



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU  
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Sanna Myllymäki

**VARASTOSÄILIÖIDEN  
KUSTANNUSTEN LASKENTATAVAT JA  
HINNOITTELUYÖKALU**

Tekniikka  
2025

VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU  
Energiatekniikka

## TIIVISTELMÄ

|                    |                                                                    |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Tekijä             | Sanna Myllymäki                                                    |
| Opinnäytetyön nimi | Varastosäiliöiden kustannusten laskentatavat ja hinnoittelutyökalu |
| Vuosi              | 2025                                                               |
| Kieli              | suomi                                                              |
| Sivumäärä          | 70                                                                 |
| Ohjaaja            | Shekhar Satpute                                                    |

---

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli päivittää ja parantaa nykyisin käytössä olevaa varastosäiliöiden hinnoittelutyökalua helpottamaan ja yksinkertaistamaan myynnin prosessia ja kustannuslaskentaa. Työssä tarkasteltiin API 650-varastosäiliöiden hinnoitteluun vaikuttavia keskeisiä tekijöitä varsinkin luonnonkuormien osalta. Työn tavoitteena oli lisäksi päivittää tuulikuorman ja seismisen eli maanjäristyskuorman nykyinen laskentatapa kattamaan ASCE 7- standardin vaatimukset Yhdysvaltojen markkinat huomioiden nykyisten Euroopan standardien ja vaatimusten lisäksi.

Teoreettisessa viitekehyksessä käsitellään varastosäiliöiden käyttötarkoituksia ja luokittelutapoja, rakennetta, säiliötyyppejä sekä muita varastosäiliöiden ominaisuuksia ja kustannuksiin vaikuttavia tekijöitä. Tämän lisäksi avataan varastosäiliöihin liittyviä standardeja ja luonnonkuormien mittaustapoja. Tutkimustyö tehtiin laskennallisen tieteen keinoin tietokoneavusteisesti ja hyödyntäen laskentatyökalua, jolla varastosäiliöihin kohdistuvia kuormituksia voitiin laskea ja analysoida. Tutkimusaineistoa kerättiin myös asiantuntijoiden kanssa keskustelemalla ja laskentatuloksia analysoimalla.

Tutkimustyön tuloksena saatiin käyttöön tarkempi kustannuslaskennan työkalu, jonka avulla voidaan jatkossa huomioida helpommin projektikohtaiset tarpeet. Luonnonkuormien raja-arvot laskettiin uudestaan vastaamaan paremmin nykytarpeita ja ASCE 7 -standardin mukainen luonnonkuormien laskentatapa saatiin integroitua työkaluun.

---

Avainsanat säiliöt, standardit, kustannuslaskenta, rakenteet

VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU  
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES  
Energiatekniikka

## ABSTRACT

|                    |                                                        |
|--------------------|--------------------------------------------------------|
| Author             | Sanna Myllymäki                                        |
| Title              | Storage tank cost calculation methods and pricing tool |
| Year               | 2025                                                   |
| Language           | Finnish                                                |
| Pages              | 70                                                     |
| Name of Supervisor | Shekar Satpute                                         |

---

The aim of this thesis was to update and improve the current pricing tool for storage tanks to facilitate and simplify the sales process and cost calculation. The work examined the key factors affecting the pricing of API 650 storage tanks, especially in terms of natural loads. Additionally, the goal was to update the current calculation method for natural loads, particularly wind load and seismic load, to meet the requirements of the ASCE 7 standard for the United States market, in addition to the current European standards and requirements.

The theoretical framework addresses the purposes and classification methods of storage tanks, their structure, tank types, and other characteristics and factors affecting costs. Furthermore, it explains the standards related to storage tanks and the measurement methods for natural loads. The research was conducted using computational science methods with computer assistance and utilizing a calculation tool to calculate and analyze the loads on storage tanks. Research data was also collected through discussions with experts and analyzing calculation results.

As a result of the research, a more accurate cost calculation tool was developed, which will make it easier to consider project-specific needs in the future. The threshold values for natural loads were recalculated to better meet current needs, and the ASCE 7-compliant calculation method for natural loads was integrated into the tool.

---

Keywords            tanks, standards, cost calculation, structure

## SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

KUVA- JA TAULUKKOLUETTELO

LYHENTEET/TERMIT

|       |                                                                                      |    |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1     | JOHDANTO.....                                                                        | 8  |
| 1.1   | Taustaa.....                                                                         | 9  |
| 1.2   | Lähtötilanne.....                                                                    | 10 |
| 1.3   | Tutkimuskysymykset.....                                                              | 10 |
| 1.4   | Työn tavoite .....                                                                   | 12 |
| 1.5   | Rajaukset.....                                                                       | 13 |
| 2     | KIRJALLISUUSKATSAUS.....                                                             | 14 |
| 2.1   | Säiliöiden luokittelu käyttötärpeen mukaan.....                                      | 15 |
| 2.2   | Säiliöiden kattotyypit.....                                                          | 16 |
| 2.3   | Vertikaalisen säiliön seinämän ja pohjalevyn rakenteelliset vaihtoehdot .....        | 20 |
| 2.4   | Horisontaaliset säiliöt .....                                                        | 21 |
| 2.5   | Paineistetut säiliöt.....                                                            | 22 |
| 2.6   | API -standardointi varastosäiliöille.....                                            | 24 |
| 2.7   | API 650 -standardin mukainen varastosäiliön suunnittelu ja kuormituslaskelmat.....   | 27 |
| 2.8   | Varastosäiliön teräsmateriaali ja sen kestävyysvaatimukset vaikuttavat tekijät ..... | 30 |
| 2.9   | Varastosäiliöihin kohdistuvien luonnonkuormien merkitys ja arviointi.....            | 34 |
| 2.9.1 | Varastosäiliöiden tuulikuormavaatimukset ASCE 7 -standardin mukaan.....              | 35 |
| 2.9.2 | Varastosäiliöiden seismisyysvaatimukset.....                                         | 39 |

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.10 API 650 -varastosäiliön kustannuslaskenta energialaitosrakentamisessa ..... | 46 |
| 3 TUTKIMUSDATAN ANALYSOINTI.....                                                 | 48 |
| 3.1 Tutkimusmenetelmä .....                                                      | 49 |
| 3.2 API 650 -säiliöiden nykyinen tuulikuorma- ja seismisyyslaskelma .....        | 49 |
| 3.3 Tutkimustyö.....                                                             | 52 |
| 4 TULOSTEN TARKASTELU .....                                                      | 59 |
| 5 PÄÄTELMÄT .....                                                                | 63 |
| LÄHTEET.....                                                                     | 65 |

## KUVA- JA TAULUKKOLUETTELO

|                                                                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Kuva 1. Tutkimuskysymykset.....                                                                                                        | 12 |
| Kuva 2. Kiinteäkattoinen varastosäiliö (Jaya, 2012).....                                                                               | 17 |
| Kuva 3. Ulkoinen kelluva katto (Jaya, 2012).....                                                                                       | 18 |
| Kuva 4. Sisäinen kelluva katto (Jaya, 2012).....                                                                                       | 19 |
| Kuva 5. Kupoloitu ulkoinen kelluva katto (Jaya, 2012).....                                                                             | 20 |
| Kuva 6. Horisontaalinen säiliö (Jaya, 2012). ....                                                                                      | 22 |
| Kuva 7. Painesäiliön järjestelmä (Jaya, 2012).....                                                                                     | 23 |
| Kuva 8. Itseankkuroitujen säiliöiden kaatumisen tarkistus<br>(American Petroleum Institute, 2020).....                                 | 30 |
| Kuva 9. Esimerkki suunnitteluvastetaajuus-spektristä (Charney &<br>Heausler, 2020).....                                                | 45 |
|                                                                                                                                        |    |
| Taulukko 1. API:n standardeja varastosäiliöille (Pullarcot, 2015, s.<br>10 - 11).....                                                  | 25 |
| Taulukko 2. Eri standardien tuulikuorman määrittelytapoja.....                                                                         | 35 |
| Taulukko 3. UBC-koodin mukaiset seismisen aktiivisuuden<br>vyöhykkeet (International Electrotechnical Commission, 2023, s.<br>16)..... | 41 |
| Taulukko 4. Seismisyysalueiden EC 8:n mukainen<br>tärkeysluokittelu (International Electrotechnical Commission,<br>2023). ....         | 42 |
| Taulukko 5. EC 8 vyöhykeluokittelu (International Electrotechnical<br>Commission, 2023). ....                                          | 43 |
| Taulukko 6. Esimerkki kuormituslaskennan tuloksista työn aikana<br>.....                                                               | 60 |

**LYHENTEET / TERMIT**

|      |                                                |
|------|------------------------------------------------|
| API  | American Petroleum Institute                   |
| ASCE | American Society of Civil Engineers            |
| ASME | American Society of Mechanical Engineers       |
| AST  | Aboveground Storage Tank                       |
| ASTM | American Society for Testing and Materials     |
| ATC  | Applied Technology Council                     |
| CSA  | Canadian Standards Association                 |
| EC   | Eurocode                                       |
| ISO  | International Organization for Standardization |
| MCE  | Maximum considered earthquake                  |
| PED  | Pressure Equipment Directive                   |
| SDC  | Seismic Design Category                        |
| SUG  | Seismic Use Group                              |
| UBC  | Uniform Building Code                          |
| UST  | Underground Storage Tank                       |

## 1 JOHDANTO

Varastosäiliöiksi (storage tanks) kutsutaan suuria, jopa 30 000 m<sup>3</sup> vetoisia, usein sylinterin muotoisia terässäiliöitä, joita käytetään energialaitosrakentamisessa pääosin polttoaineen, mutta myös muiden teollisuuden nestemäisten ja joskus myös kiinteiden aineiden varastointiin. Varastosäiliöiden koko eroaa suuresti päiväsäiliöistä (day tanks), jotka nimensä mukaisesti on laskettu vetoisuudeltaan riittämään yhden päivän tarpeisiin, ja voivat vaihdella esimerkiksi 35 m<sup>3</sup> ja 500 m<sup>3</sup> välillä.

Varastosäiliöiden suuri koko parantaa riskienhallintaa polttoaineen hankinta- ja kuljetuskustannusten suhteen, kun polttoainetta voidaan hankkia ja säilyttää kerralla suurempi määrä valmiiksi neuvotellulla hinnalla.

Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan API 650 -varastosäiliöiden hinnoitteluun vaikuttavia tekijöitä keskittyen tuuli- ja maanjäristyskuorman vaikutuksiin ja siihen, kuinka hyvin ne korreloivat realistisiin valmistuskustannuksiin ottaen huomioon projektikohtaiset olosuhteet. Tavoitteena on kehittää käytössä olevaa laskennallista työkalua niin, että sen avulla voidaan jatkossa paremmin optimoida ja tarkentaa hinnoittelua projektin myyntivaiheessa. Nykytilanteessa API 650 -varastosäiliöiden hinnoitteluun käytetään suunnittelukuvien standardimittoja, joissa ei oteta huomioon säiliön sijoituspaikan ilmastollisia vaatimuksia. Tutkimuksen tarkoituksena on selvittää, millä tavalla paikalliset seismisistä aktiiviset ja tuuliset ilmasto-olosuhteet voivat vaikuttaa varastosäiliöiden rakenteeseen ja sen myötä energialaitoksen rakentamiseen liittyviin kustannuksiin.

## 1.1 Taustaa

Opinnäytetyö tehdään Wärtsilän tarpeita huomioiden ja tutkimustyön aihe on sisäisesti tunnistettu tarve parantaa kyseisen elementin hinnoittelun tarkkuutta. Wärtsilä on yksi johtavista merenkulku- ja energiamarkkinoiden yrityksistä, joka tarjoaa maailmanlaajuisesti asiakkailleen moottorivoimalaitoksia, energian varastointi- ja optimointiratkaisuja sekä niiden elinkaari palveluita.

Wärtsilän moottorivoimalaitoksia on laaja valikoima. Voimalaitoksia rakennetaan sekä tuottamaan energiaa yksinään joko pääasiallisena energiantuotantolähteenä että varavoimalaitoksiksi toisen energiantuotantomuodon rinnalle. Voimalaitoksille on entistä enemmän kysyntää siirryttäessä uusiutuvaan energiaan, joka tarvitsee rinnalleen varavoiman lähteen tilanteissa, joissa uusiutuvan energian tuotanto on vähäisempää mutta energian tarve jatkuva. Wärtsilän moottorituotannon teknologiakehitys fokusoituu hiilineutraalien polttoaineiden, kuten metaanin ja vety/maakaasuseoksen, käyttöön, minkä lisäksi yrityksen teknologiakehitysosasto työskentelee tiiviisti esimerkiksi täysvetylaitosratkaisun parissa. Nykytilanteessa moottorivoimalaitosten polttoaineena on mahdollista käyttää kaikkia nestemäisiä polttoaineita raskaasta polttoöljystä dieseliin ja synteettisiin polttoaineisiin.

Polttoaineiden ja muiden nesteiden säilöntään tarkoitetut varastosäiliöt ovat yleisesti energialaitosrakentamisessa sertifioituja API 650 -varastosäiliöitä. Tässä tutkimuksessa keskitytäänkin kyseisiin säiliöihin energialaitosrakentamisen komponentteina ja niiden hinnoitteluun vaikuttaviin paikkakohtaisiin ilmasto-olosuhteisiin.

## 1.2 Lähtötilanne

API 650 -säiliöiden hinnoittelu painottuu tällä hetkellä suunnittelukuvien laskennalliseen painoon ja niiden mukaisiin raaka-ainekustannuksiin. Erikokoisista varastosäiliöistä on tehty tuulikuormalaskelmat kahdella erilaisella tuulikuormalla sekä seismiset laskelmat, joiden vaikutusta esimerkiksi säiliön seinämän paksuuteen arvioidaan suhteessa standardisuunnittelukuvissa mainittuun säiliön painoon. Näiden laskelmien avulla on laskettu varastosäiliön realistinen paino suhteessa ilmasto-olosuhteiden vaatimuksiin.

Nykyisessä kustannuslaskennassa näitä tuulikuormia ja seismisten vaatimusten täyttäviä lujuuslaskelmia ei kuitenkaan ole otettu huomioon, vaan varastosäiliön kustannukset lasketaan standardipainon mukaan, mikä aiheuttaa huomattavia eroja piirustuksen mukaisen ja reaalivaatimusten mukaisen raaka-ainetarpeen välillä.

Wärtsilän moottorivoimalaitosrakentamisen laajentuessa Yhdysvaltojen markkinoille on myös seismisten vaatimusten hinnoittelulaskennan päivittäminen tarpeen nyt käytössä olevasta UBC-luokituksesta joustavasti ASCE-luokitukseen niin, että seismisyysluokat olisivat vertailtavissa keskenään. Näin olisi mahdollista helpottaa kustannuslaskentaa eri markkinoilla.

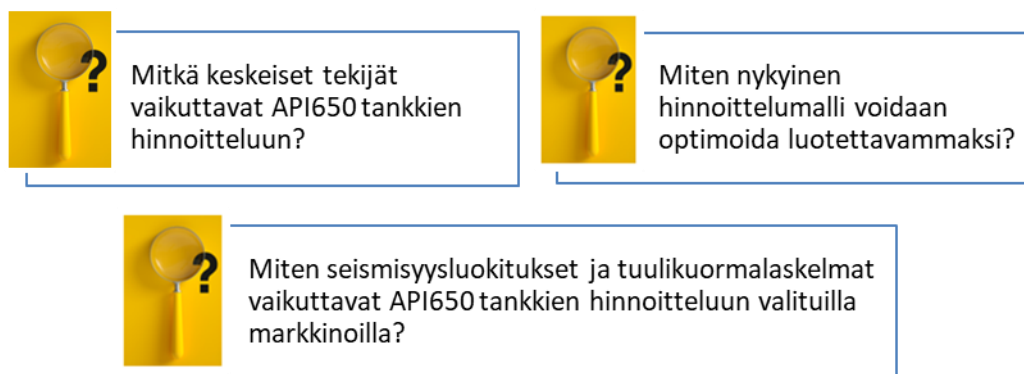
## 1.3 Tutkimuskysymykset

Opinnäytetyössä tutkitaan API 650 -säiliöiden hinnoitteluun vaikuttavia keskeisiä tekijöitä ja erityisesti tuulikuorman vaikutusta eri tuulen voimakkuuksilla sekä erilaisten seismisten luokitusten maanjäristyskuorman vaikutusta varastosäiliön rakenteeseen ja sitä kautta raaka-ainekustannuksiin ja

hinnoitteluun. Työ rajataan laajan valikoiman vuoksi tiettyihin kokoluokkiin sekä materiaalina hiiliteräkseen, joka on yleisin käytössä olevien varastosäiliöiden materiaaleista.

Tällä hetkellä käytössä olevaa hinnoittelumallia on tarpeen parantaa, joten tutkimuksen toinen näkökulma on kustannuslaskennan optimointi nykyistä tarkemmaksi ja luotettavammaksi. Työssä selvitetään, onko mahdollista luoda hinnoittelutyökalu, joka ottaa huomioon säiliön sijoituspaikan ilmastolliset vaatimukset sen sijaan, että hinnoittelun perustana käytetään suunnittelun aikana laskettua standardipainoa ja sen mukaan määriteltyä raaka-ainetarvetta.

Kolmantena tutkimuskohteena on varastosäiliöiden mahdolliset ilmasto-olosuhteisiin liittyvät erilaiset vaatimukset ja miten ne vaikuttavat säiliön kokonaiskustannuksiin. Tarkoituksena on selvittää, onko seismisiä luokituksia tarpeen tarkentaa tai päivittää nykyisestä käytössä olevasta UBC-luokituksesta ja miten se olisi yksinkertaistettuna helpointa kustannuslaskennan näkökulmasta. Tutkimuksessa tarkastellaan myös tuulikuormaluokituksen päivityksen tarpeellisuutta. Tutkimuskysymykset on koottu kuvaan 1.



Kuva 1. Tutkimuskysymykset.

#### 1.4 Työn tavoite

Opinnäytetyön tarkoituksena on luoda tutkimustyön perusteella hinnoittelutyökalu, joka ottaa huomioon yksilöllisen projektin tarpeen mukaisen varastosäiliön koon, materiaalin, asennustavan ja tuuli- sekä maanjäristyskuorman.

Työkalun avulla voidaan jatkossa välttää kustannuslaskennan epätarkkuuksia ja mahdollisesti säästää täten moottorivoimalaitoksen rakentamiskustannuksissa varastosäiliöiden osalta. Hinnoittelu itsessään on energialaitosrakentamisen yksi tärkeimmistä osa-alueista, sillä sen perusteella määrittyy myös yrityksen liiketoimen kannattavuus.

Opinnäytetyön tarkoitus on hinnoittelutyökalun lisäksi etsiä sopiva ASCE 7- standardin mukainen tapa laskea säiliöön kohdistuvaa maanjäristyskuormaa aiemmin käytössä olleen UBC-luokituksen sijaan.

## 1.5 Rajaukset

Opinnäytetyön tutkimusosuus on rajattu API 650 -standardin mukaisiin hiiliteräksestä valmistettuihin hitsattuihin varastosäiliöihin. Tutkimuksessa keskitytään maanpäällisiin varastosäiliöihin, jotka asennetaan paikalleen vertikaalisesti. Tällöin työn ulkopuolelle rajautuu muilla tavoin ja eri materiaaleista valmistetut säiliöt, joiden suunnittelussa ja valmistuksessa seurataan muuta kun API 650 -standardia. Työn ulkopuolelle rajataan myös horisontaalisesti asennetut säiliöt ja maanalaiset säiliöt.

Säiliöitä on useita kokoluokkia 5 m<sup>3</sup> päiväsäiliöstä 30 000 m<sup>3</sup> polttoaineen varastosäiliöihin. Pienemmät säiliöt jätetään tarkemman tarkastelun ulkopuolelle, koska niiden raaka-ainekustannukset ovat jo lähtökohtaisesti pienemmät eikä mahdollisilla muutoksilla ole yhtä suurta vaikutusta kokonaiskustannuksiin. Tutkimusosuudessa syvennyttään 500 m<sup>3</sup> – 10 000 m<sup>3</sup> kokoiisiin varastosäiliöihin ja tarkkaillaan niiden käyttäytymistä valituissa olosuhteissa. Tutkimustyön päätteeksi päivitettävä myyntityökalu päivitetään kaikkien käytössä olevien API 650 -standardin varastosäiliökokojen osalta pienimmästä 35 m<sup>3</sup> säiliöstä suurimpaan 30 000 m<sup>3</sup> säiliöön.

## 2 KIRJALLISUUSKATSAUS

Energialaitosrakentamisessa on käytössä laaja valikoima erityyppisiä säiliöitä ja tankkeja erilaisten nesteiden, öljyjen sekä esimerkiksi paineilman, höyryn tai jopa kiinteiden aineiden säilöntään ja prosessisovelluksiin kuten laskeutumiseen, sekoittamiseen, kiteytykseen, faasien erottamiseen ja lämmönvaihtoon. Pääosin säiliöiden tarkoitus on kuitenkin varastoida tavaraa joko myyntiverkostoa tai prosessitoimintaa varten, jolloin voidaan välttyä katkoksilta toimistuketjussa tai tietyn laitoksen tai välivaraston toiminnassa.

Varastointitarpeen kasvaessa myös säiliöiden volyymia on jouduttu lisäämään. Tämä lisää myös haasteita säiliöiden suunnittelemisen ja valmistamisen turvalliseen toteuttamiseen, ja menetelmät ovatkin muuttuneet paljon vuosien varrella. Materiaalien ja niiden ominaisuuksien tutkimus on kehittynyt ja säännöllisesti tarkistettut koodit ja standardit tukevat turvallisuuden parantumista.

Varastosäiliöt ovat usein sylinterimäisiä ja tasapohjaisia, ja niillä on kiinteä tai kelluva katto. Varastosäiliön erottaa paineestioista se, että niillä on hyvin vähäisesti tai ei lainkaan sisäistä painetta (American Petroleum Institute, 2020, s. 1-1). Varastosäiliöiden rakentaminen sisältää esimerkiksi pohjalevyjen asentamisen, pintakäsittelyn ja pinnoituksen. Säiliöiden rakentamisen ja käytön tutkimus ja kokemus on lisääntynyt, joka on johtanut suunnittelu- ja rakentamismenetelmien kehittymiseen. Sen johdosta erilaisiin koodeihin ja standardeihin on tehty muutoksia. Jokainen säiliö on käytön ja sijoituspaikan vaatimusten perusteella suunniteltava yksilöllisesti.

Teoriaosuudessa käyn läpi varastosäiliöiden käyttöä ja rakennetta yleisellä tasolla, niihin liittyviä standardeja, materiaaliominaisuuksia ja suunnitteluun vaikuttavia näkökohtia. Koska työn tarkoituksena on syventyä luonnonkuormien ja niistä erityisesti tuuli- ja maanjäristyskuormien vaikutuksiin säiliöiden kustannusten muodostumisessa, nostan esiin tarkemmin näiden luonnonkuormien suunnitteluvaatimuksia ja avaan yleisimpiä laskutapoja.

## **2.1 Säiliöiden luokittelu käyttötarpeen mukaan**

Säiliöiden luokitteluun on mahdollista käyttää useita erilaisia rakenteellisia määreitä, kuten säiliön katon rakennetta ja asennustapaa, säiliön seinämän ja pohjalevyn rakennetta, säiliön asennustapaa sekä säiliön paineistusta. Korkeapaineistettuihin säiliöihin käytetään täysin erilaisia sovellettavia standardeja, koodeja ja määräyksiä ja ne kuuluvat paineastioiden erikoisluokkaan, joten niitä ei tässä luokittelussa oteta huomioon.

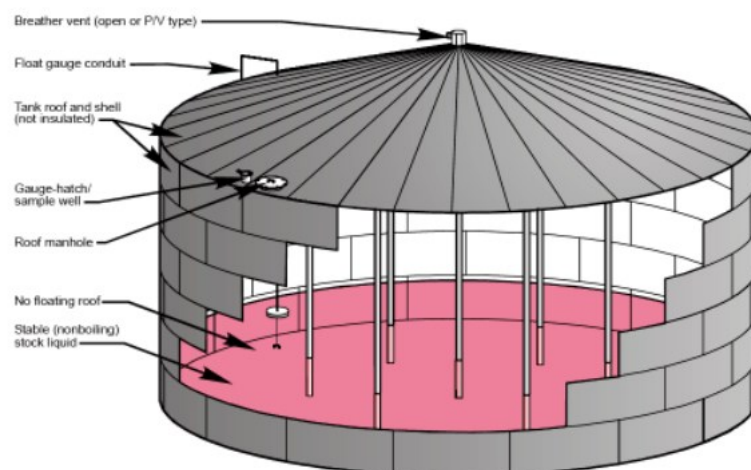
Karkein luokittelu tehdään pääosin säiliön sijoituspaikan mukaisesti luokitellen ne joko maanpäällisiksi (AST, above ground storage tanks) tai maanalaisiksi (UST, underground storage tanks), jotka eroavat sekä suunnittelu- ja valmistusnäkökohdiltaan, että niihin sovellettavien säädösten osin. AST:tä käytetään tuotannossa, jalostuksessa, markkinoinnissa ja putkistotoiminnoissa, kun UST on käytössä tyypillisesti bensiinin vähittäismyyntiasemilla (Pullarcot, 2015, s. 9 - 10). Maanpäälliset säiliöt ovat yleisemmin käytettyjä, johtuen siitä että ne ovat helpompia asentaa, kustannuksiltaan vähäisempiä, ja niiden kapasiteetti on maanalaisia säiliöitä suurempi. Maanpäällisillä säiliöillä on joko maanvaraiset tai betoniperustukset. Maanpäällinen säiliö voidaan rakentaa myös

teräsrakenteisten tukien varaan kuten vesihuoltosäiliöt, tai erityistapauksissa pohjalevyn säännöllisen tarkistuksen mahdollistavan ristikon päälle. Polttoaineiden ja kemikaalien varastointiin käytetään tyypillisesti maanalaisia säiliöitä, ja niiden koko ylittää harvoin sataa kuutiota.

Valitessa maan alle sijoitettavalle varastosäiliölle sopivaa rakennetta suunnittelussa ja valmistuksessa on huomioitava tarkasti niihin liittyviä olennaisia seikkoja. Maakuorma vaikuttaa perustusten suunnitteluun, ja UST -säiliöiden suhteen on erityisesti huomioitava nostovoiman lisäksi myös ulkoista korroosiota aiheuttavat tekijät, kuten maaperän materiaali ja ulkoisen pinnoituksen, suojauksen tai vuorauksen tarpeellisuus. Tässä työssä käsitellään jatkossa maanpäällisiä varastosäiliöitä.

## **2.2 Säiliöiden kattotyypit**

Tällä hetkellä käytössä olevista varastosäiliöiden kattotyypeistä kiinteäkattoinen (Fixed roof) lienee käytetyin sekä kustannuksiltaan edullisin. Sylinterinmuotoisen säiliön katto voi olla kartio- tai kupumallinen kuten kuvassa 2, sekä pienemmissä säiliöissä tasakatto. Kartiomallinen katto voi olla joko itsekantava muodon tarjoaman jäykkyyden ansiosta, keskikokoisissa säiliöissä keskeltä tuettu tai suuremmissa säiliöissä tuettu useammasta kohdasta katon kuorman sekä muiden mahdollisten liikkuvien tai staattisten kuormien kestämiseksi. Kartionmallinen katto voidaan tukea myös ulkopuolelta esimerkiksi kuoren ulkopuolella olevien pylväiden avulla. Kuvun tai sateenvarjon muotoinen katto on hieman erikoisempi ja muoto tekee siitä jäykemmän, mutta malli on kustannuksiltaan kalliimpi.

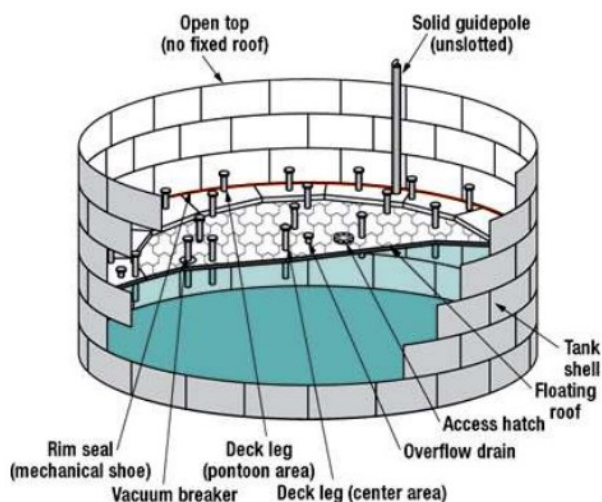


Kuva 2. Kiinteäkattainen varastosäiliö (Jaya, 2012).

Kiinteä katto on nykyään pysyvästi kiinni hitsattu ja höyrytiivis, mutta vanhemmat kiinteät katot voivat olla myös pultattuja tai niitattuja, eivätkä ne niin ollen ole täysin höyrytiivisiä. Kiinteäkattoisissa säiliöissä paineistusta ohjataan hengitysventtiilillä, eli yli- ja alipaineventtiilillä, joka sallii vähäisen sisäisen paineen tai tyhjiön. Käytännössä hengitysventtiili asetetaan usein vastaamaan ilmakehän painetta (0,19 kPa), joten venttiili vapauttaa höyryjä jo hyvin pienissä nestepinnan korkeuden, lämpötilan tai ilmanpaineen muutoksissa (Jaya, 2012, s. 9). Säiliön tilaa voidaan tarkastella mittaluukkujen, näytteenottoaivojen, kelluvien mittareiden ja kattoluukkujen kautta. Haihtumishäviöitä tapahtuu sekä näiden aukkojen, että hengitysventtiilin kautta.

Ulkoinen kelluva katto on sylinterimäisen säiliön avoimeen yläosaan asennettu kelluva katto, joka liikkuu nesteen pinnan mukana. Katto koostuu kannesta, siihen asennettavista varusteista ja reunatiivistejärjestelmästä. Ulkoisia kelluvia kattoja

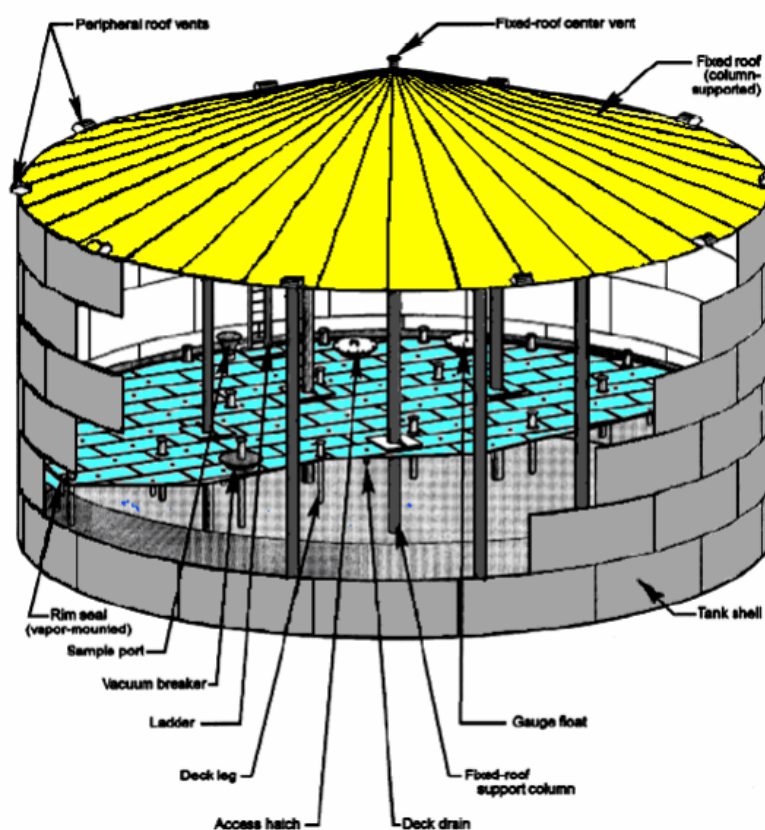
on kahta eri tyyppiä: ponttonikatto ja kaksoiskansi (Pullarcot, 2015, s. 6). Säiliöissä, joissa on käytössä tällainen kattoratkaisu, voidaan minimoida haihtumishäviöt koska ne rajoittuvat reunatiivistejärjestelmään ja kansivarusteisiin. Kelluvakattoisia säiliöitä käytetään öljytuotteiden varastoinnissa, joiden höyrinpaine on 10,3 kPa ja 76,5 kPa välillä. Kelluvakattoisia säiliöitä käytetään öljytuotteiden varastoinnissa, joiden höyrinpaine on 10,3 kPa ja 76,5 kPa välillä (Jaya, 2012, s. 12).



Kuva 3. Ulkoinen kelluva katto (Jaya, 2012).

Sisäinen kelluva katto käsittää sekä pysyvän kiinteän katon että säiliön sisäisen kelluvan katon. Kiinteä katto voidaan joko tukea pystysuorilla tukipylväillä, tai se voi olla itsekantava. Säiliön sisäinen kelluva katto voi puolestaan olla kosketuskansi, joka on suoraan kosketuksissa nesteen pintaan, tai kosketukseton kansi, joka on tuettu ponttoneilla hieman nesteen yläpuolelle. Kosketuskansityyppeihin kuuluvat alumiiniset sandwich-paneelit, hartsipinnoitetut lasikuitupaneelit sekä pannumaiset teräskatot

(Jaya, 2012, s. 16). Ei-kosketustyyppiset kannet on valmistettu alumiinista ja ovat yleisempiä. Säiliön sisäinen kelluva katto nousee ja laskee nesteen pinnan vaihtelun mukaan (ks. kuva 4). Sisäisen katon reunatiivisteet ja tuuletusaukot minimoivat höyryjen kertymisen. Johtuen ylimääräisestä tilavarauksesta nesteen pinnan yläpuolella kelluva katto vähentää jonkin verran säiliön maksimitilavuutta.



Kuva 4. Sisäinen kelluva katto (Jaya, 2012).

Kupoloituun ulkoiseen kelluvaan kattoon päädytään usein silloin, kun ulkoisella kelluvalla katolla varustettuun säiliöön asennetaan kiinteä katto, jonka tarkoitus on suojata tuulelta. Tällöin katto rakennetaan alumiiniseoksesta kupolin muotoiseksi ja

itsekantavaksi (ks. kuva 5). Kupolikatton etuja ovat pitkä käyttöikä korroosionkestävien materiaalien johdosta, se vähentää tuulesta johtuvia höyrypäästöjä ja suojaa sisempää kattoa sadeveden ja UV-säteilyn aiheuttamalta huoltotarpeelta. (Jaya, 2012, s. 7.)



Kuva 5. Kupoloitu ulkoinen kelluva katto (Jaya, 2012).

### **2.3 Vertikaalisen säiliön seinämän ja pohjalevyn rakenteelliset vaihtoehdot**

Olenaisia rakenteellisia eroavaisuuksia vertikaalisissa maanpäällisissä varastosäiliöissä löytyy kattorakenteen lisäksi myös seinämän ja pohjalevyn rakenteissa, jotka vaihtelevat käyttötarkoituksen ja -tarpeiden mukaan.

Säiliön seinämän sekä pohjan muodolla on merkitystä paitsi rakenteellisen kantavuuden ja kuorman kestävyuden osalta, myös varastoitavan nesteen liikuttamisen ja säiliön tyhjennyksen kannalta. Pienillä säiliöillä sallitaan tasapohjainen pohjalevy, kun säiliön halkaisija pysyy alle 10 metrissä, ja kun pienen kaltevuuden ei ole todettu tarjoavan hyötyä. Kartiomaisesti ylös

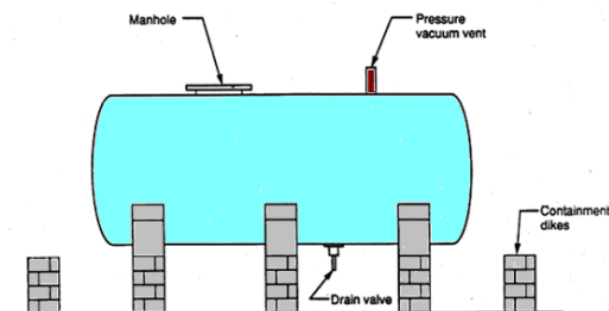
keskeltä nousevassa pohjalevyssä on keskellä korkeampi kohta ja noin 25 mm – 50 mm kaltevuus 3 metrin halkaisijaa kohden. Kartiomaisesti alas painuva pohjalevy on keskeltä alaspäin kalteva, ja usein keskellä on keräyssuppilo, josta lähtee putkisto kaivoon säiliön tyhjennystä varten. Yhteen suuntaan kallistetulla pohjalevyllä varustettu säiliö tyhjenetään matalimmasta kohdasta, mutta koska säiliön halkaisijan kasvaessa myös korkeusero kasvaa, on tämän tyyppisen pohjalevyn käyttö rajoitettu halkaisijaltaan korkeintaan 30 m säiliöihin. (Pullarcot, 2015, s. 7.)

Säiliön seinämä voidaan valmistaa joko yksiseinäisenä tai kaksiseinäisenä, joka on yleisempi maanalaisissa säiliöissä. Kaksiseinäisessä säiliössä sisemmän seinämän vaurioituessa tai vuodon ilmetessä voidaan kaksoiseinämän sisälle asentaa vuotoa havaitsevia antureita jolloin välitila toimii ikään kuin vuodonilmaisimena. Maanpäällisessä yksiseinäisessä säiliössä vuodon mahdollisuus on otettu huomioon sijoittamalla säiliö betoni- tai teräsrakenteisen kaivannon tai patosuojan sisään, joka suojaa ympäristöä säiliön sisällön leviämiseltä (Pullarcot, 2015, s. 7).

#### **2.4 Horisontaaliset säiliöt**

Horisontaaliset säiliöt ovat vaakasuuntaisesti asennettuja säiliöitä, joita käytetään yleisesti erilaisten öljyteollisuuden tuotteiden säilömiseen joko maan päälle tai maan alle asennettuina (ks. kuva 6). Horisontaaliset säiliöt ovat vertikaalisesti asennettuja huomattavasti pienempiä, useimmiten alle 20 000 gallonia eli 75,7 l. Rakenteellisen kestävyys turvaamiseksi niiden pituus suhteessa leveyteen on tiukasti määritelty, mikä rajoittaa kokoa. Maanpäällisten säiliöiden höyrypäästöt ovat samankokoisia kuin

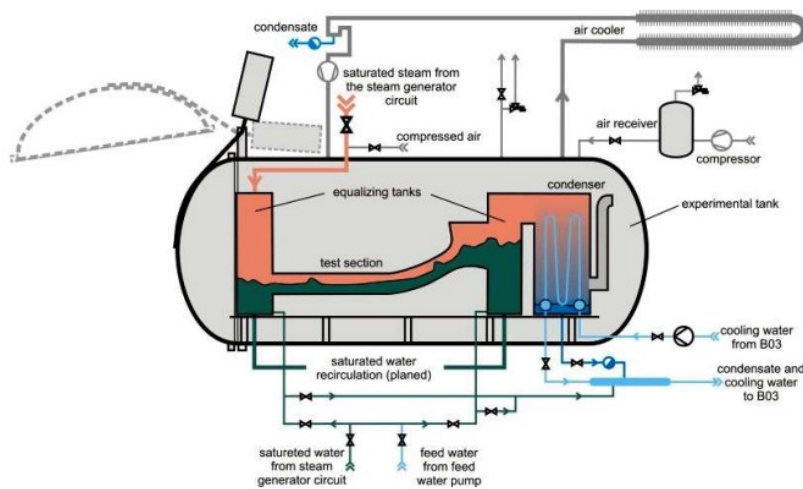
kiinteäkattoisten säiliöiden, kun maan alle asennettujen säiliöiden päästöt voidaan laskea olevan hiukan pienemmät johtuen lämpötila- ja painevaihteluiden puuttumisesta.



Kuva 6. Horisontaalinen säiliö (Jaya, 2012).

## 2.5 Paineistetut säiliöt

Paineistettuihin säiliöihin kuuluvat sekä korkeapainesäiliöt että matalapainesäiliöt. Korkeapaineisiin luetaan yli 100 kPa säiliöt ja matalapaineisiin 3,5 ja 100 kPa välillä olevat säiliöt. Painesäiliöitä on erimuotoisia, sylinteristä pallomaisen muotoiseen, riippuen säiliön käyttöpaineesta. Niissä voidaan varastoida erilaisia korkean höyrynpaineen nesteitä ja kaasuja, kuten maakaasua, propaania ja butaania nestemäisessä muodossa. Paineistettujen säiliöiden varusteisiin kuuluu paine/tyhjiöventtiili, jonka tarkoitus on estää nesteen kiehumisen ja lämpötilan tai paineen muutoksen aiheuttamat tuuletus- ja hengityshäviöt. Painesäiliöiden materiaalivalinnassa, suunnittelussa, valmistuksessa ja muissa osa-alueissa on oltava erittäin tarkka niiden mahdollisesti aiheuttaman vakavan turvallisuusriskin vuoksi, ja esimerkiksi ASMen kansainvälinen koodi Section VIII, Rules for Construction of Pressure Vessels sisältää ohjeistuksen painesäiliöiden valmistamiseen (The American Society of Mechanical Engineers, 2023). Painesäiliön tyypillinen järjestelmä on nähtävissä kuvassa 7.



Kuva 7. Painesäiliön järjestelmä (Jaya, 2012).

Energialaitosrakentamisessa paineistettuja säiliöitä käytetään esimekiksi paineilmajärjestelmässä. Paineilma tuotetaan tavallisesti ruuvikompressorilla ja varastoidaan säiliöön, josta sitä voidaan jakaa kuivaajan ja suodattimen kautta eri järjestelmille, kuten instrumentointilaitteille, toimilaitteille, suodattimille ja työilmaksi työkaluille ja puhalluspistooleille (Wärtsilä Oyj Abp, 2024).

Myös moottori käynnistetään paineilmalla. Paineilma tuotetaan käynnistysilmayksikön mäntäilmakompressoreilla, joista ilma johdetaan käynnistysilmapulloihin ja sieltä moottorin sylinteriin. Käynnistysilmapullojen koko vaihtelee noin 2000 l:n ja 5500 l:n välillä, joten ne ovat säiliöistä pienimpien joukossa. Käynnistysilmapullojen käyttöpaine on 3000 kPa ja suurin sallittu paine 3300 kPa (Wärtsilä Oyj Abp, 2024). Niiden suunnittelussa ja valmistuksessa noudatetaan joko Eurooppalaista PED direktiiviä tai ASTM A20/ASME SA20 -standardia.

Voimalaitoskäytössä oleviin käynnistysilmapulloihin tarvitaan lisäksi käytön kannalta kriittisiä komponentteja, kuten manuaalinen 3-tieventtiili pullon pohjaan kondensaatioveden tyhjennystä varten, paikallinen painemittari, turvaventtiili ja paineenrajoitusventtiili. Lisäksi tarvitaan tulo- ja lähtöliitännät tulevalle ja lähtevälle paineilmalle manuaalisilla venttiileillä (Tanveer, 2023, s. 6 - 7).

## **2.6 API -standardointi varastosäiliöille**

API eli American Petroleum Institute on julkaissut kaiken kaikkiaan yli 800 standardia kaasu- ja öljyteollisuuden toiminnan turvallisuuden sekä ympäristön ja kestävän kehityksen turvaamiseksi. Standardit on kehitetty API:n American National Standards Institutun akkreditoitun prosessin mukaisesti. Ne ovat valmistajan ja maahantuojan keino osoittaa, että tuote täyttää sille asetetut laadulliset vaatimukset. Standardien avulla voidaan myös auttaa kustannusten hallintaa, vähentää tuotannon jätettä sekä yhtenäistää alan toimintatapoja kansainvälisesti (American Petroleum Institute, 2024).

APIlla on useita standardeja erilaisten varastosäiliöiden suunnitteluun ja valmistukseen. Standardoinnissa luokitteluna on käytetty käyttötarkoituksen ja säiliön materiaalin lisäksi esimerkiksi säiliöiden sisäistä painetta, koska suunnittelun ja valmistuksen kriteerit ovat erilaiset riippuen siitä, kuinka suurta sisäistä painetta säiliön on tarkoitus kestää. API:n standardit koskevat maanpäällisiä AST -säiliöitä. UST -säiliöiden suunnittelun ja rakentamisen standardit ovat Underwriters Laboratories UL58, 1316 tai 1746 ja Steel Tank Institute F841-91 mukaisia (Pullarcot, 2015, s. 10). API on kehittänyt esimerkiksi seuraavat standardit jotka on koottu taulukkoon 1.

Taulukko 1. API:n standardeja varastosäiliöille (Pullarcot, 2015, s. 10 - 11).

|                  |                                                                                                               |
|------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| API spec.<br>12B | Tuotantonesteiden varastointiin tarkoitetut pulttatut säiliöt                                                 |
| API spec.<br>12D | Tuotantonesteiden varastointiin tarkoitetut kentällä hitsatut säiliöt                                         |
| API spec.<br>12F | Tuotantonesteiden varastointiin tarkoitetut tehtaalla hitsatut säiliöt                                        |
| API spec.<br>12P | Lasikuituvahvisteiset muovisäiliöt                                                                            |
| API 620          | Hitsattujen matalapaineisten varastosäiliöiden suunnittelu ja valmistus                                       |
| API 650          | Öllyteollisuuden tuotteiden varastointiin tarkoitettujen hitsattujen terässäiliöiden suunnittelu ja valmistus |

API 650 on paineettomien pääosin polttoaineen tai öljyteollisuuden muiden tuotteiden säilöntään tarkoitetuille hitsatuille AST-säiliöille luotu standardi. Standardin tarkoitus on helpottaa ja ohjata öljyteollisuuden hankintoja määräten varastosäiliöiden materiaalille, suunnittelulle, seinämän paksuudelle, valmistukselle, hitsaukselle, pystytykselle ja tarkastukselle vähimmäisvaatimukset. Vähimmäisvaatimusten lisäksi voidaan käyttää osapuolien sopimuksen mukaisesti tiukempia suunnittelusääntöjä, eikä API 650 -standardia ole tarkoitus tulkita suunnittelun hyväksymiseksi, suositteluksi tai tukemiseksi tai rakennus- tai suunnittelumenetelmän

rajoittamiseksi. Standardi koskee säiliöitä, jotka ovat pystysuoria, pääosin sylinterimäisiä, maanpäällisiä, suljettuja tai avoimia hitsattuja varastosäiliöitä (American Petroleum Institute, 2020, s. 1-1). Koolle standardi ei aseta rajoituksia. Sisäiselle paineelle sekä käyttölämpötilalle on asetettu rajoituksia niin, että paineen on pysyttävä alle 18 kPa ja lämpötilan alle 93 celsiusasteessa, mutta tietyillä lisävaatimuksilla rajoituksia on mahdollisuus nostaa (American Petroleum Institute, 2020, s. F-1). API 650 -standardin säiliöitä käytetään öljyteollisuuden tuotteiden varastoimisen lisäksi myös nestemäisten kemiallisten aineiden sekä veden varastointiin.

API 620 standardi on tarkoitettu suurille, hitsatuille matalapaineistetuille AST säiliöille, joissa säiliön sisältämän höyry- tai kaasutilan sisäinen paine on korkeintaan 103 kPa (American Petroleum Institute, 2013, s. 1-1). API 620 -säiliöillä on API 650 -säiliöitä vastaavat säädökset, mutta suunnitteluvaatimukset ovat hieman tiukemmat, jonka lisäksi matalapaineistetuilla säiliöillä on suuremmat vaatimukset testauksen ja analysoinnin suhteen. API 620 -standardin mukaisissa säiliöissä voidaan varastoida muun muassa nestemäistä maakaasua tai muita kylmätekniestä säilytystä tai erityistä suojausta vaativia aineita kuten nestemäistä typpeä, happea tai eteeniä. Matalapaineistetuissa säiliöissä voidaan varastoida myös esimerkiksi ammoniakkia, propaania ja butaania.

Korkeapainesäiliöissä paine on 100 kPa tai suurempi ja sen standardit on asettanut ASME eli American Society of Mechanical Engineers. ASME Section VIII Div (1) luettelee pakolliset vaatimukset, kiellot ja ohjeet materiaaleille, suunnittelulle ja valmistukselle sekä testaukselle. Koodi kattaa kaikki

ylipaineistetut säiliöt. Korkeapainesäiliöitä voidaan käyttää esimerkiksi paineistettujen kaasujen varastoinnissa. API 510 standardi ohjaa painesäiliöiden huoltoon, tarkastukseen, korjaukseen ja muutoksiin liittyviä toimenpiteitä. Tässä työssä keskitytään API 650 standardin varastosäiliöihin.

## **2.7 API 650 -standardin mukainen varastosäiliön suunnittelu ja kuormituslaskelmat**

API 650 standardi määrittelee varastosäiliön suunnitteluun vaatimuksia kuormituksen suhteen. Suunnittelussa on esimerkiksi huomioitava, että ulkoisen paineen on pysyttävä yli 0,25 kPa ja sisäisen alle 18 kPa ja katon on kestävä kahden ihmisen paino (2,2 kN/0,1 m<sup>2</sup>) missä tahansa katon kohdassa. Lumikuormaa laskettaessa käytetään ASCE 7 -standardia, elleivät paikalliset standardit vaadi suurempaa laskennallista arvoa lumikuormalle tai alueellinen maanpinnan lumikuorman ominaisarvo ylity (American Petroleum Institute, 2020, s. 5-10). Esimerkiksi Suomessa lumiolosuhteet ovat poikkeukselliset verrattuna suureen osaan muuta maailmaa, ja Suomessa lumikuorma määritellään standardissa SFS-1991-1-3 Rakenteiden kuormat. Osa 1-3: Yleiset kuormat. Lumikuormat. Perustuksia suunniteltaessa on otettava huomioon liukukitkavastus, johon vaikuttaa tuulikuorma sekä seisminen kuormitus (American Petroleum Institute, 2020, s. E-28).

Tuulen aiheuttama kuormitus on otettava huomioon varastosäiliötä suunnitellessa, ja sen merkitys kasvaa tuulelle altistuvan pinta-alan kasvaessa. Täyden varastosäiliön tuulikuorma on erilainen tyhjiin verrattuna massan kasvaessa, ja tuulikuorma onkin siksi huomioitava sen kohdistuessa säiliöön silloin kun se on keveimmillään. Tuulikuormaa laskettaessa

käytetään kolmen sekunnin tuulenpuuskan aiheuttamaa kuormitusta joko ASCE 7-05 tai ASCE 7-10 määrittelemien tuulennopeuksien mukaisesti, tai vaihtoehtoisesti paikallisten olosuhteiden tarpeiden mukaisesti, jotka ostaja määrittelee. Tuulikuormia käsitellään lisää myöhemmin.

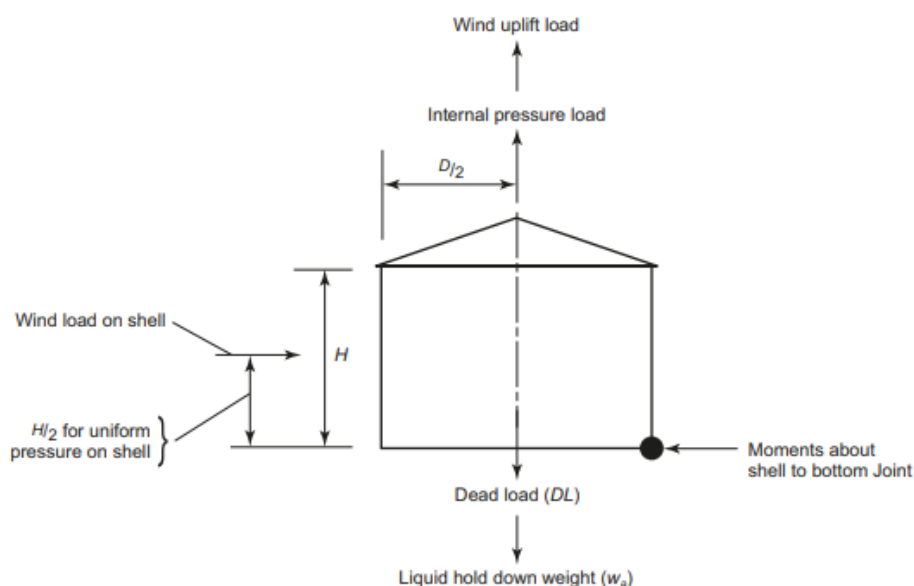
API 650 -standardissa määritellään vähimmäisvaatimukset myös seismiselle toiminnalle altistuvien säiliöiden suunnittelulle ja valmistukselle tavoitteena suojella ihmishenkiä ja estää säiliön romahdus maanjäristyksen aikana. Säiliöön ja sen komponentteihin saattaa tulla silti vaurioita. Vaatimukset perustuvat ASCE 7 standardiin. Varastosäiliön ostaja luokittelee tarvittavan käyttöluokituksen (SUG, Seismic Use Group). SUG III kategoriaan luokitellaan säiliöt, joiden toiminta tai sisältö on välttämätön joko maanjäristyksen jälkeiselle yhteiskunnan toimintojen tai jäsenten elpymiselle tai sisältävät huomattavia määriä myrkyllistä tai ympäristölle ja ihmisille vaarallista ainetta. SUG II -säiliöihin lasketaan sellaiset säiliöt, joiden sisältö voi aiheuttaa huomattavan yleisen vaaran tai ne palvelevat tärkeitä tiloja tai laitoksia, ja SUG I -luokitukseen lasketaan kaikki kahteen edelliseen kuulumattomat (American Petroleum Institute, 2020). Varastosäiliöihin kohdistuvaa seismisyyskuormitusta käsitellään myöhemmin lisää.

Varastosäiliön perustusten on kestettävä valtavan suuria voimia, joten ne voidaan rakentaa vain erittäin vahvalle perustukselle jotta vältettäisiin säiliön vakauden heikentyminen ja sen seurauksena suuresta käsiteltävästä nestemäärästä johtuva mahdollinen katastrofi. Perustuksen suunnittelu ja rakentaminen kuuluvat rakennustekniikan alaan siviilitöineen ja laadunvalvonnan tarkastuksineen, mutta myöhemmät,

mekaaniset varastosäiliön suunnittelu- ja rakennustoimet, kuuluvat mekaaniselle tiimille.

Varastosäiliön perustukset voivat olla rakenteeltaan erilaiset riippuen olosuhteista asennuspaikalla, säiliön koosta, asennussuunnasta sekä säiliön materiaalista. Perustuksina voidaan käyttää esimerkiksi tiivistettyjä maaperäperustuksia, murske kivirenkään seinämäperustuksia, betonirenkään seinämäperustuksia, laattaperustuksia tai paalutettuja perustuksia. Perustusten riittävän tiiviiden ja lujuuden mittaamiseksi tehdään painumamittauksia varastosäiliön hydrostaattisen testauksen aikana. Mikäli mittauksissa esiintyy epätasaista painumaa, tehdään lisätutkimuksia ja arvioidaan varastosäiliön turvallisuus ja eheys uudestaan (Pullarcot, 2015, s. 45 - 47).

API 650:n mukaisesti varastosäiliöt voivat olla itseankkuroituja tai mekaanisesti ankkuroituja. Itseankkuroiduissa säiliöissä säiliön seinämän ja pohjan väliseen saumaan kohdistuvan tuulikuorman kokonaisvaikutuksen luoman ulkoisen paineen vääntömomentti ei saa ylittää säiliön kokonaispainon luomaa samaan kohtaan kohdistuvaa momenttia, joka voidaan määritellä kuvan 8 mukaisesti.



Kuva 8. Itseankkuroitujen säiliöiden kaatumisen tarkistus (American Petroleum Institute, 2020).

Tämän lisäksi ankkuroinnissa on tilanteen vaatiessa otettava huomioon liukukitkavastus kertoimella 0,40 suhteessa voimaan joka kohdistuu säiliön pohjaan (American Petroleum Institute, 2020).

Varastosäiliön mekaaninen ankkurointi voi olla tarpeen joko tuulikuorman, maanjäristyskuorman tai sisäisen paineen noustessa API 650 -standardissa määriteltyjen rajoitusten yli, ja tällöin standardi määrittelee tarvittavat suunnittelu-, valmistus- ja asennusrajoitukset ankkuroinnin komponenteille ja itse ankkuroinnille.

## 2.8 Varastosäiliön teräsmateriaali ja sen kestävyysvaikuttavat tekijät

Varastosäiliön materiaalin ja liitosten kestävyys on ratkaiseva tekijä ympäristön ja ihmisten turvallisuuden kannalta. Säiliössä

voidaan varastoida myrkyllisiä nesteitä ja kaasuja, joiden leviäminen ympäristöön on estettävä. Pienikin halkeama tai vuoto rakenteessa voi johtaa säiliön hajoamiseen ja pahimmassa tapauksessa räjähtämiseen. On tärkeää määritellä teräslajit, joita valmistuksessa voidaan käyttää, jotta voidaan minimoida erilaisten nesteiden tai ulkoisten olosuhteiden aiheuttama säiliön valmistusmateriaaliin kohdistuvan korroosion tai syöpymisen mahdollisuus. Varastosäiliön komponenttien liitoskohdat, kuten tarkistusluukut sekä muuta säiliön kuoren läpiviennit aiheuttavat myös riskin varastosäiliön rakenteiden kestävyydelle. Myös muiden ulkoisten olosuhteiden, kuten tuuliolosuhteiden ja maanjäristysten aiheuttamien rasitusten huomioiminen liitosten kestävydessä on otettava huomioon esimerkiksi hitsaustavan valinnassa. Siksi varastosäiliön suunnittelua, valmistusta ja testaamista varten on kehitetty standardeja, joiden mukaan valmistetut varastosäiliöt ovat mahdollisimman turvallisia käyttää niille tarkoitetuissa olosuhteissa.

Varastosäiliöiden suunnittelua, valmistusta ja testaamista ohjaavia standardeja on useita. Yleisesti ottaen näistä seurataan sitä standardia, joka antaa tarkimmat ohjeet. Esimerkiksi EN standardiin tai eurokoodiin voidaan tehdä kansallinen liite, joka määrittelee tietyn osa-alueen tarkemmin soveltuen paremmin paikkakohtaiseen tarkasteluun tai täsmentäen yksityiskohtia. Tällöin seurataan kansallisen standardin tai koodin ohjeistusta.

Teräsrakenteisen varastosäiliön valmistamiseen käytettävä materiaali on valittava sovittujen standardien mukaan. API 650 -standardin mukaiset varastosäiliöt voidaan valmistaa ASTM-, CSA-, ISO- tai EN -standardeissa määritellyistä teräslajeista. Suomessa teräsrakenteet suunnitellaan standardin SFS-EN 1993

mukaan ja toteutetaan standardin SFS-EN 1090-2 mukaan. Se määrittelee teräsrakenteelle sallitut teräkset, profiilit, hitsiaineet, kiinnikkeet ja muut tarveaineet, joista teräsrakenne voidaan valmistaa (Ympäristöministeriö, 2019, s. 5 - 7 ).

Teräsrakenteiden suunnittelua ohjaava SFS-EN 1993 -standardi ohjeistaa suunnittelussa rakenteiden toteutusasiakirjojen ja rakennesuunnitelmien sisällön lisäksi toteutusluokan valitsemisessa sekä suunnitellun käyttöiän määrittämisessä, sekä toteutuksen suunnittelun ja sen asiakirjojen soveltuvuudesta, käytettävien rakennustuotteiden ja kokoonpanojen valinnassa sekä teräsrakenteiden palosuojauksen asennuksessa (Ympäristöministeriö, 2019). Standardi ohjaa lisäksi toteutuksen, palosuojauksen ja rakenteiden kelpoisuuden valvonnassa.

API 650 -varastosäiliöiden valmistamisessa sallitut teräslajit ovat EN -standardin SFS-EN 10025 mukaiset S275- ja S355-lujuusluokan teräkset, joista S355 on Suomessa yleisesti käytetty (The American Society of Mechanical Engineers, 2023). Teräslajin valinnassa otetaan huomioon siihen kuormituksen ja rakenteellisten ominaisuuksien myötä kohdistuvat lujuusvaatimukset, ilmaston ja ympäristön luomat rasitukset, pitkäaikaiskestävyys, valmistusprosessin aikana esimerkiksi hitsauksen tai kylmä/lämpökäsittelyn aiheuttamat vaatimukset, saatavuus ja hinta sekä muut vaatimukset esimerkiksi asiakkaan taholta (Teräsrakenneyhdistys, s. 4).

Varastosäiliön rakenne vaatii teräkseltä paksuussuuntaista lujuutta, joka on myös otettava huomioon materiaalia valitessa. Haurausmurtumisen ja lamellirepeilyn mahdollisuus ja niiden estäminen on otettava huomioon teräsrakennesuunnittelussa. Mikäli esiintyy kohtisuoraa painetta säiliön kuoreen, jolloin levyyn

kohdistuu pintaa vastaan kohtisuora vetojännitys, liitoksessa voi esiintyä lamellirepeilyä. Lamellirepeily on hitsisauman alla tapahtuvaa teräksen pinnansuuntaista murtumista, jota on mahdoton havaita silmämääräisesti tarkastelemalla. Lamellirepeily on pääosin valssattujen terästen haaste, koska valssatun teräksen sitkeys ja muodonmuutoskyky on huonoimmillaan teräksen paksuussuunnassa (TWI, n.d.). Materiaalin lisäksi lamellirepeilyyn vaikuttaa rakenteen jäykkyys sekä liitossuunnittelu. Haurausmurtuman mahdollisuus riippuu teräksen lujuuden ja sitkeyden lisäksi sen jännitystasosta, käyttölämpötilasta, kuormitusnopeudesta sekä aineen paksuudesta. Esimerkiksi teräksen iskusitkeydellä on suora vaikutus rakenteen haurausmurtuman esiintymiseen varsinkin kylmissä olosuhteissa (Lepov ja muut, 2017, s. 227). Haurausmurtuma voi myös saada alkunsa virheellisestä hitsauksesta tai kuorman alla olevan kohdan tai pitkään rasituksen alla olleen kohdan alkusäröstä, ja edetä nopeasti ilman teräksessä silmin havaittavaa muutosta. Haurausmurtuma on yleisempi paksuissa teräsrakenteissa, mutta mahdollinen myös ohuissa rakenteissa jos rakenteeseen kohdistuu monimutkaisempaa kuormitusta (SSAB, 2016, s. 319).

Materiaalin kestävyyttä voidaan hitsatuissa teräsrakenteissa parantaa erilaisilla pinnoitusmenetelmillä. Esimerkiksi kuumasinkityksellä teräksen korroosionkestävyyttä parannetaan sinkkikylpyyn upottamalla. Sinkki on terästä epäjalompi ja syöpyys ensin, ja suojauksen teho määritelläänkin sinkkikerroksen paksuudella (Teräsrakenneyhdistys, s. 5). Pitkäaikaiskestävyyttä voidaan parantaa myös käyttämällä ilmastorasitusta kestäviä teräksiä eli säänkestäviä teräksiä.

Teräslajin lisäksi API 650 standardi määrittelee sallitut rajat kuorilevyjen enimmäis- ja vähimmäispaksuudelle, teräksessä esiintyvien muiden alkuaineiden esiintymiselle sekä mahdollisten pintavirheiden korjaamiseen käytetylle hitsaustavalle.

## **2.9 Varastosäiliöihin kohdistuvien luonnonkuormien merkitys ja arviointi**

Varastosäiliöitä käytetään usein vaarallisten aineiden, kuten polttoaineiden ja kemikaalien varastointiin teollisuusalueilla ja sen ohutkuorinen rakenne jättää säiliön alttiiksi voimakkaille ulkoisille kuormituksille kuten hurrikaaneille, maanjäristyksille ja vastaaville luonnonvoimille. Suomen olosuhteet poikkeavat paljon muusta maailmasta juuri tuuli-, maanjäristys- ja lumiolosuhteiden osalta. Kun energialaitosta myydään esimerkiksi Aasiaan tai Yhdysvaltoihin, on paikalliset olosuhteet ja niiden mukaiset vaatimukset otettava huomioon energialaitoskomponenttien suunnittelu- ja rakentamisvaiheessa. Tällöin luonnonkuormien määrittely eroaa Euroopan standardeista, ja se on tehtävä paikalliset standardit huomioon ottaen. Teräsrakenteiden mitoituksessa on tärkeää tietää harvinaisempien tilanteiden, esimerkiksi mahdollisten suurempien maanjäristysten ja hirmumyrskyjen aiheuttamat kuormat ja niiden esiintymisen todennäköisyys suhteessa paikallisiin normaaleihin luonnonkuormiin, ja rakennesuunnittelussa kiinnostaakin enemmän maksimituuli kuin yleinen tuulisuuden taso. Lisäksi on tärkeää tietää kumpi kuorma on alueella suurempi, tuuli- vai maanjäristyskuorma. ASCE:n (The American Society of Civil Engineers) julkaisema standardi ASCE 7 käsittelee muun muassa Yhdysvaltojen tuuli- ja maanjäristyskuormia ohjeistaen varastosäiliöiden suunnittelussa ja rakentamisessa näiltä osin.

### 2.9.1 Varastosäiliöiden tuulikuormavaatimukset ASCE 7 -standardin mukaan

Arvioitaessa riittävää tuulikuorman suuruutta on otettava huomioon kohdemaan normit, maanmuodostus sekä muut vaikuttavat tekijät. Rannikolla on esimerkiksi suurempi mahdollisuus trooppisiin myrskyihin ja mantereen sisäosissa tuuliolosuhteet ovat pääosin rauhallisemmat, lukuun ottamatta hurrikaanialueita USA:ssa. Myös vuoristoseuduilla tarvitaan tarkempaa määrittelyä. Eri standardeissa ja koodeissa on erilaisia määritelmiä perustuulennopeudelle joka lasketaan keskiarvotusajan ja toistumisvälin avulla (ks. taulukko 2).

Taulukko 2. Eri standardien tuulikuorman määrittelytapoja

| <b>Standardi/koodi</b> | <b>Perustuulennopeus</b> | <b>Toistumisväli</b> |
|------------------------|--------------------------|----------------------|
| ISO 4354:2009          | 3 s (10 min)             | Ei määritelty        |
| EN 1991-1-4.6          | 10 min                   | 50 v                 |
| ASCE 7-10              | 3 s                      | 350-700-1700 v       |
| AIJ                    | 10 min                   | 100 v                |
| AS/NZS<br>1 170.2:2011 | 0.2 s                    | 500-1000 v           |

Logiikka perustuulennopeuden laskemiselle on kuitenkin sama. Tällöin lasketaan tuulennopeus, josta saadaan laskettua

dynaaminen paine ja lopuksi tästä laskemalla paine rakennuksen vaipalla.

Vientiprojekteissa on tärkeää välttää eri standardien ristiinkäyttöä esimerkiksi käyttämällä kohdemaan kuormitusstandardeja, mutta mitoittamalla rakenne tutummalla standardilla. Tuulikuorman laskeminen on monimutkainen prosessi, ja vaikka perusajatus on sama, antavat eri standardit ja koodit suuruudeltaan erilaisia tuulikuormia, vaikka lähtötiedot ovat olleet yhtäläiset (Jalkanen, 2021).

Yhdysvalloissa käytössä oleva ASCE 7 määrittelee kuormitukset ja kuormitusyhdistelyt ja on monen muunkin maan ohjeistuksen mallina. Viimeisin versio on ASCE 7-22, mutta tuulikuormien osalta olennaiset versiot ovat ASCE 7-05 sekä ASCE 7-10, joita tässä työssä seurataan. Näiden kahden version välillä on tuulikuormien määrittelyssä tapahtunut olennainen muutos, kun ASCE 7-05 tuulikuorman yhdistelykerroin 1,6 ja tuulennopeutena käytettävä 3 sekunnin puuska ja 50 vuoden toistumisaika muutettiin ASCE 7-10:ssä yhdistelykertoimeksi 1,0 ja tuulennopeudeksi 3:n sekunnin puuska ja 300 / 700 / 1700 vuoden toistumisajaksi. Tämä ei vaikuta tuulikuorman merkittävyyteen, mutta on tärkeää huomioida, että eri versioiden tuulennopeutta tai yhdistelykerrointa ei voi tästä johtuen käyttää laskennoissa ristiin.

ASCE tarjoaa kaksi vaihtoehtoa tuulikuorman määrittämiseen. Standardin avulla voidaan käyttää analyyttisiä menetelmiä, tai rajakerroksen tuulitunnelitutkimusta (BLWT). BLTW menetelmä on analyyttistä menetelmää tarkempi sisältäen mallinnuksen tuulen vaihteluista kohteessa sekä ympäröivien rakennelmien vaikutuksen tuulen vaihteluun. Tästä huolimatta BLTW-tulokset

ovat usein pienempiä verrattaessa analyttisten menetelmien avulla saatuihin tuloksiin, ja suositellaankin, että niitä käytettäisiin vähimmäissuunnittelukuormina. Tässä työssä otetaan esimerkiksi analyttinen menetelmä ja jätetään BLTW käsittelemättä (Stafford & Reinhold, 2023, s. 19-20).

Nopeuspaine  $q$  määritellään riippumatta menetelmästä, ja se riippuu rakennuksen riskiluokan perussuunnittelutuulen nopeudesta ja alueen topografiasta sekä korkeudesta merenpinnan tasosta.

Analyttisellä menetelmällä nopeuspaine lasketaan kaavan 1 mukaan (Stafford & Reinhold, 2023, s. 20):

$$q_z = 0.00256 K_z K_{zt} K_e V^2 \left( \frac{N}{m^2} \right) \quad (1)$$

Missä:

- $z$  = alaviite, joka osoittaa korkeuden maanpinnasta, jossa viitepaine lasketaan analyttisen menetelmän mukaisesti
- $q_z$  = nopeuspaine arvioituna korkeudella  $z$ , jossa  $z$  on sopiva analyttiselle menetelmälle, jota käytetään paineen tai voiman laskemiseen
- $K_z$  = nopeuspaineen altistumiskerroin arvioituna korkeudella  $z$
- $K_{zt}$  = topografinen kerroin, joka ottaa huomioon tuulen nopeuden lisääntymisen kukkuloiden ja jyrkänteiden yli
- $K_e$  = maanpinnan korkeuskerroin
- $V$  = perustuulen nopeus

Maaston altistusluokitus voi olla B, C tai D (Stafford & Reinhold, 2023, s. 21 - 22). Altistus B määritellään "kaupunki- ja esikaupunkialueiksi, metsäisiksi alueiksi tai muiksi maastoiksi, joissa on lukuisia lähekkäin sijaitsevia esteitä, joiden koko vastaa omakotitaloja tai suurempia." Altistus C määritellään "avoimeksi maastoksi, jossa on hajanaisia esteitä, joiden korkeus on yleensä alle 30 jalkaa. Tämä kategoria sisältää tasaiset, avoimet maat ja ruohomaat." Altistusluokka D määritellään "tasaisiksi, esteettömiksi alueiksi ja vesipinnoiksi. Tämä kategoria sisältää sileät mutatasangot, suolatasangot ja yhtenäisen jään."

Topografiset vaikutukset on otettu tuulikuormalaskennassa huomioon jo vuosikausia. ASCE 7 standardin analyttinen menetelmä käyttää kolmea eri kerrointa tuulen lisäkertoimen laskemiseksi riippuen maaston muodosta alueella. Tässä voidaan käyttää apuna ASCE Hazard Toolia ja Google Earthin korkeuskäyriä, joiden avulla saadaan mallinnettua tarkasti ympäröivä maasto ja löydettyä korkeimmat lähellä sijaitsevat mäet tai muut tuuleen vaikuttavat muodostelmat.

ASCE 7 viitekarttojen mukainen perustuulinopeus saadaan määriteltyä rakenteen sijainnin ja riskiluokan mukaan. Standardin viitekarttoja voidaan käyttää sijainnin ja luokituksen määrittelyyn, mutta helpoin ja tarkin tapa määrittää perustuulen nopeus suunnittelua varten on käyttää ASCE Hazard Tool -työkalua (American Society of Civil Engineers, 2025). ASCE Hazard Tool mahdollistaa hyvin tarkan sijainnin määrittämisen, minkä lisäksi työkalun lähtötiedoiksi syötetään useita muita parametreja, kuten standardiversio (ASCE 7-10, ASCE 7-16, ASCE 7-22), riskiluokka, mittausdata sekä kuormitustyyppit, joiden avulla työkalu laskee perustuulennopeuden valitussa sijainnissa.

### **2.9.2 Varastosäiliöiden seismisyysvaatimukset**

Maanjäristyksen aikana syntyy kolmen muotoisia seismisiä aaltoja. Ensisijaisia P-aaltoja, toissijaisia S-aaltoja sekä pinta-aaltoja. Maanjäristyksen sijainti voidaan löytää P- ja S-aaltojen avulla.

Varastosäiliöt ovat rakenteiltaan alttiita vaurioille keskisuurten ja suurten maanjäristysten aikana. Tällöin saattaa syntyä muutoksia varastosäiliön seinämään, repeymiä säiliön ja putkien välisiin liitoksiin tai seinämän ja pohjan väliseen hitsaussaumaan tai esimerkiksi seinämän alaosan kantavuuden pettämistä. Tästä syystä maanjäristyksen tapahtuessa rakenteiden vasteelle on suoritettu lukuisia kokeellisia ja analyttisiä tutkimuksia, joilla on pyritty määrittämään sekä hydradynaamisten paineiden vaikutusta että seismisen liikkeen sivuttaiskomponentin aiheuttaman dynaamisen voiman vaikutusta rakenteisiin.

Eriyistä huomiota on kiinnitettävä nesteiden varastointiin käytettäviin säiliöihin. Maanjäristyksen aikana neste kohdistaa säiliön seinämään hydradynaamisen voiman. Graham ja Rodriguez (1952) todistivat suorittamallaan testeillä, että säiliön sisällä värähtelevä neste luo kaksi erilaista komponenttia, joista ensimmäinen, impulssikomponentti, on horisontaalinen liike sekä y- että x-akselin suuntaisena kallistuen akselin ympäri, mutta kummassakin tapauksessa siis liikkuu yhtenäisesti säiliön kanssa, ja toinen, konvektiokomponentti, edustaa pintaan kohdistuvaa aaltoliikettä. Näiden tutkimusten perusteella on kehitetty mekaanisia malleja yksinkertaistamaan hydrodynaamisten voimien arviointia ja ennustamaan perusleikkausvoiman, kaatumismomentin ja maksimiaaltojen korkeuden vastetta. Sekä

API 650 että Eurocode 8 käyttävät näitä malleja (Saint-Felix-López ja muut, 2021, s. 6).

Maanjärityksille aktiivisilla alueilla on rakenteiden kuormituksille laskettava maanjärityskuorma. Maanjärityksen voimakkuutta voidaan kuvata magnitudilla, intensiteetillä ja kallioperän maksimivaakakiihtyvyydellä (PGA, peak ground acceleration). Rakennesuunnittelun osalta tärkein parametri on kallioperän maksimivaakakiihtyvyys, joka maanjärityksen sattuessa kohdistuu erilaisena kuormituksena eri suuntiin. Rakennusten rakenteiden repeämisvaara kasvaa vaakasuuntaisen, eli PGA kiihtyvyyden kasvaessa. PGA-arvon perusteella voidaan luokitella alustava maanjäritysmitoituksen tarve seuraavasti:

- $a_g \leq 0,08g$ , alhainen seismisyys
- $0,08g < a_g \leq 0,24g$ , kohtuullinen seismisyys
- $a_g > 0,24g$ , korkea seismisyys

Jossa  $a_g$  kuvaa PGA-arvon suuruutta. Sekä kohtuullisella että korkealla seismisyysalueella tarvitaan maanjäritysmitoitusta ja alhaisen seismisyyden alueella se voidaan jättää tekemättä.

Maanjäritysten seismologisessa luokittelussa voidaan käyttää magnitudia tai erilaisia maanjärityksen intensiteettiasteen mukaisia taulukoita, jotka luokittelevat maanjäritykset niiden rakenteisiin, ihmisiin ja eläimiin sekä luontoon aiheuttamien vaikutusten perusteella. Intensiteettiasteikko ei ole instrumentaalisen mittaustavan avulla määritelty analyttinen mittaustapa, vaan kuvaa maanjärityksen aiheuttamia vaikutuksia. Kun halutaan mitata instrumentaalisesti määritelty arvo maanjärityksen voimakkuudelle, käytetään magnitudia. Magnitudi perustuu yhteisesti kalibroitujen instrumenttien avulla

mitattuun maanjäristysaaltojen amplitudiin. (International Electrotechnical Commission, 2023, s. 7 - 8 ).

Seismisen kuormituksen laskemisen ohjeistuksena Euroopassa on käytössä EN 1998, eli Eurocode 8 (EC 8), ja Yhdysvalloissa aiemmin käytössä ollut UBC 97 (1997 Uniform Building Code). UBC koodin on korvaa tulevaisuudessa ASCE 7-standardi. UBC koodin mukainen seismisyysalueiden luokittelu on jaettu kuuteen alueryhmään, joiden intensiivisyys on skaalattu muokatun Mercallin skaalan mukaan (Modified Mercalli Scale, MM), kun Euroopan alueella käytössä on Euroopan makroseisminen skaalaus (European Macroseismic Scale, EMS-98) (International Electrotechnical Commission, 2023, s. 8). 0 - kategorian vyöhykkeellä ei tapahdu vakavaa seismistä liikettä, kun korkeimmassa vyöhykkeen 4 luokassa on mahdollisuus hyvin vakavaan seismiseen liikehdintään.

Taulukko 3. UBC-koodin mukaiset seismisen aktiivisuuden vyöhykkeet (International Electrotechnical Commission, 2023, s. 16)

| <b>Seismisen aktiivisuuden vyöhyke</b> | <b>PGA, kallioperän maksimivaakakiihtyvyyt, m/s<sup>2</sup></b> |
|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| 0                                      | 0,0 – 0,5                                                       |
| 1                                      | 0,5 – 0,75                                                      |
| 2A                                     | 0,75 – 1,5                                                      |
| 2B                                     | 1,5 – 2                                                         |
| 3                                      | 2 – 3                                                           |
| 4                                      | 3 – 4 ja tästä ylöspäin                                         |

UBC 97 -koodin mukaan seisminen analyysi voidaan luokitella staattisiin ja dynaamisiin analyysihin. Staattisessa analyysissä maanjäristysvoimat sovelletaan rakenteeseen kohdistuvina staattisina kuormina. Dynaamisessa analyysissä taas otetaan huomioon kuormien dynaaminen toiminta ja se voidaan laskea käyttäen joko vasteen spektrianalyysimenetelmää, tai aikahistoria-analyysia. Näistä dynaaminen analyysi on koettu yksinkertaisemmaksi, helppokäyttöiseksi ja toimivaksi analyysiksi (Prasad, 1997).

EC 8 -koodin mukaan seismisyysalueet on luokiteltu tärkeysluokkiin seismisen tapahtuman todennäköisyyden ja maaperäluokan perusteella. Todennäköisyys on laskettu keskimääräisen toistumisajan perusteella ja EC 8 -koodissa on käytetty 10 % todennäköisyyttä seuraavan 50 vuoden aikana. Eri tärkeysluokat on laskettu tärkeys kertoimen  $\gamma_I$  ja keskimääräisen toistumisajan mukaan seuraavan taulukon mukaisesti

Taulukko 4. Seismisyysalueiden EC 8:n mukainen tärkeysluokittelu (International Electrotechnical Commission, 2023).

| <b>Tärkeysluokka</b>     | <b>Keskimääräinen toistumisaika vuosissa</b> |
|--------------------------|----------------------------------------------|
| I ( $\gamma_1 = 0,8$ )   | 243                                          |
| II ( $\gamma_1 = 1,0$ )  | 475                                          |
| III ( $\gamma_1 = 1,2$ ) | 821                                          |
| IV ( $\gamma_1 = 1,4$ )  | 1303                                         |

Euroopan alueella on myös käytössä vyöhykeluokittelu, mutta luokittelun raja-arvot eroavat UBC -koodin luokittelusta, koska käytössä on erilainen kaava intensiivisyyden skaalautumiseen.

Taulukko 5. EC 8 vyöhykeluokittelu (International Electrotechnical Commission, 2023).

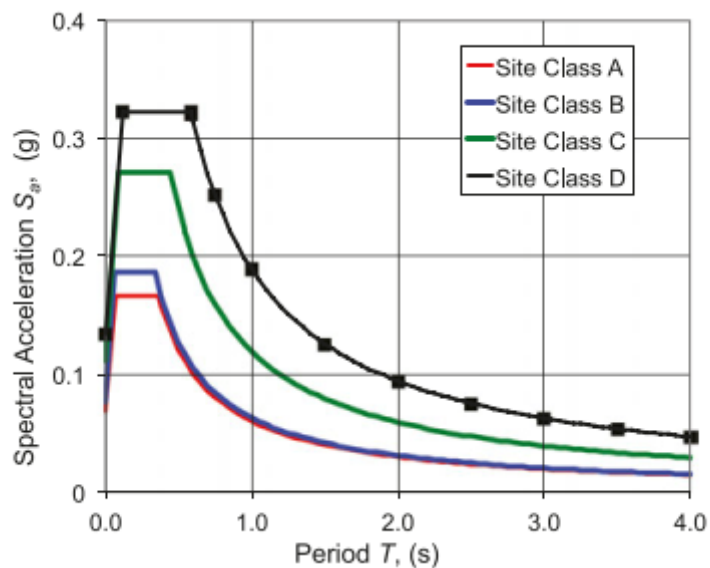
| <b>Seismisen aktiivisuuden vyöhyke</b> | <b>PGA, kallioperän maksimivaakakiihtyvyys, m/s<sup>2</sup></b> |
|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| 0                                      | 0,01 – 0,2                                                      |
| 1                                      | 0,2 – 0,5                                                       |
| 2                                      | 0,5 – 1                                                         |
| 3                                      | 1 – 2                                                           |
| 4                                      | 2 – 20 ja tästä yli                                             |

ASCE 7 ei käytä laskennoissaan PGA-arvoa, vaan lyhyen värähdysajan ( $S_s$ , short period spectral acceleration) sekä yhden sekunnin värähdysajan ( $S_1$ , spectral acceleration) mukaisiin spektriarvoihin jotka ilmoittavat seismisyyden tason tietyn ajan kuluessa (Charney & Heausler, 2020, s. 17). ASCE 7 ero EC 8 koodiin on esimerkiksi kahden prosentoin maanjäristystapahtuman todennäköisyys MCE (maximum considered earthquake) seuraavan 50 vuoden aikana, mikä tarkoittaa 2475 vuoden toistumisväliä ja siten huomattavasti harvempaa toistumisväliä verrattuna EC 8:aan. Myös teräsrakenteille käytettävät käyttäytymiskertoimet ovat selvästi eri suuruisia johtuen seismisyyden erilaisesta todennäköisyydestä ja tarkasteltavista mitoitustilanteista.

ASCE 7 -standardin mukaisessa seismisyyskuorman laskemisessa käytettäviä parametreja on useita. Perusparametreihin lasketaan spektriarvot  $S_S$  ja  $S_1$ , sijaintikerroin  $F$ , ajanjakso  $T$  sekä seismisyyskerroin  $C$ . Näiden lisäksi merkitystä on maaperän sekä kivimateriaalin laadulla, joiden mukaan sijainti luokitellaan, sekä muilla paikkakohtaisilla tiedoilla (Charney & Heausler, 2020, s. 18).

ASCE 7 -standardin mukaista seismisyyskuormaa laskettaessa paikkakohtainen tieto voidaan kartoittaa standardin avulla luokittelemalla sijainti ASCE:n karttojen avulla, mutta tämä todetaan epätarkaksi tavaksi ja  $S_S$  ja  $S_1$  suositellaan määriteltäväksi verkkopohjaisen työkalun avulla (American Society of Civil Engineers, 2025).

Työkalujen avulla saadaan paikkakohtaiset maanjäristyskuormakertoimet. Sijaintikohtaista luokittelua käytetään kuvaamaan tietyn paikan maaperätyyppiä sekä niiden vaikutusta paikan kertoimiin  $F_a$  ja  $F_v$ , joita käytetään suunnitteluvastetta (design response spectrum) kehitettäessä (Charney & Heausler, 2020, s. 27). Pelkkä paikan luokitusmenettely ei kuitenkaan kata mahdollisia seismisten ja geologisten vaarojen arviointia.



Kuva 9. Esimerkki suunnitteluvastetaajuus-spektristä (Charney & Heausler, 2020).

Seisminen tärkeyskerroin  $I_e$  (seismic importance factor) kuvaa maanjäristystapahtuman riskikategoriaa, jota käytetään apuna sivuttaisvoimien määrittelyssä suunnittelun aikana. Näiden avulla saadaan laskettua seisminen suunnittelukategoria (SDC, seismic design category), jota puolestaan tarvitaan vasteen muutoskerroimen (response modification coefficient,  $R$ ), järjestelmän ylivahvuuskertoimen (system overstrength factor  $\Omega_0$ ), ja siirtymän vahvistuskertoimen (deflection amplification factor,  $C_d$ ) ohella, kun lasketaan arvojen mukaisia rakenteellisia tarpeita (Charney & Heausler, 2020, s. 47 - 48).

Käytännössä merkitystä on siis sillä miten korkea ja kuinka leveä suunnitteluvastetaajuus-spektrin graafi on.  $S_s$  näkyy graafissa jyrkkyytenä, joka kertoo kuinka ärhäkällä seisminen kuorma on ja kuinka kauan se kestää, ja  $S_1$  eli graafissa näkyvän tason (plateau) pituus ja sen laskeutuminen kuvaa kuorman kestoa ja sen hiipumista.

## **2.10 API 650 -varastosäiliön kustannuslaskenta energialaitosrakentamisessa**

Energiasektori elää tällä hetkellä jatkuvassa muutoksessa. Huolet ilmastonmuutoksesta sekä öljyvarantojen loppumisesta ovat huolestuttaneet ja energian tuotannossa katse on siirtynyt uusiutuviin energialähteisiin ja polttoaineisiin. Energialaitosrakentamisessa on entistä tärkeämpää tutkia ja kehittää uusia mahdollisuuksia tuottaa sähköä, ja sektoriin kohdistuu kovenevan kilpailun myötä jatkuva paine optimoida toimintaa ja vähentää kustannuksia. Energia-alan yhtiön suorituskykyyn vaikuttavia tekijöitä on viisi: kustannukset, aikataulu, turvallisuus, määrä ja tuotanto. Näistä kustannusten arviointi on ensisijaisen tärkeää energiaprojektinhallinnassa (Montang, 2023, s. 2 - 3). Tähän saadaan helpotusta, kun eri komponenteista on olemassa tarkkoja kustannusarvioita. Tällöin taas korostuu tarve tarkemmille kustannusarviomenetelmille ja -työkaluille, jotta voidaan säilyttää taloudellinen kestävyys ja operatiivinen tehokkuus energiarakentamisen alalla, jossa kilpailu on jatkuvaa ja vaatii jatkuvaa kustannusten kontrollointia.

API 650 -varastosäiliöiden hinnoitteluun vaikuttaa suunniteltu koko, jonka lisäksi merkitystä on suunnitteluun ja valmistukseen käytetyllä ajalla, materiaalilla ja sen pintakäsittelyllä, lisäkomponenteilla, kuten säiliöön asennettavalla mittausvälineistöllä, sekä valitulla kattotyypillä. Muita kokonaiskustannuksiin vaikuttavia tekijöitä ovat esimerkiksi perustukset ja alustarakenteet sekä tarvittavat tarkastukset ja testit. Varastosäiliön suunnitteluvaiheessa tehdään sijoituspaikan mukaan tuuli- ja seismisyyslaskelmat, joiden mukaan määritellään kohdekohtaiset rakenteelliset vaatimukset. Tällöin

määritellään tarvittava materiaali sekä kuoren paksuus, jolla on varsinkin isoissa varastosäiliöissä suuri merkitys kustannuslaskentaan.

Tarkasteltavassa kohteessa on kustannuslaskennassa aiemmin hyödynnetty mittakuvissa mainittuja standardimittoja ja niiden mukaan laskettuja materiaalikustannuksia, ja kokonaiskustannuksiin on lisätty muut tarvittavat komponentit ja projektikohtaiset tarpeet ja vaatimukset. Tällöin on kuitenkin jätetty huomioimatta paikkakohtaiset vaatimukset luonnonkuormien osalta, ja Yhdysvaltojen markkinoiden korostuessa voimalaitosten myynnin on tarpeen päivittää kustannuslaskennan työkaluja kohtaamaan paikalliset standardit, tarpeet ja olosuhteet. Näitä puutteita korjaamaan on tarkoitus etsiä menetelmä, jonka avulla varastosäiliöiden hinnoittelu projektin myyntivaiheessa olisi jatkossa tarkempaa ja perustuisi selkeämmin projektikohtaisiin tarpeisiin varsinkin luonnonkuormien osalta.

### 3 TUTKIMUSDATAN ANALYSOINTI

Tutkimus aloitettiin kartoittamalla nykytilanne tarkastelun kohteena olevan yrityksen varastosäiliöiden asiantuntijan kanssa. Varastosäiliöistä on tehty vuonna 2017 Excel-taulukko, jonka mukaan säiliöiden hinnat nykyäänkin määritellään. Säiliöt on taulukossa kategorioitu materiaalin, tyypin ja koon mukaan, ja taulukosta voi löytää säiliölle mittapiirustuksen sekä laskelmat kahdelle eri tuulikuormalle sekä 4-luokan seismiselle alueelle. Tällä tavalla luokiteltuna ja esitettynä tietojen voidaan kuitenkin kokea olevan puutteelliset projektin myyntivaiheen kustannusarviota tehdessä. Yhdysvalloissa käytettävät standardit koskien seismisyysluokitusta ja mahdollisen maanjäristyksen säiliöön kohdistavan kuormituksen laskemista poikkeavat aikaisemmin käytössä olleesta. Lisäksi tuulikuorman laskemisessa käytössä tällä hetkellä oleva luokittelu, jossa tuulikuorma lasketaan 82 mph (~36,7 m/s) sekä 123 mph (~55 m/s) arvoilla, koetaan hieman epäselväksi ja mahdollisesti riittämättömäksi nykytarpeisiin.

Maanrakennusosaston vanhempaa kehityspäällikköä konsultoitiin hahmotettaessa muiden voimalaitoskomponenttien laskennoissa nykyään käytössä olevia keinoja. Myös moottoreiden ja generaattoreiden pohjakehysten asennuksen maanjäristyskuorman laskemisessa on päivitetty laskutapaa sekä ns. kriittisiä rajapintoja, joiden ylittyessä on tarpeen tehdä rakenteellisia vahvistuksia ja muita toimenpiteitä moottorin ja generaattorin pohjakehysten liitoskohtien ja ankkuroinnin osalta. Tämän lisäksi maanjäristyskuorman laskemistavan päivitys on ollut esillä yleisemmin, koska yritys on siirtymässä aiemmin käytössä olleesta UBC 97:n seismisten alueiden luokittelutavasta

ASCE 7-16 -standardin mukaiseen seismisyyskuorman luokitteluun ja laskemistapaan. Myös tuulikuormien laskennassa käytetty ASCE 7-10 -versio päivitetään lähiaikoina uudemman ASCE 7-16 mukaiseksi.

### **3.1 Tutkimusmenetelmä**

Tutkimusmenetelmänä käytettiin tässä työssä laskennallista tiedettä, jossa tietokoneita käytetään työkaluina ja tutkimusvälineinä empiiristen tietojen käsittelyyn ja analysointiin matemaattisten mallien avulla. Tutkimustyössä käytössä oleva laskentaohjelma on klassinen esimerkki laskennallisen tieteen työkalusta. Laskennallinen tiede sisältää simulointia, mallinnusta ja tiedonhallintaa, ja voi hyödyntää myös tekoälyä. Laskennallisen tieteen avulla voidaan selittää kokeellisia tuloksia ja ennustaa myös uusia tuloksia yhdistämällä sekä teoreettinen että kokeellinen tutkimus (Jyväskylän yliopisto, n.d.).

Laskentaohjelma, jolla varastosäiliöihin kohdistuvia luonnonkuormia ja niiden aiheuttamaa rakenteellista vahvistusta ja ankkuroinnin tarpeellisuutta määritetään, on Tank 13 -niminen ohjelma, joka on käytössä vaasalaisessa suunnitteluyrityksessä.

### **3.2 API 650 -säiliöiden nykyinen tuulikuorma- ja seismisyyslaskelma**

Nykyistä laskentamenetelmää tutkitaan laskennallisen tieteen työkalujen avulla ja kehitetään sitä vastaamaan nykytarpeita. Tällä hetkellä tuuli- ja seismisyyskuorma lasketaan Tank 13 -laskentaohjelmalla. Laskuohjelman kanssa aiemmin työskennellyt henkilö on jäänyt eläkkeelle, ja uusien laskelmien parissa työskentelevä asiantuntija ei ole syventynyt kyseiseen laskuohjelmaan, mutta ohjelmaan syötettävien parametrien

perusteella voidaan arvioida ohjelman hyödyntävän luonnonkuormien analysoinnissa ASCE 7-10 analyyttistä menetelmää, jota myös API 650 standardi ohjaa käyttämään. Tarkoitus on jatkaa saman Tank 13 -laskentaohjelman käyttöä myös uusia laskelmia tehdessä. Sekä seismisyys-, että tuulikuorman laskeminen hyödyntää paikkakohtaisia tuuli- ja maanmuodostustietoja, jotka nykyisissä laskelmissa on syötetty joko projektikohtaisesti käsin tai käyttämällä varsinkin maanmuodostustietoihin niin sanottuja default- eli vakioarvoja, joiden voidaan päätellä vastaavan keskimääräisesti normiarvoja ilman suurempia poikkeavuuksia.

Myös uusissa laskelmissa maanmuodostuksen arvoina tuulikuormalaskelmissa käytetään vakioarvoja esimerkiksi topograafisessa tekijässä ja tärkeyskertoimessa. Vakioarvoja käytettäessä saadaan summittainen tulos, jota voidaan hyödyntää tässä tapauksessa myynnin työkalun kehittämisessä, mutta projektikohtaista kuormitusta laskettaessa paikkakohtaiset tiedot voidaan hakea ASCE Hazard -työkalun avulla.

Varastosäiliön syötetiedoiksi tarvitaan yksityiskohtaiset tiedot esimerkiksi säiliön suunnittelustandardista, -menetelmästä, suunnittelulämpötilasta ja -paineesta, kuorimateriaalista, kuoren suunnittelujännityksestä ja hydrostaattisesta testijännityksestä. Lisäksi lähtötiedoiksi tarvitaan säiliön halkaisija, kuoren korkeus, suunniteltu nestepinta, nesteen ominaispaino, rakenteiden paino, tuulen nopeus, tiedot kuorikerroksista ja niiden materiaalista sekä korroosiovaroista, vähimmäismurto- ja vetolujuuksista. Ankkuripulttien tiedot, kuten sallittu jännitys, myötöjännitys, siirtymä keskisäiliön halkaisijasta sekä katon tiedot, kuten

kattopellin paksuus ja korroosiovara, kulma katon ja vaakasuoran välillä, nettopinta-ala, paino, materiaali ja suunnittelujännitys, ovat myös olennaisia lähtötietoja kuormitusta laskettaessa Tank 13 -ohjelmalla. Seismistä kuormitusta varten laskentaohjelma pyytää syöttämään seismisen vyöhykkeen tai vyöhykekertoimen, tärkeys kertoimen, paikan vahvistuskertoimen, säiliön kuoren kokonaispainon, pohjalevyn paksuuden ja vähimmäislujuuden sekä ankkurointitiedot ja sivuttaisvoimakertoimet. Nämä tiedot saadaan API 650 -standardista sekä säiliön mittakuvista ja liitetiedostoista. Tuulen nopeus voidaan määrittellä haluttuun raja-arvoon tai paikkakohtaiseen arvioon. Paikkakohtaiset arvot voidaan myös hakea ASCE Hazard -ohjelman avulla.

Syötettävien lähtöarvojen ja muuttujien avulla ohjelmasta saadaan halutut tulokset esimerkiksi tietyllä määritellyllä luonnonkuormalla ta paikkakohtaisilla arvoilla vaadittu ankkurointimenetelmä, tuulivahvikkeiden tarve, vaipan paksuus ja muita rakenteellisia määreitä.

Nykyisistä laskelmista on luotu matriisi, johon on koottu laskelmat eri API 650 säiliöversioiden standardimittakuvista sekä kuormituslaskelmien tuloksista mainituilla tuulikuormilla sekä maanjäristysalue 4:n (zone 4) arvoilla. Laskelmissa on mainittu lisäksi säiliön ankkurointiin tarvittavien ankkuripulttien määrä.

Tutkimustyön alkuvaiheessa laskin pohjatyönä tyhjän säiliön painoerot mittakuvien sekä eri kuormituslaskelmien tulosten välillä. Tuloksista on huomattavissa, että säiliön mittakuvassa laskettu paino eroaa hieman eri tuulikuormilla laskettujen arvojen mukaisesta todellisesta painosta ja vielä enemmän maanjäristyskuormalla lasketusta painosta. Esimerkiksi 2000 m<sup>3</sup> varastosäiliön mittakuvassa tyhjän säiliön painoksi on laskettu

65 400 kg, kun maanjäristyskuorma huomioiden säiliön todellinen paino on laskelman mukaan 75 660 kg.

Tulosten perusteella painoeroa myyntivaiheessa käytetyn painon ja reaalisen painon välillä syntyy tällöin 10 260 kg, ja tämän voi laskea vaikuttavan hintaan jonkin verran. Laskelmista käy myös ilmi, että korkeammilla tuulikuormilla sekä seismisyyskuormalla ankkuripulttien määrä kasvaa huomattavan korkeaksi, jopa niin, että 2000 m<sup>3</sup> varastosäiliön ankkuripulttien on oltava asennettu 0,74 metrin välein, eli ottaen huomioon säiliön koon, hyvin tiheään. Tämä myös sekä hankaloittaa että pitkittää asennustyötä paikan päällä.

Tutkimustyön tarkoituksena on löytää toimivampi tapa arvioida projektiin valittavan säiliön kustannuksia jo projektin myyntivaiheessa. Edellä mainituista tuloksista voidaan päätellä, että nykyisessä työkalussa on päivittämisen tarvetta.

### **3.3 Tutkimustyö**

Tutkimustyö aloitetaan päivittämällä hinnoitteluun vaikuttavien luonnonkuormien merkittävät raja-alueet, joiden mukaan säiliömatriisi tullaan päivittämään. Tuulikuorma- ja seismisyyslaskelmien päivittäminen aloitetaan kartoittamalla tarve mahdollisille uusille tuulennopeusrajoille. Tämän lisäksi seismisyyslaskelmat on jatkossa laskettava eri tavalla johtuen siirtymisestä seismisyysalueluokituksesta (zone- luokittelu) ASCE 7 mukaiseen laskentatapaan. Tässä työn vaiheessa konsultoitin vanhempaa kehityspäällikköä, joka on ollut päivittämässä kohdeyrityksen muiden energiarakentamiseen liittyvien komponenttien seismisyyslaskelmia. Koska alustavat hahmotelmat sopivien raja-arvojen selvittämiseksi oli jo tehty

muille komponenteille, todettiin, että myyntiosaston työn yksinkertaistamiseksi samojen raja-arvojen käyttäminen myös varastosäiliöiden seismisyyslaskelmissa olisi suotavaa. Laskentatyökalun parametreinä seismisyyskuormitusta laskettaessa sovittiin uusissa laskelmissa käytettävän lähtöarvona suunnitteluperusteista spektraalista kiihtyvyyssarvoa  $S_{DS}$ . Laskentaohjelmaan lähtötietoja syötettäessä paikkakohtaiset spektriarvot jätetään arvottomiksi, jolloin ohjelma laskee säiliön kuormituksen suoraan annetun  $S_{DS}$  arvon mukaan. Vaikka tällöin tulos ei ole tietyn geograafisen sijainnin mukaan määritelty, sopii se hyvin tutkimuksen tarkoitukseen eli kartoittamaan kustannusperäisiä muuttujia erilaisissa seismisissä olosuhteissa.

Tutkimuksen ensimmäisessä vaiheessa päädyimme lisäämään tuulikuormalaskentoihin yhden korkeamman luokituksen verrattuna aikaisempiin laskelmiin, eli 150 mph (~67,1 m/s) raja-arvon. Ajoittainen tuulennopeus paikallisesti on lisääntynyt varsinkin rannikkoalueilla, ja edellisiä raja-arvoja hieman korkeampi arvo koettiin tuulikuormien osalta tarpeelliseksi lisäykseksi säiliöön kohdistuvan kuormituksen kartoittamiseen. Tämän lisäksi suunniteltiin otettavaksi laskelmiin mukaan maanjäristyskuorman laskeminen 150 mph tuulennopeudessa  $S_{DS}$  arvoilla 0.9 g ja 1.1 g. Näillä samoilla  $S_{DS}$  arvoilla maanjäristyskuormaa seurataan esimerkiksi moottorin ja generaattorin ankkuroinnin kuormituksessa niin, että alle 0.9 g ei aiheuta mitään toimenpiteitä, 0.9 g – 1.1 g välillä tarvitaan ankkurointi ja yli 1.1 g arvolla otetaan käyttöön vaimennuslaitteet.

Kartoitusvaiheessa laskelmia tehdään kolmella eri säiliökoolla, joista pienin on 500 m<sup>3</sup>, toinen 1000 m<sup>3</sup> ja suurin 5000 m<sup>3</sup>.

Tarkoituksena on myös alkutarkastelun aikana selvittää kumpi kuormista vaikuttaa varastosäiliöön voimakkaammin, tuuli- vai maanjäristyskuorma.

Jo ensimmäisissä laskuissa huomataan, että korkeimmalla sovitulla seismisyysarvolla  $S_{DS}$  1,1 g ei ankkuripulttien määrässä päästä samaan lukumäärään kuin nykyisessä seismic zone 4 - laskelmassa. Nykyisin käytössä olevissa laskelmissa todettiin olevan huomattavan suuri määrä ankkuripultteja, ja niissä on myös käytetty sellaisia muuttujia, joita uudemmassa versiossa ei enää löydy. Pienimmässä, 500 m<sup>3</sup> säiliössä, eroja ei juurikaan esiinny ja suuremmissa säiliöissä voidaan ensimmäisten laskelmien avulla huomata, että yhtäläisillä raja-arvoilla laskettaessa edellisten ja uusien laskelmien välillä on huomattavia eroja esimerkiksi ankkurointiin tarvittavien ankkuripulttien määrässä. Tämä saattaa johtua inhimillisistä virheistä edellisten laskujen aikana ja toisaalta myös muutoksista standardien eri versioiden välillä, joka on vaikuttanut laskentaohjelman arvoihin sitä päivitetäessä. Edellisissä laskelmissa muuttujista on myös jätetty kokonaan pois pohjalevy ja käytetty kattomalli on erilainen verrattuna yrityksellä käytössä olevaan malliin, joka on varmasti myös osaltaan vaikuttanut tulosten eroavaisuuksiin. Sisäisten tukirakenteiden mallinnuksessa on voinut olla myös eroja verrattaessa nykyisiin muuttujiin.

Laskelmiin vaikuttaa myös esimerkiksi vapaan nestepinnan ja säiliön katon välinen tila, jonka takia kattotyypin valinnalla on merkitystä laskujen tulosten suhteen. Maanjäristyksen aikana neste säiliön sisällä alkaa liikkumaan ja kohdistaa seinämiin hydrostaattista painetta, jonka lisäksi neste nousee kohti kattoa aiheuttaen mahdollisen vaaratilanteen. Tässä tutkimuksessa jätän

silti ilmiön syvemmän tarkastelun pois, koska työstä tulisi muuten liian laaja. Ilmiö on silti syytä huomioda. Laskuohjelma kuitenkin laskee ilmiön vaikutuksen säiliön rakenteisiin ja varoittaa mahdollisen vaaratilanteen mahdollisuudesta automaattisesti. Varoitus johtaa tarkempiin projektikohtaisiin laskelmiin ottaen huomioon yksityiskohtaiset paikkakohtaiset tiedot sekä muut projektikohtaiset laskelmiin vaikuttavat tekijät, jolloin voidaan laskea varastosäiliölle tarpeen olevat rakenteelliset muutokset juuri kyseiselle projektille.

Ensimmäisten koelaskujen jälkeen on tarkoitus kartoittaa miten työtä olisi paras jatkaa. Olennaista on kartoitusvaiheessa laskuohjelman ja päätettyjen raja-arvojen avulla päätellä onko varastosäiliöihin kohdistuvalla tuulikuormalla vai maanjäristyskuormalla suurempi merkitys, ja sen jälkeen iteroimalla löytää sellaiset matriisiin lisättävät raja-arvot edellä mainituista tuulikuorman ja maanjäristyskuorman raja-arvoista, joiden kohdalla vaaditaan olennaisia rakenteeseen vaikuttavia muutoksia. Oletuksena on, että näiden raja-arvojen avulla voidaan määritellä mahdollisimman turvallisten ja mahdollisimman kevyiden, kustannuksiltaan optimoitujen varastosäiliöiden hinnoittelutyökalu.

Laskelmia jatketaan seuraavaksi yhdellä 5000 m<sup>3</sup>:n säiliökoolla jolloin voidaan keskittyä löytämään sellaisia raja-arvoja, joilla rakenteeseen tulee muutoksia. Laskelmissa kiinnitetään huomiota muun muassa rengasmuurin kaatumismomenttiin (ringwall overturning moment) sekä ankkuripulttien määrään, kuorilevyn paksuuteen ja tuulijäykisteiden tarpeeseen, jotka kaikki vaikuttavat säiliön lopulliseen painoon tai muilla tavoin sen kustannuksiin. Laskelmissa käytettyihin tuuli- ja

maanjäristyskuormien raja-arvoihin lisätään myös korkeammat arvot teoreettista tarkastelua varten, tuulikuormalle 180 mph (~80,5 m/s) raja-arvo, ja seismiselle kuormalle  $S_{DS}$  1,3 g.

Laskelmista voidaan todeta heti, että maanjäristyskuormalla on selvästi suurempi vaikutus kuin tuulikuormalla. Ensimmäinen tuulijäykiste on tarpeen noin 111 mph (~49,7 m/s) tuulikuormalla ja 180 mph kuormalla tarvitaan toinen tuulijäykiste. Ankkuripulttien määrä puolestaan pysyy samana kaikilla tuulikuormilla, mutta määrä alkaa lisääntymään  $S_{DS}$  arvon saavuttaessa 0,4 g. Tästä eteenpäin ankkuripulttien yhtenäispaino lisääntyy 0,9 g seismisellä kuormalla noin 3000 kg, 1,1 g  $S_{DS}$  arvolla noin 5000 kg ja 1,3 g  $S_{DS}$  arvolla noin 9000 kg. Koska mittakuvissa standardisäiliön paino on 127 000 kg, tällaisella painon lisääntymisellä ei koeta kustannuspohjaisessa tarkastelussa olevan kovin suurta painoarvoa. Huomion arvoista on kuitenkin se, että tuulikuormalla on odotettua paljon vähäisempi merkitys säiliöön tarvittaviin ankkuripulttien määrään. Edellisissä laskelmissa ankkuripulttien määrää jouduttiin kasvattamaan jo pienemmillä kuormituksilla.

Huomiota herättävä tulos on myös se, että siinä missä vanhoissa laskelmissa säiliön tyhjäpaino saattoi lisääntyä standardimittakuvassa mainitusta painosta jopa 10 260 kg (2000 m<sup>3</sup> säiliössä), uusien tulosten mukaan tyhjäpaino säilyy kaikilla kuormituksilla samana eikä levyn vahvuuksia ole tarpeen muuttaa kovemmallakaan tuulella tai keskinkertaisella maanjäristyskuormituksella. Verrattaessa laskelmien lähtötietoja keskenään käy ilmi, että edellisistä laskelmista on tuntemattomasta syystä jätetty kokonaan pois säiliön pohjalevy.

Itoimalla voidaan päästä tulokseen, että ensimmäinen kuorilevyn vahvennus tulee vastaan  $S_{DS}$  arvon ylittäessä 1,3 g.

Tuloksia analysoidessa huomattiin, että alun perin korkeimmaksi raja-arvoksi valikoitu  $S_{DS}$ -arvo 1,1 g näyttää olevan edellisten laskelmien zone 4 arvoa selvästi alhaisempi. Itoimalla todettiin, että zone 4 vastaa  $S_{DS}$  arvoa 1,41 g niillä lähtötiedoilla mitä uusissa laskelmissa käytetään. Tästä syystä päädyimme korottamaan laskelmiin valittua korkeimpaa maanjäristysarvoa 1,1 g  $\rightarrow$  1,4 g arvoon, jotta saisimme säiliömatriisiin tarpeeksi korkean maanjäristyskuorma-arvon referenssiksi sellaisiin projekteihin, joissa on tarve suuremman seismisen kuorman kestävyteen.

Tutkimustyön seuraavassa vaiheessa valitaan neljä eri varastosäiliökokoja ja neljä eri variaatiota luonnonkuormille. Raja-arvoina pidetään tutkimustulosten perusteella 150 mph tuulennopeutta, jolloin säiliöön on tarpeen lisätä tuulijäykiste, maanjäristysarvona  $S_{DS}$  0.9 g sekä yhteiskuormitusarvoina  $S_{DS}$  1.1 g ja 150 mph ja  $S_{DS}$  1.4 g johon on lisätty 150 mph tuulikuorma. Tuloksista tarkastellaan kokonaispainoa sekä ankkuripulttien määrää näillä arvoilla, jonka lisäksi lopuksi päädytään lisäämään huomiomerkintä tapauksissa, joissa ankkuripulttien etäisyys laskee alle metriin. Näin voidaan yrittää välttää liian tiheään asennettuja ankkuripultteja ja antaa esimerkiksi projektikohtainen mahdollisuus muuttaa ankkuroinnissa käytettyjä materiaaleja ja vaikuttaa siten pulttien määrään ja etäisyyteen.

Erilaisia API 650 -säiliökokoja on nykyisessä matriisissa 20 kappaletta, ja näistä jokaisesta tehdään neljä uutta kuormitustapauslaskelmaa jotka kootaan yhdeksi dokumentiksi ja

arkistoidaan yrityksen järjestelmään. Uusista kuormituslaskelmista merkitään matriisiin kustannuslaskennan käyttöön tyhjäpaino ja ankkuripulttien määrä. Hyperlinkki laskelmista merkitään koottuun dokumenttiin, josta näkee yksityiskohtaisemmat ja laajemmat tiedot kyseisen säiliön kuormituslaskelmista.

## 4 TULOSTEN TARKASTELU

API 650 -varastosäiliöiden hintaan vaikuttaa useampi toisiinsa sidoksissa oleva tekijä. Kustannuksiin vaikuttavia tekijöitä on projektikohtaisilla vaatimuksilla kuten käyttötarkoituksella, rakenteella, materiaalilla ja instrumenteilla, jonka lisäksi hintaan vaikuttaa suunnitteluun, valmistukseen, asennukseen ja tarkastukseen kuluvat työtunnit. Paikkakohtaisista vaatimuksista etenkin luonnonkuormien vaikutuksesta aiheutuvilla rakenteellisten vahvistusten ja ankkuroinnin vahvistamisen tarpeen lisääntymisellä on kustannusarvioinnissa suuri merkitys.

Tutkimuksen aikana kävi ilmi, että maanjäristyskuorma vaikuttaa varastosäiliön kuormituslaskelmien mukaan säiliön rakenteeseen ja ankkuroinnin tarpeeseen tuulikuormaa selvästi vahvemmin. Tuulikuorman aiheuttama tuulivahvikkeiden ja kuoren vahvistamisen tarve näkyy laskelmissa vasta huomattavan suurella kuormituksella ottaen huomioon varastosäiliön suuren koon ja tuulelle alttiin pinta-alan. Toisaalta maanjäristyskuorman ei tarvitse kasvaa kovinkaan suureksi ennen kun laskuohjelman mukaan on tarpeen lisätä ensimmäisiä ankkuroinnin vahvennuksia. Tämä selittyy loogisesti suurelta osin kyseisistä luonnonkuormista aiheutuvien voimien erilaisella ilmenemisellä. Tuulikuorman kohdistuessa varastosäiliöön kohdistuu rakenteisiin pääosin yhdensuuntainen voima. Maanjäristyksen sattuessa rakenteisiin kohdistuu useampi erisuuntainen voima, joka kuormittaa liitoksia voimakkaammin. Kun säiliö altistuu voimakkaalle luonnonkuormalle, heikoimpia kohtia ovat liitosten lisäksi erilaisten komponenttien ja instrumenttien hitsaus- ja yhtymäkohdat sekä luukut ja muut kuoreen tehdyt läpiviennit. Taulukossa 6 nähdään esimerkki eri kuormituslaskentojen

vaikutuksesta 5000 m<sup>3</sup> varastosäiliön painoon ja kuormitusten vaikutuksesta ankkurointiin ja tuulivahvikkeiden tarpeeseen.

Taulukko 6. Esimerkki kuormituslaskennan tuloksista työn aikana

| 5000 m <sup>3</sup> säiliö                           | <b>82 mph</b> | <b>123 mph</b> | <b>150 mph</b> | <b>SDS 0.9</b> | <b>SDS 1.1</b> | <b>SDS 1.1 + 150 mph</b> | <b>SDS 1.4 + 150 mph</b> |
|------------------------------------------------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------------------------|--------------------------|
| Ankkuripultit, kpl                                   | 24            | 24             | 24             | 66             | 82             | 82                       | 106                      |
| Tyhjäpaino, kg                                       | 135533        | 135533         | 135533         | 135533         | 135533         | 135533                   | 139366                   |
| Tuulijäykisteen paino, kg                            | -             | 1000           | 1000           | 1000           | 1000           | 1000                     | 1000                     |
| Kokonaispaino, kg (+ tuulijäykiste ja ankkuripultit) | 136695        | 137695         | 137695         | 139795         | 140595         | 140595                   | 145618                   |
| Painon lisäys, kg                                    | 1162          | 2162           | 2162           | 4262           | 5062           | 5062                     | 6252                     |

Kun tutkittiin pienempien säiliöiden käyttäytymistä tutkimukseen valituilla kuormitusarvoilla, huomattiin yllättäen että 100 m<sup>3</sup> säiliölle tarvitaan enemmän ankkuripultteja kuin puolet isommalle 150 m<sup>3</sup> säiliölle. Tuloksia analysoitaessa huomattiin, että näiden kokojen välillä tapahtuu rakenteellinen eroavaisuus, sillä 100 m<sup>3</sup> ja sitä pienemmät säiliöt ovat kapeampia ja korkeampia kuin seuraavaksi isompi koko. Tuulikuormaa laskettaessa pienet säiliöt eivät oletetusti tarvitse vahvennuksia, koska säiliön pientyessä myös tuulelle altistuva pinta-ala pienenee. Maanjäristyskuorman osalta tilanne muuttui. Kun suhde poikkipinta-alan ja korkeuden välillä muuttuu, tarvitaan

ankkuripultteja enemmän, koska korkeampi säiliö on alttiimpi huojumiselle maanjäristyksen aikana. Tämän lisäksi säiliön pohjan pienempi halkaisija pienentää myös perustusten vastaista pinta-alaa, eli pohjan kautta maanpinnasta saatavaa tukialaa.

Tutkimustyön tuloksena päädyttiin raja-arvojen iteroinnin avulla uusiin tuuli- ja maanjäristyskuorma-arvoihin, joiden koetaan sopivan paremmin energialaitosrakentamisen kustannuslaskennan tarpeisiin. Kustannuslaskennan käyttöön saatiin myös sopivat maanjäristyskuorman arvot, joita voidaan jatkossa soveltaa myös Yhdysvaltojen markkinoilla, koska ne perustuvat siellä yleisesti käytössä olevaan ASCE 7 -standardiin. Aikaisemmin käytössä ollut UBC-koodin mukainen seismisyysalueisiin perustuva maanjäristyskuorman laskenta saatiin muutettua joustavasti sellaisiin arvoihin, joita voi verrata nyt myös vanhoihin laskelmiin, koska nyt käyttöön otettu ASCE 7 -standardin mukainen raja-arvo on helppo kääntää myös aiempaan seismisyysalueelaskentaan sopivaksi arvoksi. Tämä tekee uusien ja vanhojen laskelmien vertailun sujuvammaksi. UBC koodin mukaisesta seismisyysluokituksesta voidaan nyt halutessa luopua. Itse varastosäiliömatriisiin eli kustannuslaskennan hintatyökaluun saatiin projektikohtaisen kustannusarvion kannalta olennaisia lähtöarvoja, kuten erilaisten kuormitusversioiden mukaisia varastosäiliöiden kokonaispainoja ja ankkuripulttimääriä, joita voidaan nyt hyödyntää suoraan myynnin työkaluna.

Alun perin herännyt huoli materiaalikustannusten kasvamisen osalta oli verrattaen turha, koska tarvittavat vahvennukset ovat uusien laskelmien mukaan kokonaispainoon verrattuna kohtuullisen vähäiset. Silti kustannuksia syntyy muualta, kuten

työtuntien lisääntyessä asennusvaiheessa kun ankkuripulttimäärät kasvavat huomattavasti. Ankkuripulttien asentaminen on työläs vaihe, ja jos pulttien välimatka lyhenee pahimmillaan 0,6 metriin, joutuu niitä asentamaan hyvin tiheään. Ankkuripulttien määrällä ei ole vaikutusta pelkästään pulttien asentamiseen työmaalla, vaan myös ankkurijalkojen määrään, eli asennustyön määrä kumuloituu myös muihin työvaiheisiin.

## 5 PÄÄTELMÄT

Yhteenvedona voidaan todeta, että varastosäiliöiden kustannustutkimus auttoi ymmärtämään kustannusten takana olevia ajureita paremmin. Näin voidaan keskittää mahdolliset uudet tutkimukset ja muutokset sellaisiin ongelmakohtiin, joilla on todettu olevan kustannuslaskennan kannalta merkitystä. Luonnonkuormalaskelmien avulla kustannusten arviointi on jatkossa mahdollista tehdä projektikohtaisesti niiden raja-arvojen sisällä, jotka tutkimuksessa on todettu olevan käytännöllisimmät säiliöiden rakenteellisten vaatimusten kannalta.

Tuulikuorman ja maanjäristyskuorman erilaiset vaikutukset varastosäiliöihin tulivat yllätyksenä, koska aiemmin on ollut vallalla käsitys, jonka mukaan tuulikuormalla voisi olla varastosäiliön rakenteeseen suurempi vaikutus kuin maanjäristyskuormalla. Tämä auttaa jatkossa kohdistamaan mielenkiinnon nimenomaan seismisten alueiden energialaitosrakentamisen komponenttien tarkempaan tarkasteluun.

Maanjäristyskuormituksen laskennassa päästiin onnistuneesti siirtymään haluttuun ASCE 7:n mukaiseen laskentatapaan, ja tämä saatiin integroitua osaksi laskentatyökalua.

Varastosäiliömatriisin toimimista käytännössä seurataan vuoden ajan, jonka jälkeen analysoidaan käyttäjien palautteen perusteella onko muutoksesta ollut hyötyä. Tarkkailujakson aikana on tärkeää myös selvittää matriisista löytyvien tietojen käytännönläheisyys ja miettiä, onko tarpeen muokata matriisista löytyviä tietoja käyttäjäystävällisemmäksi.

Tulevaisuudessa on myös tarpeen päivittää varastosäiliöiden mittakuvat. Varastosäiliöiden perustiedoista tulisi päivittää tyhjäpainot sekä lisätä referenssit uusiin laskelmiin.

Pienempien varastosäiliöiden profiilia on myös tulevaisuudessa mahdollisesti syytä tarkistaa, sillä korkeampi säiliö vaatii tukevamman ankkuroinnin ja enemmän ankkuripultteja. Tältä voidaan välttyä optimoimalla myös pienempien säiliöiden profiilia. Epäselvää on vielä, onko tällä kovinkaan suurta taloudellista merkitystä säiliön pienen koon vuoksi.

Ankkuroinnin suhteen on tärkeää kiinnittää huomiota ankkuripulttien lisääntyneeseen määrään maanjäristyskuorman kasvaessa. Pulttien määrän voimakas kasvu hankaloittaa ja pitkittää säiliön asennustyötä ja lisää materiaalikustannuksia. Ankkuripulttien määrään on mahdollista vaikuttaa materiaalimuutoksilla vaihtamalla ankkuripulttimateriaalia kestävämmäksi. Laskelmissa käytetystä S235 teräslaadusta valmistetut ankkuripultit on mahdollista vaihtaa esimerkiksi vahvempiin ja kestävämpiin S355 teräslaadusta valmistettuihin, halkaisijaltaan isompiin pultteihin, joka vähentää niiden määrällistä tarvetta. Samalla voidaan laskea optimaalinen välimatka ankkuripulteille.

## LÄHTEET

- American Petroleum Institute. (2013). API Standard 620. Design and Construction of Large, Welded, Low-pressure Storage Tanks.
- American Petroleum Institute. (2024). *About API*. Haettu 23. 11. 2024 osoitteesta <https://www.api.org/about>
- American Petroleum Institute. (Maaliskuu 2020). API Standard 650. Welded Tanks for Oil Storage.
- American Society of Civil Engineers. (2025). *ASCE Hazard Tool*. Haettu 14. 1. 2025 osoitteesta ASCE Hazard Tool: <https://ascehazardtool.org/>
- Charney, F. A. & Heausler, T. F. (2020). American Society of Civil Engineers. Seismic Loads - Guide to the Seismic Load Provisions of ASCE 7-16.
- Graham, E. W. & Rodriguez, A. M. (Syyskuu 1952). *Characteristics of Fuel Motion Which Affect Airplane Dynamics*. ASME Journal of Applied Mechanics. <https://doi.org/10.1115/1.4010515>
- International Electrotechnical Commission (2023). European standard EN IEC 60721-2-6. Classification of environmental conditions – Part 2-6: Environmental conditions appearing in nature – Earthquake vibration and shock.
- Jalkanen, J. (27.8.2021). *Luonnonkuormat vientiprojektissa*. Teräsrakenneyhdistys. <https://www.terasrakenneyhdistys.fi/document/1/1075/44>

3573e/Jussi\_Jalkanen\_Luonnonkuormat\_vientiprojekteissa.pdf

Jaya, A. (Kesäkuu 2012). *Kolmetz Handbook Of Process Equipment Design, STORAGE TANK SELECTION, SIZING AND TROUBLESHOOTING*. Haettu 7.11.2024 osoitteesta KLM Technology Group Engineering Solutions: <https://www.klmtechgroup.com/PDF/EDG-SYS/ENGINEERING-DESIGN-GUIDELINES-storage-tank-Rev2.1web.pdf>

Jyväskylän yliopisto. (ei pvm). *Laskennallinen tiede*. Haettu 23.1.2025 osoitteesta Jyväskylän yliopisto: <https://www.jyu.fi/fi/opiskelijalle/laskennallinen-tiede>

Lepov, V., Grigoriev, A., Bisong, M. S. & Lepova, K. (2017). *Brittle Fracture Modeling for Steel Structures operated in the Extreme*. Haettu 28.12.2024 osoitteesta ScienceDirect: [https://pdf.sciencedirectassets.com/314029/1-s2.0-S2452321617X00048/1-s2.0-S2452321617302810/main.pdf?X-Amz-Security-Token=IQoJb3JpZ2luX2VjEM3%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2FwEaCXVzLWVhc3QtMSJGMEQCIGt%2BYT%2FN649FGUzJXi%2BzEiPgv8yuJiGMI5ZkAL9Wv6vxAiBf3V83Kk](https://pdf.sciencedirectassets.com/314029/1-s2.0-S2452321617X00048/1-s2.0-S2452321617302810/main.pdf?X-Amz-Security-Token=IQoJb3JpZ2luX2VjEM3%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2FwEaCXVzLWVhc3QtMSJGMEQCIGt%2BYT%2FN649FGUzJXi%2BzEiPgv8yuJiGMI5ZkAL9Wv6vxAiBf3V83Kk)

Lukkari, J., Kyröläinen, A. & Kauppi, T. (2016). Hitsauksen materiaalioppi: Osa 1, Metalliopin perusteet, terästen luokittelu ja valmistus, rakenneterästen käyttäytyminen hitsauksessa, murtuminen ja korroosio. Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys r.y.

- Montang, S. Y. (Lokakuu 2023). *Revolutionizing Feasibility Studies: A Proprietary Complex Model for Atmospheric API 650 Storage Tank Cost Estimation in National Oil Company*. Haettu 21.1.2025 osoitteesta PM World Library: <https://pmworldlibrary.net/wp-content/uploads/2023/10/pmwj134-Oct2023-Montang-revolutionizing-feasibility-studies-a-proprietary-complex-model.pdf>
- Prasad. (1997). *UBC 1997 Seismic Design*. Haettu 6.1.2025 osoitteesta Structural Guide Civil & Structural Engineering Knowledge: <https://www.structuralguide.com/ubc-1997-seismic-design/>
- Pullarcot, S. (2015). *Above Ground Storage Tanks, Practical Guide to Construction, Inspection, and Testing*. CRC Press.
- Saint-Felix-López, N., Álvarez-Deulofeu, E.-R. & Candebat-Sánchez, D. (2.8.2021). *Spectral Seismic Analysis of Vertical Cylindrical Steel Tanks*. Haettu 12.2.2025 osoitteesta Revista Facultad de Ingeniería: <https://doi.org/10.19053/01211129.v30.n57.2021.12636>
- SSAB. (2016). *SSAB High Strength Structural Hollow Sections - Handbook For Steel Structures*. Haettu 27.12.2014 osoitteesta SSAB:n rakenneputkien käsikirjat: <https://www.ssab.com/fi-fi/brandit-ja-tuotteet/terasluokat/rakenneputket/kasikirjat>
- Stafford, E. T. & Reinhold, T. (2023). American Society of Civil Engineers. Wind Loads, Guide to Wind Load Provisions of ASCE 7-22.

Subramanian, C. (2.8.2019). *Reducing the Risk of High Temperature Creep Failures in Refinery Service Component and Equipment*. Noudettu osoitteesta ASME Journal of Pressure Vessel Technology: <https://doi.org/10.1115/1.4043812>

Tanveer, S. (30.11.2023). *Starting Air System Design Handbook*. Haettu 12.2.2025 osoitteesta Mechwis - Mechanical and process: [www.wartsila.com](http://www.wartsila.com)

Teräsrakenneyhdistys. (ei pvm). *Teräsrakentamisen eurooppalaiset pelisäännöt- suunnittelu ja toteutus (TEP) WP2 Käytettävät tuotteet*. Haettu 12.1.2025 osoitteesta Teräsrakenneyhdistys: [https://www.terasrakenneyhdistys.fi/document/1/1257/1d73779/TEP\\_WP2\\_Kaytettavat\\_tuotteet.pdf](https://www.terasrakenneyhdistys.fi/document/1/1257/1d73779/TEP_WP2_Kaytettavat_tuotteet.pdf)

The American Society of Mechanical Engineers. (2023). ASME Boiler and Pressure Vessel Code, An International Code. Section VII.

TWI. (ei pvm). *Defects - Lamellar tearing*. Haettu 6.2.2025 osoitteesta The Welcing Institute. <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/defects-lamellar-tearing-047>

Wärtsilä Oyj Abp. (2024). *Mechwis - Mechanical and Process*. Haettu 27.12.2024 osoitteesta [www.wartsila.com](http://www.wartsila.com)

Ympäristöministeriö. (3.6.2019). *Suomen rakentamismääräyskokoelma, Rakenteiden lujuus ja vakaus, Teräsrakenteet*. Haettu 29.12.2024 osoitteesta Ympäristöministeriö:

[https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Terasrakente-et-2019-D829E0A3\\_9D8E\\_4730\\_8E6C\\_EF076B4642F2-126585.pdf](https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Terasrakente-et-2019-D829E0A3_9D8E_4730_8E6C_EF076B4642F2-126585.pdf)

