

Hanne Paatinen

# Työohje varastosäiliön katon rakenneanalyysiin

Opinnäytetyö

Tekniikan ammattikorkeakoulututkinto

Energiatekniikan koulutus

2025



**Kaakkois-Suomen  
ammattikorkeakoulu**

|                 |  |
|-----------------|--|
| Tutkintonimike  | Insinööri (AMK)                                |
| Tekijä/Tekijät  | Hanne Paatinen                                 |
| Työn nimi       | Työohje varastosäiliön katon rakenneanalyysiin |
| Toimeksiantaja  | AFRY Finland Oy                                |
| Vuosi           | 18.4.2025                                      |
| Sivut           | 37 sivua                                       |
| Työn ohjaaja(t) | Kalle Tarhonen, Perttuli Ukkonen               |

## TIIVISTELMÄ

Teollisuudessa käytetään varastosäiliöitä nesteiden, kuten polttoaineiden ja kemikaalien säilyttämiseen, ja niiden käytön turvallisuuteen vaikutetaan jo suunnitteluvaiheessa. Yksi suunnittelun keskeinen vaihe on säiliön rakenneanalyysi, jossa varmistetaan, että rakenteen lujuusominaisuudet ovat riittävät säiliön sijainti ja käyttötarkoitus huomioiden.

Tämän produktiivisen opinnäytetyön tavoitteena oli luoda työohje varastosäiliön kattorakenteen lujuusanalyysiin AFRY Finland Oy:lle. Työohjeen tarkoitus on yhdenmukaistaa lujuuslaskijoiden toimintatapoja ja helpottaa analyysin suorittamista. Työohje tehtiin englanniksi, koska AFRY on kansainvälinen suunnitteluyhtiö.

Työohje perustuu elementtimenetelmään (FEM) ja eurooppalaisiin standardeihin. Opinnäytetyössä on tutustuttu elementtimenetelmän keskeisiin periaatteisiin ja säiliöiden suunnittelua ja teräsrakenteita koskeviin standardeihin. Varastosäiliön rakenneanalyysiä käytiin läpi yhdessä toimeksiantajan edustajan kanssa, minkä pohjalta työohje tehtiin. Alustavaan työohjeeseen saatiin kommentit kahdelta kokeneemmalta lujuuslaskijalta ja lisäksi työohje pääsi heti testikäyttöön uudella työntekijällä. Näiden pohjalta työohje viimeisteltiin lopulliseen muotoonsa.

Opinnäytetyön tuloksena syntyi työohje, joka toimii arvokkaana toimintaa tehostavana työvälineenä toimeksiantajan lujuuslaskijoille. Työohje tarjoaa systemaattisen tavan suorittaa analyysi, mikä vähentää virheiden mahdollisuutta ja nopeuttaa työskentelyä. Yhtenäistetyt työtavat parantavat laskelmien vertailtavuutta, mikä tekee prosessista sujuvamman ja luotettavamman.

**Asiasanat:** FEM, rakenneanalyysi, työohje, varastosäiliö

|                  |  |
|------------------|--|
| Degree title     | Bachelor of Engineering  |
| Author (authors) | Hanne Paatinen   |
| Thesis title     | Work instructions for structural analysis of storage tank roof |
| Commissioned by  | AFRY Finland Oy  |
| Time             | 18.4.2025  |
| Pages            | 37 pages   |
| Supervisor       | Kalle Tarhonen, Perttuli Ukkonen                               |

## ABSTRACT

Storage tanks are used to store liquids such as fuels and chemicals, and their safety is influenced by decisions made during the design phase. One crucial phase of the design process is structural analysis, which ensures that the structural features of the tank meet the strength requirements considering its location and intended use.

The objective of this thesis was to create work instruction for the structural analysis of the roof structure of storage tanks. The commissioning company of the work was AFRY Finland Oy. The purpose of the instructions was to standardize the working methods of strength analysts and facilitate the analysis process. Since AFRY is an international design company, the Instruction was written in English.

The instruction is based on the Finite Element Method (FEM) and European standards. Key principles of FEM, as well as standards related to tank design and steel structures, are presented in this thesis. Guided by an experienced strength analyst, the structural analysis served as the basis for creating the work instruction. The instruction was reviewed by two experienced strength analysts, and it was immediately tested by a new employee. Based on this feedback, the instruction was finalized into its current form.

As an outcome of the thesis, work instruction was developed to support and streamline the work of strength analysts. It provides a systematic approach to conducting analyses, minimizing errors and improving workflow efficiency. Standardized methods also enhance the comparability of analyses, making the process more reliable.

**Keywords:** FEM, structural analysis, work instruction, storage tank

## SISÄLLYS

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | JOHDANTO .....                                       | 5  |
| 2     | SÄILIÖN KATON RAKENNE .....                          | 6  |
| 3     | STANDARDIT .....                                     | 7  |
| 3.1   | Standardien ohjeet säiliön katon suunnitteluun ..... | 8  |
| 3.2   | Kuormat .....  | 10 |
| 4     | FEM .....  | 14 |
| 4.1   | Elementtien muodot .....                             | 14 |
| 4.2   | Solmupisteet .....                                   | 17 |
| 4.3   | Reunaehdot .....                                     | 18 |
| 4.4   | Elementtiverkko .....                                | 20 |
| 4.5   | FEM-laskennan tulokset .....                         | 20 |
| 4.5.1 | Lineaarinen analyysi .....                           | 21 |
| 4.5.2 | Von Misesin myötöehto .....                          | 22 |
| 4.5.3 | Stabiiliteettianalyysi .....                         | 23 |
| 4.5.4 | Kokonaismuodonmuutokset ja jännitykset .....         | 25 |
| 5     | TYÖOHJEEN TEKEMINEN .....                            | 29 |
| 6     | TYÖN TULOKSET .....                                  | 32 |
| 7     | JOHTOPÄÄTÖKSET .....                                 | 35 |
|       | LÄHTEET .....  | 37 |

## 1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tilaaja on AFRY Finland Oy. Afry on kansainvälinen suunnittelu- ja konsultointiyhtiö, joka sai alkunsa, kun Ruotsissa 1895 perustettu ÅF osti Suomessa 1958 perustetun Pöyryn. Afryllä on toimistoja 40 maassa ja konsernin pääkonttori on Tukholmassa. Suomessa Afry työllistää noin 2 500 asiantuntijaa noin 30 paikkakunnalla. Afryllä on projekteja sadassa maassa eri toimialoilla, joista Suomessa toimii prosessiteollisuus, energia, infra ja liikkeenjohdon konsultointi. (AFRY 2025.)

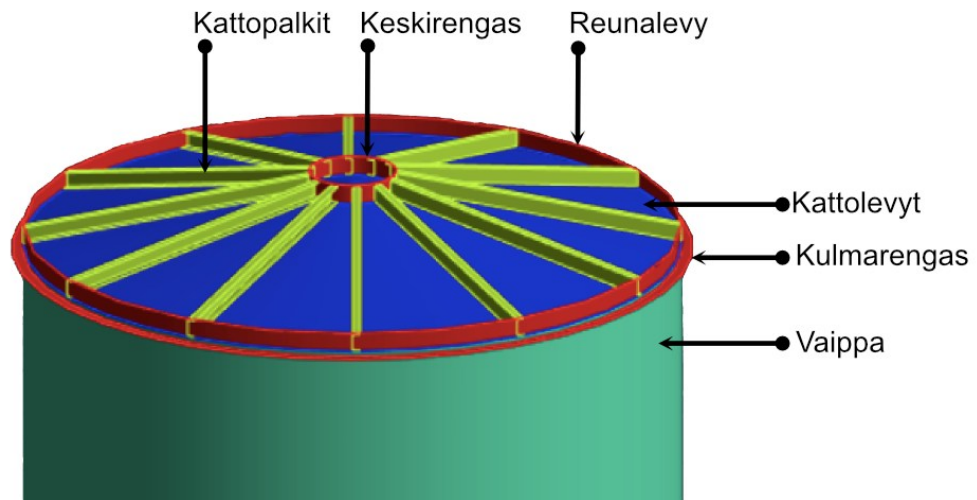
Työn tavoitteena on suunnitella ja toteuttaa työohje varastosäiliön kattorakenteen mitoitukseen Ansys-ohjelmalla. Varastosäiliöitä käytetään laajasti eri teollisuuden aloilla, esimerkiksi energianteollisuudessa, ja niissä säilytetään muun muassa kemikaaleja ja polttoaineita. Säiliön rakenteisiin vaikuttavia tekijöitä ovat esimerkiksi sijainti, käyttötarkoitus ja koko, minkä vuoksi jokainen suunniteltava säiliö on aina yksilö ja jokaiselle säiliölle on aina tehtävä oma rakenneanalyysi. Työohjeelle on tarvetta, sillä tällä hetkellä kukin lujuuslaskija tekee analyysin omalla tavallaan ja työohjeella halutaan varmistaa analyysien yhdenmukaisuus. Tarkoitus ei ole luoda Ansysin käyttöohjetta vaan standardeihin perustuvien toimintatapojen mukainen työohje, jonka pääasiallinen tarkoitus on yhtenäistää lujuuslaskijoiden työtapoja. Lisäksi työohjeen on tarkoitus helpottaa ja nopeuttaa lujuuslaskijoiden työskentelyä ja vähentää virheellisten analyysien määrää ja siten lisätä laskelmien luotettavuutta ja rakenteiden kestävyyttä ja turvallisuutta.

Työ toteutetaan tutustumalla asiaan liittyviin standardeihin ja lujuusanalyysissä käytettävään elementtimenetelmään, jota Ansys käyttää. Toimeksiantajan opastuksella tehdään kuvitteellisen varastosäiliön katon lujuusanalyysi, minkä pohjalta tehdään alustava työohje. Esimerkkisäiliön työvaiheista saadaan havainnollistavia kuvia työohjeeseen. Alustavan työohjeen valmistuttua pyydetään kommentteja toimeksiantajalta, minkä pohjalta tehdään tarvittavia korjauksia. Myös työn edetessä käydään ohjetta läpi, jolloin sitä voi kommentoida jo tekovaiheessa.

Toimeksiantajalla on käytössään Ansys Space Claim -ohjelmalla luotu parametrisoitu malli, jolla säiliön geometria mallinnetaan. Jottei opinnäytetyöstä tulisi liian laaja, on työohjeen tekeminen rajattu käsittelemään varastosäiliöiden kattorakennetta. Varastosäiliön katto on standardin SFS-EN 14015 mukainen kiinteä katto. Työohje ja sen tekemistä varten saadut lähtötiedot ovat salaisia, joten tässä opinnäytetyössä niitä ei kuvailla yksityiskohtaisesti.

## 2 SÄILIÖN KATON RAKENNE

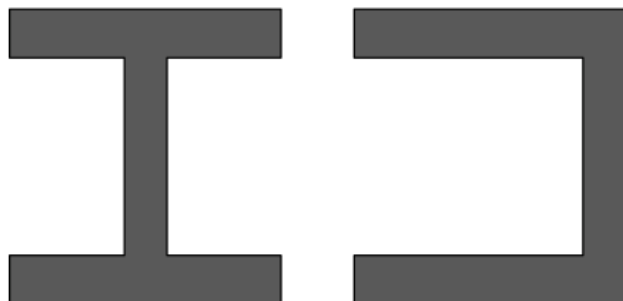
Työohje perustuu esimerkksäiliön rakenneanalyysiin ja työohjetta käytetään samanlaisten säiliöiden rakenneanalyysin tekemiseen. Suunniteltavat säiliöt ovat aina kartiokattoisia ja lieriön muotoisia, mutta esimerkiksi niiden koko, katon kaltevuuskulma ja kattopalkkien lukumäärä voivat vaihdella. Säiliön osat on esitelty kuvassa 1.



Kuva 1. Varastosäiliön rakenne

Taivutetuista levyistä koostuvaa säiliön lieriön mallista seinää kutsutaan vaipaksi. Kattorakenteeseen kuuluu kolme rengasta; keskirengas, kulmarengas ja reunalevy. Kulmarengasta säädelään tarkasti standardissa ja siitä kerrotaan tarkemmin seuraavassa luvussa. Keskirengas on nimensä mukaisesti säiliön keskellä ja reunalevy säiliön katon reunalla. Kattopalkit kiinnittyvät näiden kahden renkaan väliin. Kattopalkit ovat rakenteen kestävyyskannalta

merkittävin osa, sillä ne on suunniteltu kantamaan kattoon kohdistuvat kuormat. Kattopalkkien alla on kattolevy. Palkkeja nimitetään niiden profiilin mukaan ja säiliön kattopalkit voivat olla joko I- tai U-palkkeja (kuva 2).



Kuva 2. Palkkien I- ja U-profiilit.

Molemmat palkkiprofiilit koostuvat kolmesta osasta, jotka ovat ylälaippa, uuma ja alalaippa. Säiliön mallintamisessa käytetään parametrissa mallia, jonka mukaan palkin profiili määräytyy. Esimerkkisäiliön palkit ovat U-palkkeja. Afryllä on myös toinen parametrisoitu malli, jossa on I-palkkeja. Työohje soveltuu molemmille säiliömalleille, sillä palkkien profiili ei vaikuta ohjeeseen. Parametrissa kerrotaan lisää työn tulokset osiossa (luku 6).

### 3 STANDARDIT

Standardit määrittelevät esimerkiksi sen, minkälaisia säiliöitä tiettyyn käyttötarkoitukseen voidaan suunnitella ja rakentaa sekä niiden rakentamiseen käytettävät materiaalit ja materiaalipaksuudet sekä suunnittelussa huomioon otettavat voimat, jotka säiliön tulee kestää. Tässä työssä käytettävät standardit ovat säiliöitä käsittelevä SFS-EN 14015 sekä niin kutsutut eurokoodit. Työssä tarkastellaan säiliön kattorakenteen suunnitteluun liittyviä seikkoja sekä Suomeen rakennettavan säiliön tyypillisimpiä kuormituksia.

Eurokoodit ovat rakennuksia sekä maa- ja vesirakennuskohteita koskevia eurooppalaisia standardeja, joissa on erityisesti mekaaniseen lujuuteen ja paloturvallisuuteen liittyviä vaatimuksia ja joiden on tarkoitus yhdenmukaistaa rakennustuotteiden teknisiä vaatimuksia Euroopan maiden välillä. (SFS-EN 1991-1-1 + AC, 6.)

### 3.1 Standardien ohjeet säiliön katon suunnitteluun

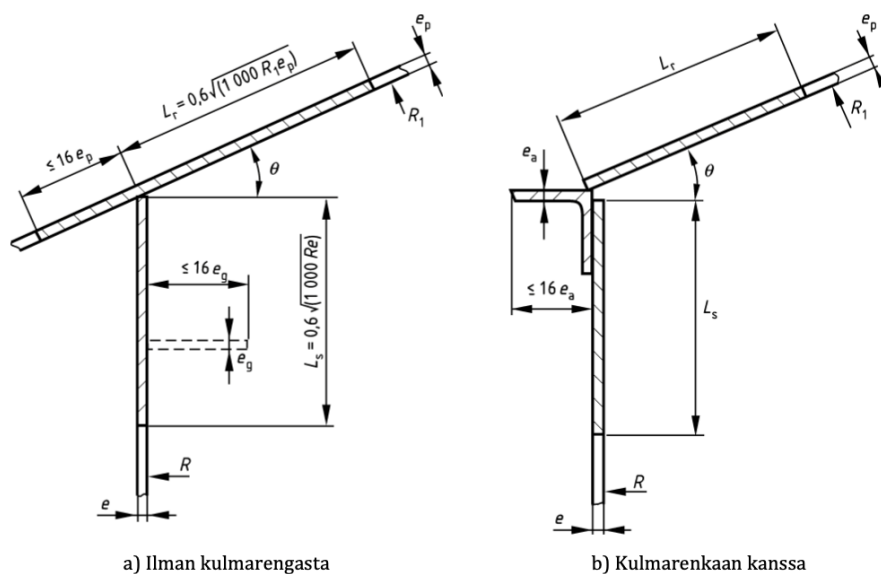
Säiliö, jonka mallintamiseen ja analyysiin työohjetta käytetään, on standardin SFS-EN 14015 mukainen:

- tarkoitettu nesteiden säilyttämiseen vähintään ympäristön lämpötilassa
- pystylieriön muotoinen
- tasapohjainen
- maanpäällinen
- teräksestä valmistettu
- paikalla rakennettava
- osat liitetty hitsaamalla (SFS-EN 14015, 1).

Standardin mukainen säiliön katto voi olla kelluva tai kiinteä katto ja standardissa määritellään kiinteälle katolle kaksi erilaista kattotyyppiä:

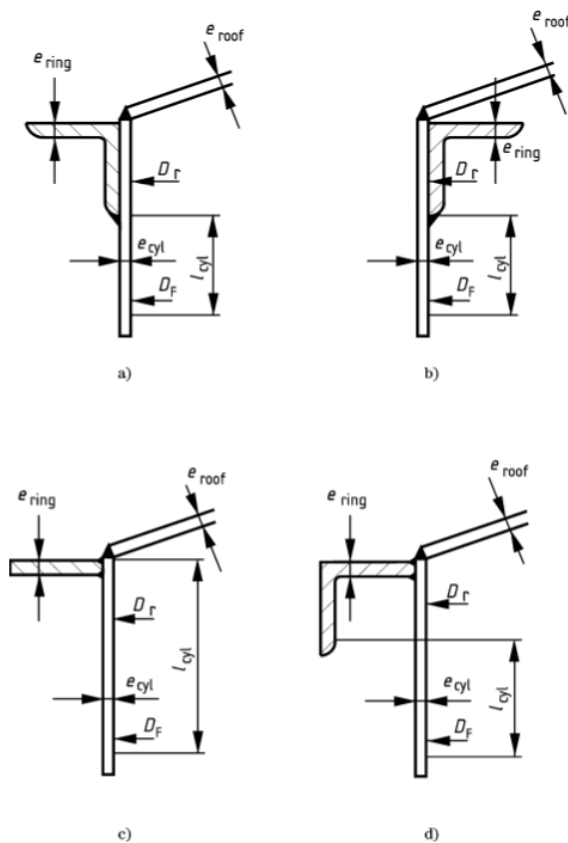
- itsekantava kartio- tai kupolikatto, kattorakentein tai ilman niitä tai
- pilareilla tuettu katto (SFS-EN 14015, 52).

Työohjeen säiliön katto on kiinteä itsekantava kartiokatto, jossa on kattorakenteita. Säiliön vaipan ja katon välistä liitosaluetta kutsutaan puristusalueeksi, jossa tulee olla kulmarengas (kuva 3), kun kyseessä on kiinteäkattoinen säiliö. Puristusalueen vähimmäispinta-ala määritetään standardin kaavan avulla. Vähimmäispinta-alaan vaikuttaa suunnittelupaine, kattolevyjen massa, säiliön säde, katon jyrkkyys sekä sallittu puristusjännitys (SFS-EN 14015, 56).



Kuva 3: Säiliön puristusalue kulmarengalla ja ilman (SFS-EN 14015, 55)

Kuvassa 3 on poikkileikkauskuvat kahdesta säiliön reunasta, säiliössä a ei ole kulmarengasta ja säiliössä b on kulmarengas. Kulmarengas on L- tai lattapalkista taivutettu säiliön ympäri kiertävä rengas, joka toimii kuoren ja katon liitospalana ja sen tarkoitus on jäykistää puristusalue. Kulmarenkaan vähimmäiskoko määritetään standardissa olevan taulukon avulla säiliön halkaisijan mukaan (EN 14015, 56). Standardissa kuvataan useita erilaisia tapoja kiinnittää katto säiliöön. Kuvassa 4 on esitetty, kuinka katto voidaan hitsata vaipan ylimpään levykertaan.



Kuva 4. Katto hitsattuna ylimpään levykertaan (SFS-EN 14015, 176)

Katto voidaan kiinnittää säiliöön hitsaamalla se vaipan ylimpään levykertaan, jolloin kulmarengas hitsataan vaipan yläreunaan ja se voi olla L- tai lattapalkki. Työohjeen säiliön kulmarengas on kuvan 4 c-kohdan mukainen lattapalkki.

Kartiokaton kattopalkkien välinen jänne saa olla korkeintaan 2 m kun säiliön kattolevyn toista reunaa tukee säiliön yläreunan rengas (keskirengas). Tämä

sallittu enimmäispituus on pienempi, ellei tukirengasta ole. Lisäksi kattopalkkien väliin tulee laittaa poikkisiteitä katon pinnan tasossa, kun säiliön halkaisija ylittää 15 metriä. (SFS-EN 14015, 53.) Työohjeen esimerkkisäiliö on tätä pienempi ja siinä ei poikkisiteitä ole.

### 3.2 Kuormat

Kuormalla tarkoitetaan rakenteeseen kohdistuvaa voimaa. Kuormat aiheuttavat rakenteeseen jännityksiä, jotka voivat vaikuttaa sen kestävyyskykyyn. Rakennusmateriaaleille on määritetty vetokokeella myötöraja ja murtolujuus. Mikäli jännitykset kasvavat myötörajaa suuremmaksi, materiaaliin tulee pysyviä muodonmuutoksia, kuten taipumia tai kiertymiä. Jännitysten ylittäessä murtolujuuden, rakenne murtuu. (Gere & Timoshenko 1990, 12–14, 35.)

Kuormat luokitellaan aikariippuvuuden mukaan pysyviin kuormiin, muuttuviin kuormiin ja onnettomuuskuormiin. Tietyt kuormat voivat olla onnettomuuskuormia tai pysyviä kuormia riippuen rakennuskohteen sijainnista, tällaisia kuormia ovat esimerkiksi maanjäristys- ja lumikuormat. Kuormat luokitellaan myös alkuperän perusteella välittömiksi tai välillisiksi, vaikutuskohdan vaihtelun perusteella kiinteiksi tai liikkuviksi sekä kuorman luonteen tai rakenteen vasteen perusteella staattisiksi tai dynaamisiksi. (SFS-EN 1990 + A1 + AC, 58.) Välitön kuorma kohdistuu rakenteeseen suoraan, kun taas välillinen kuorma välittyy jonkin toisen rakenteen kautta. Kiinteillä kuormilla tarkoitetaan kuormia, joiden sijainti rakenteessa ei muutu, tällaisia ovat esimerkiksi rakenteen omamassa ja kiinteät laitteet. Liikkuvat kuormat ovat kuormia, joiden vaikutuskohta vaihtelee, tällaisia voivat olla esimerkiksi ihmiset. Staattisen kuorman suunta ja suuruus pysyvät vakiona ja dynaamisen kuorman suunta ja suuruus muuttuvat säännöllisesti, epäsäännöllisesti tai sattumanvaraisesti (Sormat s.a.) Säiliöiden suunnittelussa otetaan huomioon seuraavat kuormat:

- a. nesteen aiheuttamat kuormat käytön ja nestepainekokeen aikana
- b. sisäpuolisen paineen aiheuttamat kuormat käytön ja nestepainekokeen aikana
- c. lämpötilaeroista aiheutuvat kuormat
- d. kiinteät kuormat
- e. eristyksen aiheuttamat kuormat
- f. jakautuneet liikkuvat kuormat
- g. liikkuvat pistekuormat
- h. lumikuormat

- i. vesisateen aiheuttamat kuormat
- j. tuulikuormat
- k. maanjäristyskuormitukset
- l. putkistojen ja liitososien kiinnityksestä aiheutuvat kuormat
- m. perustuksen painumasta aiheutuvat kuormat
- n. onnettomuuskuormat (EN 14015, 37).

Työohjeen esimerkkitalanteeksi on valittu Suomessa tyypillinen tilanne, jolloin huomioon otetaan kiinteät kuormat, sisäinen paine, lumikuormat ja tuulikuormat. Tässä työssä keskitytään siis näihin kuormituksiin.

### **Kiinteät kuormat**

Säiliön kaikkien rakenneosien sekä säiliöön pysyvästi kiinnitettyjen rakenneosien paino ovat kiinteitä kuormia (SFS-EN 14015). Työohjeen säiliön kiinteisiin kuormiin luetaan luvussa 2 esitellyt rakenneosat ja säiliön pohja sekä säiliön eristys.

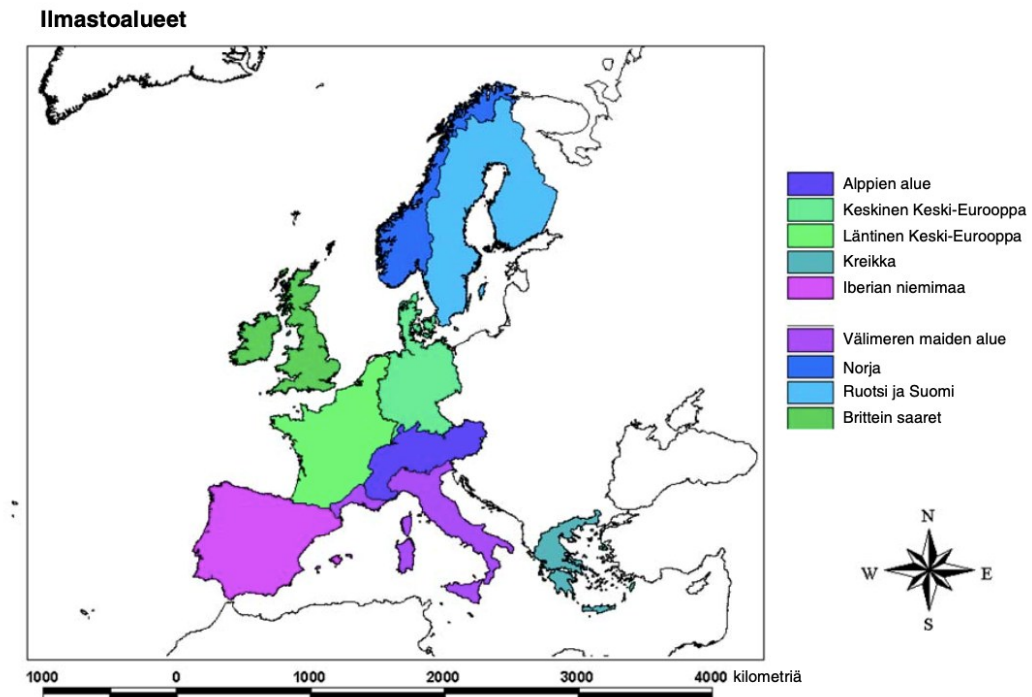
### **Säiliön sisäisen paineen aiheuttamat kuormat**

Säiliöille määritellään aina suunnittelupaine ja suunnittelualipaine. Suunnittelupaineella tarkoitetaan suurinta sallittua painetta varastoidun nesteen yläpuolella ja suunnittelualipaineella tarkoitetaan suurinta sallittua alipainetta varastoidun nesteen yläpuolella. Suunnittelupaine voi olla korkeintaan 500 mbar ja suunnittelualipaine voi olla korkeintaan 20 mbar. Suunnittelupaine ja -alipaine määräytyvät säiliötyypin mukaan. Sisäpuolisen paineen aiheuttamat kuormat ovat sisäpuolisen paineen pienin ja suurin arvo eli käytännössä suunnittelupaine ja -alipaine. (SFS-EN 14015, 15, 19, 25, 38.) Suunnittelupaineet ovat aina projektikohtaisia ja käytettävään säiliötyyppiin vaikuttaa se, mitä nestettä säiliössä on tarkoitus varastoida.

### **Lumikuormat**

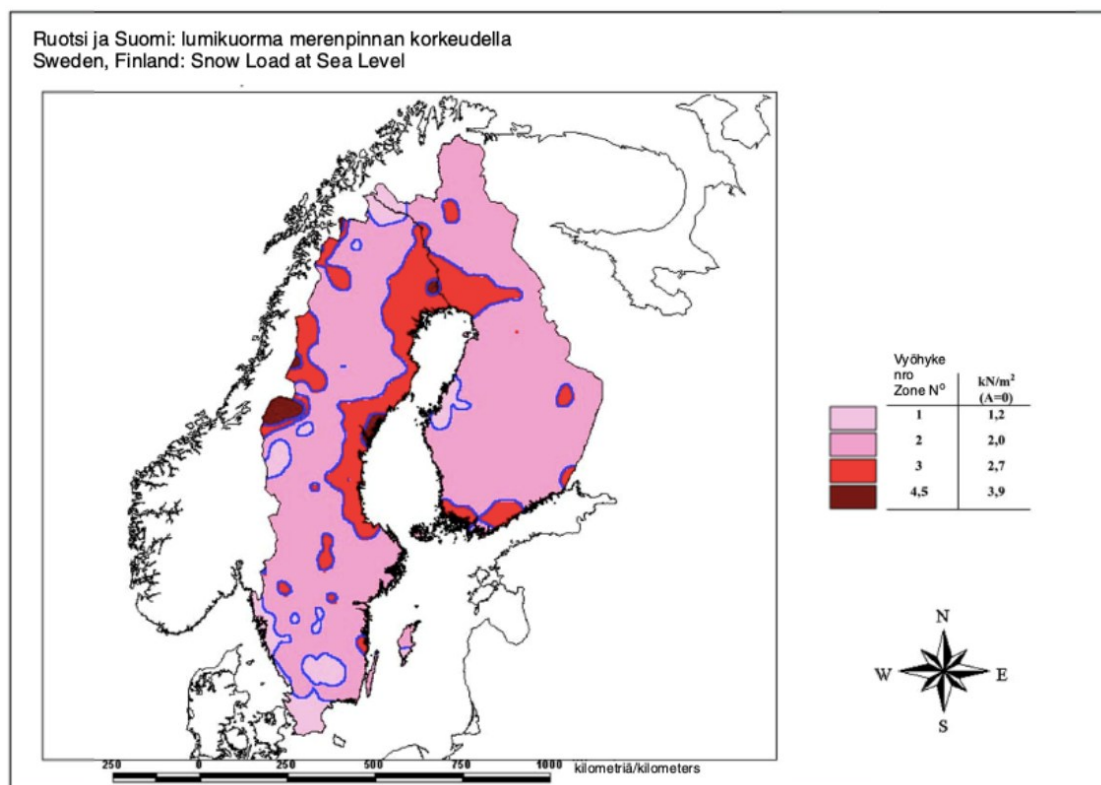
Lumikuormat luokitellaan muuttuviksi kiinteiksi kuormiksi sekä staattisiksi kuormiksi ja ne tulee määrittää aina tapauskohtaisesti. Lumikuormien määrittämisessä käytetään maanpinnan lumikuorman ominaisarvoa, jolla tarkoitetaan

alueelle tyypillistä vuotuista lumikuormaa. Euroopan maat on jaettu ilmaston mukaan alueisiin, mikä on esitetty kuvassa 5. (SFS-EN 1991-1-3, 14, 20–24.)



Kuva 5. Kuvateksti (SFS-EN 1991-1-3, 64)

Kuvasta 5 nähdään, kuinka Euroopan maat on jaettu ilmastoalueisiin. Ilmastoalue määrä sen millä laskukaavalla maanpinnan lumikuorman ominaisarvo lasketaan. Ilmastoalueet on edelleen jaettu vyöhykkeisiin. Suomen ja Ruotsin ilmastoalueen vyöhykkeet on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6. Lumikuorma merenpinnassa (SFS-EN 1991-1-3, 72)

Ilmastoalueen kartta kuvaa, kuinka ilmastoalue on jaettu vyöhykkeisiin vuotuisen lumikuorman mukaan. Lumikuorma ilmoitetaan merenpinnan korkeudella ja rakennuksen korkeus merenpinnasta otetaan huomioon maanpinnan lumikuorman ominaisarvoa laskettaessa. Lisäksi kullakin vyöhykkeellä on vyöhykenumero, jota käytetään kertoimena laskennassa. (SFS-EN 1991-1-3, 64.)

Kattoihin kohdistuvia lumikuormia laskettaessa tulee ottaa huomioon, että lumi voi kinostua moniin eri muotoihin. Kinostumista aiheuttavia tekijöitä ovat esimerkiksi katon muoto, pinnan karheus ja paikallinen ilmasto, kuten tuulisuus, lämpötilan vaihtelut ja sateiden todennäköisyys. Koska kattojen vuotuiset lumikuormat ovat maanpinnan lumikuormia pienemmät katon kaltevuuden takia, tulee kattojen lumikuormia määrittäessä käyttää katon muotokerrointa. Muotokerroin määräytyy katon kaltevuuskulman mukaan. (SFS-EN 1991-1-3, 26–32.)

### Tuulikuormat

Maa-alueilla erityisesti puuskat aiheuttavat tuhoa, sillä keskituulenopeus voi 1,5–2-kertaistua 5–10 sekunnin puuskissa (Ilmatieteenlaitos 2023). Säiliöitä

suunniteltaessa kolmen sekunnin tuulenpuuskan nopeusarvona tulee käyttää vähintään 45 m/s. Ostajan ja valmistajan tulee sopia asianmukainen tuulikuorman arvo, mikäli kolmen sekunnin tuulen puuskan nopeuden voidaan olettaa ylittävän 45 m/s alueella, jonne säiliötä suunnitellaan. (SFS-EN 14015, 39.)

Tuulikuormat luokitellaan muuttuviksi kiinteiksi kuormiksi. Tuulikuormat aiheuttavat paineita, jotka vaikuttavat voimina kohtisuoraan rakenteen pintaa vastaan ja kuormia määritettäessä tulee ottaa huomioon sekä ulkoiset että sisäiset paineet. Tuulikuormia mallinnettaessa ne yksinkertaistetaan paineiden tai voimien joukoksi, jonka vaikutus on sama kuin tuulenpuuskien. (SFS-EN 1991-1-4, 30, 42.)

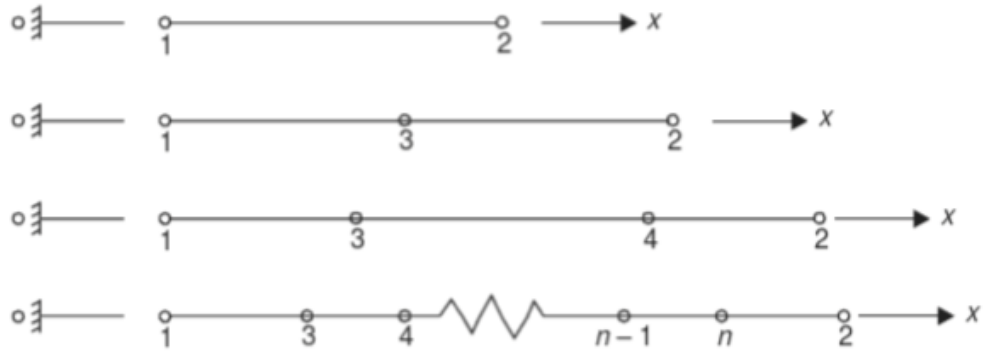
## **4 FEM**

FEM (finite element method) tai FEA (finite element analysis) eli elementtimenetelmä on suuntaa antava numeerinen analyysi- ja ongelmanratkaisumenetelmä, jota käytetään muun muassa rakenteiden lujuuslaskentaan. Menetelmässä monimutkainen rakenne yksinkertaistetaan pienempiin osiin, joista muodostuu elementtiverkko. Teknisissä ongelmissa on usein ääretön määrä muuttujia, mutta yksinkertaistetussa elementtiverkossa muuttujien määrä on äärellinen, minkä ansiosta ongelma voidaan ratkaista riittävän hyvällä tarkkuudella. Elementeissä on solmupisteitä, joiden tuntemattomat suureet ratkaistaan interpolointifunktiolla. Kaikkien elementtien ratkaisut muodostavat koko rakenteen ratkaisun. FEM-ohjelmistojen käyttäjä saattaa saada vaikutelman helposta ja nopeasta tavasta ratkaista erilaisia tekniikan ongelmia, mutta tulokset voivat olla jopa vaarallisia, jos käyttäjä ei ymmärrä elementtimenetelmän periaatteita. Nykypäivänä FEM-ohjelmistoja on paljon, joista Ansys on yksi yleisimmin käytetyistä. (Bhavikatti 2005, 1–7.)

### **4.1 Elementtien muodot**

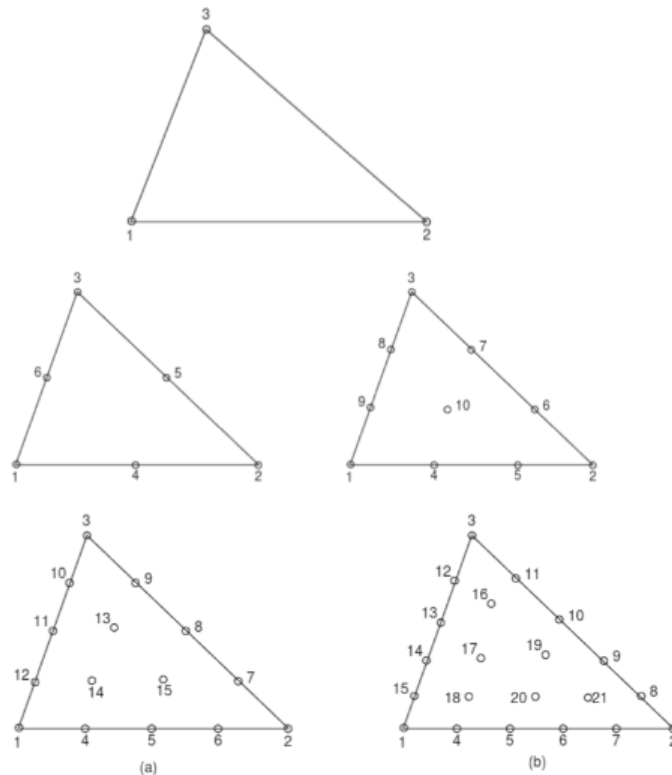
Käytettävien elementtien muodot riippuvat käsillä olevasta ongelmasta. Yksinkertaisen ongelman ratkaisuun on turhaa käyttää monimutkaisia elementtejä ja monimutkaista ongelmaa ei voida ratkaista liian yksinkertaisilla elementeillä. Käytettävä elementtityyppi vaikuttaa analyysin tarkkuuteen ja laskentatehoon. Elementit voidaan jakaa muotonsa puolesta neljään kategoriaan:

- yksiulotteiset elementit (kuva 7)
- kaksiulotteiset elementit (kuva 8)
- aksisymmetriset elementit (kuva 9)
- kolmiulotteiset elementit (kuva 10). (Bhavikatti 2005, 33.)



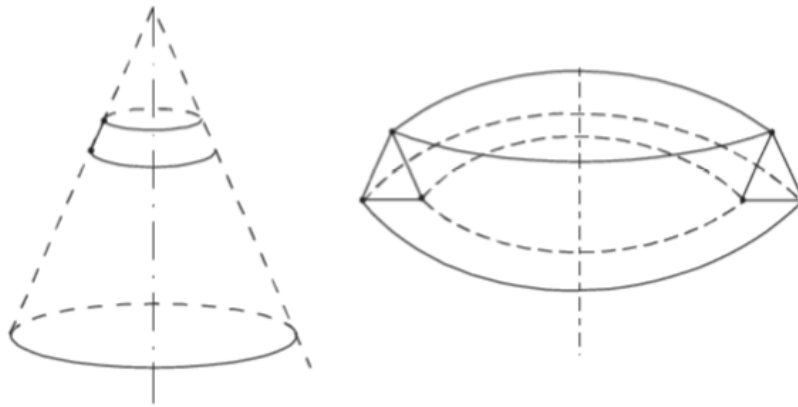
Kuva 7. Yksiulotteisia elementtejä (Bhavikatti 2005, 33)

Yksiulotteiset elementit ovat erilaisia viivoja ja ne soveltuvat yksiulotteisten ongelmien ratkaisuun (Bhavikatti 2005, 33). Yksiulotteiset ongelmat ovat tapauksia, joissa jännitykset ja muodonmuutokset voidaan esittää yhdestä suunnasta. Tällaisia tapauksia ovat yleensä esimerkiksi yksittäiset tangot ja palkit.



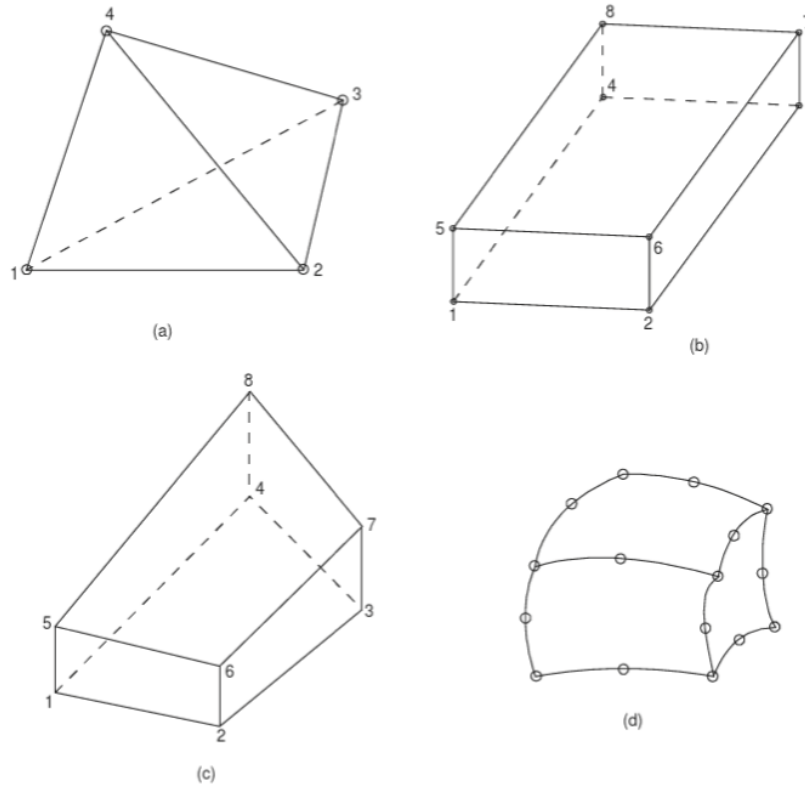
Kuva 8. Kaksiulotteisia kolmioelementtejä. (Bhavikatti 2005, 34–35)

Kaksiulotteisia elementtejä voidaan käyttää esimerkiksi levyrakenteiden analyysiin. Kaksiulotteiset elementit ovat yleensä kolmioita tai nelikulmioita ja ne voidaan jaotella edelleen sen mukaan, kuinka paljon niissä on solmupisteitä ja missä ne sijaitsevat. Yksinkertaisin kaksiulotteinen elementti on kolmio, jonka kulmissa on solmupisteet, solmupisteitä voi olla myös reunoilla tai keskellä. Myös kaarevareunaiset elementit ovat mahdollisia. (Bhavikatti 2005, 34–37.)



Kuva 9. Aksisymmetrisiä elementtejä (Bhavikatti 2005, 37)

Aksisymmetriset elementit ovat symmetrisiä akselin suhteen ja ne ovat yksi- tai kaksiulotteisia. Yksiulotteinen aksisymmetrinen elementti on viiva, joka on pyöräytetty akselin ympäri (kuvassa 9 vasemmalla). Kaksiulotteinen aksisymmetrinen elementti on rengas, jonka poikkileikkaus on kolmio tai nelikulmio (kuvassa 9 oikealla). Aksisymmetriset elementit sopivat kartioiden ja lieriöiden muotoisten kappaleiden, kuten säiliöiden tai putkien analyysiin. (Bhavikatti 2005, 37.)

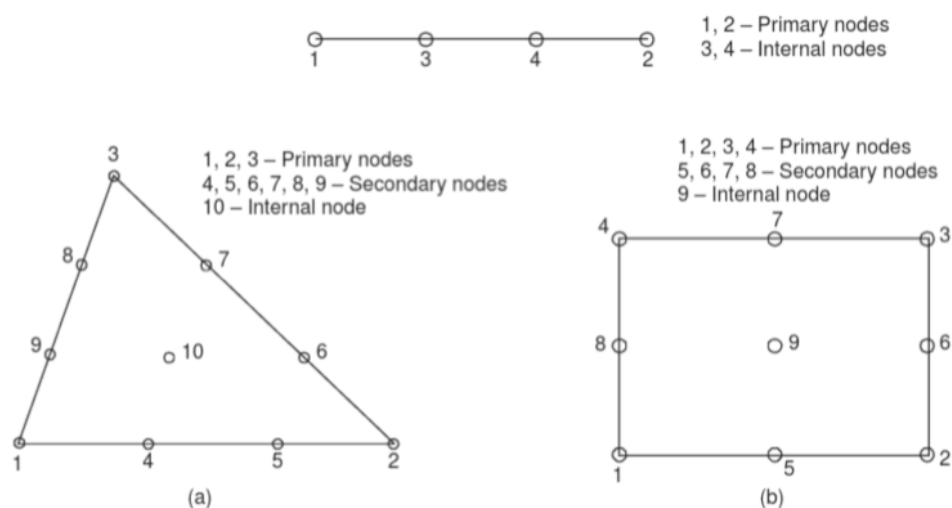


Kuva 10. Kolmiulotteisia elementtejä. (Bhavikatti 2005, 38)

Monimutkaisimmissa ongelmissa käytetään kolmiulotteisia elementtejä, jotka voivat olla monen muotoisia. Yksinkertaisin kolmiulotteinen elementti on tetraedri, jonka kulmissa on solmupisteet (a). Suorakulmaisen särmiön muotoista elementtiä sanotaan tiielementiksi (b). Myös kolmiulotteisen elementin reunat voivat olla kaarevia. (Bhavikatti 2005, 38.) Kolmiulotteisia elementtejä käytetään kolmiulotteisissa ongelmissa, eli silloin kun rakenteen muotoa ei voida esittää yksi- tai kaksiulotteisena tai kun kappaleeseen kohdistuu jännityksiä monelta eri suunnalta tai jännitysten aiheuttamat muodonmuutokset ovat monisuuntaisia.

## 4.2 Solmupisteet

Analyysin tarkkuuteen vaikuttaa myös solmupisteiden määrä ja sijainti elementissä. Kuvassa 11 on esitetty solmupisteitä erilaisissa elementeissä.



Kuva 11. Elementtien solmupisteet. (Bhavikatti 2005, 39)

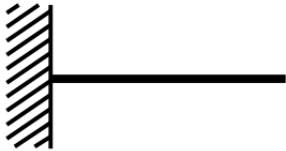
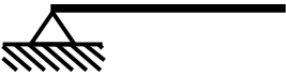
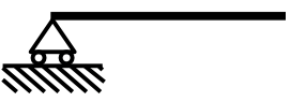
Elementeissä voi olla erilaisia solmupisteitä. Ulkoiset solmupisteet ovat elementin reunoilla ja ne voivat olla kahden tai useamman elementin yhteisiä solmupisteitä. Ulkoiset elementit jaetaan edelleen primäärisiin ja sekundäärisiin solmupisteisiin. Yksiulotteisissa elementeissä primääriset solmupisteet ovat elementtien päissä ja niiden välillä voi olla useita sisäisiä solmupisteitä. Kaksi- ja kolmiulotteisissa elementeissä primääriset solmupisteet ovat elementtien kulmissa ja sekundääriset solmupisteet ovat elementtien sivuilla. Solmupisteet ovat valittuja äärellisiä kohtia, joista perustuntemattomat ratkaisemalla voidaan ratkaista ongelma. Perustuntemattomat ovat esimerkiksi lujuusanalyyseissä materiaalin muodonmuutokset eli siirtymät. (Bhavikatti 2005, 39.)

Elementtejä, joissa on vain primääriset solmupisteet, sanotaan lineaarisiksi elementeiksi. Mitä enemmän elementissä on solmupisteitä, sitä korkeamman asteen elementtejä ne ovat. Korkeamman asteen elementeissä on myös monimutkaisempia muotofunktioita. Samassa rakenteessa voidaan käyttää lineaarisia sekä korkeamman asteen elementtejä, esimerkiksi kohdassa, johon kohdistuu suurempia kuormia, voidaan käyttää korkeamman asteen elementtejä. (Bhavikatti 2005, 33–39, 98.)

### 4.3 Reunaehdot

Reunaehtojen huolellinen määrittäminen on avainasemassa onnistuneessa lopputuloksessa (Bhavikatti 2005, 6). Elementtimenelmässä reunaehdot määritetään kappaleen tuennan mukaan (Hietikko 2021, 172). Tuenta kuvaa sitä,

kuinka kappale pääsee liikkumaan ja lujuusopissa tuentaa kuvataan kaksiulotteisissa ongelmissa kuvan 12 osoittamalla kolmella tavalla.

|   |   |
|---|---|
|  | <p><b>Kiinteä tuki</b><br/> - 0 vapausastetta<br/> - kolmen arvoinen tuki</p> |
|  | <p><b>Niveltuki</b><br/> - 1 vapausaste<br/> - kahden arvoinen tuki</p>       |
|  | <p><b>Rullatuki</b><br/> - 2 vapausastetta<br/> - yhden arvoinen tuki</p>     |

Kuva 12. Tuentatavat (kuva muokattu Hietikko 2004, 23 mukaan)

Kiinteä tuki tarkoittaa käytännössä tukea, joka estää kappaleen liikkumisen kokonaan ja tuennassa on ”nolla vapausastetta”. Sitä sanotaan kolmen arvoiseksi tueksi, koska se sulkee pois kolme vapausastetta. Niveltuki on tuki, joka sallii kappaleen liikkeen nivelellisesti, mutta pitää kappaleen muuten paikallaan tuen kohdalta. Niveltukea sanotaan myös kahden arvoiseksi tueksi ja siinä on yksi vapausaste. Keinulauta on mekanismi, jossa on keskellä niveltuki. Rullatuki taas on yhden arvoinen tuki ja siinä on kaksi vapausastetta. Käytännön esimerkki rullatuesta voisi olla kottikärry, jota voidaan työntää edes takaisin, mutta se on maahan tuettu pyörän kohdalta.

Kiinteät rakenteet tulee tukea jollain tavalla, jottei ne liiku ja ne tulee olla staattisesti määritellyjä. Kappale on staattisesti määritetty, kun siinä on nolla vapausastetta. Kaksiulotteisissa ongelmissa tämä käytännössä tarkoittaa:

- yhtä kiinteää tukea
- yhtä niveltukea ja yhtä rullatukea, tai
- kolmea rullatukea.

Jos tukia on liikaa tai liian vähän, on rakenne staattisesti epämääräinen. (Hietikko 23–24.) Kolmiulotteisissa ongelmissa vapausasteita on kuusi. FEM-ohjel-

miston reunaehdot tulee määrittää mahdollisimman tarkasti vastaamaan todellisia tuentoja. Jo pienikin poikkeama todellisesta tuentatavasta saattaa aiheuttaa radikaaleja muutoksia tuloksiin ja reunaehtoien puutteellinen tai virheellinen määrittäminen onkin yleisin syy virheellisiin FEM-laskennan tuloksiin. (Hietikko 2021, 172–173.)

#### 4.4 Elementtiverkko

Verkotuksella tarkoitetaan sitä, että halutulle rakenteelle luodaan useista elementeistä koostuva elementtiverkko. Elementtien määrä, koko ja muoto vaikuttavat verkotuksen onnistumiseen. Elementtiverkossa voi olla epäjatkuvuuksia, jotka liittyvät rakenteen geometriaan, kuormiin, reunaehtoihin tai materiaaliin. Geometrinen epäjatkuvuus on sellainen, että rakenteen muodossa tapahtuu yhtäkkäinen muutos. Kuormien epäjatkuvuus on sitä, kun kuorma kohdistuu johonkin tiettyyn kohtaan tai sen voimakkuus muuttuu äkillisesti. Kun reunaehto muuttuu äkillisesti tai rakenteen materiaali vaihtuu, on tällaisessa kohdassa myös epäjatkuvuus. Verkottaessa tulee huomioida, että epäjatkuvuuksissa on solmukohtia. (Bhavikatti 2005, 156.) Mikäli epäjatkuvuuskohdissa ei ole solmupisteitä tai niitä on liian vähän, ei rakenteeseen kohdistuvat jännitykset siirry elementistä toiseen oikein, eikä analyysi vastaa todellisuutta.

Elementtien koko vaikuttaa analyysin tarkkuuteen. Mitä pienempiä elementtejä käytetään, sitä tiheämpi verkko on ja sitä tarkempi analyysistä tulee. Toisaalta voidaan myös käyttää korkeamman asteen elementtejä, jolloin myös saadaan tarkempia tuloksia. Tiheässä verkossa ja korkeamman asteen elementeissä on kuitenkin enemmän solmupisteitä, joista ohjelmisto ratkaisee tuntemattomia, joten laskenta voi viedä kohtuuttoman paljon aikaa ja tiedostosta tulee raskaampi ja se vie enemmän tietokoneen muistia. On vaikea määrittellä, käytetäänkö mieluummin tiheämpää verkkokokoa vai korkeamman asteen elementtejä. On siis tärkeää löytää sopiva verkkokokoko ja elementit, jotka antavat nopeasti riittävän tarkan tuloksen. (Bhavikatti 2005, 159.)

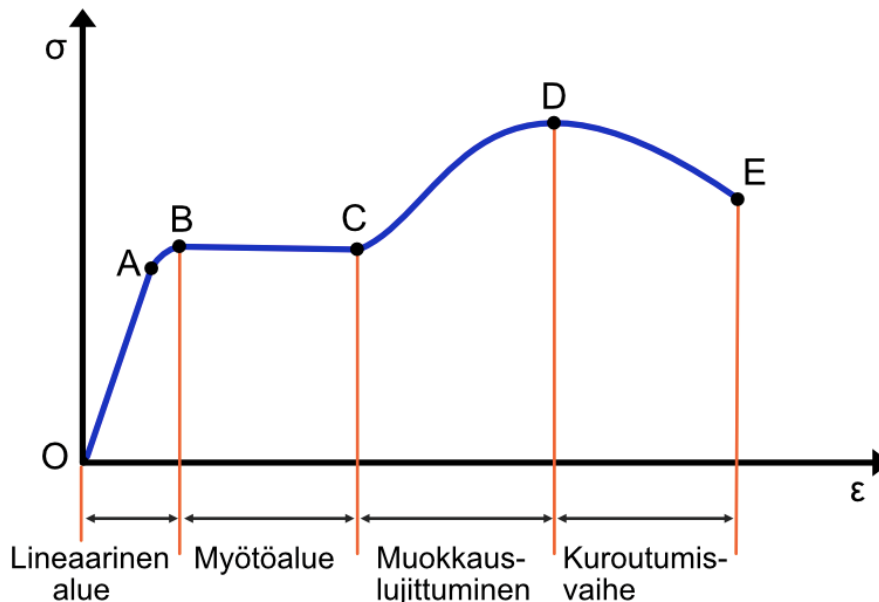
#### 4.5 FEM-laskennan tulokset

Elementtimenetelmää käytetään laajasti erilaisissa insinööri-ongelmissa kuten värähtelymekaniikassa, virtaustekniikassa ja termodynamiikassa (Hietikko 2021, 170). FEM-ohjelmistoilla voidaan tuottaa useita erilaisia analyyskejä ja

oleellista on tietää mikä laskentatapa on milloinkin tarpeen. Tässä työssä keskitytään työohjeen kannalta oleellisiin analyyseihin.

#### 4.5.1 Lineaarinen analyysi

Rakenteiden lujuuslaskennassa käytetään yleensä lineaarista analyysiä, jolloin tehdään olettaus, että kuormat ovat staattisia, eli paikallaan pysyviä ja jännitykset pysyvät materiaalin suhteellisuusrajan alapuolella (Hietikko 2021, 174). Materiaalien ominaisuuksia on tutkittu vetokokeilla, joiden perusteella tiedetään tiettyjen materiaalien jännityksen ja venymän suhde, jota kuvataan kuvan 13 mukaisella jännitysvenymäkäyrällä (Gere & Timoshenko 1990, 22).



Kuva 13. Jännitysvenymäkäyrä (kuva muokattu Gere & Timoshenko 1990, 13 mukaan)

Jännitysvenymäkäyrällä kuvataan materiaalin venymää ( $\epsilon$ ) jännityksen ( $\sigma$ ) kasvaessa. Useimpien rakennusmateriaalien käyttäytyminen jännitysvenymäkäyrän alkuosassa (O-A) on lineaarisesti kimmoista, ja aluetta kutsutaan lineaariseksi tai kimmoiseksi alueeksi. Materiaali on kimmoisaa, eli palautuu takaisin alkuperäiseen muotoonsa, jos siihen kohdistuvat kuormitukset pysyvät suhteellisuusrajan A alapuolella. Pisteestä A jälkeen materiaali alkaa venyä enemmän suhteessa kuormituksen lisääntymiseen, kunnes materiaali saavuttaa myötörajan B, minkä jälkeen siihen tulee pysyviä muodonmuutoksia. Ra-

kenneteräksen jännitysvenymäkäyrä on lineaarisella alueella lähes pystysuora, mikä tarkoittaa, että materiaali on hyvin jäykkää, eikä se juurikaan veny ennen myötörajaa. Jännitysvenymäkäyrän lineaarisella alueella pätee Hooken laki. 1600-luvulla Robert Hooke, oli ensimmäinen, joka tutki ja testasi materiaalien elastisia ominaisuuksia ja huomasi lineaarisen suhteen materiaaliin kohdistetun kuorman ja materiaalin venymän välillä. Noin sata vuotta myöhemmin Thomas Young määritteli kimmomoduulin materiaalin ominaisuutena, joka kuvaa kuinka paljon materiaali venyy suhteessa jännitykseen. Hooken laki on laskukaava, jota nykyisin kuvataan kimmomoduulin kautta. (Gere & Timoshenko 1990, 12–23.) Lineaariset analyysit perustuvat siis Hooken lakiin ja kimmomoduuliin, joka on materiaalikohtainen suure. Jotta lineaariset analyysit onnistuisivat mahdollisimman tarkasti, on todella tärkeää, että materiaalin ominaisuudet on määritetty oikein.

#### 4.5.2 Von Misesin myötöehto

Koska eri materiaalien ominaisuudet ja käyttäytyminen ovat hyvin erilaisia ja kuormitustilanteet voivat olla monimuotoisia, ei lujuusopissa ole olemassa yleispätevää teoriaa kaikkiin tilanteisiin ja kaikille materiaaleille. On kuitenkin kehitetty lukuisia erilaisia vauriohypoteeseja, joista kukin pätee kohtuullisen hyvin joillekin materiaaleille joissakin olosuhteissa. Yksi hypoteeseista on vakiovääristymisenergiyahypoteesi (VVEH), josta käytetään myös muun muassa nimitystä von Misesin myötöehto. (Outinen & Salmi 2004, 339, 349.)

Äsken mainitusta vetokokeesta voidaan määrittää materiaalin vetomyötöraja ( $R_e$ ) ja vetomurtolujuus ( $R_m$ ), näiden lisäksi joillekin materiaaleille voidaan määrittää puristuskokeen avulla tyssäysraja ( $R_{-e}$ ) ja puristusmurtolujuus ( $R_{-m}$ ) ja vääntökokeella leikkausmyötöraja ( $\tau_s$ ) ja leikkausmurtolujuus ( $\tau_B$ ). Sitkeiden materiaalien, kuten teräksen, veto- ja puristuskokeiden tulokset ovat lähellä toisiaan ja leikkausmyötöraja on hieman yli puolet vetomurtolujuudesta:

- $R_e \approx R_{-e}$
- $R_m \approx R_{-m}$
- $\tau_s \approx 0,58R_e$

Tällaisten sitkeiden materiaalien käyttäytymisen von Misesin myötöehto pysyy ennustamaan erittäin hyvin, joten se sopii käytettäväksi teräsrakenteen analysoinnissa. (Outinen & Salmi 2004, 343, 355–357.)

Jännitystä on olemassa kahdenlaista; normaalijännitys ja leikkausjännitys. Normaalijännitys syntyy, kun kappaleeseen vaikuttavat voimat ovat kappaleen pituusakselin suuntaisia, kun taas leikkausjännitys syntyy, kun kappaleeseen vaikuttavat voimat ovat leikkauspinta-alan suuntaisia (Gere & Timoshenko 1990, 3–4, 27–28). Von Misesin myötöehto on jännityshypoteesi, joka yhdistää normaali- ja leikkausjännityksen. Tämän lisäksi jännitykset voivat vaikuttaa eri suuntiin x-, y- ja z-akseleiden suhteen. Kolmiaksaalisiin ongelmiin von Misesin myötöehto vastaa hyvin, sillä se ottaa huomioon kaikki kolme jännityksen ääriarvoa (Outinen & Slami 2004, 350).

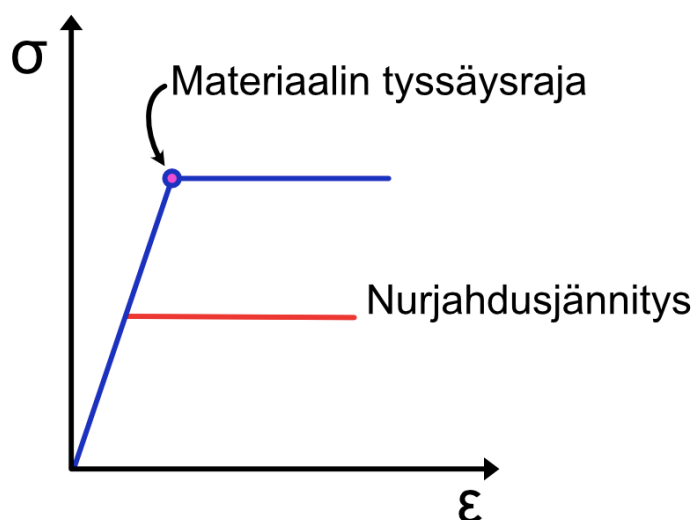
Kun rakenne, kuten palkki, joutuu taivutukseen, syntyy taivutusjännitystä, mikä tarkoittaa normaalijännityksen vaihtelua; palkin toisella puolella syntyy vetojännitystä ja toisella puristusjännitystä. Säiliöt ovat kuorirakenteita, joissa kuormitus on pääasiassa vetoa, eikä merkittävää taivutusjännitystä esiinny. Kuorirakenteissa jännitykset jakautuvat pinnan tasossa, jolloin puhutaan kalvojännityksistä, jotka vaikuttavat tasaisesti poikkileikkauksen läpi. Taivutusjännitykset puolestaan vaihtelevat poikkileikkauksen eri kohdissa. Säiliöiden rakenneanalyysissä tarkastellaan sekä kalvo- että taivutusjännityksiä. Työohjeessa kalvo- ja taivutusjännitysten analysointiin käytetään Von Misesin myötöehtoa.

### 4.5.3 Stabiliateettianalyysi

Stabiliateettianalyysi tulee tehdä säiliölle niissä kuormitustapauksissa, jossa nurjahdus, lommahdus ja kiepahdus ovat mahdollisia. Näiden kaikkien vauriomekanismien kohdalla kyse on samasta ilmiöstä, ja englannin kielelle ne kaikki kääntyvätkin ”buckling” (MOT sanakirja 2025). Kaikissa on kyse sisäisen tasapainon eli stabiliateetin menetyksestä. Nurjahduksessa pituuteensa nähden hoikka rakenne, kuten sauva tai palkki, taipuu pitkittäissuuntaisen voiman ansiosta. Lommahduksella tarkoitetaan yleensä levyn tai kuorirakenteen epämuodostumista pitkittäissuuntaisessa puristuksessa. Klassinen esimerkki lommahduksesta on alumiinitölkki, jota puristetaan kasaan. Kiepahduksella (lateral buckling) tarkoitetaan puristuksesta johtuvaa rakenteen kiertymää tai

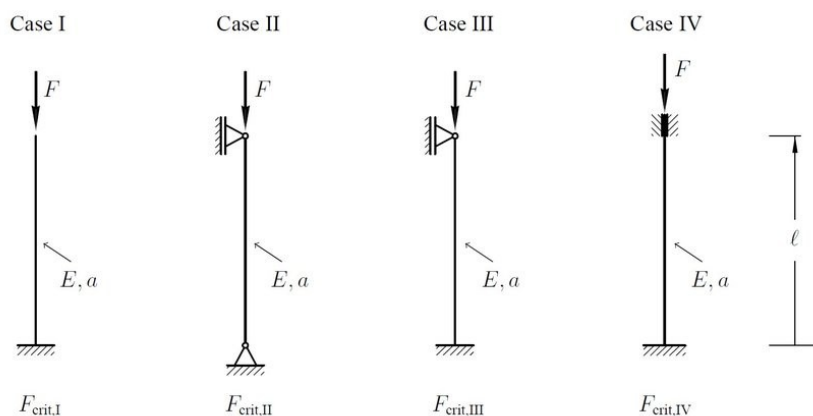
vääntymää. (Gere & Timoshenko 1990, 577–579; Outinen & Salmi 2004, 279–280.)

Kuten aiemmin mainittiin, joillekin materiaaleille on puristuskokeessa voitu määrittää tyssäysraja. Puristettaessa materiaali pullistuu ja litistyy, ja kuormituksen kasvaessa vastustuskyky lyhenemiselle kasvaa ja tapahtuu tyssäntyminen (Gere & Timoshenko 1990, 17–18). Kuitenkin, jos kyseessä on pituutensa nähden huomattavan hoikka rakenne, materiaali ei puristu kasaan, vaan se alkaa taipua jo paljon ennen tyssäysrajan saavuttamista (Mörkö Engineering Oy s.a.) Kuvassa 14 on esitetty esimerkki puristuskäyrästä.



Kuva 14. Tyssäysraja ja nurjahdusjännitys (kuva muokattu Mörkö learning -videon pohjalta)

Kuvaajan pystyakselilla on jännitys ja vaaka-akselilla puristuma, sininen käyrä edustaa puristuskokeella saatavaa tulosta, johon on merkitty tyssäysraja. Punainen viiva kuvastaa kriittistä rajaa, jossa kyseisestä materiaalista valmistettu hoikka kappale alkaa pullistumisen sijaan taipua, eli nurjahtaa. (Mörkö Engineering Oy s.a.) 1700-luvulla Leonard Euler löysi kaavat, joilla voidaan selvittää hoikan kappaleen kriittinen nurjahduskuormitus. Euler esitteli sauvan tuennan mukaiset neljä nurjahdustapausta, jotka on esitetty kuvassa 15. (Outinen & Salmi 2004, 285–288.)



Kuva 15. Eulerin nurjahdustapaukset (ResearchGate 2025)

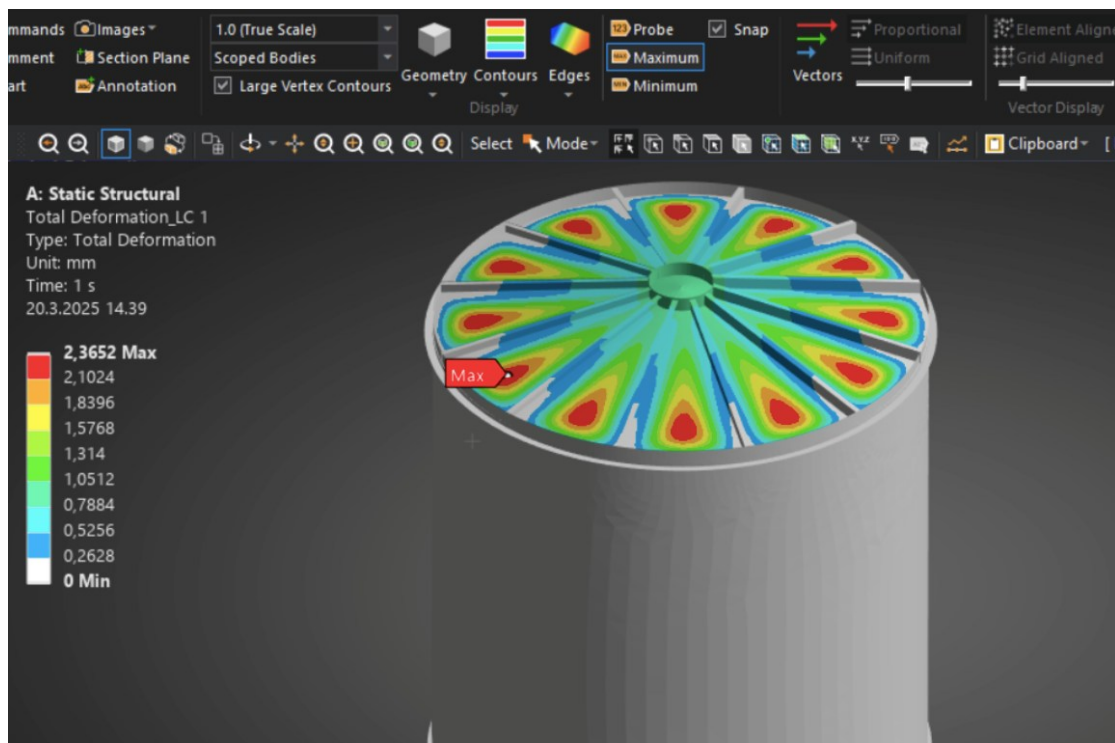
Kullekin tapaukselle Euler määrittäi nurjahdusjännityksen laskukaavan eli nurjahduksen peruskaavat. Kun sauvaan kohdistettu puristusvoima ylittää sallitun rajan, sauva voi taipua useisiin erilaisiin muotoihin voiman suuruudesta ja Eulerin tapauksesta riippuen. Kullekin Eulerin tapaukselle voidaan määrittää useita erilaisia nurjahdusmuotoja ja kriittinen jännitys, joka kyseisen muodon aiheuttaa. Käytännössä erilaisia nurjahdustapauksia on kuitenkin rajattomasti, mutta Eulerin peruskaavoilla rakenteen stabiilius voidaan määrittää kohtalaiseen tarkasti. (Outinen & Salmi 2004, 285–290.) Työohjeen kaltaisen säiliön kohdalla nurjahdustapaukset ovat huomattavasti monimutkaisempia.

FEM-ohjelmistossa määritetään, kuinka monta ominaismuotoa tietylle kuormitusyhdistelmälle lasketaan. Sopiva ominaismuotojen määrä on aina tapauskohtainen ja vaatii suunnittelijan harkintaa. Stabiiliteettianalyysi ei ole valmis, kun ohjelmisto antaa rakenteelle lasketut ominaismuodot, vaan analyysille on aina tehtävä standardin SFS-EN 1993 mukainen jälkikäsitteily (SFS-EN 1993-1-1, 35). Stabiiliteettianalyysin kannalta on tärkeää, että rakenteen reunaehdot ja kontaktit on luotu oikein ja että materiaaliominaisuudet on määritelty riittävästi tarkasti.

#### 4.5.4 Kokonaismuodonmuutokset ja jännitykset

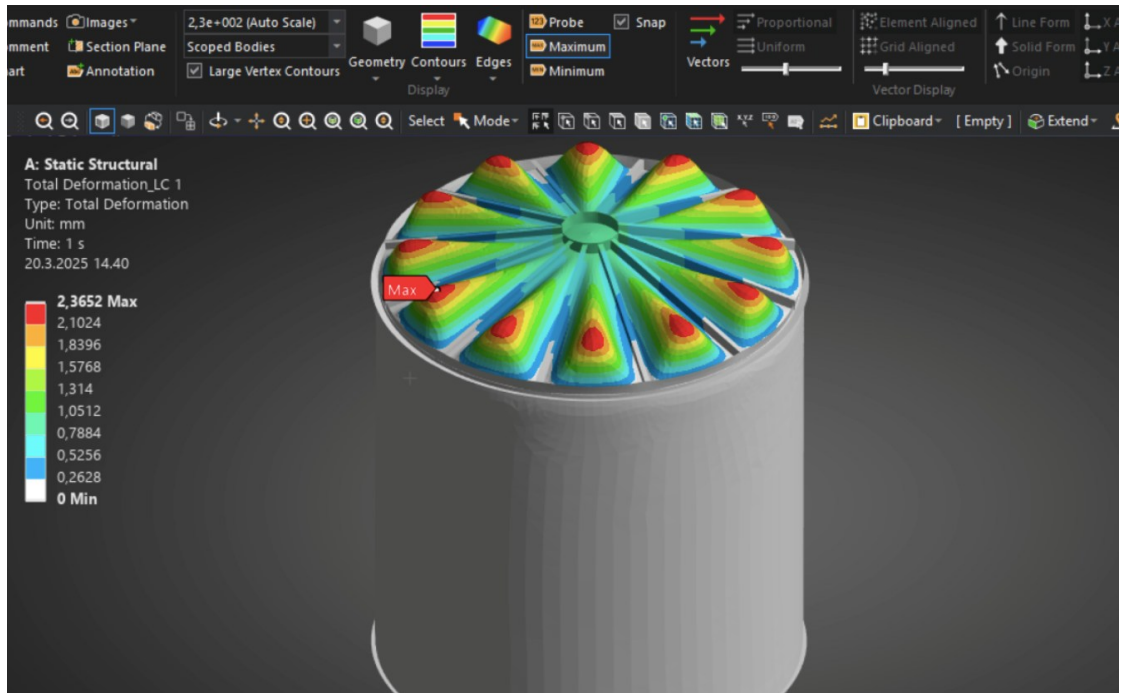
FEM-ohjelmistoissa tuloksia tarkastellaan laskennan jälkeen muodonmuutoksista ja jännityksistä. Tulokset esitetään väripintoina ja korkeuskäyriä. (Hietikko 2021, 174.) Kokonaismuodonmuutoksilla esitetään, kuinka rakenteen muoto muuttuu siihen kohdistuvan kuormituksen ansiosta. Tuloksista saadaan selville, missä kohtaa rakennetta suurimmat muodonmuutokset tapahtuvat.

Näissä kohdissa rakenne on alttiina muodonmuutoksille ja vaurioitumiselle. Tuloksista nähdään myös suurimmat siirtymät eli kuinka paljon rakenne siirtyy alkuperäisestä muodostaan. Kuvissa 16 ja 17 on esitetty esimerkissäiliön kokonaismuodonmuutokset eräällä kuormitustapauksella.



Kuva 16. Kokonaismuodonmuutokset

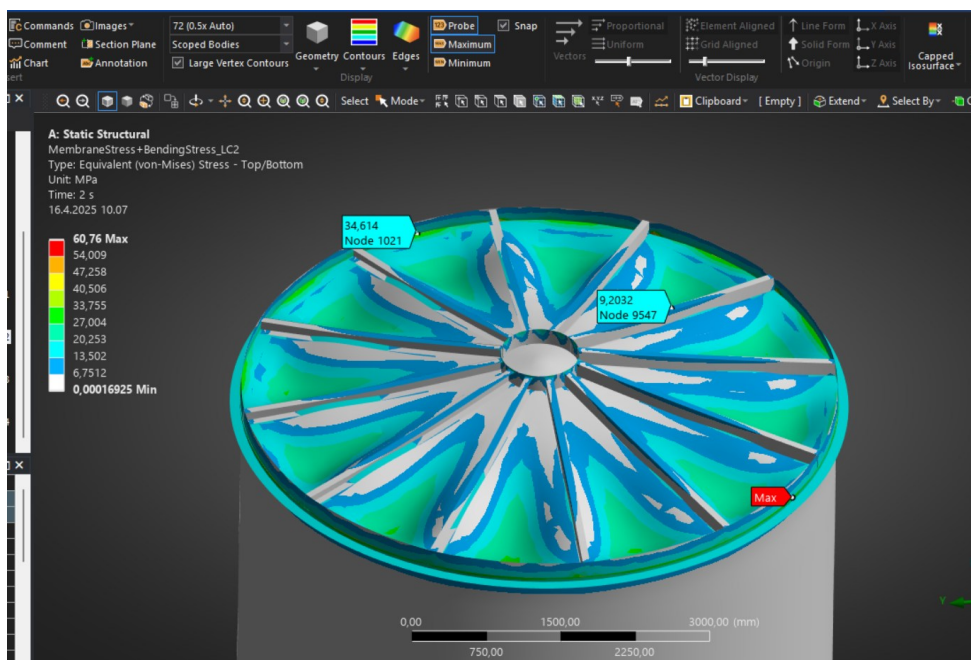
Kuvassa 16 on esitetty säiliön muodonmuutokset todellisella skaalauksella. Rakenteen muoto ei silmin nähden muutu, sillä suurimmat muodonmuutokset ovat alle 3 mm.



Kuva 17. Kokonaismuodonmuutokset skaalattuna

Kuvassa 17 on esitetty sama tilanne eri skaalauksella, mistä nähdään, että säiliön kattolevyt siirtyvät ylöspäin. Skaalausta vaihtamalla nähdään selvemmin mihin suuntaan ja mistä kohdista rakenteen muoto muuttuu.

Von Misesin jännityksiä tarkastellessa kiinnitetään huomiota suurimpiin jännityksiin ja verrataan niitä materiaalin myötörajaan. Kuvassa 18 on esitetty esimerkiksi säiliön taivutus- ja kalvojännitykset eräessä kuormitustilanteessa.

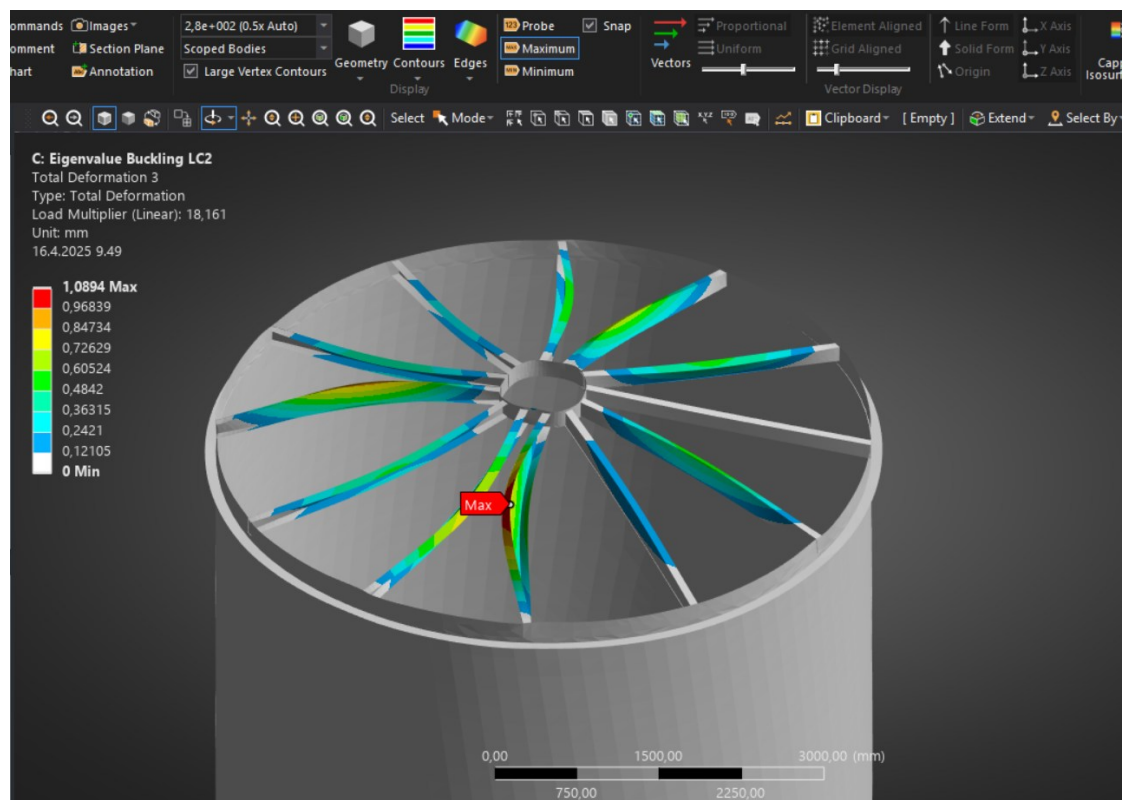


Kuva 18. Taivutus- ja kalvojännitykset

Kuvasta nähdään, kuinka suuria jännityksiä rakenteessa esiintyy, esimerkiksi valkoisilla alueilla jännitykset ovat 0–6,8 MPa. Maximum-toiminnolla voidaan selvittää missä kohtaa rakennetta sen suurin jännitys on, ja probe-toiminnolla voidaan selvittää tietyn kohdan tarkka jännitys. Jännityksiä verrataan materiaalin myötörajan ja jos jännitykset ovat alle myötörajan voidaan todeta, että rakenne kestää kyseisen kuormitustilanteen. Kuvan tapauksessa jännitykset ovat reilusti alle myötörajan.

Kuten esimerkkitapauksella, symmetrisellä rakenteella, johon kohdistuu tasaisia kuormituksia, muodonmuutosten ja jännitysten tulee olla symmetriset. Tällaisissa tapauksissa epäsymmetriset muodonmuutokset ja jännitykset voivat kertoa esimerkiksi kuormitusten virheellisestä mallintamisesta, huonosta verkotuksesta tai muusta huolimattomuudesta. Stabiilitettianalyysin tulokset taas voivat olla hyvinkin monimuotoisia myös symmetrisillä rakenteilla.

Stabiilitettianalyysissä FEM-ohjelma laskee määritellyn määrän ominaismuotoja kullekin kuormitusyhdistelmälle. Kuvassa 19 on esitetty yksi ohjelman laske kema ominaismuoto.



Kuva 19. Stabiilitettianalyysi

Stabiiliteettianalyysin ominaismuodot voivat olla keskenään hyvinkin eri näköisiä eikä välttämättä lainkaan symmetrisiä, vaikka rakenne ja kuormitukset olisivatkin symmetriset. Analyysi antaa kullekin ominaismuodolle kuormituskerroimen (load multiplier), joka kertoo, kuinka moninkertainen kuormituksen tulee olla, jotta annettu ominaismuoto tapahtuisi. Mitä pienempi kuormituskerroin on, sitä suuremmalla todennäköisyydellä rakenteella on stabiiliteettiongelmia. Kuormituskerroin on määritelty ideaalirakenteelle, mutta todellisuudessa mikään rakenne ei kuitenkaan ole ideaali ja tästä syystä tarvitaan standardin mukainen jälkikäsitely.

## 5 TYÖOHJEEN TEKEMINEN

Tavoitteenani oli tehdä selkeä ja helposti luettava työohje. Hyvässä työohjeessa etsittävän tiedon tulee löytyä helposti ja ohjeet ovat järkevästi ja senelty ja siinä on havainnollistavia kuvia jokaisesta vaiheesta. Olen pyrkinyt tekemään työohjeen yksityiskohtaisesti, niin, että uusikin työntekijä, joka ei välttämättä ole käyttänyt lainkaan Ansysiä, pystyy tekemään projektinsa pelkääntään työohjetta käyttäen.

### Esimerkkisäiliöt

Afryn työntekijän opastuksella suunnittelin esimerkkisäiliöitä, joista tein rakeneanalyysit. Kävimme työn vaiheet läpi kolmessa puolentoista tunnin mittaisessa osassa Teamsin välityksellä. Jokaisen opastuskerran jälkeen tein omia säiliöitäni itsenäisesti samalla kirjoittaen työohjetta. Tein useita esimerkkisäiliöitä, sillä halusin vertailla eri tapoja tehdä asioita. Kävi ilmi, että kun asiat tekee järkevässä järjestyksessä, saattaa jokin seuraava vaihe olla suoraviivaisempi. Esimerkkisäiliöiden edetessä otin näyttökuvia työohjetta varten. Työohjeen tein englanniksi, sillä Afry on kansainvälinen suunnittelufirma, jolla on myös Suomessa paljon työntekijöitä, joiden äidinkieli ei ole suomi.

Tein esimerkkisäiliöt Ansysin opiskelijalisenssillä. Lisenssiin liittyy rajoitteita, jotka aiheuttivat ongelmia. Opiskelijalisenssiä ei ole tarkoitettu varsinaisten rakenteiden analysointiin, vaan pienempien tehtävien tekemiseen, minkä ansi-

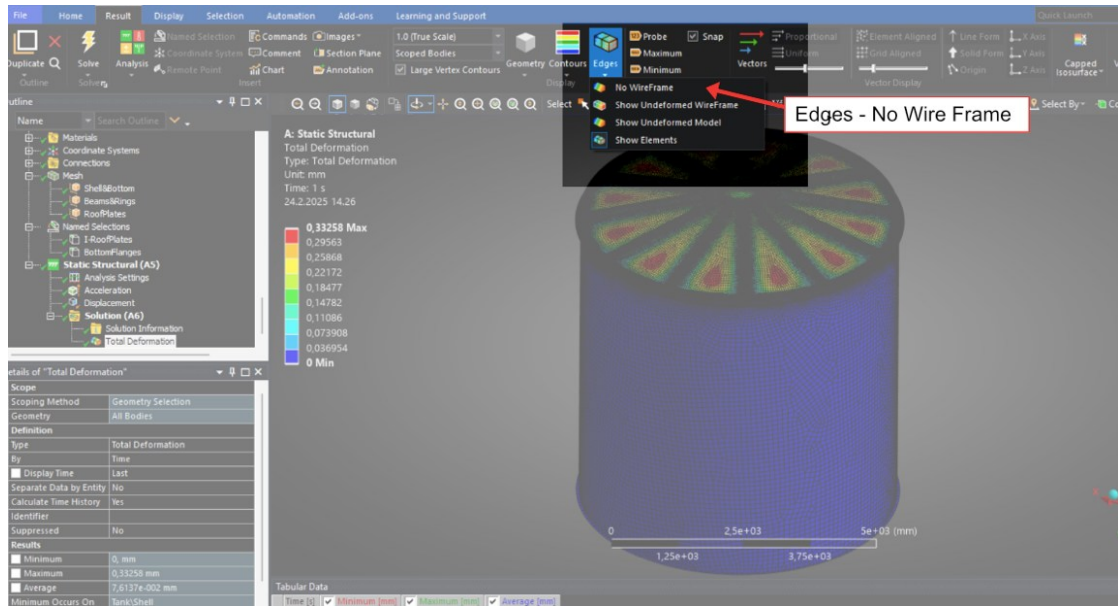
osta siinä on rajoitettu elementtien ja solmupisteiden yhteismäärää. Verkotuksen tekeminen onnistui melko pienellä verkkokoolle, mutta analyysilaskentaa ohjelma ei suorittanut, ennen kuin verkkokokoa oli pienennetty. Tein useita erilaisia variaatioita, jotta sain verkotuksen sopimaan lisenssin rajoituksiin, mutta niin, että verkko oli tasainen ja mahdollisimman pieni kriittisimmissä kohdissa. Elementtiverkon suuren koon takia esimerkkisäiliöiden analyysijä ei voida pitää luotettavina, mutta verkkoa pienentämällä sain kuitenkin loput vaiheet dokumentoitua työohjetta varten. Työohje sisältää myös ohjeet oikean verkkokoon valintaan, eikä esimerkkisäiliön liian suuri verkkokokoko vaikuta työohjeen avulla analysoitavien säiliöiden luotettavuuteen.

## **Kuvat**

Työohjeen kuvat koostuvat näyttökuvista ja ne havainnollistavat tekstiä ja auttavat lukijaa hahmottamaan, mistä milloinkin tulee klikata tai mihin täytyy kiinnittää huomiota. Yhden näyttökuvan ottaminen on hyvin nopea prosessi, mutta työohjeen kuvitukseen kului kuitenkin todella paljon aikaa, sillä jokainen kuva on tarkkaan harkittu. Olen pyrkinyt tekemään kuvat mahdollisimman selkeiksi ja helppolukuisiksi. Kuvan selkeyteen vaikutin kuvan rajauksella ja lisäämällä kuviin hahmotusta helpottavia elementtejä. Näyttökuvien rajaukset suunnittelin sen mukaan, mikä kulloisessakin vaiheessa on oleellista. Ei ole järkeä esittää näyttökuvaa koko ruudusta, jos ohje käsittelee vain joitakin pientä osaa. Toiset näyttökuvat toimivat parhaiten sellaisena kuin ne ovat, mutta moniin kuviin lisäsin graafisen suunnittelun ohjelmalla seuraavia elementtejä:

- hämärrys ja valaistus
- kehykset
- tiivistetty ohjeteksti
- nuolet ja aaltosulku
- numerointi

Kuvassa 20 on havainnollistettu hämärrys ja valaistus sekä lyhyt ohjeteksti ja nuoli.



Kuva 20. Työohjeen kuva

Näyttökuvan päälle on laitettu läpikuultava filtti, joka ”hämärtää” epäoleelliset asiat ja oleellinen asia on ”valaistu”, eli kyseisessä kohdassa filttiä ei ole. Valaisun tarkoitus on saada ohjeen lukija heti kohdistamaan katseensa oikeaan paikkaan, jottei hänen tarvitsisi etsiä haluttua painiketta. Näyttökuvien päälle on laitettu ohjetekstit ja nuoli, joka osoittaa mistä tulee painaa tai mihin tulee kiinnittää huomiota. Hyvin usein ohjetekstissä lukee sama teksti kuin itse näyttökuvassa, sillä näyttökuvan tekstit eivät välttämättä näy lopullisessa asiakirjassa. Toisinaan ohjeteksti voi olla myös pidempi, mutta olen pyrkinyt pitämään ne mahdollisimman lyhyinä, jottei kuvaan tule liikaa täytettä. Useissa kuvissa tekstilaatikoita on useita ja joissakin kohdissa on tärkeää, että asiat tehdään tietyssä järjestyksessä, jolloin olen liittänyt ohjeteksteihin numeroinnin.

Hahmotusta helpottavien elementtien lisääminen kuviin vei paljon aikaa, sillä ne täytyi suunnitella huolellisesti, jotta kuvasta ymmärtää mitä tulee tehdä, mutta niin, ettei kuva mene liian tukkoon ja vaikuta sekavalta. Koen ajallisen ponnistelun silti ollen tarpeellista, sillä jokainen kuviin lisätty elementti nopeuttaa työohjeen lukemista ja auttaa lukijaa ymmärtämään ohjeet. Kuvat ovat erittäin oleellinen osa työohjetta, sillä ilman niitä ohjeiden tulkinta voi olla todella vaikeaa.

## **Kirjoittaminen**

Työohjeen kirjoittaminen englanniksi tuotti jossain määrin vaikeuksia, mutta toisaalta taas englanti oli luonteva englanninkieliselle ohjelmistolle. Kirjoitin ohjeet pääosin omaan kielitaitooni ja sanakirjoihin tukeutuen, mutta käytin apunani myös hieman tekoälyä sekä Ansys Help-sivustoa. Ansys Help on Ansysin oma ohjesivusto ohjelmiston käyttäjille (Ansys 2025). Siitä oli hyötyä ohjelmiston terminologian hyödyntämisessä, löysin sieltä joitakin hyödyllisiä sanoja kuvaamaan sitä mistä pitää painaa tai mihin tieto tulee syöttää. Ansys Helpistä oli hyötyä myös silloin, jos kohtasin jonkin ongelman esimerkkisäiliön analyysiä tehdessä. Tekoälyltä pyysin apua otsikon keksimiseen, kun kappaaleen sisältö oli vaikea tiivistää otsikon muotoon, ja joissakin kohdissa lauseen muotoiluun, jos oma lause kuulosti kömpelöltä. Havaitsin, että kääntäjäsovelluksiin verrattuna tekoäly on parempi kääntäjä, sillä sille voi selittää asioita, kun taas kääntäjäsovellukset kääntävät lauseita sanasta sanaan, eikä usein osaa liittää sanoja oikeaan kontekstiin.

## **Palautteen perusteella tehdyt parannukset**

Sain jo työohjeen tekovaiheessa toimeksiantajan opinnäytetyötä ohjaavalta lujuuslaskijalta hyvää palautetta työohjeen sisällöstä ja sen selkeydestä. Hän kommentoi työohjeen ensimmäistä versiota ja kommentit koskivat lähinnä kuviin liitettyjen ohjetekstien kokoja ja lisäksi työssä oli yksi virheellinen ohjeistus. Korjasin virheen seuraavaan versioon ja suurensin kuvien ohjetekstejä, jotta ne ovat helposti luettavissa myös tulostetusta ohjeesta. Seuraava versio pääsi heti testikäyttöön uudelle työntekijälle, jolla ei ollut aiempaa kokemusta Ansysin käytöstä. Uusi työntekijä kommentoi työohjeen olleen selkeä ja kattava sekä helposti käytettävä. Hän ehdotti paria pientä tarkennusta työohjeeseen, jotka lisäsin lopulliseen versioon. Lisäksi sain kommentteja toiselta kokeneemmalta lujuuslaskijalta, joka toivoi muutamiin kohtiin selvennystä, esimerkiksi mistä johtuu, että jonkin asian tulee olla tietyllä tavalla. Nämäkin pienet muutokset tein lopulliseen versioon.

## **6 TYÖN TULOKSET**

Työn tuloksena saatiin aikaiseksi noin 70-sivuinen työohje, jossa on yli sata kuvaa. FEM-ohjelmistoja on olemassa lukuisia ja vaikka lujuuslaskijalla olisi

useiden vuosien kokemus jostakin toisesta FEM-ohjelmistosta, hän ei välttämättä osaa käyttää Ansysin ohjelmia sujuvasti. Tästä syystä työohjeen vaiheet on kuvattu hyvin yksityiskohtaisesti, jotta uusikin työntekijä pystyisi tekemään analyysin. Työohjeen päävaiheet ovat seuraavat:

- Geometrian määrittäminen
- Kontaktien luominen
- Verkotus
- Reunaehtojen määrittäminen
- Kuormitusten mallintaminen
- Kokonaissiirtymät ja von Misesin jännitykset
- Stabiiliteetilaskenta ja jälkikäsitteily

Tässä luvussa kerrotaan geometrian luomisesta parametrisoidun mallin avulla sekä kuormien jakamisesta kuormitustapauksiin. Koska FEM-laskennan vaiheista on kerrottu jo yleisellä tasolla luvussa 4 ja koska työohje on salainen, ei tässä ole tarpeen selostaa muita vaiheita yksityiskohtaisesti.

### **Geometrian määrittäminen parametrisen mallin avulla ja kontaktien luominen**

Työohjeessa ei käsitellä säiliön mallintamista, vaan geometria tuodaan Afryllä jo olemassa olevan parametrisen mallin avulla. Parametrisella mallintamisella tarkoitetaan sitä, että tietyt mitat tai ominaisuudet voidaan suhteuttaa toisiinsa. Parametrinen malli voidaan ohjelmoida esimerkiksi siten, että yhtä mitta suurentamalla kannattelevien palkkien määrä kasvaa tai jokin toinenkin mitta muuttuu. Kun malli on ohjelmoitu huolellisesti, siihen tarvitsee määrittää vain tietyt päämitat, joiden pohjalta ohjelma luo koko rakenteen mallin. Parametrisia malleja on kannattavaa tehdä rakenteista, joita toistuvasti tehdään eri kokoisina, mutta muuten samanlaisina tai niissä on rakenteellisesti hyvin vähän eroja. Parametristen mallien käyttö helpottaa ja nopeuttaa suunnittelutyötä huomattavasti.

Vaikka säiliö tehdään parametrisen mallin avulla aina samanlaisena, ja vaikka säiliöitä tehtäisiin samankokoisenakin, liittyy niihin aina tekijöitä, jotka vaikuttavat eri tavoin rakenteen kestävyysasteeseen. Jokainen suunniteltava säiliö on siis kuitenkin erilainen ja siksi rakenneanalyysi on tehtävä jokaiselle säiliölle aina erikseen. Säiliön rakenteen kestävyysasteeseen vaikuttavia tekijöitä ovat esimerkiksi

säiliön koko, säiliön suunniteltu sijainti, suunnittelupaine, säiliöön liittyvät erilaiset osat, kuten putkiyhteet jne.

Kun säiliön geometria on määritetty ja malli luotu, suurin osa kontakteista on luotu siinä samalla. Kontakteilla tarkoitetaan sitä, miten säiliön eri kappaleet ovat kiinnittyneet toisiinsa. Geometriasta tulleiden liitosten lisäksi täytyy kuitenkin manuaalisesti lisätä joukko liitoksia, jotka ovat kaikki käytännössä yksi liitos, joka kopioidaan kaikkiin vastaaviin kohtiin säiliön rakenteessa.

### **Kuormat**

Luvussa 3.2 on lueteltu säiliön suunnittelussa huomioon otettavat kuormitukset. Työohjeessa ei kuitenkaan oteta näitä kaikkia huomioon, sillä siinä haluttiin keskittyä vain yleisimpiin tapauksiin. Suunnittelijan tulee siis aina tapauskohtaisesti ottaa huomioon muitakin kuormituksia, kuin työohjeen peruskuormitukset. Työohjeessa käsitellään esimerkkitapaus, joka on tyypillinen Suomeen sijoitettavalle säiliölle. Näin ollen työohjeessa käsitellään seuraavat kuormitukset:

- kiinteät kuormat
- sisäinen ylipaine
- sisäinen alipaine
- lumikuormat
- tuulikuormat

Työohjeen esimerkin kuormituksista aiheutuu neljä erilaista kuormitustapausta. Kuormitustapauksissa otetaan huomioon aina pahin mahdollinen kuormitusyhdistelmä, mikä tarkoittaa, että ylöspäin ja alaspäin vaikuttavia kuormia ei oteta huomioon samanaikaisesti, sillä niiden vaikutukset kumoavat toisensa osittain tai kokonaan. Tuuli aiheuttaa painetta kattoon tuulen puolelta kattorakennetta ylöspäin nostaen ja suojan puolelta kattorakennetta alaspäin painaen, tuulikuormat määritetään kuitenkin eri kuormitustapauksissa konservatiivisesti joko ylöspäin tai alaspäin koko katon pinta-alalle. Jokaisessa kuormitustapauksessa on aina mukana kiinteät kuormat eli säiliön oma massa. Jokaiselle kuormitustapaukselle on määritelty yksi kuormitus määrääväksi tekijäksi, jolle on standardin mukaan määritetty suurempi kuormituskerroin. Taulukossa 1 on esitelty kuormitustapaukset.

Taulukko 1. Kuormitustapaukset

|     | Kiinteät kuormat | Ylipaine        | Alipaine        | Lumikuorma      | Tuulikuorma              |
|-----|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------------------|
| LC1 | Kyllä            | <b>Määräävä</b> | Ei              | Ei              | Ylöspäin                 |
| LC2 | Kyllä            | Ei              | <b>Määräävä</b> | Kyllä           | Alaspäin                 |
| LC3 | Kyllä            | Ei              | Kyllä           | <b>Määräävä</b> | Alaspäin                 |
| LC4 | Kyllä            | Ei              | Kyllä           | Kyllä           | <b>Määräävä alaspäin</b> |

Taulukon 1 ensimmäisessä sarakkeessa LC tarkoittaa kuormitustapausta (load case) ja huomioitavat kuormitukset ovat ensimmäisellä rivillä. Taulukossa lukee ”Kyllä” kun kyseinen kuormitus otetaan huomioon kyseisessä kuormitustapauksessa ja ”Ei”, kun sitä ei oteta huomioon. Tuulikuormasta mainitaan, huomioidaanko se ylöspäin vai alaspäin.

Ensimmäisessä kuormitustapauksessa otetaan huomioon ylöspäin vaikuttavat voimat, jotka ovat säiliön sisäinen ylipaine ja tuulen aiheuttama nostevoima. Alipainetta ja lumikuormia ei oteta huomioon, sillä ne vaikuttavat alaspäin. Säiliön sisäinen ylipaine on kuormitustapauksen määräävä tekijä. Tässä kuormitustapauksessa otetaan huomioon vain ylöspäin vaikuttava tuulikuorma tasaisesti koko katon pinta-alalle.

Lopuissa kuormitustapauksissa voimat vaikuttavat alaspäin ja määräävä tekijä vaihtuu. Toisessa kuormitustapauksessa määräävä tekijä on alipaine, kolmannessa lumikuorma ja neljännessä tuulikuorma. Näissä kuormitustapauksissa ei oteta huomioon ylipainetta ja tuulikuorma huomioidaan vain alaspäin.

## 7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tehdä työohje varastosäiliön katon analyysiin, jotta analyysimenetelmät saataisiin yhtenäistettyä ja lujuuslaskennan luotettavuutta parannettua. Ohjeen avulla insinöörit voivat tehdä analyysin johdonmukaisesti ja tehokkaasti, mikä vähentää virheiden mahdollisuutta ja lisää rakenteiden turvallisuutta. Yhteisen työtavan ansiosta laskelmat ovat myös keskenään vertailtavampia, mikä tekee prosessista sujuvamman ja luotettavamman.

Työohjeen kehitysprosessi ja esimerkkianalyysit osoittivat, että selkeästi dokumentoitu ohjeistus nopeuttaa ja selkeyttää analyysin tekemistä. Vaikka työohje keskittyykin vain säiliön katon rakenneanalyysiin, siitä voi olla suuri hyöty myös muunlaisten rakenneanalyysien tekemisessä. Työohje toimii arvokkaana työkaluna niin uusille kuin kokeneemmillekin lujuuslaskijoille ja sen jatkuvalla kehittämisellä voidaan varmistaa, että se pysyy ajan tasalla. Toimeksiantajalta saadun palautteen perusteella työohje täyttää sille asetetut odotukset. Työohjeen kerrottiin olevan selkeä ja riittävän yksityiskohtainen, ja ohje on helppo käyttää ja ymmärtää jopa kokemattomalle Ansysin käyttäjälle.

Ohje perustuu voimassa oleviin standardeihin ja FEM-laskennan periaatteisiin, mikä varmistaa työohjeen luotettavuuden. Kuitenkin jokainen säiliö on aina erilainen ja suunnittelijan tulee osata käyttää työohjetta soveltaen eri tilanteisiin. Ensimmäisen version jälkeen työohjetta on muokattu toimeksiantajan kommenttien perusteella, mikä lisää sen soveltuvuutta ja käyttökelpoisuutta. Työohje luovutettiin toimeksiantajalle Word-asiakirjana, jotta sitä olisi helppo muokata ja jatkaa tarpeen tullen. Käytännön luotettavuutta voidaan parantaa työohjeen päivittämisellä ja käyttäjäpalautteen huomioon ottamisella. Jotta ohje säilyttää merkityksensä, tulee sen sisältö tarkistaa säännöllisesti ja varmistaa, että se vastaa alan kehittyviä vaatimuksia.

Koen opinnäytetyöprosessin olleen arvokas oppimiskokemus, joka on sekä vahvistanut jo opittuja asioita että tuonut paljon uutta. Opinnäytetyön aihe vastasi hyvin energiatekniikan opintojen sisältöä, sillä opinnot ovat sisältäneet muun muassa materiaalitekniikkaa, lujuuslaskennan perusteita ja 3D-mallintamista. Koulussa FEM-laskentaa on käsitelty hyvin vähän osana muita kursseja, ja opinnäytetyössäni sain perehtyä siihen syvällisemmin. Standardeihin ja FEM-laskennan periaatteisiin tutustuessani opin myös tulkitsemaan ja ymmärtämään teknisiä tekstejä paremmin.

## LÄHTEET

AFRY. 2025. Engineered by AFRY. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://afry.com/fi-fi/tietoa-meista> [viitattu 31.3.2025].

Ansys. 2025. Ansys Help. WWW-sivusto. Saatavissa: [https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/main\\_page.html](https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/main_page.html) [viitattu 16.4.2025]

Bhavikatti, S.S. 2005. Finite Element Analysis. New Delhi. New Age International Ltd. E-kirja. Saatavissa: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/xamk-ebooks/detail.action?docID=358028> [viitattu 15.1.2025].

Gere, J.M. & Timoshenko, S.P. 1990. Mechanics of Materials. 3. painos. Boston: PWP-KENT Publishing Company.

Hietikko, E. 2021. Palkki: Lujuuslaskennan perusteet. 4. painos. Helsinki: BoD – Books on Demand.

MOT Sanakirjat. 2025. Kielikone Oy. Saatavissa: [https://www.sanakirja.fi/?gad\\_source=1&gclid=EAlalQobChMI-K3l3qX\\_iwMVqIW-RBR3USyqbEAAYASAAEqJu0PD\\_BwE](https://www.sanakirja.fi/?gad_source=1&gclid=EAlalQobChMI-K3l3qX_iwMVqIW-RBR3USyqbEAAYASAAEqJu0PD_BwE) [viitattu 11.3.2025].

Mörkö Engineering Oy. S.a. TE131- Nurjahdus. Mörkö Learning. Videoleike. Saatavissa: [https://morkolearning.com/lesson\\_TE131.php](https://morkolearning.com/lesson_TE131.php) [viitattu 11.3.2025]

Outinen, H. & Salmi, T. 2004. Lujuusopin perusteet. 4. painos. Tampere: Presus Oy.

ResearchGate. 2025. Euler Buckling Cases. Saatavissa: [https://www.researchgate.net/figure/Euler-buckling-cases-I-fixed-free-II-pinned-pinned-III-fixed-pinned-and-IV\\_fig1\\_329062902](https://www.researchgate.net/figure/Euler-buckling-cases-I-fixed-free-II-pinned-pinned-III-fixed-pinned-and-IV_fig1_329062902) [viitattu 16.4.2024]

SFS-EN 14015. 2005. Nesteiden varastointiin vähintään ympäristön lämpötilassa käytettävien säiliöiden suunnittelu ja valmistus. Paikalla rakennettavat pystylieriön muotoiset tasapohjaiset maanpäälliset hitsatut terässäiliöt.

SFS-EN 1991-1-1 + AC. Eurocode 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1–1: Yleiset kuormat, tilavuuspainot, oma paino ja rakennusten hyötykuormat.

SFS-EN 1991-1-3 + AC + A1. Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1–3: Yleiset kuormat. Lumikuormat.

SFS-EN 1991-1-4 + AC + A1. Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1–4: Yleiset kuormat. Tuulikuormat.

SFS-EN 1993-1-1. Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1–1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt.

Sormat s.a. Osa 4: Kuormitustyyppit. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://fi.sormat.com/article/kiinnittamisen-pikakurssi/osa-4-kuormitustyyppit/> [viitattu 25.1.2025]