



Osaamista  
ja oivallusta  
tulevaisuuden  
tekemiseen

Ada Rainio

# Putkistolaskentaohjelmistojen vertailu

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Kemiantekniikka

Insinöörityö

3.5.2021

Tekijä Otsikko	Ada Rainio Putkistolaskentaohjelmistojen vertailu
Sivumäärä Aika	37 sivua + 3 liitettä 3.5.2021
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	kemiantekniikka
Ammatillinen pääaine	
Ohjaajat	lehtori Timo Seuranen suunnitteluinsinööri Janne Komulainen osastopäällikkö Jimi Pulkka
<p>Insinööri työ oli tulevaa ohjelmistohankintaa varten toteutettu projekti, jonka tavoitteena oli uuden FEM-pohjaisen putkistolaskentaohjelmiston arviointi nyt käytössä olevan laskentaohjelmiston rinnalle. Laskentaohjelmistolta vaadittiin useita ominaisuuksia vaativan laskennan tarpeisiin, joihin yrityksessä käytössä ollut ohjelma kykeni. Vaatimukseen listattiin lisäksi ominaisuuksia, joilla haluttiin sujuvoittaa laskentaprosessia, vaikuttaen näin kustannuksiin sekä työn mielekkyyteen.</p> <p>Projekti toteutettiin vertailemalla erilaisia markkinoilla olevia putkistolaskentaohjelmistoja keskenään. Vartenotettavien ohjelmistojen ominaisuuksista kerättiin tietoja, ja lupaavimmista ohjelmistoista hankittiin lisenssit käytännön testeihin. Laskennan pohjana käytettiin aikaisemmassa projektissa laskettua putkistogeometriaa, johon tehtiin muutoksia monipuolisemman analysoinnin mahdollistamiseksi. Työn aikana havaittiin, ettei E3D:llä mallinnettua xml-muotoista geometriaa saanut nostettua yhteenkään laskentaohjelmaan suoraan. Myös muissa ominaisuuksissa oli runsaasti hajontaa eri ohjelmien välillä. Työn aikana otettiin yhteyttä usean ohjelmiston tarjoamaan tekniseen tukeen, arvioitiin mallinnuskokemusta sekä lisenssien hintoja.</p> <p>Lopputuloksena saatiin arvioitua neljä eri putkistolaskentaohjelmistoa ominaisuuksineen, ja löydettiin vartenotettava vaihtoehto Finnsapin rinnalle otettavaksi. Mallin ohjelmaan nosto-, tiedon syöttö- ja muokkaukokemukset kirjattiin ylös ja pisteytettiin. Käytännön kokemusten lisäksi ohjelmien kustannustiedot tukevat ohjelmistohankinnoissa päätöksentekoa. Projektin tuloksiin pystytään palaamaan ohjelmistohankinnan tullessa ajankohtaiseksi.</p>	
Avainsanat	FEM, joustavuusanalyysi, laskentaohjelmistot, vertailu

Author Title	Ada Rainio Comparison of Piping Calculation Software
Number of Pages Date	37 pages + 3 appendices 3 May 2021
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Chemical Engineering
Professional Major	
Instructors	Timo Seuranen, Senior Lecturer Janne Komulainen, Design Engineer Jimi Pulkka, Department Manager
<p>The thesis project was implemented for a future software acquisition. Its aim was to evaluate the new FEM-based pipeline calculation software as a replacement for the currently used calculation software. The calculation software was required to meet the computational needs of several features that the program used in the company was capable of. In addition, features were added to the requirements to streamline the calculation process, thus positively impacting costs, and the meaningfulness of the work.</p> <p>The thesis project was carried out by comparing different calculation software on the market. Feature data was collected from the software to be considered, and licenses were obtained for practical testing of the most promising ones. The calculation was based on the pipeline geometry calculated in the previous project, which was modified to allow for more versatile analysis. During the project, it was found that the geometry in xml-format modelled with E3D could not be raised directly to any calculation program. There was considerable variation in other features between different software. During the project, technical support provided by several software was contacted, and modeling experience and license prices were estimated.</p> <p>As a result, four different calculation programs with their characteristics were evaluated, and a realistic alternative was found to replace the existing Finnsap in due time. Model input, data entry and editing experiences, as well as price, will support decision making in software acquisitions. The results of the project can be returned to when the software acquisition becomes relevant.</p>	
Keywords	FEM, flexibility analysis, calculation software, comparison

## Sisällys

Lyhenteet

Symbolit

1	Johdanto	1
2	Putkistolaskennan hyödyt	2
2.1	Laskennan perusteita	2
2.2	Standardi SFS-EN 13480-3	3
2.3	Laskentaohjelmistojen periaatteet	5
3	Putkistolaskentaohjelmistot	8
3.1	Putkistolaskentaohjelmistolle asetetut kriteerit	9
3.2	Ominaisuuksien vertailu	9
3.3	Vertailussa mallinnettava putkilinja	10
3.3.1	Finnsap	10
3.3.2	Caepipe	13
3.3.3	RFEM	17
3.3.4	AutoPIPE	18
3.3.5	Rohr2	20
3.3.6	Caesar II	26
4	Vertailu pisteyttämällä	31
4.1	Tulosten vertailu	32
4.2	Suositus	34
5	Yhteenveto	34
	Lähteet	36
	Liitteet	
	Liite 1. Vaaditut ominaisuudet	
	Liite 2. Esimerkki sallitun jännityksen tarkastuksesta käsin laskemalla	
	Liite 3. Pisteyttävä taulukko	

## Lyhenteet

CAE	Computer-aided Engineering.
DOF	Degree Of Freedom. Vapausaste.
FEA	Finite Element Analysis. Elementtianalyysi, elementtimenetelmällä suoritettava analyysi.
FEM	Finite Element Method. Elementtimenetelmä.
GUI	Graphical User Interface. Graafinen käyttöliittymä.
PED	Pressure Equipment Directive. Painelaitedirektiivi.
SIF	Stress intensity factor. Jännitysintensiiteettikerroin.

## Symbolit

$E_c$	Metallin kimmokerroin kuormitustapauksen alimmassa lämpötilassa. MPa.
$E_h$	Metallin kimmokerroin kuormitustapauksen korkeimmassa lämpötilassa. MPa.
$f_a$	Sallittu jännityksen vaihteluväli. MPa.
$f_c$	Sallitun jännityksen arvo metallin alimmassa lämpötilassa kuormitustapauksessa. MPa.
$f_f$	Suunnittelujännitys. MPa.
$f_h$	Sallitun jännityksen arvo metallin korkeimmassa lämpötilassa kuormitustapauksessa. MPa.
$R_m$	Murtolujuus. MPa.
$R_p$	Ylemmän myötörajan arvo asennuslämpötilassa. MPa.
$R_{p1,0t}$	Ylemmän myötörajan arvo lämpötilassa t. MPa.
U	Jännityksen vaihteluvälin pienennyskerroin.

## 1 Johdanto

Joka vuosi rakennetaan ympäri maailmaa tuhansia teollisuuskohteita, joissa tarkasti suunnitellut rakenteet takaavat turvallisen ympäristön nyt ja tulevaisuudessa. Haluttuun lopputulokseen päästään vain eri alojen yhteistyöllä. Teollisuuslaitoksissa yhdistyvät usean eri suunnittelualan osaaminen, kuten teräsrakenteet, betonirakenteet, putkistot, säiliöt, painelaitteet ja hoitotasot. Eri osa-alueita on useita. Laskennalla varmistetaan suunniteltujen rakenteiden turvallisuus ja taloudellisuus.

Putkiston lujuuslaskentaa tehdään pääasiassa rakenteille, joiden tulee kantaa ennalta määritellyt kuormitukset. Lujuuslaskijat ottavat Suomessa kantavien rakenteiden laskennassa huomioon omapainon ja hyötykuorman lisäksi lumi- ja tuulikuormat. Mutta entä kun laskentaa tehdään seismisesti aktiivisille alueille? Jos maanjäristykset tai reilusti poikkeavat lämpötilat tulee huomioida laskennassa, on työssä käytettyjen putkistolaskentaohjelmistojen vastattava ominaisuuksiltaan näitä vaatimuksia.

Insinööriyön tarkoituksena on löytää putkistolaskentaohjelmisto Pinja Industry Oy:llä tällä hetkellä käytössä olevan Finnsap-ohjelmiston rinnalla käytettäväksi. Tavoitteena on seuloa eri putkistolaskentaohjelmistoista soveltuvin sekä Pinjan asettamiin ominaisuusvaatimukseen että kustannuksiin nähden. Vertailu tehdään valituista ohjelmistoista selvittämällä käytön tehokkuus, hinnoittelu sekä lisenssien joustavuus. Ohjelmistoja vertailaan keskenään valmiiksi asetettujen ominaisuusvaatimusten perusteella. Tällä vertailulla karsitaan yrityksen käyttöön huonommin soveltuvat ohjelmistot pois. Käyttövertailu toteutetaan valmiiksi valitulla esimerkkitapauksella, jossa sekä Finnsapilla että vertailuun valituilla putkistolaskentaohjelmistoilla mallinnetaan sama putkilinja. Saatuja tuloksia vertaillaan keskenään. Ohjelmistojen vertailun ja testauksen perusteella tehdään yksinkertainen pisteytystaulukko, ja opinnäytetyön tuloksena saadaan tieto ohjelmistojen soveltuvuudesta Pinja Industry Oy:n käyttöön sekä hankinnan kustannuksista.

## 2 Putkistolaskennan hyödyt

Metallisten putkistojen ja -rakenteiden suunnittelulla varmistetaan, että putkisto on turvallinen käyttää ja ylläpitää kaikissa ennakoitavissa olevissa kuormituslanteissa koko sen käyttöajan. Oikealla suunnittelulla vältetään taloudellisten kustannusten lisäksi haitat ihmisille ja ympäristölle sekä estetään putkiston, siihen liittyvien laitteiden ja kanakkeiden ylikuormitus ja väsyminen. Suunnittelulla ja laskennalla pyritään estämään myös mahdolliset vuodot sekä liian suuret putkistoa kuormittavat liikkeet. [1, s. 8.]

### 2.1 Laskennan perusteita

Tavallisesti putkistosuunnittelijan mallintamasta putkistosta tehdään lujuuslaskijan tekemä jännitysanalyysi. Yksinkertaisimmillaan tämä tapahtuu kahden ohjelman välillä tiedostosiirtona, jolloin putkistosuunnittelussa tehdyn 3D-mallin kaikki tiedot saadaan siirrettyä laskentaohjelmaan, ja putkiston analysoiminen voidaan suorittaa nopeasti ja tehokkaasti. Joustavuusanalyysin tarve on lähtöisin tavallisesti painelaitedirektiivin ja kemikaalilainsäädännön vaatimuksista, suunnittelustandardien, säädösten tai tarkastuslaitosten asettamista vaatimuksista, tai asiakkaiden omista vaatimuksista [3, s. 2–3].

Putkiston tulee kestää suunnitellut kuormat, kuten lämpölaajenemisesta tai -supistumisesta aiheutuvat liikkeet ja siirtymät. Tämän lisäksi putkiston tulee kestää myös muista kuormista aiheutuvat rasitukset, joita voivat olla esimerkiksi satamaputkistot, joihin vaikuttaa vuorovesi, tuuli tai maaperän painuminen. Näissä tilanteissa käytetään joustavuusanalyysiä tai vastaavia keinoja, joilla varmistetaan standardinmukaisuus. [2, s. 120.] Joustavuusanalyysi tulee tehdä myös silloin, kun putkisto kuuluu painelaitedirektiivin piiriin, riskianalyysin yhteydessä tai vaaraa arvioitaessa [1, s. 9–10]. Joustavuusanalyysillä putkisto saadaan optimoitua turvallisiksi, luotettavaksi sekä taloudelliseksi [4].

Standardissa EN 13480-3:2017 ”Metalliset teollisuusputkistot. Osa 3: Suunnittelu ja laskenta” on määritelty putkiston suunnittelun ja laskennan keskeiset periaatteet. Tämä eurooppalainen standardi on vahvistettu myös suomalaiseksi kansalliseksi standardiksi. [2, s. 1.]



## 2.2 Standardi SFS-EN 13480-3

Putkistoon kohdistuu erilaisia kuormituksia, joiden tulee olla tiedossa laskentaa varten. Näitä ovat esimerkiksi sisäinen ja ulkoinen paine, putkiston ja tämän sisällön aiheuttama paino, ympäristön aiheuttamat kuormat, kuten tuuli- ja lumikuormat, värähtelyt, puhdistuskuormat sekä seismiset kuormat. Värähtelyä putkistoon voivat aiheuttaa kompresso- reiden aiheuttama resonanssi tai paineenvaihtelut. Puhdistuskuormalla tarkoitetaan puhdistuksen aikaisten kuormitusten muutosta esimerkiksi happopesun ja huuhtelun aikaan. Muutoksia voi tulla esimerkiksi sisäiseen paineeseen, putkiston painoon ja lämpölaaje- nemiseen puhdistustilanteessa, ja laskennassa tuleekin huomioida kaikki staattiset, dy- naamiset ja kinemaattiset reunaehdot puhdistuksen kuormitusten laskennassa. Putkis- ton ja kannakkeiden suunnittelussa tulee näiden lisäksi tiedostaa myös putkiston paino kokonaisuudessaan, sisältäen putken, putkenosien, venttiileiden sekä eristyksen yhteis- painon. Koeponnistustilanteessa painoon vaikuttaa lisäksi käytettävä väliaine. [2, s. 7– 11.] Standardi sisältää laskentakaavat jokaiselle putkimuodolle, eri seinämävahvuuksiin ja paineisiin sekä taivutusten vaatimiin lisäpaksuuksiin [2, s. 22–24]. Käytetyt materiaalit otetaan huomioon [2, s. 19].

Ulkoisen paineen alaisia putkiston rakenneosia laskettaessa tulee ottaa huomioon, että ulkoisen paineen on oltava käyttöolosuhteissa ja koeolosuhteissa esiintyvistä paineista suurempi [2, s. 80]. Jos putkistoon kohdistuu toistuvia paineen, lämpötilan tai ulkoisen kuormituksen vaihteluita, staattista mitoitusta tulee täydentää yksityiskohtaisella väsy- misanalyysillä. Kuormitusten vaihtelut saattavat aiheuttaa materiaalin väsymisestä joh- tuvia vaurioita, vaikka kuormitukset olisivatkin pienempiä kuin suunnittelussa käytetyt staattiset kuormitukset. Väsymissäröilykäyttäytymiseen vaikuttavat myös hitsit sekä pin- nan sileys. [2, s. 95.]

### Joustavuusanalyysi

Putkiston on oltava tarpeeksi joustava, jotta putkisto tai sen kannattimet eivät vaurioidu suurten jännitysten tai väsymisen takia. Joustavuus ehkäisee vuotoja ja muodonmuutok- sia putkistossa tai siihen kuuluvissa varusteissa ja laitteissa. Putkiston jännitykset eivät saa ylittää suunnittelussa käytettyjä raja-arvoja. Myöskään kuormituksista aiheutuvat re- aktivoimat eivät saa vahingoittaa kannattimia tai putkistoon liittyviä laitteita.

Joustavuuden varmistamiseksi tulee putkiston rakenne huomioida putkien suunnanmuutoksilla, joustavilla liitoksilla tai muiden vastaavanlaisten rakenteiden avulla. [2, s. 120–123.] Jännityksiä putkistoon voivat aiheuttaa putkistomateriaalin tai lämpötilan muutokset putkistossa, ympäryshitsit, joiden myötöraja on huomattavasti pienempi kuin perusaineen myötöraja, tai rakenteesta johtuva lämpölaajenemisen kompensoituminen lyhyeen haaraan. Näihin pitää kiinnittää huomiota varsinkin käytettäessä alhaisen murtovenymän omaavia materiaaleja. Putkiston riittävä joustavuus tulee varmistaa analyyttisillä menetelmillä, jotta voidaan välttää suuremmat paikalliset plastiset vauriot. [2, s. 123.]

Joustavuusanalyysiä varten tarvitaan tarkkoja tietoja kohteesta. Näitä ovat lämpölaajenemisen kerroin, kimmokerroin kuormitustilanteen lämpötilan mukaan, Poissonin vakio, jossa kaikille teräksille voidaan joustavuusanalyysissä käyttää arvoa 0,3 sekä jousto- ja jännityskertoimet. [2, s. 124.] Joustavuusanalyysissä jännitykset määritellään nimellisiin seinämäpaksuutta käyttäen. Jos huomattavaa korroosion tai eroosion esiintymistä on odotettavissa, se tulee ottaa analyysissä huomioon. [2, s. 129.]

Laitteiden lämpöliikkeet aiheuttavat useimmiten pakkoliikkeitä putkistoon, mutta putkiston esijännitys on myös eräänlainen pakkoliike. Pakkoliikkeitä voivat aiheuttaa myös esimerkiksi maaperän liikkumisesta aiheutuva kannakkeiden painuminen. [3, s. 10.] Laitteiden pakkoliikkeet määritellään suunnittelulämpötilan mukaan, jos laskenta on tarpeen suunnitteluarvoilla (P1; T1) suorittaa. Jos käyttölämpötila eroaa enemmän kuin 10 % suunnittelulämpötilasta, niin käyttölämpötila ja -paine tarkastellaan erillisenä kuormitustapauksena (P2; T2). Jos putkistossa esiintyy käyttötilanne, jolloin lämpötila T3 on alle asennuslämpötilan, tämä lämpötila ja vastaava paine lasketaan omana kuormitustapauksena. [3, s. 13.]

Kannatinelementtien tulee kantaa putkiston ja putkiston varassa olevien laitteiden paino, ohjata putkiston liikkeitä ja siirtää putken aiheuttamat staattiset tai dynaamiset kuormat ympäröiviin rakenteisiin. [2, s. 135–136.] Putkiston värähtelyä voi aiheuttaa putken sisälön liike tai ulkoiset toistuvat kuormitukset. Näitä pyritään estämään suunnittelulla sekä sopivilla kannattimilla. Putkiston reititystä voi muuttaa tai käyttää lisätukia värähtelyä aiheuttavien kohtien lähellä. [2, s. 135.] Kannattimet tulee sijoittaa joustavuusanalyysin mukaisesti tai arvioitujen tuettavien kuormien perusteella, ottaen huomioon sopivien kiinnityskohtien saatavuus ympäröivissä rakenteissa. Putkistoa tukevat kannattimet on

jaettu kolmeen ryhmään: jäykät kannattimet, joustavat kannattimet ja sekundäärikannattimet. [2, s. 140–142.]

### 2.3 Laskentaohjelmistojen periaatteet

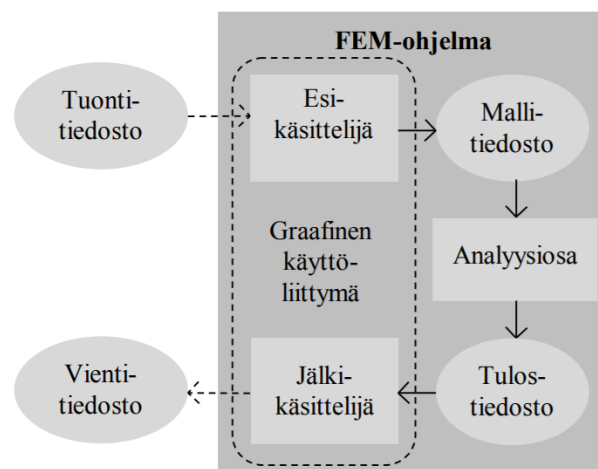
Laskentaohjelmiston käyttäjä on vastuussa laskentaohjelmiston tuottaman datan oikeellisuuden varmistamisesta, tulosten analysoinnista ja ymmärtämisestä. Lähes kaikki lähtötiedot, joita tarvitaan putkiston suunnittelussa, tarvitaan myös joustavuusanalyysiä varten. Suunnittelun alkuvaiheessa alustavaan analyysiin tarvittavat vähimmäistiedot ovat reittitiedot laskettavista linjoista, putkistossa käytetyt materiaalit, linjan suunnittelu- ja käyttöpaine sekä suunnittelu- ja käyttölämpötila, virtaavan aineen tiheys, sekä riittävät tiedot putkistoon liittyvistä laitteista tai liittyvien laitteiden yhteissä esiintyvistä lämpöliikkeistä. Tämän lisäksi on hyvä olla tiedossa putkilinjaluettelo, rakenne- tai kokoonpanopii-rustukset liittyvistä laitteista, kannakepiirustukset, tiedot ympäristöolosuhteista kuten asennuslämpötila sekä prosessitiedot, ajotapakuvaus tai muu selvitys eri käyttötilanteista. Laskentamalli pyritään rajaamaan niin, että jokainen laskettavasta linjasta haarautuva putkilinja mallinnetaan vähintään ensimmäiseen kiintopisteeseen asti. [3, s. 6–7.]

#### Elementtianalyysi FEA

Viime vuosikymmeninä teknisten ongelmien ratkaisemiseksi kehitettiin useita numeerisia menetelmiä, ja matemaattisesta mallinnuksesta tuli olennainen osa ongelmien ratkaisua. Eri laskentamenetelmissä on omat etunsa ja haittapuolensa ratkaistavan ongelman mukaan. [9.] Putkistolaskentaohjelmisto koostuu FEM-laskentaohjelmistosta sekä sen tuottaman, hyvin suuren numeerisen tulostiedon jälkikäsittelyohjelmasta. Tämä jälkikäsittelyohjelma muuntaa tulokset havainnolliseen graafiseen asuun. [5, s. 1.] Jälkikäsittelyssä laskentaohjelmisto huomioi standardin vaatimukset. Finite Element Method, FEM, on numeerinen laskentamenetelmä, jolla optimoidaan materiaalikäyttöä ja rakenteen muotoa, sekä tarkastellaan rakenteen kestävyyttä [6]. Elementtimenetelmällä haetaan likiarvo ilmiölle, jota kuvataan yhtälöillä ja reunaehdoilla [7, s. 6]. Finite Element Analysis, eli FEA, on elementtianalyysi, joka suoritetaan elementtimenetelmällä FEM.

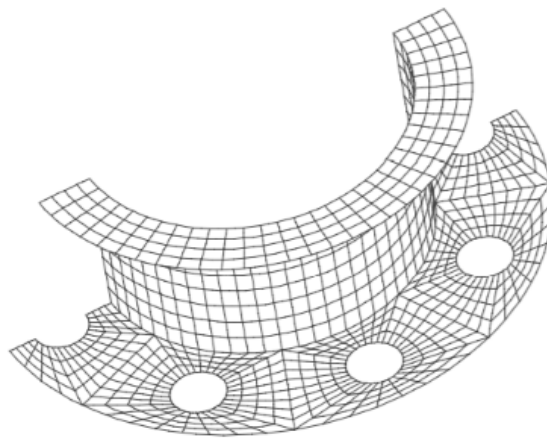
Koska FEM on likiarvomenetelmä, joka matemaattisesti kuvataan osittaisdifferentiaaliyh-  
tälöillä, ratkaisuun sisältyy aina menetelmään kuuluva virhe. Käytössä olevista numeeri-  
sista tekniikoista FEM on yksi monipuolisimmista menetelmistä, jonka tehokkuus perus-  
tuu sen joustavuuteen, sillä malli voi olla muodoltaan, materiaaliltaan, tukiehdoiltaan ja  
kuormiltaan monimutkainen. [7, s. 6.] Sitä käytetään laajasti kiinteässä mekaniikassa,  
lämmönsiirrossa, ilmailu- ja avaruusteollisuudessa, biomekaniikassa, rakennemekani-  
kassa ja nestemekaniikassa. FEM:iä on käytetty myös sähkö- ja sähkömagneettisessa  
laskennassa, virtauslaskennassa [9] sekä esimerkiksi lentokoneen siipien, siltojen ja vä-  
risevien rakenteiden analysoinnissa [8]. Laskentamallin luonnin ja varsinaisen laskennan  
lisäksi FEM-analyysi sisältää myös tulosten tarkastelun ja arvioinnin.

Yleisesti FEM-ohjelma sisältää esikäsittelijän, analyysiosan ja jälkikäsittelijän. FEM-las-  
kentaohjelman eri osat näkyvät kuvassa 1. Esikäsittelijällä luodaan rakennemalli, ja ana-  
lyysin jälkeen laskentatulokset käsitellään jälkikäsittelijällä. Useissa ohjelmissa esi- ja  
jälkikäsittelijällä on yhteinen graafinen käyttöliittymä GUI (Graphical User Interface). [7,  
s. 9–10.]



Kuva 1. Yleiset FEM-ohjelman osat [6].

FEM ratkaisee erilaisia monimutkaisiakin analysoitavia rakenteita jakamalla ne pienemmiksi alueiksi, elementeiksi, jotka koostuvat toisiinsa liittyvistä pisteistä [9]. Kun ongelma-alue on diskretisoitu, numeeriset arvot lasketaan elementin solmupisteissä [7, s. 52]. Saadut arvot yhdistämällä saadaan ratkaisu likiarvona koko analysoitavalle osalle. Analyysiä saadaan näin yksinkertaistettua, vaikka joudutaankin käsittelemään suurta määrää tietoa. [9.] Elementtityyppejä ovat piste-, viiva-, pinta- ja tilavuuselementit. Elementtityypin puolestaan määrittelevät solmupisteiden lukumäärä, sijainti ja vapausasteet. [7, s. 52.] Elementit solmuineen muodostavat yhdessä verkon, jonka tiheämpi rakenne antaa tarkemman tuloksen, mutta toisaalta vaatii pidemmän laskenta-ajan ja suuremmat resurssit [9]. Esimerkki kuoren verkkorakenteesta näkyy kuvassa 2.



Kuva 2. Kuorirakenteen elementtiverkko [2, s. 7].

Vapausaste (DOF, Degree Of Freedom) tarkoittaa siirtymää, joka voi tapahtua siirtymänä koordinaattiakselin suunnassa tai kiertymänä koordinaattiakselin ympäri [7, s. 52–53]. Vapausasteet riippuvat yleensä käsiteltävän alueen elementtien lukumäärästä, koosta ja tyypistä [9]. Laskenta voidaan suorittaa yksi-, kaksi- tai kolmiulotteisena, kun rakennemalli on luotu esikäsittelijällä [7, s. 93].

Tulostiedosto, eli lähtötietojen ja analyysin yhteenveto, on useimmissa ohjelmissa saatavana tekstitiedostona. Tuloksia voidaan laskennan jälkeen tarkastella jälkikäsittelijällä. [7, s. 93–95.] Palkkirakenteilla tärkeimmät laskennasta saatavat tulokset ovat solmujen siirtymät ja elementtien rasituskuvat [5]. Palkkielementit ovat tärkeässä osassa putkistolaskentaohjelmistoissa putkistolaskennan perustuessa niihin. FEM-mallinnuksessa

vaaditaan kokemusta, hyvää teknistä arviointia ja ymmärtämistä [9]. Tulosten oikeellisuus tulee aina varmistaa toista menetelmää käyttäen. On suositeltavaa käyttää sekä yksinkertaistettua mallia, että käsinlaskentamenetelmää. [7, s. 101.] Jännitysanalyysin tulosten on oltava standardin määrittämässä sallituissa rajoissa kaikissa kuormitustapauksissa [1, s. 51]. Tuloksista selviää myös kannakoinnin toimiminen suunnitellulla tavalla, ja se ettei laitteisiin kohdistu liian suuria voimia. Standardit päivittyvät ja muuttuvat, joten tulee varmistaa, että ohjelmistojen päivitys vastaa uusinta standardia. [3, s. 20.]

### 3 Putkistolaskentaohjelmistot

Etsityn laskentaohjelmiston pitää olla tarpeeksi monipuolinen kattaakseen ominaisuudet, joita ohjelmalta vaaditaan. Finnsap on korkealaatuinen laskentaohjelmisto. Asiakaspalvelu toimii, käytössä vastaan tulevat kehitysehdotukset käsitellään nopeasti ja näiden perusteella myös tehdään päivityksiä ohjelmaan. Ohjelmalla pystyy laskemaan ohutkuorirakenteita ja se sisältää Eurokoodi 3 -ratkaisijan. Finnsapin ominaisuudet tekevät siitä kattavan laskentaohjelmiston. Tämän takia myös sen pohjalta koottu ominaisuusvaatimuslista oli laaja. Uudelta ohjelmistolta vaaditut ja suositellut ominaisuudet koottiin Excel-taulukkoon ohjelmistojen vertailua varten. Tämä taulukko löytyy liitteestä 1.

Alustavaan vertailuun valittuja laskentaohjelmistoja olivat Caepipe, Caesar 2, ROHR 2, Bentley'n Auto PIPE, sekä dPIPE ja RFEM:in RF-Piping. Osa näistä ohjelmistoista oli päätetty jo opinnäytetyön alkaessa ottaa mukaan tarkasteluun. FEM-pohjaisia laskentaohjelmistoja löytyi useita vertailuun mukaan otettavaksi, mutta osa näistä karsiutui kriteeristön perusteella pois. Useassa ohjelmassa oli esimerkiksi ASME:n standardit, mutta ei EN 13480 -standardia, jonka pohjalta laskenta suoritetaan. Ohjelmistojen omassa mainosmaterialissa oli laveasti kuvailtu ominaisuuksia joihin ohjelmistot pystyvät, joten alustava vertailu vaatimuslistan ja ohjelmistomateriaalin avulla vaati aikaa. Tiedonkeruun perusteella ei kuitenkaan saatu selvitettyä tarpeeksi kattavasti eri ohjelmistojen ominaisuuksia. Tämän takia päädyttiin hankkimaan ohjelmistojen testilisenssit käytännön testejä varten.

### 3.1 Putkistolaskentaohjelmistolle asetetut kriteerit

Uudella putkistolaskentaohjelmistolla tuli voida suorittaa jännitysanalyysi standardien EN 13480-3, ASME B31.1 ja ASME B31.3 mukaan. Sillä tuli myös pystyä suorittamaan ominaistaajuus- sekä vastespektrianalyysit. Ominaisuuksia, joita ohjelman tuli sisältää, olivat esimerkiksi geometrian tuonti ulkoisesta lähteestä, ohjelman sisäinen mallintaja, vinotuentojen syöttömahdollisuus ja mahdollisuus jakaa malli ryhmiin. Vaadittavia kuormitustapauksia olivat usean eri ajotilanteen analysointi, mahdollisuus syöttää tilapäisiä kuormitustapauksia ja näiden tilapäisten kuormitustapausten suorittaminen standardin vaatimusten mukaan. Ohjelmalla piti olla mahdollista tuottaa tulosteita graafisessa muodossa esimerkiksi siirtymäkuvien, tukivoimien ja tukien siirtymän sekä standardin mukaisen jännityskuvien tarkastelua ja raportointia varten. Toivottavaa myös oli, että raportin saisi tulostettua automaattisesti, tai siten että kuvien tulostus olisi mahdollista automatisoida. Tuki- ja elementtivoimien tulostus tekstimuodossa, sekä tulosten rajaaminen ryhmäkohtaisesti piti myös olla mahdollista.

### 3.2 Ominaisuuksien vertailu

Alustava vertailu tehtiin kokoamalla Exceliin eri laskentaohjelmistot, sekä niiltä vaaditut ominaisuudet. Putkistojännitysanalyysi suoritetaan aina standardien mukaan. Jos ohjelmalla ei ollut mahdollisuutta käyttää sekä ASME B31.1-, ASME B31.3- että EN 13480-3-standardia, jäi ohjelma pois vertailusta. Exceliin laaditusta listasta oletettiin selviävän nopeasti, mitkä ohjelmat olivat ominaisuuksiltaan tarpeeksi kattavia vastaamaan vaatimuksia. Vertailua varten tiedot ohjelmien ominaisuuksista kerättiin pääasiassa niiden omilta internetsivuilta löytyvistä materiaaleista. Kaikkien ohjelmistojen ominaisuuksista ei kuitenkaan ollut saatavilla kattavaa kuvausta, joten selvitystyö vaati ohjelmistojen testilisenssin hankkimisen. Ohjelmistot, joista saatiin lisenssit kuukaudeksi käyttöön, olivat Rohr2 ja Caepipe. AutoPIPE:stä ja Caesar2:sta käytettiin tarjolla olleet lyhyemmät testilisenssi. dPIPE:stä ei saatu testilisenssiä käyttöön, joten se karsiutui vertailusta pois. RFEMiltä tarjottiin lisenssi kolmeksi kuukaudeksi käyttöön.

### 3.3 Vertailussa mallinnettava putkilinja

Putkilinjan geometria oli xml-muodossa. Alkuperäisen 3D-mallin putkistosuunnitteluun oli käytetty E3D:tä. Vaikka geometria ja putkiston sisältämät tiedot pitäisi siirtyä mallin mukana, tulee koko putkilinja tarkistaa ja korjata mallin siirrossa syntyneet poikkeamat. Mallina käytettiin aikaisemmassa projektissa jo laskettua putkistoa, johon tehtiin muutoksia monipuolisemman analysoinnin mahdollistamiseksi. Käytännön tavoitteena oli perehtyä vertailtaviin ohjelmistoihin, niiden tarjoamiin mahdollisuuksiin, sekä mahdollisiin puutteisiin. Myös ohjelmien käytettävyyteen kiinnitettiin huomiota. Jokaisen ohjelman tarkasteluun oli varattu noin 4 päivää aikaa. Käytetty aika kuitenkin vaihteli ohjelman helppokäyttöisyyden sekä sen ominaisuuksien perusteella. Ajankäyttöön vaikutti myös se, saatiinko putkistogeometria nostettua ohjelmaan vai mallinnettiinko linja käsin, käsiteltiinkö koko putkilinjaa vai pelkästään sen osaa.

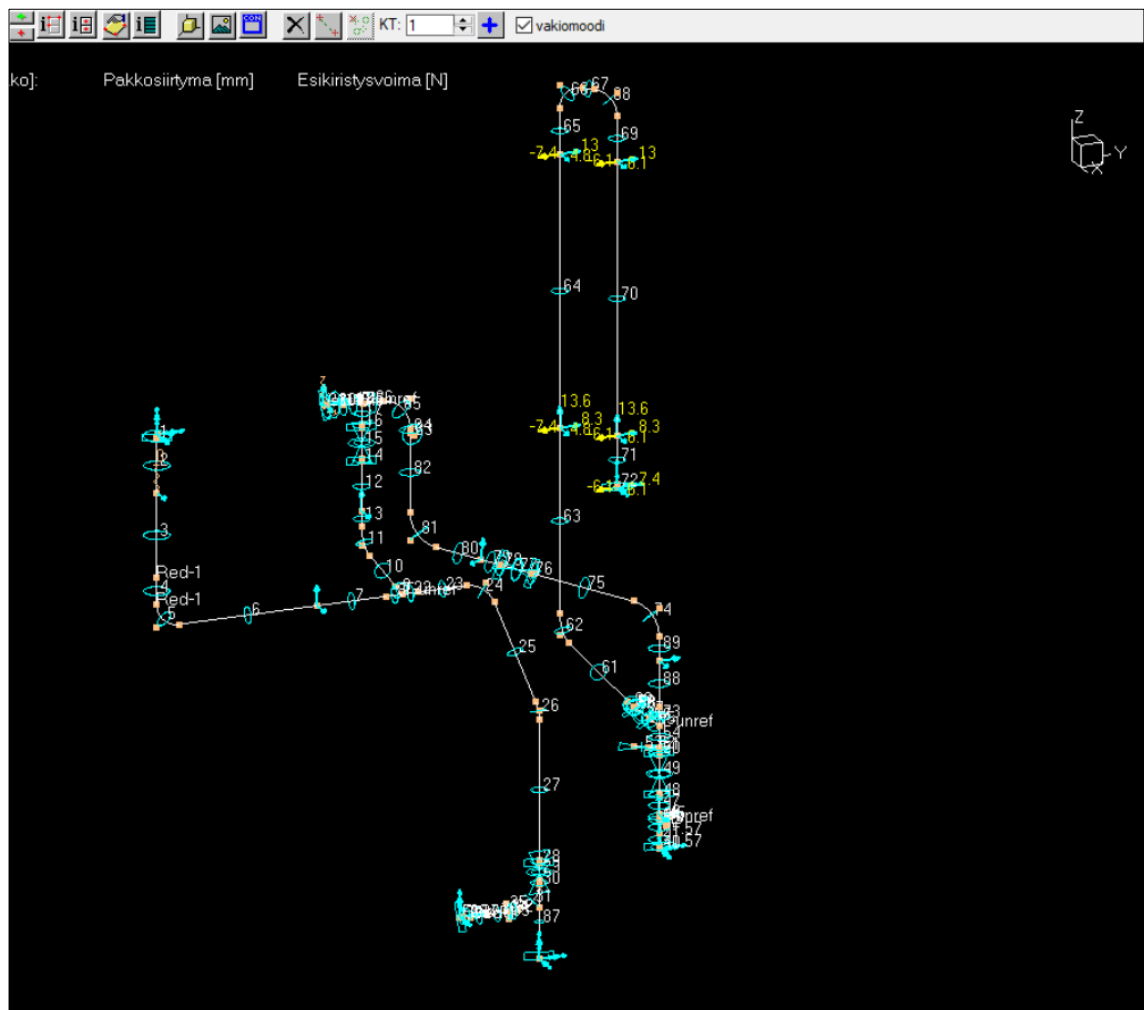
#### 3.3.1 Finnsap

Finnsap on suomalainen FEM-lujuuslaskentaohjelmisto, jota käytetään yleisesti koneenrakennuksessa, teräsrakentamisessa ja laitossuunnittelussa. Analysointi voidaan suorittaa useisiin erityyppisiin rakenteisiin ja erilaisia analyysimahdollisuuksia on runsaasti. Näitä ovat esimerkiksi ominaisvärähtelyt, maanjäristysanalyysi, lämmönjohtumisanalyysi sekä materiaalisesti ja geometrisesti epälineaarinen analyysi. Ohjelmisto sisältää jälkikäsitteilyjä. Finngen-mallintajalla luodaan rakenteen geometria ja elementtimallit, sekä annetaan reuna-, kuormitus-, materiaali- sekä muut ominaisuusehdot. Malleja on mahdollista siirtää muista rakenne- ja suunnitteluohjelmistoista, kuten Cadmaticistä ja PDMS:stä suoraan laskentaohjelmistoon. Putkistosta voidaan tehdä joustavuus- ja jännitysanalyysit, joiden suorittaminen voidaan valita tehtäväksi EN 13480, ASME:n, SFS:n tai RN:n normien mukaan. [10.] Myös E3D:stä, joka on PDMS:n uudempi versio, saa mallit siirrettyä vaivattomasti Finnsappiin. Tulosteet ja kuvat dokumentointiin saa tuotettua helposti.

Mallin nosto ohjelmaan sujui helposti, jolloin geometria saatiin heti käyttöön. Malli käytiin kokonaisuudessaan läpi, ja muokattiin manuaalisesti vastaamaan isometrejä. Malli näkyy kuvassa 3. Kannakkeiden sijoituksessa oikeaan kulmaan piti kiinnittää huomiota, sillä jos putki ei ollut pääakseleiden suuntainen, kannakkeet eivät automaattisesti asetu

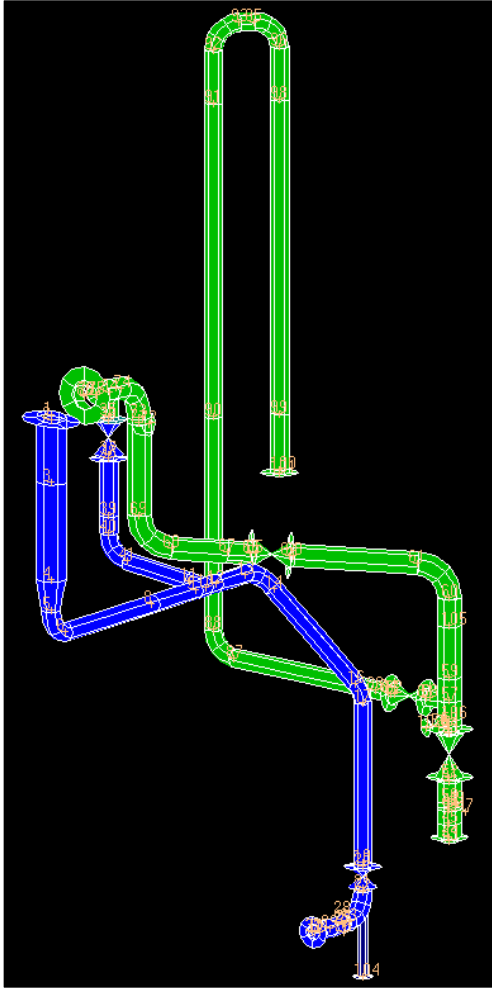


putkilinjan suuntaisiksi. Finnsapissa ei myöskään voi kumota tehtyä käskyä, mikä saattaa vaikuttaa ajankäyttöön isompaa työtä tehdessä.



Kuva 3. Esimerkkilinja Finnsapissa.

Materiaalina putkistossa oli austeniittinen ruostumaton teräs 1.4307 (X2CrNi 18–9). Putkiston lämpötila, paine sekä sisällön tiheys vaihtelivat. Lämpötilassa 110 °C oli paine 0,56 MPa ja sisällön tiheys 1,22 kg/dm<sup>3</sup>, sekä vastaavasti lämpötilassa 100 °C 0,4 MPa ja 1,3 kg/dm<sup>3</sup>. Kuvassa 4 näkyy lämpötilan jakautuminen putkistossa. Vihreällä esitetty putkisto oli lämpötilassa 110 °C, ja sinisellä näkyvä 100 °C. Putken seinämävahvuus erosi näillä alueilla toisistaan.



Kuva 4. Lämpötilan jakautuminen putkistossa.

Tuloksista tarkasteltiin siirtymiä, jotka aiheutuvat kylmässä kuormitustilanteessa jatkuvasta kuormituksesta eli paineesta sekä putken omasta sekä siihen liittyvien laitteiden painosta. Kuumassa kuormitustilanteessa huomioidaan lämpölaajenemisesta aiheutuva jännityksen vaihteluväli jatkuvan kuormituksen lisäksi. Kannakoinnin aiheuttamat voimat tutkittiin eri kuormitustilanteissa, kuten myös putkistoon syntyvät jännitykset. Jännityksiä tarkastellaan standardin 13480-3 mukaisesti jännityssuhteiden kautta, eivätkä putkiston jännitykset saaneet ylittää standardin mukaisia sallittuja jännityksiä. Siirtymiä, kannakointia ja jännityksiä tarkasteltiin myös seismisten siirtymien ja painetestin osalta.

Sallitut jännitykset jakoutuivat taulukon 1 mukaan putkistossa. Kuuman kuormitustilanteen sallitun jännityksen arvo 335 MPa tarkastettiin myös käsin laskemalla, tästä

esimerkki löytyy liitteestä 2. Painetestin osalta saatu sallitun jännityksen arvo oli pieni, kun oikea arvo olisi tullut standardin mukaan laskemalla 45 % murtolujuudesta  $R_m$  määritellyssä koelämpötilassa. Oikea arvo olisi näin ollut 207 MPa. Tulos vastaisi tätä jännitystä, jos laskenta olisi suoritettu Finnsapin omalla materiaalikirjastolla. Nyt käytössä oli Pinjan luoma oma kirjasto, josta puuttui  $R_m$ :n arvo. Tämä aiheutti virheen painekokeen jännityksessä. Kaikkien muiden ohjelmien tuloksia verrattiin Finnsapin antamiin tuloksiin, joiden perusteella arvioitiin ohjelman suorittaman laskennan tulosten paikkansapitävyyttä.

Taulukko 1. Sallitut jännitykset tarkastettiin jokaisesta ohjelmasta.

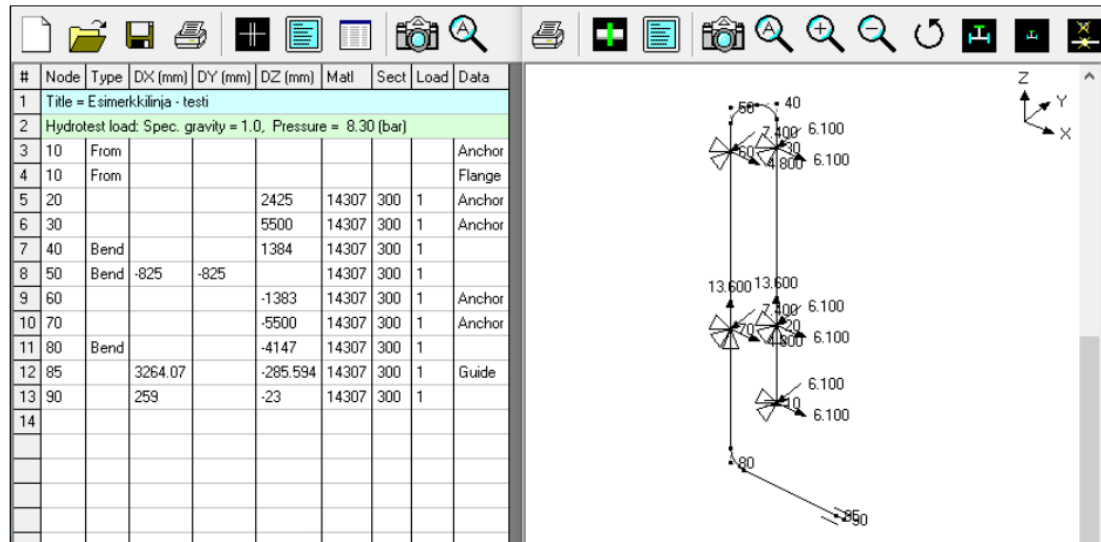
Putken lämpötila	Sallitut jännitykset, MPa			
	Jatkuva kuormitus-tilanne ff	Kuuma kuormitus-tilanne ff+fa	Seisminen kuormitus-tilanne	Painetestti
100 °C	121	335	161	204
110 °C	118	331	157	204

### 3.3.2 Caepipe

Caepipe on amerikkalaisen SST Systemsin putkiston jännitysanalyysiohjelmisto (1983), joka on yksinkertainen ja nopea käyttää. Tällä Windows-pohjaisella sovelluksella voi laskea staattiset ja dynaamiset jännitysanalyysit useilta teollisuudenaloilta. Ohjelmassa on mahdollista pitää useampaa ikkunaa kerralla auki, jolloin tulokset, grafiikat ja syötetyt tiedot näkyvät samanaikaisesti näytöllä. [12.]

Testilisenssi paljasti, ettei Caepipen tarjoamaan ilmaisohjelmaan saanut syötettyä kuin 20 riviä tietoa. Testimallia jouduttiin karsimaan alle kolmasosaan alkuperäisestä, jotta malli saatiin mahdutettua Caepipen tarjoamaan tilaan. Ilmaisessa testiversiossa ei myöskään ollut datan sisäännostomahdollisuutta, jotta geometria olisi saatu valmiina ohjelmaan. Kuvasta 5 näkyy lyhyt malli, joka mallinnettiin siis käsin. Ominaisuuksia joutui hakemaan, mutta varsinaisesti epäselvyyttä tuli vastaan vasta painetestin luomisen kohdalla sekä seismisten siirtymien syötössä. Näihinkin vastaukset tosin löytyivät

kohtuullisen lyhyen hakemisen jälkeen, mutta samalla todettiin, ettei kuormitustapausten yhdistelmät ole riittävät haussa olevalle putkistolaskentaohjelmistolle. Kuormitusten tuloksiin ei saanut erikseen seismistä kiihtyvyyttä ja seismistä siirtyvyyttä. Myöskään useampaa yhdistelmää seismisiä kuormitustapauksia ei Caepipeen saanut syötettyä, mikä on välttämättömyys laskentaohjelmistolle.



Kuva 5. Mallinnusnäkyä Caepipessä

Analyysin tulokset vastasivat pääosin Finnsapin vastaavia tuloksia, ja erot olivat esimerkiksi siirtymissä millimetrin kymmenesosan suuruisia. Sallittu jännitys puolestaan erosi eri ohjelmien välillä. Caepipessä näki laskennassa käytetyn standardin tarkan kohdan, jolla tulos laskettiin. Tämä näkyy kuvasta 6. Caepipen laskema suunnittelujännitys  $f_f$  oli sama kuin Finnsapin vastaava, mutta sallittu jännityksen vaihteluväli  $f_a$  vaihteli putken eri kohdissa, sekä tämän takia myös jännitysten summan  $f_f + f_a$  arvot.

#	Node	Press. Allow. (bar)	Sustained (12.3.2-1)		Expansion (12.3.4-1)			Expansion (12.3.4-2)		Occasional (12.3.3-1)				
			S1 (MPa)	$f_f$ (MPa)	S1 $f_f$	S3 (MPa)	$f_a$ (MPa)	S3 $f_a$	S4 (MPa)	$f_f + f_a$ (MPa)	S4 $f_f + f_a$	S2 (MPa)	1.2 $f_f$ (MPa)	S2 1.2 $f_f$
1	10	5.60	17.57	118.2	0.15	0.000	200.7	0.00	17.57	318.8	0.06	17.57	141.8	0.12
	20	16.7	18.97	118.2	0.16	3.875	207.9	0.02	22.85	326.0	0.07	39.76	141.8	0.28
2	20	5.60	13.83	118.2	0.12	3.878	207.9	0.02	17.71	326.0	0.05	35.13	141.8	0.25
	30	16.7	16.37	118.2	0.14	11.49	207.9	0.06	28.47	326.0	0.09	35.24	141.8	0.25

Kuva 6. Laskennassa käytetyn standardin eri kohdat olivat hyvin esillä tuloksissa.

Standardin EN13480-3 mukaan jännityksen vaihteluväli  $f_a$  lasketaan kaavalla

$$f_a = U (1,25f_c + 0,25f_h) \frac{E_h}{E_c}, \text{ jossa} \quad (1)$$

$f_a$  = sallitun jännityksen vaihteluväli

$E_c$  = metallin kimmokerroin kuormitustapauksen alimmassa lämpötilassa

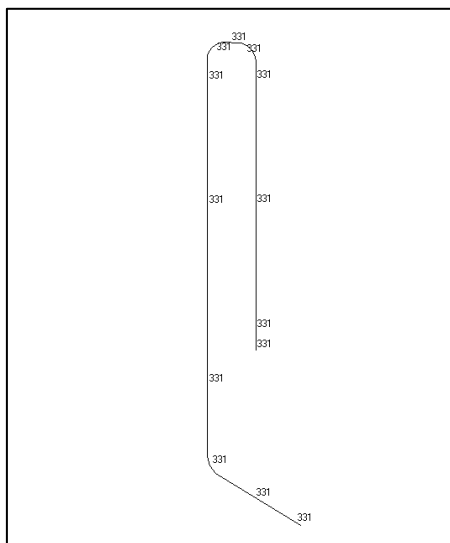
$E_h$  = metallin kimmokerroin kuormitustapauksen korkeimmassa lämpötilassa

$f_c$  = sallitun jännityksen arvo metallin alimmassa lämpötilassa kuormitustapauksessa

$f_h$  = sallitun jännityksen arvo metallin korkeimmassa lämpötilassa kuormitustapauksessa

$U$  = jännityksen vaihteluvälin pienennyskerroin, joka on tässä kuormitustapauksessa 1, lämpötilan laskennallisten täysien vaihteluvälien määrän ollessa 7000.

Näiden perusteella jäi epäselväksi, mikä sai aikaan vaihtelua arvoihin putken eri kohdissa materiaalin ja sen ominaisuuksien pysyessä samana. Sallitut jännitykset vaihtelivat 319–326 N/mm<sup>2</sup>. Finnsapissa sallittu jännitys oli laskettu tällä aivan samalla standardin kaavalla. Sallitut kuumen kuormitustilanteen jännitykset samalle lyhyelle mallille olivat siinä 331 N/mm<sup>2</sup>. Nämä näkyvät kuvassa 7.



Kuva 7. Finnsapissa sallitut jännitykset pysyvät kauttaaltaan samoina lyhyessä mallissa.

Erot siirtymien, tukireaktioiden sekä jännitysten tuloksissa voivat johtua siitä, että Finnsapissa käytetty geometria oli tuotu suoraan E3D:stä, mutta Caepipessä mallinnettu käsin. Tämän takia tuloksiin tulee eroja väkisinkin. Sallittujen jännitysten eroja tämä ei kuitenkaan selitä. Taulukossa 2 näkyvät ohjelmien antamat jännitykset samalle putkilinjalle. Ohjelmien käyttämät aineistot erosivat toisistaan. Caepipen materiaalikirjastoon korjattiin käytetyn materiaalin tietoja vastaamaan Finnsapin arvoja. Finnsapin materiaalikirjaston arvot on syötetty ohjelmaan vastaamaan tarkasti standardia. Aikataulullisten syiden takia ei sallittujen jännitysten vaihtelun tutkimiseen käytetty enempää aikaa.

Taulukko 2. Sallittujen jännitysten tulokset.

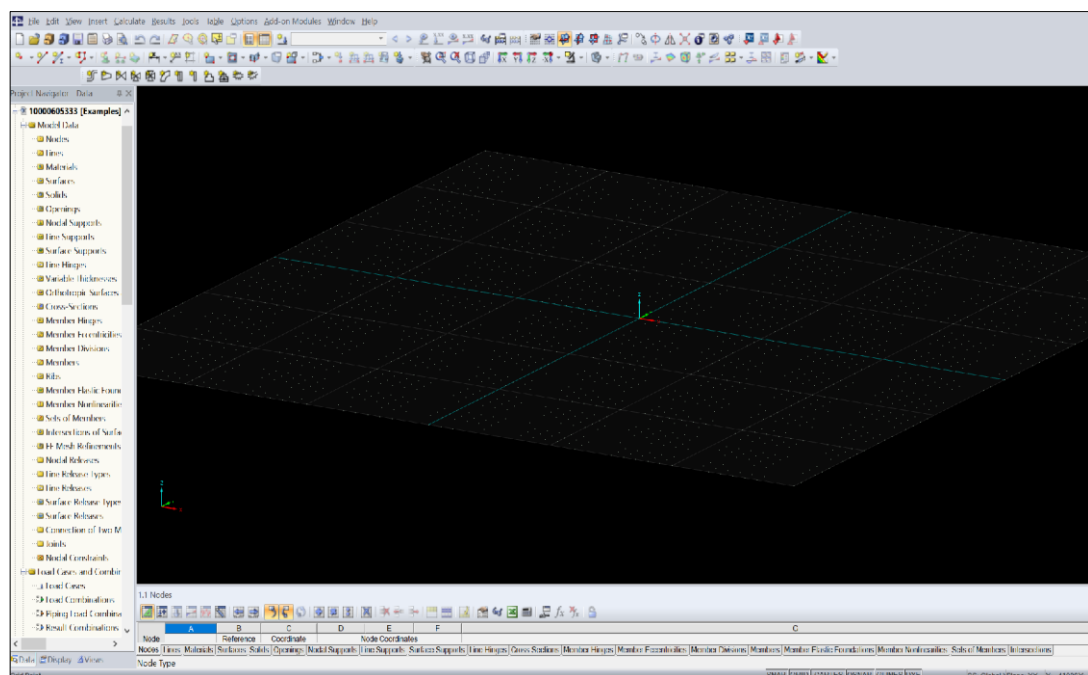
Lyhyt malli		Finnsap	Caepipe
Sallitut jännitykset MPa	Jatkuva kuormitus- tilanne ff	118	118
	Kuuma kuormitus- tilanne ff+fa	331	319–326
	Seisminen kuormi- tustilanne	157	142
	Painetesti	204	-

Varmistaessa Caepipen teknisestä tuesta xml-muotoisten mallien siirtomahdollisuutta ohjelmaan selvisi, ettei xml-muodossa ole mahdollista siirtää geometriaa myöskään varsinaiseen laskentaohjelmistoon. Yhteydenottoa varten tuli rekisteröityä tätä tarkoitusta varten luodulle sivulle, ja ohjeita noudattamalla luoda kysymys tekniseen tukeen. Tämä ei tehnyt asioinnista sujuvan tuntuista, mutta vastaukset kysymyksiin sai aina alle vuorokaudessa. xml-muotoisten tiedostojen käsittelyyn ehdotettiin Caepipe 3D+ -nimistä ohjelmaa, joka on Caepipe-pohjainen laskentaohjelmisto käytettäväksi muiden 3D-ohjelmien rinnalla tai lisäosana. Koska Caepipe oli havaittu liian suppeaksi laskentaohjelmaksi, ei Caepipe 3D+:aa lähdetty enää erikseen testaamaan. Koska ohjelma ei selvästi ollut riittävän kattava, Caepipe putosi pois vertailusta.

### 3.3.3 RFEM

RFEM on Dulbal softwarin modulaarinen FEM-laskentaohjelmisto, joka julkaistiin 1987 Saksassa Harsewinkelissä. RFEMiä voidaan käyttää teräs-, betoni-, puu-, lasi-, kalvo- ja vetolujuuksien rakenteelliseen analysointiin ja suunnitteluun, kuten myös laitos- ja kone- tekniseen suunnitteluun, tai dynaamisiin analyysiin. Ohjelmisto painottaa käyttäjäystävällisyyttä mallin siirrossa sen sisältämien eri ohjelmamoduulien välillä. Eri moduuleilla voi koota räätälöidyn ohjelmapaketin yksilöllisiin tarpeisiin. Putkistolaskentaan RFEMillä on RF-Piping. [14.]

Ohjelman aukaiseminen ensimmäisen kerran loi suuret odotukset. Ulkoasu oli vaikuttava ja erilaisia käskypainikkeita runsaasti. Nämä näkyvät kuvassa 8. Pian kuitenkin todettiin, ettei sillä kyettykään avaamaan xml-tiedostoa. Yhteydenotto Dulbalin tukeen varmisti, ettei RFEMiin ole mahdollista tuoda mallia E3D:stä xml-muodossa. Tämä kuitenkin on yksi käytetyistä tiedostomuodoista, jolla geometria laskentaohjelmiin siirretään, joten Dulbalin RFEM karsiutui pois vertailusta.



Kuva 8. RFEMin RF-Piping.

### 3.3.4 AutoPIPE

Bentleyn AutoPIPE on putkiston jännitysanalyysiin erikoistunut, Yhdysvalloista 1984 lähtöisin oleva kattava ohjelmistotyökalu. Se sisältää intuitiivisen mallintamisympäristön sekä kattavat analysointimahdollisuudet. AutoPIPE tarjoaa lisäksi erilaisia lisäohjelmia, kuten AutoPIPE Vessel paineastioille, lämmönvaihtimille, säiliöille ja ilmanjäähdyttimille, tai AutoPIPE Nuclear ydinvoimalaitoksen putkistojen suunnitteluun ja analysointiin. [13.]

Grafiikka oli ohjelmassa selkeää ja erilaiset käskypainikkeet oli sijoitettu helpotajuisesti ruudulle. Geometrian sisääntuonti xml-muodossa ei ohjelmaan onnistunut, joten AutoPIPElla mallinnettiin sama lyhyt linja kuin Caepipella. Mallinnus oli helppoa, ja syötetyn tiedon löytäminen ja muokkaaminen oli sujuvaa Review Component Data -ikkunan avulla, joka näkyy kuvassa 9. Sen avulla pystyi tutkimaan syötettyä dataa ja muokkaamaan tietoa usean eri välilehden kautta.

From	To	Material	Pipe ID	Nominal mm	Case 1 Press (MPa)	Case 1 Temp (deg C)	Case 1 Auto	Case 1 Expan (mm/m)	Case 1 Auto	Case 1 Hot Mod. (E6 N/mm2)	Case 1 Auto	Case 1 Rpt. (2 or Both) (N/mm2)	Case 1 Auto	Case 1 Rpt. (A-B) (N/mm2)	Case 1 Auto	Case 1 Tensile (Basis) (N/mm2)	Case 1 Auto	Case 1 Creep (Sec) (N/mm2)	Case 1 Auto	Case 1 Hot Allow. (N/mm2)	Case 2 Press (MPa)	Case 2 Temp (deg C)	Case 2 Auto	Case 2 Expan (mm/m)	Case 2 Auto	Case 2 Hot Mod. (E6 N/mm2)	Case 2 Auto	Case 2 Rpt. (2 or Both) (N/mm2)	Case 2 Auto
A80	A81	1.4307 X2CR	300	300.0	0.56	110.00	✓	1.568	✓	0.1923	✓	142.00	✓	176.00	✓	0.00	✓	0.00	117.33	-10	0.00	✓	-0.151	✓	0.2000	✓	180.00	✓	
A81	A82	1.4307 X2CR	300	300.0	0.56	110.00	✓	1.568	✓	0.1923	✓	142.00	✓	176.00	✓	0.00	✓	0.00	117.33	-10	0.00	✓	-0.151	✓	0.2000	✓	180.00	✓	
A82	A83 N	1.4307 X2CR	300	300.0	0.56	110.00	✓	1.568	✓	0.1923	✓	142.00	✓	176.00	✓	0.00	✓	0.00	117.33	-10	0.00	✓	-0.151	✓	0.2000	✓	180.00	✓	
A83 N	A83 F	1.4307 X2CR	ELBOW	300.0	0.56	110.00	✓	1.568	✓	0.1923	✓	142.00	✓	176.00	✓	0.00	✓	0.00	117.33	-10	0.00	✓	-0.151	✓	0.2000	✓	180.00	✓	
A83 F	A84 N	1.4307 X2CR	300	300.0	0.56	110.00	✓	1.568	✓	0.1923	✓	142.00	✓	176.00	✓	0.00	✓	0.00	117.33	-10	0.00	✓	-0.151	✓	0.2000	✓	180.00	✓	
A84 N	A84 F	1.4307 X2CR	ELBOW	300.0	0.56	110.00	✓	1.568	✓	0.1923	✓	142.00	✓	176.00	✓	0.00	✓	0.00	117.33	-10	0.00	✓	-0.151	✓	0.2000	✓	180.00	✓	
A84 F	A85	1.4307 X2CR	300	300.0	0.56	110.00	✓	1.568	✓	0.1923	✓	142.00	✓	176.00	✓	0.00	✓	0.00	117.33	-10	0.00	✓	-0.151	✓	0.2000	✓	180.00	✓	
A85	A86	1.4307 X2CR	300	300.0	0.56	110.00	✓	1.568	✓	0.1923	✓	142.00	✓	176.00	✓	0.00	✓	0.00	117.33	-10	0.00	✓	-0.151	✓	0.2000	✓	180.00	✓	
A86	A87 N	1.4307 X2CR	300	300.0	0.56	110.00	✓	1.568	✓	0.1923	✓	142.00	✓	176.00	✓	0.00	✓	0.00	117.33	-10	0.00	✓	-0.151	✓	0.2000	✓	180.00	✓	
A87 N	A87 F	1.4307 X2CR	ELBOW	300.0	0.56	110.00	✓	1.568	✓	0.1923	✓	142.00	✓	176.00	✓	0.00	✓	0.00	117.33	-10	0.00	✓	-0.151	✓	0.2000	✓	180.00	✓	
A87 F	A88	1.4307 X2CR	300	300.0	0.56	110.00	✓	1.568	✓	0.1923	✓	142.00	✓	176.00	✓	0.00	✓	0.00	117.33	-10	0.00	✓	-0.151	✓	0.2000	✓	180.00	✓	
A88	A89	1.4307 X2CR	300	300.0	0.56	110.00	✓	1.568	✓	0.1923	✓	142.00	✓	176.00	✓	0.00	✓	0.00	117.33	-10	0.00	✓	-0.151	✓	0.2000	✓	180.00	✓	
A89	A90	1.4307 X2CR	300	300.0	0.56	110.00	✓	1.568	✓	0.1923	✓	142.00	✓	176.00	✓	0.00	✓	0.00	117.33	-10	0.00	✓	-0.151	✓	0.2000	✓	180.00	✓	

Kuva 9. Syötetty tieto oli jatkuvasti esillä omassa ikkunassaan.

Ohjelmassa oli tietoa runsaasti esillä, mutta tarkempaa tietoa hakiessa käyttö muuttui raskaammaksi, eikä tieto enää löytynytään helposti. Tiedon hakeminen ohjelman uumenista oli tuskastuttavan aikaa vievää. Tarkastellessa laskennan tuloksia huomattiin, että käyrissä jännitysintensiiteettikerroin SIF eroaa Finnsapin arvoista. Finnsap antaa käyrissä SIF:n arvoksi 6,09 ja AutoPIPE 4,55. Kaavoja tarkastellessa kävi ilmi, että molemmat ohjelmat käyttävät täysin samoja standardin mukaisia laskukaavoja. Tämä ei siis selvittänyt asiaa. Kuvassa 10 näkyy lyhyt esimerkkilinja mallinnettuna.



The screenshot displays the Bentley AutoPIPE Demo interface. The main window shows a 3D piping model with points labeled A00 through A06. Below the model is a 'Review Component Data' table with the following data:

	From	To	Material	Pipe ID	Nominal mm	Case 1 Pres. MPa	Case 1 Temp. deg C	Case 1 Auto	Case 1 Expan. mm/m	Case 1 Auto	Case 1 Hot Mod. E6 N/mm2	Case 1 Auto	Case 1 Rp0.2t or ReHt N/mm2	Case 1 Auto	Case 1 Rp1.0t (A>=30) N/mm2	Case 1 Auto	Case 1 Tens. N
▶	A00	A01	1.4307 X2CR	300	300.0	0.56	110.00	<input checked="" type="checkbox"/>	1.588	<input checked="" type="checkbox"/>	0.1923	<input checked="" type="checkbox"/>	142.00	<input checked="" type="checkbox"/>	176.00	<input checked="" type="checkbox"/>	
	A01	A02	1.4307 X2CR	300	300.0	0.56	110.00	<input checked="" type="checkbox"/>	1.588	<input checked="" type="checkbox"/>	0.1923	<input checked="" type="checkbox"/>	142.00	<input checked="" type="checkbox"/>	176.00	<input checked="" type="checkbox"/>	
	A02	A03 N	1.4307 X2CR	300	300.0	0.56	110.00	<input checked="" type="checkbox"/>	1.588	<input checked="" type="checkbox"/>	0.1923	<input checked="" type="checkbox"/>	142.00	<input checked="" type="checkbox"/>	176.00	<input checked="" type="checkbox"/>	
	A03 N	A03 F	1.4307 X2CR	ELBOW	300.0	0.56	110.00	<input checked="" type="checkbox"/>	1.588	<input checked="" type="checkbox"/>	0.1923	<input checked="" type="checkbox"/>	142.00	<input checked="" type="checkbox"/>	176.00	<input checked="" type="checkbox"/>	
	A03 F	A04 N	1.4307 X2CR	300	300.0	0.56	110.00	<input checked="" type="checkbox"/>	1.588	<input checked="" type="checkbox"/>	0.1923	<input checked="" type="checkbox"/>	142.00	<input checked="" type="checkbox"/>	176.00	<input checked="" type="checkbox"/>	
	A04 N	A04 F	1.4307 X2CR	ELBOW	300.0	0.56	110.00	<input checked="" type="checkbox"/>	1.588	<input checked="" type="checkbox"/>	0.1923	<input checked="" type="checkbox"/>	142.00	<input checked="" type="checkbox"/>	176.00	<input checked="" type="checkbox"/>	
	A04 F	A05	1.4307 X2CR	300	300.0	0.56	110.00	<input checked="" type="checkbox"/>	1.588	<input checked="" type="checkbox"/>	0.1923	<input checked="" type="checkbox"/>	142.00	<input checked="" type="checkbox"/>	176.00	<input checked="" type="checkbox"/>	
	A05	A06	1.4307 X2CR	300	300.0	0.56	110.00	<input checked="" type="checkbox"/>	1.588	<input checked="" type="checkbox"/>	0.1923	<input checked="" type="checkbox"/>	142.00	<input checked="" type="checkbox"/>	176.00	<input checked="" type="checkbox"/>	

Kuva 10. Esimerkkilinjan AutoPIPElla mallinnettuna.

Materiaalikirjastosta käytetyn austeniittisen teräksen etsiminen oli haastavaa, ja lopulta koko käytössä olevan materiaalikirjasto tulostettiin materiaalin ominaisuuksien tarkastelua varten. Kirjastosta löytyi haettu materiaali 1.4307, ja arvot erosivat Finnsapin vastavista. Ohjelman materiaalikirjastoa on ilmeisesti mahdollista myös itse muokata, mutta sitä kokeilemalla ei tapahtunut yhtään mitään. Mahdollisesti testilisenssin takia ei kaikki ominaisuudet ole käytettävissä.

Laskenta ei antanut painetestistä tai seismisestä kuormitustapauksesta aiheutuvien jännitysten arvoja, eikä syytä löytynyt omatoimisesti etsimällä. Taulukossa 3 näkyy AutoPIPE:n antamat tulokset.

Taulukko 3. Bentley'n lyhyen mallin sallitut jännitykset.

Lyhyt malli		Finnsap	AutoPIPE
Sallitut jännitykset MPa	Jatkuva kuormitus- tilanne ff	118	117
	Kuuma kuormitus- tilanne ff+fa	331	213
	Seisminen kuormi- tustilanne	157	-
	Painetesti	204	-

Bentley'n tarjoamaan tukeen yhteydenotto osoittautui vaikeaksi, jotta umpikujaan johtaneisiin kysymyksiin saataisiin vastauksia. xml-muotoisten tiedostojen sisäännoston epäonnistuminen, tuen puute sekä käytön haasteet saivat Bentley'n AutoPIPE:n putoamaan pois vertailusta.

### 3.3.5 Rohr2

Rohr2 on saksalaisen SIGMA Ingenieurgesellschaft mbH:n putkistojännitysanalyysi-ohjelmisto alkujaan 1960-luvun lopulta. Rohrillä voidaan suorittaa sekä staattisia, että dynaamisia analyysejä monimutkaisista putkistoista sekä tukirakenteista. Sen alustana toimii Microsoft Windows. Ohjelmistoa voidaan laajentaa lisäosilla ja -moduuleilla, kuten ROHR2flange-laippa-analyysillä, tai ROHR2nozzlella suuttimien tarkempaan analysointiin. Ohjelmistoa käytetään yleisesti energia- kemian- ja petrokemian teollisuudessa. [11.]

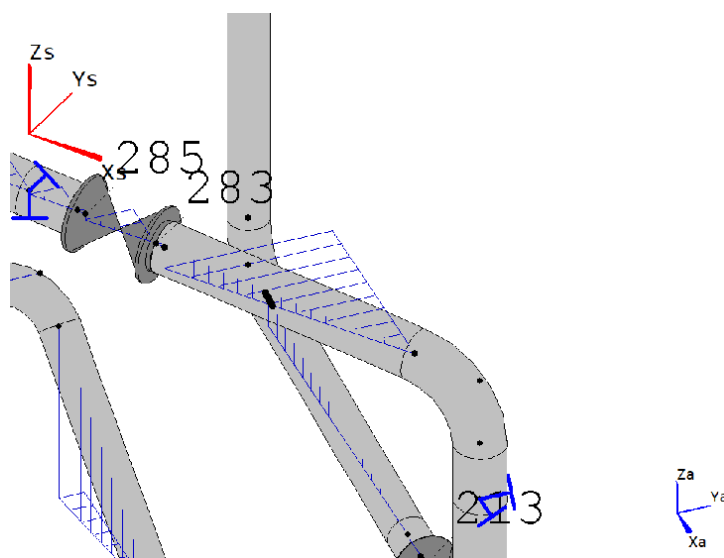
Ohjelman suunnittelussa ei ole lähdetty grafiikka edellä. Aukeava ohjelma oli harmaan sävyinen ja erilaisia käskypainikkeita löytyi runsaasti pienellä fonttikoolla. Ensimmäisellä yrittämällä ei xml-muodossa oleva tiedosto auennut, mutta toinen tiedosto, joka oli pcf-muodossa aukesi moitteetta. Rohr2 toimii eri logiikalla kuin esimerkiksi Caepipe tai AutoPIPE, joissa tiedon syöttö- ja muokkausominaisuudet on rakennettu toimimaan hyvin

samankaltaisesti. Rohr2 on insinöörien suunnittelema, ja ohjelma vaati totuttelua muiden tähän mennessä arvioitujen ohjelmien jälkeen.

Rohrin käyttöön tarjottiin tunnin perehdytys. Tunnin perehdytys venyi kahdeksi tunniksi. Hyvin kattavassa perehdytyksessä selvitettiin aluksi käyttö, johon Rohriä Pinjalla tultaisiin käyttämään. Tämän pohjalta perehdytys alkoi perusmallinnuksella ja laitteiden lisäämisellä. Ohjelmassa on kattavat laiteluettelot ja materiaalikirjastot, joita pystyy halutesaan muokkaamaan. Painetestin ja erilaisten kuormien lisääminen, sekä erilaisten analyysien suorittaminen käytiin läpi. Perehdytyksessä korostettiin tuen laatua ja nopeaa reagointia, joka on tärkeää hektisissä projekteissa. Tuki sijaitsee fyysisesti samalla aikavyöhykkeellä kuin Suomi, joten myös maantieteellisesti asiaa tarkasteltuna vastauksia ei tarvitse odottaa pitkään. Rohriltä luvattiin kaikkiin kysymyksiin reagoimisen kestävän enintään 2 tuntia.

Perehdytyksen aikana löytyi myös Pinjalle hyödyllisiä ominaisuuksia, joihin Rohr ei taipunut. Nämä ominaisuudet kirjattiin ylös kehitysehdotuksina, ja Rohrin puolesta luvattiin palata aiheeseen. Pian saatiinkin tieto, että toinen näistä ehdotuksista saadaan käyttöön Rohrissä jo seuraavaan päivitykseen. Rohrillä tekninen tuki oli piristävän kiinnostunut asiakkaista.

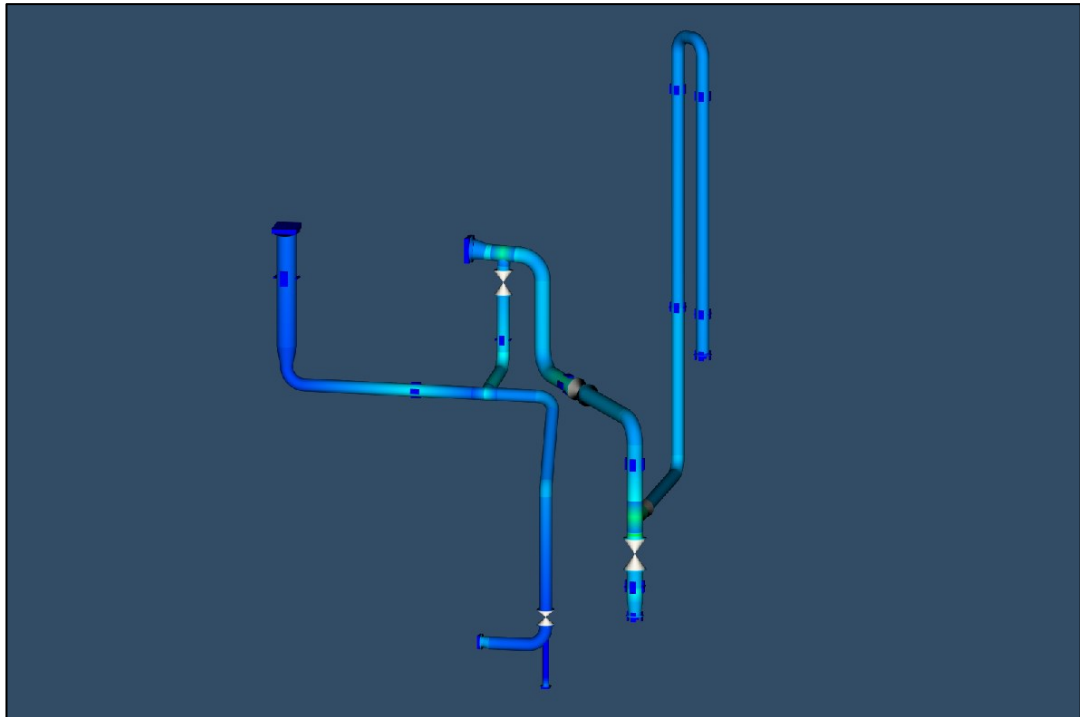
Mallin geometria saatiin nostettua Finnsapista AutoCADin kautta Rohriin, jolloin mallin ranka saatiin käyttöön. Mallin työstäminen, putkien ja venttiileiden lisääminen sujui loogisesti ja tekeminen tuntui helpolta. Myös kannakkeen lisääminen putkeen, joka ei ollut käytetyn koordinaattiakseliston suuntainen, onnistui vaivattomasti. Ohjelma haki itsenäisesti putkilinjan suunnat ja sijoitti halutun kannakkeen kulkevan putken suuntaiseksi automaattisesti. Tämän huomaa myös mallissa linjan vieressä näkyvästä koordinaattisymbolista, joka eroaa tavanomaisesta käytetystä koordinaatistosta. Tämä näkyy kuvassa 11.



Kuva 11. Kannakkeet asettuvat helposti oikeaan kulmaan putkelle.

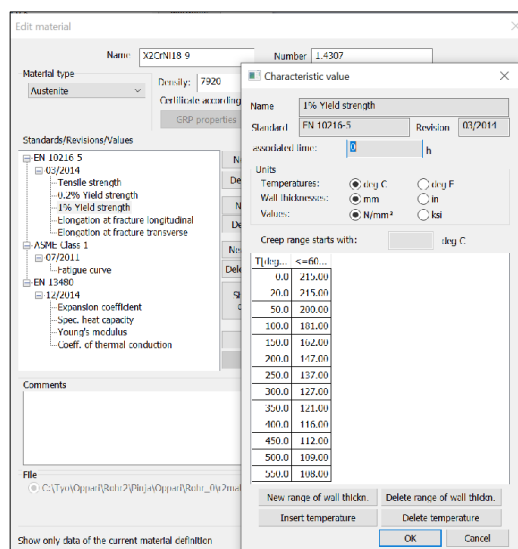
Venttiileiden liikuttaminen putkilinjalla, sekä kartioiden mallinnus käytännössä vaati totuttelua. Teknisen tuen toimivuus tuli testattua, kun oletetun valmiin mallin laskennasta tuli virheilmoituksia, eikä tuloksia päässyt tarkastelemaan. Malli laitettiin kysymysten kera tukeen, ja vastaus tuli muutamassa minuutissa. Uusi etäpalaveri sovittiin seuraavalle työpäivälle, ja lisenssiaikaa jatkettiin. Geometrian siirto Finnsapista ei ollut toiminut niin hyvin kuin oli oletettu, vaan linjoista löytyi paljon rakoja. Kaikki virheet korjattiin palaverin aikana, ja tuettiin ohjelman käyttöä. Ainoastaan seismisten siirtymien sijoittaminen malliin jäi käymättä läpi.

Kannakkeet katsottiin täsmäämään Finnsapin vastaavia, ja laskennasta saatuja tuloksia verrattiin Finnsapin tuloksiin. Arvot erosivat, joten käytetyn materiaalin arvot tarkastettiin. Rohrin sisältämät materiaalin kimmokertoimet ja pituuden lämpötilakertoimet vastasivat täysin Finnsapin arvoja, ainoastaan myötörajassa R<sub>p</sub>t oli muutamassa arvossa eroa. Nämä korjattiin materiaalikirjastoon. Tulosten tarkasteluun tottuminen vei aikansa, mutta käytön selvittyä, tieto löytyi sujuvasti ja käytännöllisesti. Rohr2 vaikutti käyttäjäystävällisimmältä ohjelmalta tähän mennessä tarkastelluista ohjelmistoista. Eri käskyt löytyivät, tai tulivat vastaan loogisesti, kun niitä tarvitsi. Valmis malli näkyy kuvassa 12.



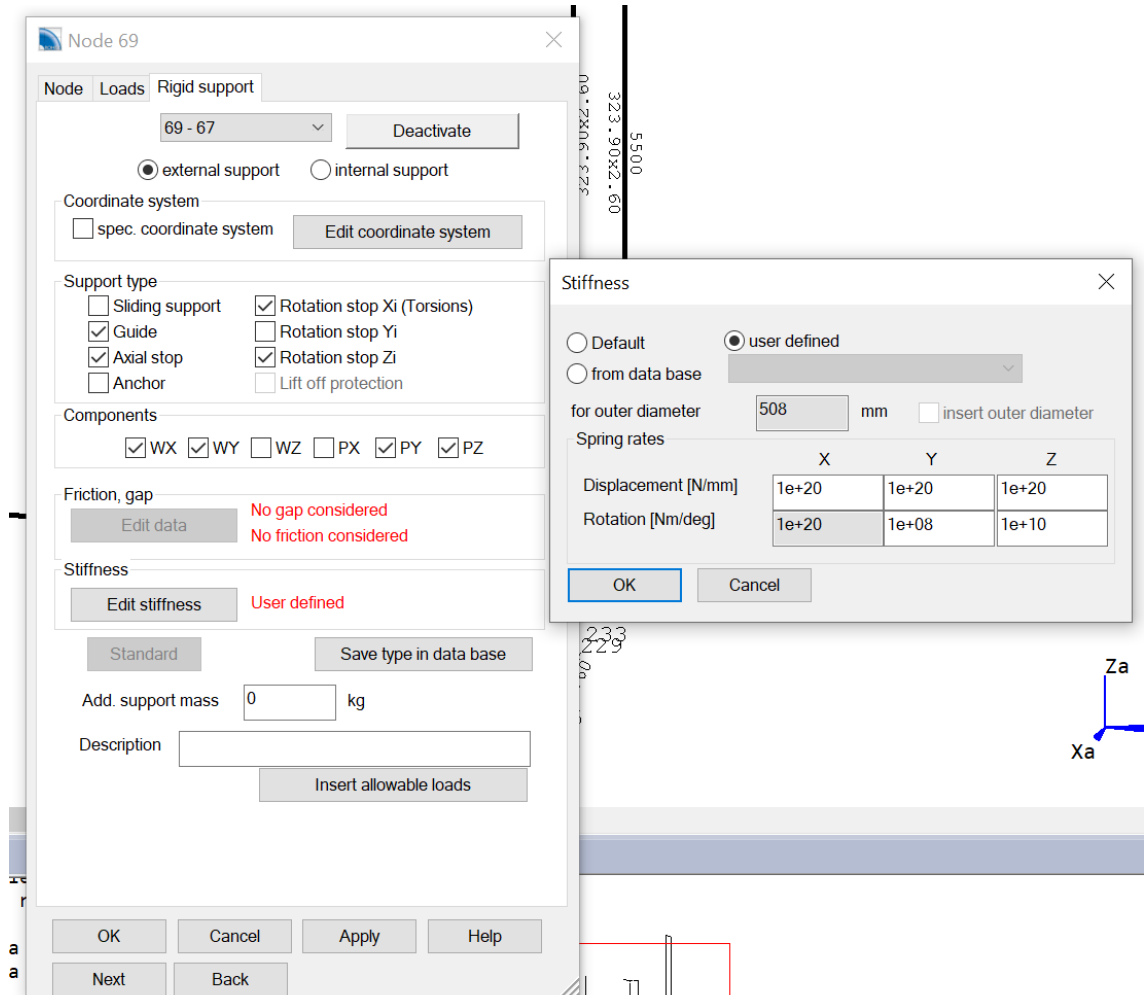
Kuva 12. Esimerkkilinja Rohr2:ssa

Sekä pysyvän kuormitustilanteen että kuumen kuormitustilanteen sallitun jännityksen arvot vastasivat Finnsapin tuloksia. Myös painetestin sallittu jännitys Rohrin laskennassa vastasi standardin arvoja. Materiaaliarvoja tarkastellessa havaittiin pieniä eroja myötölujuuden arvoissa, jotka korjattiin materiaalikirjastoon. Tämä näkyy kuvassa 13. Rohrin tulokset sallituissa jännityksissä olivat 100 °C:ssa 335 MPa ja 110 °C:ssa 330,9 MPa.



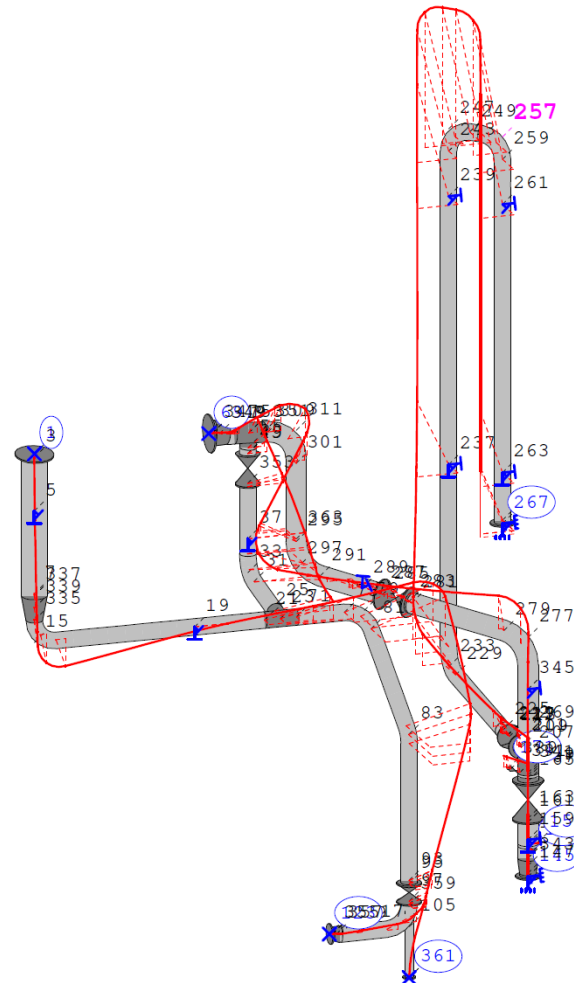
Kuva 13. Löytyneet erot muutamassa myötörajan arvossa korjattiin materiaalikirjastoon.

Ohjelmalla lasketut jännitykset ylittivät sallitut jännitykset, mutta kun kannakkeista poistettiin kitkakertoimet 0,3, tasaantuivat voimat huomattavasti. Kuvassa 14 näkyy kannakkeen muokattavissa olevia ominaisuuksia. Seismisten siirtymien aiheuttamien sallittujen jännitysten tarkasteluun ei ehditty paneutua aiheen ansaitsemalla tarkkuudella käytettävissä olleen ajan puitteissa.



Kuva 14. Kannattimista poistettiin kitkakertoimet 0,3 ja osaan määriteltiin siirtymä- ja kiertymäjousivakiot.

Rohristä saadut tulokset, kaikesta ponnistelusta huolimatta, erosivat seismisten siirtymien ja painetestin osalta toisistaan. Erot tuloksissa voivat selittyä osittain sillä, että Rohriin tuotu malli oli rikki ja korjailun myötä malli muuttui alkuperäisestä. Kuvassa 15 näkyy ohjelman graafinen esitystapa siirtymien kuvaukseen.



Kuva 15. Siirtymät suunnitteluolosuhteissa.

Ohjelmien käyttämät aineistot eivät eronneet toisistaan, mutta epäilykseksi jäi, käyttäytykö jousivakioiden käyttö eri tavalla eri ohjelmissa. Kuumen kuormitustilanteen tukiin kohdistuvat vertikaaliset voimat olivat selvästi suurempia kuin Finnsapin laskemat voimat. Tämä eroavaisuus saattoi olla jousivakioiden aiheuttamaa. Taulukosta 4 löytyvät laskennassa käytetyt sallitut jännitykset. Rohr2 on dynaamisessa laskennassa nopea ja tehokas ohjelma. Testi dynaamisen laskennan ominaisuuksista suoritettiin opinnäytteen ulkopuolella. Rohrin peruskäytön oppii nopeasti.

Taulukko 4. Rohrin tulokset sallituista jännityksistä.

Koko malli		Finnsap		Rohr2	
		110 °C	100 °C	110 °C	100 °C
Sallitut jännitykset, MPa	Jatkuva kuormitus- tilanne ff	118	121	118	121
	Kuuma kuormitus- tilanne ff+fa	331	335	331	335
	Seisminen kuormi- tustilanne	157	161	154	157
	Painetestit	204	204	207	207

### 3.3.6 Caesar II

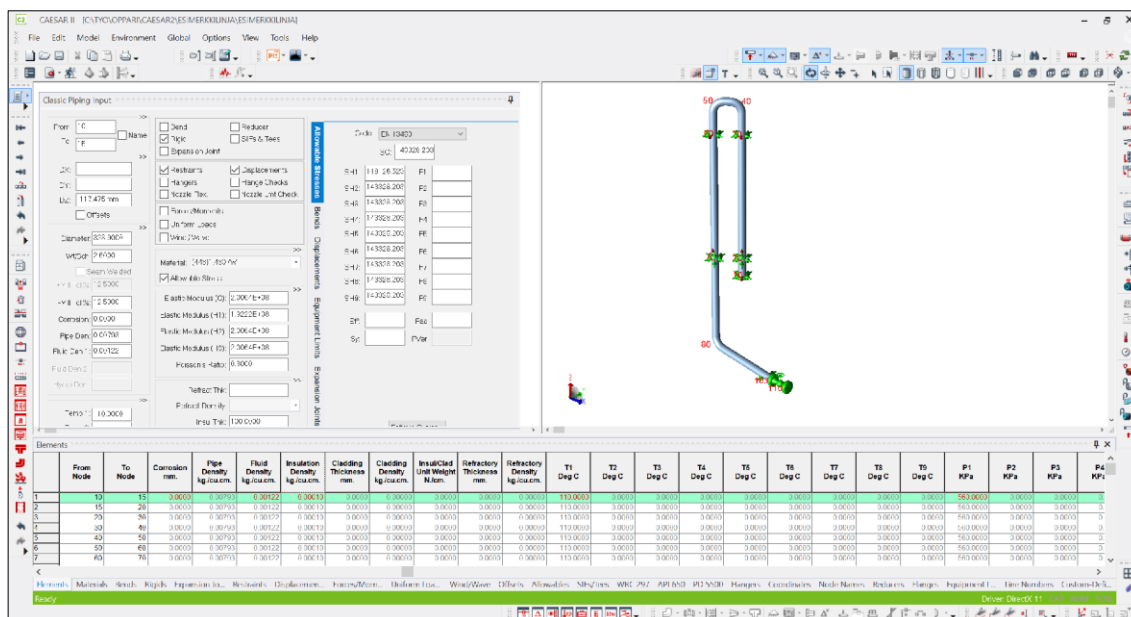
Hexagon PPM:n (1969) kehittämä Caesar on laajasti käytetty ohjelma putkien jännitysanalyseille. Se sisältää yli 35 kansallista putkistostandardia, ja integrointi muihin Hexagonin tarjoamiin CAD-suunnitteluohjelmiin sujuvoittaa mallien siirtämistä ohjelmasta toiseen vähentäen virheiden mahdollisuutta. Caesarilla on mahdollista mallintaa, analysoida ja raportoida hyvinkin suuria ja monimutkaisia putkistojärjestelmiä. Hexagon tarjoaa ratkaisuja datan tehokkuuden, tuottavuuden ja laadun parantamiseksi, niin antureiden kuin ohjelmistojen osalta. [15.]

Geometrian siirto Caesariin xml-muodossa ei onnistunut. Asiaa tiedusteltiin teknisestä tuesta, mutta vastauksen sijaan kyseltiin lisenssistä. Lopputulemana saatiin ohjelmaan uudet lisenssitunnukset, mutta itse kysymykseen xml-muotoisen tiedoston sisäännostomahdollisuudesta ei saatu vastausta. Lisenssin ollessa vain 15 päivän mittainen päädyttiin mallintamaan sama lyhyt putkilinja kuten Caepipellä, jotta ohjelma ehdittiin varmasti testaamaan.

Mallintamisen aloitus sujui hitaasti, ja tekemisen tueksi joutui ottamaan heti alkuun ohjevideota sekä ohjelmasta itsestään löytyvät ohjeet mallin luomiseen. Mallintaminen

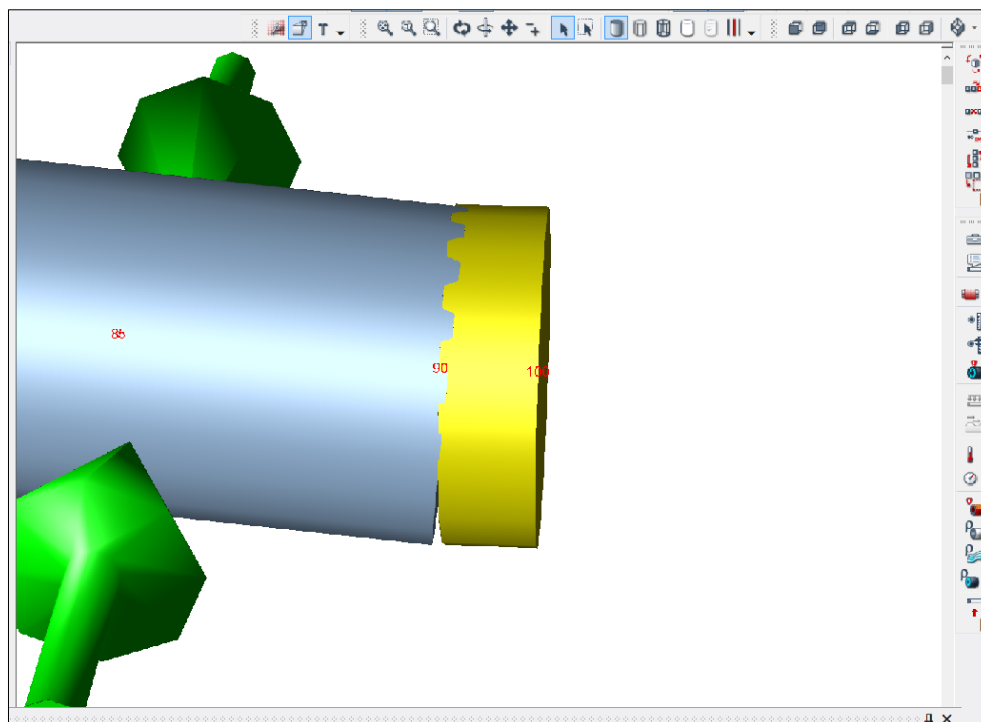


Caesarilla oli hyvin samantyyppistä kuin Bentley'n AutoPIPEllä ja Caepipellä. Näytöllä oli jatkuvasti erilaisia taulukoita, jotka sisälsivät kaiken sen tiedon, joita ohjelmaan on syötetty. Tästä näkyy esimerkki kuvassa 16. Erilaisia lämpötiloja ohjelmaan saa määriteltyä 9 kappaletta. Haussa olevaan uuteen laskentaohjelmistoon tulee voida syöttää eri lämpötilatapauksia yli 20 kappaletta, joten ohjelma ei vaikuta tarpeeksi kattavalta tarpeisiin nähden. Seismisten liikkeiden syöttö malliin tuotti epävarmuutta.



Kuva 16. Mallinnusnäkyä Caesar2:ssa.

Mallinnuksen jälkeen jäi edelleen epäselväksi, sijoitettiin seismiset liikkeet oikein malliin. Virheentarkistuksen löytämät ongelmakohdat estivät näkemästä tuloksia, ja sitä, onnistuiko seismisten siirtymien syöttö toivotulla tavalla. Virheilmoituksia tuli kannakkeille, joihin oli syötetty myös siirtymätietoja. Caesar ei hyväksynyt tilannetta, jossa tukisolmulle sijoitettiin siirtymä. Tilanne ratkaistiin syöttämällä siirtymätieto siirtyvän solmun ja apusolmun välille. Virheilmoitus tuli myös liian loivasta käyrästä, jota ohjelma ei suostunut analysoimaan käyränä. Tämä ratkaistiin poistamalla koko käyrä, jolloin virheilmoitusta ei enää tullut. Tämä ratkaisu näkyy kuvassa 17.



Kuva 17. Liian loivasti kääntyvä putki.

Tuloksia tarkastellessa huomattiin, että käytettäviä yksiköjä tuli muuttaa. Muutos tehtiin aloitusnäytössä, kun malli oli tallennettu ja sammutettu. Halutuista yksiköistä luotiin oma tiedosto, joka tuli erikseen lukea työstettävässä mallissa käyttöön. Ikävä kyllä tämä yksikköjen muutos ei ulottunut analyysin tuloksiin saakka, vaan haluttu yksikkötiedosto tuli erikseen vielä ottaa käyttöön, jotta myös tulospuolelle saatiin oikeat yksiköt.

Tarkastelua jatkettiin tutkimalla materiaalitiedot. Myös nämä löytyivät aloitussivulta, kun varsinainen malli oli suljettuna. Tiedot löytyivät helposti, ja niiden muokkaaminen on tehty helpoksi. Materiaaleja on kirjastossa runsaasti. Materiaalien tiedot, jotka näkyvät kuvassa 18, vastasivat hyvin Finnsapin vastaavia tietoja.

CAESAR II Material Database Editor

File Edit Material View

Number: 443 Name: 1.4307W Applicable Piping Code: EN 13480 Type:

Density: 0.008 Minimum Temperature Curve (A-D):  Eff. Cf, z:

Cold Elastic Modulus: 199947952.00 Poissons Ratio: 0.300 FAC: 0.000

FRP

Laminate Type:  Eh/Ea: 0.000

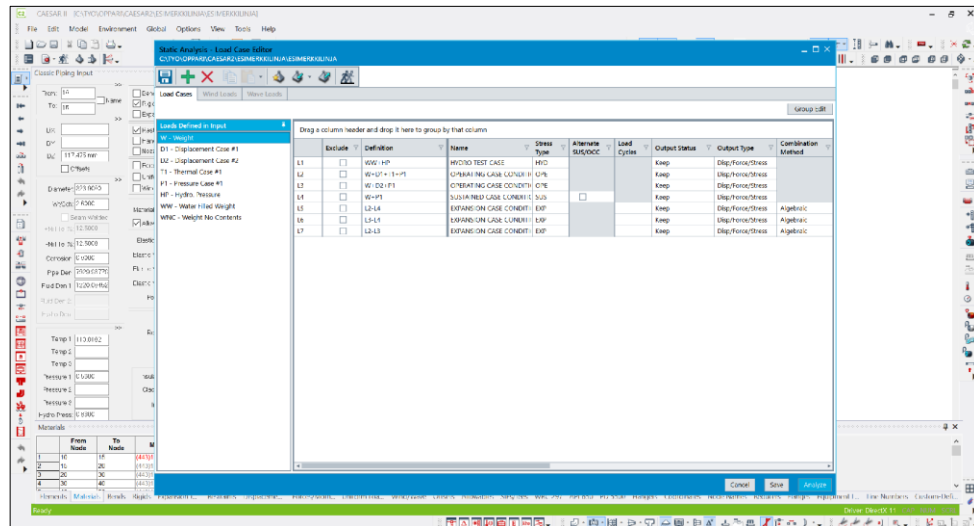
R Ratio:  Design Strain: 0.000

	Temperature	Exp. Coeff.	Allowable Stress	Elastic Modulus	Yield Stress	Ult. Tensile Strength	W	Rmmin
1	-39.99822	14.80824	143328.2	2.047743e+08				
2	-0.001446194	15.13116	143328.2	2.013269e+08				
3	19.997	15.2883	143328.2	1.99948e+08	179993.8			
4	49.99444	15.51924	133328.7	1.9719e+08				
5	99.99055	15.8913	120662.4	1.930532e+08				
6	149.9867	16.24626	107996	1.889163e+08				
7	199.9828	16.5843	97996.56	1.847795e+08				
8	249.9783	16.90542	91330.02	1.806426e+08				
9	299.9744	17.21034	84663.48	1.765058e+08				
10	349.9706	17.49942	80663.83	1.716794e+08				
11	399.9666	17.7705	77330.91	1.675426e+08				
12	409.9655	17.82342	76797.25	1.668531e+08				
13	419.965	17.87436	76264.29	1.661636e+08				
14	429.9644	17.92548	75730.63	1.654742e+08				
15	439.9633	17.97642	75197.66	1.640952e+08				
16	449.9627	18.02538	74664.01	1.634057e+08				
17	459.9616	18.07452	74264.11	1.627163e+08				
18	469.9611	18.12348	73864.22	1.620268e+08				
19	479.96	18.17046	73464.32	1.606478e+08				
20	489.9594	18.21744	73064.42	1.599584e+08				
21	499.9583	18.26442	72663.84	1.592689e+08				
22	509.9578	18.30942	72530.77	1.585794e+08				
23	519.9572	18.35442	72397.7	1.578899e+08				
24	529.9561	18.39942	72263.95	1.56511e+08				
25	539.9555	18.44244	72130.88	1.558215e+08				
26	549.9555	18.48546	71997.12	1.55132e+08				
27	559.9556	18.52848		1.544426e+08				
28	569.9556	18.56952		1.530636e+08				
29	574.95	18.5904		1.530636e+08				
30	579.95	18.61056		1.523741e+08				
31	589.95	18.65142		1.516847e+08				
32	599.95	18.69048		1.509952e+08				
33	609.95	18.72954		1.496162e+08				

Kuva 18. Käytetyn materiaalin tiedot

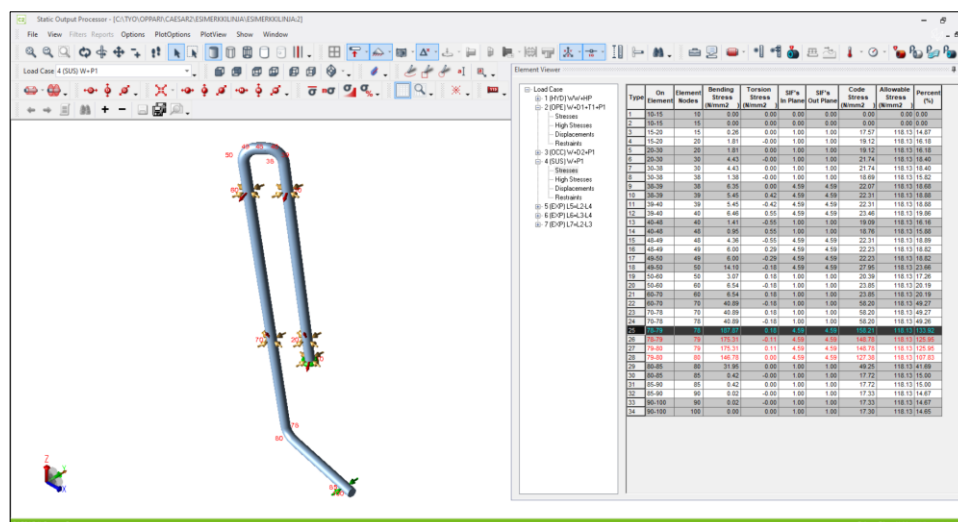
Tulosten tarkastelu osoitti, että sallitut jännitykset vaihtelivat putken eri kohdissa, jopa saman elementin eri päissä sijaitsevilla solmuilla. Jännitykset olivat siis samankaltaiset Caepiästä saatujen jännitysten kanssa, jossa tätä vaihtelua myös esiintyi. Tulosten esitystavasta ei käynyt täysin selväksi mikä jännityksistä vastasi mitään kuormitustapausta. Verratessa Caepipen ja Caesarin sallittuja jännityksiä keskenään, ei muuta yhteneväisyyttä löytynyt, kuin jatkuva vaihtelu. Caesar2 antoi pysyvistä kuormista aiheutuviiksi sallituiksi jännityksiksi samat arvot,  $118 \text{ N/mm}^2$ , kuin Finnsap, mutta siihen

yhtenäisyydet näiden kahden ohjelman välillä jäivätkin. Eri kuormitustapauksia pääsi tarkastelemaan ja muokkaamaan Load Case Editorin kautta, johon ilman ohjeita tuskin eksyy. Tämä näkyy kuvassa 19.



Kuva 19. Kuormitustapauksia muokattiin uuden ikkunan kautta input-välilehdellä.

Kaiken kaikkiaan ohjelma oli vaikeakäyttöinen, ja vaatii valmistajan tarjoaman maksullisen koulutuksen. Caesar on maailmanlaajuisesti paljon käytetty ohjelmisto, joten käytön monimutkaisuus tuli osittain yllätyksenä sekä varsinkin xml-tiedoston sisäännoston epäonnistuminen yllätti täysin. Geometriaa yritettiin nostaa sisään muillakin tiedostomuodoilla, mutta mikään näistä ei auennut. Teknisestä tuesta vastauksia sai odottaa puoli vuorokautta. Kuvassa 20 näkyy yksi tapa tulosten tarkasteluun.



Kuva 20. Tuloksia pystyi tarkastelemaan myös taulukkomuodossa.

Mallintaminen oli kohtalaisen sujuvaa alun jälkeen. Työskennellessä tosin joutui jatkuvasti turvautumaan ohjeisiin ja opastaviin videoihin päästäkseen esimerkiksi tarkastelemaan ja muokkaamaan eri kuormitustapausyhdistelmiä. Sama koski yksiköiden muokkaamista. Taulukossa 5 näkyvät Caesarin sallitut jännitykset. Seismisen kuormitustilan laskemiseksi ohjelmaan olisi pitänyt syöttää k-kerroin, mutta aikataulullisten syiden takia ei kertoimen syöttöön ehditty paneutua. Tämän takia sallitun jännityksen arvo on sama kuin jatkuvassa kuormitustilanteessa. Caesarin omat koulutusmateriaalit ja -videot ovat maksullisia, joten niihin ei päästy käsiksi. Ohjelman käyttö aiheutti toisinaan turhautumista omalaatuisella logiikallaan, joka ei aukea itsestään.

Taulukko 5. Lyhyen mallin sallitut jännitykset.

Lyhyt malli		Finnsap	Caesar II
Sallitut jännitykset, MPa	Jatkuva kuormitustilanne ff	118	118
	Kuuma kuormitustilanne ff+fa	331	200–301
	Seisminen kuormitustilanne	157	118
	Painetesti	204	-

#### 4 Vertailu pisteyttämällä

Useat alustavassa tiedonhakuun perustuneessa vertailussa tarkastellut putkistolaskentaohjelmat olivat monipuolisia ja vastasivat monelta osin haluttua ohjelmistoa, mutta lähes kaikilta myös puuttui vaadittuja ominaisuuksia. Tästä syystä ohjelmistojen karsiminen muutamaaan vaihtoehtoon vei aikaa. Alkuperäisen ajatuksen mukaisesti ohjelmistoja ei saatu karsittua pelkällä Excel-vertailulla, joten päädyttiin käyttämään tarjolla olevia testilisenssejä ohjelmien todellisten potentiaalien selvittämiseksi. Konkreettisesti testatessa näyttäytyivät ohjelmistoesitteiden kuvaukset kaikenkattavista ohjelmistoista

uudessa valossa, ja jo pelkkä mallin nosto ohjelmaan tuotti kaikille laskentaohjelmille haasteita. Tämä oli yllättävää, sillä Finnsapiin saa nostettua mallit vaivatta. Vertailtavien ohjelmistojen ominaisuuksista koottiin pisteyttävä vertailutaulukko, jossa huomioitiin myös taloudelliset kustannukset.

Käyttökokemukset ohjelmistoista, työskentelyn sujuvuus sekä hinta vaikuttavat ohjelmistohankintaa suunnitellessa. Ohjelmistovertailussa mukana olivat Caepipe, AutoPIPE, Rohr2 ja Caesar2. Näillä ohjelmilla, sekä Finnsapilla, mallinnettiin yksi putkisto, tai sen osa, ja kokemukset eri ohjelmistoista kerättiin yhteen pisteyttävään taulukkoon. Vertailu oli tällöin selkeää ja helposti käsiteltävää.

#### 4.1 Tulosten vertailu

Kokemukset eri ohjelmistojen käytöstä kerättiin taulukkoon 6. Vertailussa kiinnitettiin huomiota haluttuihin ominaisuuksiin, sekä ohjelmien käytössä esiin nousseisiin piirteisiin ja käyttömukavuuteen. Taulukko kokonaisuudessaan löytyy liitteestä 3. Taulukossa on painotettu erikseen mallinnuskokemusta, geometrian tuontia ulkoisesta lähteestä, käytännön tukea sekä analyysin tulosten tulkintaa. Prosentuaaliset painotukset näissä jakautuvat ominaisuuksien tärkeyden perusteella. Jokainen näistä osioista pitää sisällään aiheeseen liittyviä ominaisuuksia, joilla on kaikilla omat prosentuaaliset painotukset. Kohdasta ”Pisteet yhteensä” näkyy pisteytetty tulos ohjelman ominaisuuksista ilman kustannusten vaikutusta. Kustannukset on pisteytetty ottamalla huomioon sekä alkuinvestointi että kuukausimaksu. Pisteytyksessä on käytetty arvoja -2, 0, 2, 4, 6, jossa -2 on heikko ja 6 on erinomainen. Tällä pisteytyksellä saatiin erot ohjelmien välillä selvemmin näkyviin.

Taulukko 6. Käyttökokemukset pisteytettyinä.

	%	Caepipe	AutoPIPE	Rohr2	Caesar2
<b>Mallinnuskokemus</b>	<b>25 %</b>	<b>0,9</b>	<b>0,6</b>	<b>1,2</b>	<b>0,6</b>
Käytön sujuvuus	20 %	6	2	6	2
Materiaalikirjaston käyttö	10 %	2	0	6	2
Lämmön ja paineiden syöttö	20 %	4	4	4	4
Putkenosien ja venttiileiden lisäys	10 %	6	4	4	2
Kannakointi	10 %	6	4	6	0
Tilapäisten kuormitustapausten syöttö	10 %	0	2	2	4
Kuormitustapausten riittävä määrä	10 %	-2	0	4	-2
Syötettyjen arvojen tarkastaminen	10 %	4	2	4	4
<b>Geometrian tuonti ulkoisesta lähteestä</b>	<b>30 %</b>	<b>-0,2</b>	<b>-0,2</b>	<b>0,4</b>	<b>-0,6</b>
E3D:stä (xml)	33 %	-2	-2	-2	-2
Muusta ohjelmasta (dxf)	33 %	0	0	0	-2
Muusta ohjelmasta (pcf)	33 %	0	0	6	-2
<b>Käytön tuki</b>	<b>25 %</b>	<b>0,8</b>	<b>0,0</b>	<b>1,3</b>	<b>0,0</b>
Tekninen tuki	50 %	4	-2	6	0
Ohjemateriaalin helppokäyttöisyys	50 %	2	2	4	0
<b>Analyysin tulosten tulkinta</b>	<b>20 %</b>	<b>0,4</b>	<b>0,6</b>	<b>1,0</b>	<b>0,4</b>
Sallitut jännitykset	30 %	0	4	6	0
Tukireaktiot	20 %	4	2	4	2
Siirtymät	20 %	4	4	6	4
Tulosten tarkastelun helppous	30 %	2	2	4	2
<b>Pisteet yhteensä</b>	<b>100 %</b>	<b>1,9</b>	<b>1,0</b>	<b>3,8</b>	<b>0,3</b>
Kustannukset	25 %	4,5	1,5	2,5	3
<b>Pisteet kustannukset huomioituna</b>	<b>125 %</b>	<b>3,30</b>	<b>1,47</b>	<b>4,58</b>	<b>1,25</b>

## 4.2 Suositus

Sekä käytännön kokemuksen että vertailutaulukon perusteella oli ominaisuuksiltaan lähimpänä tavoiteltua ohjelmaa Rohr2. Tällä tehokkaalla ohjelmalla saadaan nopeasti analysoitua putkistoa, ja ohjelman käytön oppii nopeasti. Rohrin tarjoama tekninen tuki on nopea, laadukas ja ehdottoman positiivinen. Ohjelman asetuksia on helppo muokata haluttuihin tarkoituksiin sopiviksi ja erilaisten kuormitustapausten lisääminen vaivatonta. Lisenssin aiheuttamilla kustannuksilla on kuitenkin vaikutusta ostopäätökseen ja näin ollen vaihtoehdoisen ohjelman hankintaa joutuu tarkastelemaan tämän osalta tarkemmin.

## 5 Yhteenveto

Tavoitteena projektissa oli löytää käytössä olevan Finnsap-ohjelman rinnalle uusi FEM-pohjainen putkistolaskentaohjelmisto. Tämä toteutettiin vertailemalla usean laskentaohjelmiston ominaisuuksia, ja lupaavimmista ohjelmistoista hankittiin testilisenssit käytännön testejä varten. Kullakin ohjelmalla mallinnettiin yksi putkilinja, tai sen osa. Kertyneiden kokemusten pohjalta kerättiin kunkin ohjelman ominaisuudet pisteyttävään taulukoon. Projektin lopputuloksena saatiin arvioitua neljä eri laskentaohjelmistoa ominaisuuksineen ja kustannuksineen. Näihin tietoihin voidaan palata uutta ohjelmistoa hankittaessa.

Ohjelmistojen parissa työskennellessä ja niihin yksi kerrallaan pureutuessa sai todeta, että ostopäätöksen tekeminen pelkkien mainoslauseiden perusteella olisi haastavaa. Laskentaohjelmistot tulivat markkinoille 1980-luvun alkupuolella, ja vuosittaisilla päivityksillä pyritään pysymään kehityksen kärjessä mukana. Moni ohjelma ei tästä huolimatta saanut tuoduksi geometriaa ulkoisesta lähteestä yleisesti käytetyillä tiedostomuodolla. Tämä yllätti, ja alun perin oletuksena ollut varsin tiukka kilpailu muutaman ohjelman kesken kuivui auttamatta kokoon. Laskentaohjelmistoja on tarjolla monia eritasoisia ja riippuikin hankkivan yrityksen käyttötarpeista, minkälaista ohjelmaa etsitään. Ohjelmissa on paljon hajontaa tehokkuudessa, mutta myös hinnassa sekä helppokäyttöisyydessä. Toiset ohjelmat vaativat käyttäjiltä selvästi koulutuksen, jotta niiden koko potentiaalin saa käyttöön.



Tässä tapauksessa monimutkaisiin suorituksiin ei käytettävissä olleen ajan puitteissa päästy. Tarkempaan perehtymiseen teknisten ominaisuuksien osalta tulee keskittyä omassa projektissaan, jos tähän nähdään tarvetta. Läpikäydyistä ohjelmistoista nousi esiin yllätyksiä, myös positiivisia, sekä selvä vertailun voittaja. Finnsapin oheen otetaan Rohr2.

## Lähteet

- 1 Joustavuus- ja jännitysanalyysit. 2015. Yrityksen sisäinen dokumentti. Pinja Engineering Oy.
- 2 SFS-EN 13480. Metalliset teollisuusputkistot. 2017. Suunnittelu ja laskenta. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.
- 3 Joronen, Olli-Pekka. 2020. Putkistojen joustavuusanalyysi. Luentomoniste. Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 4 Chari. S. Raghava. 2017. Piping Stress analysis. E-artikkeli. Blockdale Publishing. <<https://search-proquest-com.ezproxy.metropolia.fi/central/docview/1970314071/4C443F4BB7624365PQ/1?accountid=11363>>. Luettu 19.11.2020
- 5 Elementtimenetelmän perusteet. Verkkoaineisto. DIGMA. <<http://www2.amk.fi/digma.fi/www.amk.fi/material/attachments/vanhaamk/digma/5h5F5Hlr3/FES05.pdf>>. Luettu 29.9.2020.
- 6 FEA-laskennan teoriaa. Verkkoaineisto. Vertex Systems. <<https://kb.vertex.fi/fea2017fi/tutustu-tarkemmin-ominaisuuksiin/yleiset-aiheet/fea-laskennan-teoriaa>>. Luettu 29.9.2020.
- 7 Syrjä, Risto. 2019. Elementtimenetelmään perustuvan ohjelman käytön perusteet. Verkkoaineisto. Aalto-yliopisto, Insinööritieteiden korkeakoulu. <[https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/1260662/course/section/158839/L\\_FEM\\_FI\\_20190905.pdf](https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/1260662/course/section/158839/L_FEM_FI_20190905.pdf)>. Luettu 2.11.2020.
- 8 Dworsky, Lawrence N. 2014. Introduction to Numerical Electrostatics Using MATLAB. E-kirja. Wiley-IEEE Press.
- 9 Desai, Y.M; Eldho T.I. & Shah, A. H. 2011. Finite Element Method with Applications in Engineering. E-kirja. Pearson India.
- 10 FEMdatan ohjelmistotuotteet. Verkkoaineisto. FEMdata. <<http://www.femdata.fi/Tuotteet.htm>>. Luettu 4.11.2020
- 11 ROHR2 Program System for Static and Dynamic Analysis of Complex Piping and Steel Structures. 2020. Sähköpostidokumentti. SKIOS Engineering. Luettu 19.1.2021.
- 12 CAEPIPE. Verkkoaineisto. SST Systems, Inc. <<http://www.caepipe.com/learn.php>>. Luettu 19.1.2021

- 13 AutoPIPE Create piping models quickly and easily. Verkkoaineisto. Bentley Systems. <<https://www.bentley.com/en/products/product-line/pipe-stress-and-vessel-analysis-software/autopipe>>. Luettu 19.1.2021.
- 14 RFEM – FEM Structural Analysis Software. Verkkoaineisto. Dlubal Software GmbH. <<https://www.dlubal.com/en/products/rfem-fea-software/what-is-rfem>>. Luettu 4.2.2021.
- 15 CAESAR II. 2021. Verkkoaineisto. Hexagon AB. <<https://hexagonppm.com/offers/products/caesar-ii>>. Luettu 5.2.2021.

## Vaaditut ominaisuudet

		Caepipe	CAESAR II	ROHR2	Bentley Auto PIPE	dPIPE	FEPIPE	Comsol	Winpipe	RFEM + RF-PIPING
Jännitysanalyysi	EN 13480-3 mukaan	x	x	x	x	x				x
	ASME B31.1 mukaan	x	x	x	x	x	x		x	x
	ASME B31.3 mukaan	x	x	x	x	x	x		x	x
Ominaisuuksien analyysi / modal analysis		x	x	x	x	x				x
Vastespektrianalyysi /response spectrum analysis		x	x	x	x	x				x
Harmoninen vaste		x	x	x	x					?
Aikaintegraatio		x	x	x	x	x				x
Erillinen väsymismitoitus						x				
Geometrian tuonti ulkoisesta lähteestä		x	x	x	x	x				
Sisäinen mallintaja		x	x	x	x	x				x
Jousituennat ja epälineaariset tuennat		x	x	x	x	x				
Vinotuentojen syöttömahdollisuus		x								
Palkkimallien käyttö apuelementteinä		x	x	x	x	x				x
Tukipisteiden lämpöliikkeiden syöttö tuille						x				
Tukien pakkosiirtymien syöttö										
Lämpöliike ja pakkosiirtymä erillisinä kuormina										
Usean eri lämpötilan syöttö samaan malliin		x	x	x		x				x
Usean eri paineen syöttö samaan malliin		x	x	x						x
Usean eri tiheyden syöttö samaan malliin		x								
Mallin jako ryhmiin				x						x
Datan syöttö tekstimuodossa						x				
Kuorimallin yhdistäminen putkimalliin				x	x					x
Työkalu yhteiden jäykkyyksien ratkaisemiseen				x	x					
Apuelementtipalkkimallin mitoitus										
Laskentastandardin perustapaukset										
Usean eri ajotilanteen analysointi					x					
Tilapäisten kuormitustapausten syöttö	Tuulikuormat	x	x	x	x	x				x
	Varoventtiilin purkautuminen	x		x		x				x
	Seismiset kuormitukset	x	x	x	x	x				x
	Suoritus standardin mukaan			x						x
Kuormitustapausten yhdistely		x		x	x					x
Graafisessa muodossa	siirtymäkuva	x		x		x				x
	tukivoimat	x		x						
	tukien siirtymä	x								
	stand. muk. jännityskuva									
Kuvat raportointiin	jännityssuhde					x				
	siirtymäkuva									
	tukivoimat									
	tukien siirtymä									
	stand. muk. jännityskuva									
	jännityssuhde									
Raportin tulostus automaattisesti		x		x						x
Kuvien tulostuksen automatisointimahdollisuus										x
Tukivoimien tulostus tekstimuodossa						x				
Elementtivoimien tulostus tekstimuodossa										
Tulosten rajaaminen ryhmäkohtaisesti										x
Apuelementtien voimien tulostus tekstimuodossa										
Maksimitulosten esitys tekstimuodossa, jännitys										

### Esimerkki sallitun jännityksen tarkastuksesta käsin laskemalla

Tarkastuksessa käytettiin sallitun jännityksen vaihteluvälin  $f_a$  laskentakaavaa:

$$f_a = U (1,25 * f_c + 0,25 * f_h) \frac{E_h}{E_c}, \text{ jossa} \quad (1)$$

Metallin kimmokerroin 100 °C lämpötilassa  $E_h = 193,18 \text{ MPa}$

Metallin kimmokerroin asennuslämpötilassa  $E_c = 199,96 \text{ MPa}$

Ylemmän myötörajan arvo lämpötilassa  $t$  (100 °C)  $R_{pt1} = 181 \text{ MPa}$

Murtolujuus  $R_m = 460 \text{ MPa}$

Jännityksen vaihteluvälin pienennyskerroin  $U = 1$  (taulukosta)

Suunnittelujännitys  $f$  austeniittisella teräksellä, kun  $A \geq 35 \%$ , lasketaan kaavalla

$$f = \frac{R_{p1,0t}}{1,5} \quad (2)$$

$$f = \frac{181 \text{ MPa}}{1,5} = 120,667 \text{ MPa}$$

Kylmän tilan jännitys  $f_c$ , asennuslämpötilassa 10 °C, lasketaan kaavalla

$$f_c = \frac{R_m}{3} \quad (3)$$

$$f_c = \left( \frac{460 \text{ MPa}}{3} \right) = 153,333 \text{ MPa}$$

Sallitun jännityksen arvo metallin kuumassa lämpötilassa  $f_h$  saadaan pienimmästä arvosta:  $f_h = \min(f_c; f; f_{CR})$ . Virumisalueella sallitun jännityksen arvo  $f_{CR}$  on lisäehtona. Tässä tapauksessa ei toimita virumisalueella. Joten sallitun jännityksen arvo  $f_h$  on

$$f_h = f = 120,667 \text{ MPa}$$

Jolloin saadaan laskettua sallitun jännityksen vaihteluväli  $f_a$  kaavalla 1:

$$f_a = 1 * (1,25 * 153,333 \text{ MPa} + 0,25 * 120,667 \text{ MPa}) * \frac{193,18 \text{ MPa}}{199,96 \text{ MPa}} = 214,312 \text{ MPa}$$

Joustavuusanalyysissä käytetty suunnittelujännitys  $f_f$  saadaan pienimmästä arvosta:

$$f_f = \min(f; f_{CR}), \text{ eli nyt}$$

$$f_f = f = 120,667 \text{ MPa}$$

Jolloin saadaan laskettua kuumen tilanteen (100 °C) sallittu jännitys  $f_f + f_a$

$$120,667 \text{ MPa} + 214,312 \text{ MPa} = 334,978 \text{ MPa}$$

## Pisteyttävä taulukko

	%	Caepipe	Auto-PIPE	Rohr2	Caesar2	Kommentit
<b>Mallinnuskokemus</b>	<b>25 %</b>	<b>0,9</b>	<b>0,6</b>	<b>1,2</b>	<b>0,6</b>	
Käytön sujuvuus	20 %	6	2	6	2	
Materiaalikirjaston käyttö	10 %	2	0	6	2	Materiaalitietojen löytyminen ja muokkaaminen tarvittaessa
Lämmön ja paineiden syöttö	20 %	4	4	4	4	
Putkenosien ja venttiileiden liittäminen	10 %	6	4	4	2	Uuden syöttö ja vanhan muokkaus
Kannakointi	10 %	6	4	6	0	
Tilapäisten kuormitustapausten syöttö	10 %	0	2	2	4	
Kuormitustapausten riittävä määrä	10 %	-2	0	4	-2	Lämpötiloissa yli 20 kappaletta
Syötettyjen arvojen tarkastaminen	10 %	4	2	4	4	
<b>Geometrian tuonti ulkoisesta lähteestä</b>	<b>30 %</b>	<b>-0,2</b>	<b>-0,2</b>	<b>0,4</b>	<b>-0,6</b>	
E3D:stä (xml)	33 %	-2	-2	-2	-2	
Muusta ohjelmasta (dxf)	33 %	0	0	0	-2	
Muusta ohjelmasta (pcf)	33 %	0	0	6	-2	
<b>Käytön tuki</b>	<b>25 %</b>	<b>0,8</b>	<b>0,0</b>	<b>1,3</b>	<b>0,0</b>	
Tekninen tuki	50 %	4	-2	6	0	
Ohjelmateriaalin helppokäyttöisyys	50 %	2	2	4	0	
<b>Analyysin tulosten tulkinta</b>	<b>20 %</b>	<b>0,4</b>	<b>0,5</b>	<b>1,0</b>	<b>0,4</b>	
Sallitut jännitykset	30 %	0	4	6	0	
Tukireaktiot	20 %	4	2	4	2	
Siirtymät	20 %	4	4	6	4	
Tulosten tarkastelun helppous	30 %	2	0	4	2	
<b>Pisteet yhteensä</b>	<b>100 %</b>	<b>1,9</b>	<b>0,9</b>	<b>3,8</b>	<b>0,3</b>	
Kustannukset	25 %	4,5	1,5	2,5	3	
<b>Pisteet kustannukset huomioituna</b>	<b>125 %</b>	<b>3,30</b>	<b>1,35</b>	<b>4,58</b>	<b>1,25</b>	

## Käytetyt pisteet

- 6 Erinomainen
- 4 Hyvä
- 2 Tyydyttävä
- 0 Välttävä
- 2 Heikko