



SAVONIA

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIKAN JA LIIKENTEEN ALA

TERÄSSILOJEN JA -SÄILIÖIDEN SUUNNITTELIJAN MITOITUS- TYÖKALU

TEKIJÄ: Tiia Mirzayeva

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma/Tutkinto-ohjelma Energiatekniikan tutkinto-ohjelma	
Työn tekijä(t) Tiia Mirzayeva	
Työn nimi Terässiilojen ja -säiliöiden suunnittelijan mitoitustyökalu	
Päiväys 24.4.2018	Sivumäärä/Liitteet 27 + 1
Ohjaaja(t) Olli-Pekka Kähkönen, Heikki Salkinoja	
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Insinööritoimisto Comatec Oy	
<p>Työn toimeksiantaja oli Insinööritoimisto Comatec Oy. Tehtävänantona oli tehdä suunnittelijalle mitoitustyökalu sillojen ja säiliöiden laskemiseen. Mitoitustyökalun teko perustui standardeihin SFS-EN 1991-4, ja SFS-EN 1993-4-1, sekä jo tehtyyn Jimi Pulkan diplomiopinnäytetyöhön (2007) kyseisestä aiheesta.</p> <p>Tämä opinnäytetyö oli tutkimustehtävä, jossa tutkittiin mitoitustyökalun teon onnistumista rakentamalla mitoitustyökalu alusta alkaen itse. Työn tutkimuspohjana käytettiin Jimi Pulkan (2007) diplomityön laskentatyökalua, jonka pohjalta lähdettiin rakentamaan oma versio tarvittavasta mitoitustyökalusta. Työvaiheita oli paljon ja näin ollen työ oli erittäin haastava.</p> <p>Työn tavoite saavutettiin hyvin. Yritykselle mitoitustyökalu on erittäin tärkeä, sillä se nopeuttaa laskennallista työtä huomattavasti ja säästää sekä kustannuksia että aikaa työssä. Mitoitustyökalun avulla voidaan nopeasti määrittää silon tai säiliön koko. Kuinka paljon silo tarvitsee raakamateriaalia levyihin ja kuinka paksuja milläkin korkeudella levyt ovat.</p>	
Avainsanat Siilo, mitoitustyökalu, raakamateriaali, mitoitus	

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Energy Engineering			
Author Tiia Mirzayeva			
Title of Thesis Steel Silo Designer`s Dimensioning Tool			
Date	24.4.2018	Pages/Appendices	27 + 1
Supervisor(s) Olli-Pekka Kähkönen, Heikki Salkinoja			
Client Organisation /Partners Engineering Office Comatec Oy			
<p>The client of this thesis was Engineering Office Comatec Oy. The aim of this study was to make a dimensioning tool for designer to calculate silo's dimensioning. This study was based on standards SFS-EN 1991-4, SFS 1993-4-1 and on the master's thesis of Jimi Pulkka (2007).</p> <p>This thesis was a research project where it was investigated how a dimensioning tool can be successfully made. The basis of research was the designer tool made by Jimi Pulkka (2007). Based on the tool a new version was made. There were many work stages in the process and so this study was very demanding.</p> <p>The aim of the study was reached. To the company this dimensioning tool is very important because it speeds up calculatory work considerably and saves costs and time in work. When work is ready the client can with help of the dimensioning tool fast define the size of the silo, the quantity of raw materials for metal sheets and the thickness of each sheet in different levels.</p>			
Keywords Silo, dimensioning tool, raw material, dimensioning			

ESIPUHE

Tämä opinnäytetyö siilojen ja säiliöiden mitoitus työkalun tekemisestä kertoo siitä, kuinka mitoitus työkalu tehdään onnistuneesti, mitä onnistuminen vaatii ja minkälaisia ongelmakohtia työn aikana ilmaantui. Työn aihe on keskimääräistä vaikeampi ja siksi työtä piti sen edistyessä rajata kunnolla, ettei työstä tullut liian suuri.

Työ vaati loppujen lopuksi vähemmän työstä, kuin alkuun luulin, sillä alkuun työssä oli tarjolla todella laajasti tietoa. Työn toisella viikolla aihe selkeni huomattavasti, kun se koostui diplomi-insinöörin jo tekemästä työstä. Aihe oli kuitenkin todella haastava ja siksi sen pystyi ottamaan opinnäytetyöaiheeksi. Rajattuamme työtä opettajan kanssa työ oli selvä ja siitä oli paljon materiaalia tarjolla, joten työ muuttui huomattavasti helpommaksi kuin alussa. Siilojen ja säiliöiden mitoitus työkalun tekeminen onnistui annettujen tietojen pohjalta melko hyvin. Työstä on paljon apua yritykselle, kun se helpottaa tarjouslaskentaa, myymistä ja suunnitteluvaihetta.

Mielestäni onnistuin tehtävänannossa olosuhteisiin nähden hyvin, kiitos siitä auttajilleni esimiehelleni Jarkko Aholalle Comatec Oy:stä, sekä lujuuslaskija Asko Vartiainen Rantotek Oy:stä ja opettajilleni Marko Pekkariselle Savonia-Ammattikorkeakoulusta, Olli-Pekka Kähköselle, Savonia-Ammattikorkeakoulusta ja Markku Halttuselle Savonia-Ammattikorkeakoulusta. Opinnäytetyön teko voi olla todella stressaavaa ja haastavaa, mutta teidän ansiosta tämän työn teko tuntui vaan haasteelta, joka oli mukava ottaa vastaan. Erityiset kiitokset kuuluvat läheisilleni, aviomiehelleni ja tyttärelleni, sekä äidilleni siitä, että he kannustivat työn teon eri vaiheissa saattamaan työn loppuun.

Varkaudessa 18.3.2018

Savonian opiskelija Tiia Mirzayeva

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	6
1.1	Työn taustaa ja tavoite	6
1.2	Yritysesittely	7
1.2.1	Insinööritoimisto Comatec Group	7
1.2.2	Insinööritoimisto Comatec Oy:n referenssit	7
2	SIILORAKENTEET	8
3	SIILOJEN MITOITUSKUORMAT	9
3.1	Siilojen kuormitukset yleisesti	10
3.2	Siilokuorma	10
3.2.1	Tuuli	12
3.2.2	Maanjäristys	12
3.3	Siilojen luokittelu SFS-EN -standardeissa	13
3.3.1	Luokittelu SFS-EN 1991-4 mukaan	13
3.3.2	Luokittelu SFS-EN 1993-4-1 mukaan	13
3.4	Siilokuormien yhdistely	13
3.4.1	Normaalisti vallitsevat ja tilapäiset kuormitusyhdistelmät	14
3.4.2	Onnettomuustilanteiden kuormayhdistelmät	15
3.4.3	Maanjäristystilanteiden kuormayhdistelmät	16
4	MITOITUSTYÖKALUN RAKENTAMINEN	17
4.1	Input-lähtötiedot	17
4.2	Ohjelma	18
4.3	Output-ulostulotiedot	19
5	ANALYYSI	20
6	YHTEENVETO	24
	LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT	26
	LIITE 1: EXCEL MITOTUSTYÖKALU	27

1 JOHDANTO

Mitoitustyökalu on Excel-pohjainen ohjelma, joka laskee tarvittavat tiedot annettujen lähtötietojen pohjalta tietynmallisessa kaavaohjelmassa. Lähtöarvoja voi muuttaa ja silloin arvot muuttuvat tilanteeseen nähden sopiviksi. Mitoitustyökalua tarvitaan suunnitteluyrityksessä, jossa mitoitetaan silloja ja säiliöitä sopiviksi kohteisiin, joihin siilot tai säiliöt ovat menossa. Mitoitustyökalu on suunnittelijan tarvitsema työkalu laskentaa varten. Suunnitteluyritykselle mitoitustyökalu on erittäin tärkeä, sillä se nopeuttaa laskennallista työtä huomattavasti ja säästää sekä kustannuksia, että aikaa työssä. Mitoitustyökalun sisältö analysoi sitä tietoa, mitä lähtöarvot asettavat exceltietokantaan. Mitoitustyökalu antaa tarvittavat tiedot vaativiin laskelmiin.

Tämä työ rakentuu seuraavasti. Luku 1 on johdanto, jossa kerrotaan raportin sisällöstä, työn taustasta ja työn tavoitteesta, sekä esitellään lyhyesti Insinööritoimisto Comatec Oy. Luku 2 kertoo sillo-rakenteista. Luvussa 3 kerrotaan sillojen mitoituskormista. Ensin kerrotaan sillojen kuormituksista yleisesti luvussa 3.1, minkä jälkeen luvussa 3.2 esitellään teoriaa sillokuormasta. Luvussa 3.3 määritetään standardi SFS-EN sillojen luokittelusta. Luku 3.4 kertoo sillokuormien yhdistelystä.

Luvussa 4 esitellään mitoitustyökalun rakentaminen. Luvussa 5 on analyysi, missä analysoidaan ohjelman antamia tuloksia ja excelin laskemia kaavoja. Luku 6 on yhteenveto, jossa kerrotaan miten mitoitushjelma silloille ja säiliöille luodaan onnistuneesti ja mistä syystä yleensä koko mitoitustyökalua tarvitaan.

1.1 Työn taustaa ja tavoite

Työn toimeksiantaja on Insinööritoimisto Comatec Oy. Tehtävänantona on tehdä suunnittelijalle mitoitustyökalu sillojen ja säiliöiden laskemiseen.

Aihe oli aluksi erittäin avonainen – sillojen ja säiliöiden mitoitustyökalu excelillä tehden. Työssä käytetään standardia *SFS-EN 1991-4 + Eurokoodi* perustavana tietona. Ensitarkastelun jälkeen työ muuttui diplomityön muuttamiseksi yritykselle sopivaksi ohjelmaksi, joka laskee sillojen ja säiliöiden tarvittavan levyn paksuuden korkeudella x , sekä tarvittavan raakamateriaalien massan – siilon tai säiliön ja suppilon massat sekä kokonaismassan.

Työn taustalla on standardista määritettävä laskentaohjelman teko. Standardin mukaisesti tulee rajata ja määrittää, millainen excel-laskentaohjelmasta tulee. Kuitenkin oli olemassa jo valmiiksi tehty diplomitaso työ aiheesta, joten siitä oli helpompi valmiilta pohjalta työstää laskentaohjelma loppuun. Nimenomaan tämä työ muotoutui opinnäytetyöksi, sillä toimeksiantaja katsoi työn olevan tarpeellinen yritykselle.

1.2 Yritysesittely

1.2.1 Insinööritoimisto Comatec Group

Insinööritoimisto Comatec Group tuottaa ja kehittää projektinhallinta-, suunnittelu ja asiantuntijapalveluita. Erityisesti tämä alallaan johtava yritys tunnetaan kyvystään toteuttaa koneenrakennuksen ja teknologiateollisuuden toimeksiantoja, jotka ovat haastavia. Ajanmukainen ja koeteltu teknologia on lähtökohta, johon Comatecin ratkaisut perustuvat. (Comatec 2018.)

Suunnittelu, asiantuntijapalvelut, projektin johtaminen, sekä ideointi ja konseptointi ovat Comatecin tarjoamia palveluita. Yrityksellä on vahva kokemus niin hyötyajoneuvoista, materiaalinkäsittely- ja tuotantojärjestelmistä, työkoneista kuin voimalaitoksista ja kattiloista. Erikoistuneet asiantuntijat ratkaisevat tekniseen laskentaan, tuoteturvallisuuteen, testaukseen ja elinkaaripalveluihin liittyviä haasteita ja osaaminen Comatecilla kattaa sähkö- ja automaatio-, sekä mekaniikkasuunnittelun. (Comatec 2018.)

Comatec Group aloitti toimintansa vuonna 1986 ja nykyisin Comatecin liikevaihto on (vuonna 2017) noin 35 miljoonaa euroa. 500 asiantuntijaa toimii kansainvälisen insinööritoimiston palveluksessa. Konsernin toimipisteitä on Suomessa 20 paikkakunnalla, sekä ulkomailla Virossa, Ruotsissa, Puolassa ja Intiassa. Insinööritoimisto Comatec Oy, Comatec Poland Sp. z o.o., Comatec Sweden AB, Comatec Estonia OÜ, Microteam Oy, Insinööritoimisto Metso Oy, Rantotek Oy ja Oucons Oy kuuluvat Comatec Groupiin. (Comatec 2018.)

1.2.2 Insinööritoimisto Comatec Oy:n referenssit

- Millog: Vaihtamalla takakorin valmistusmateriaalin paransi Comatec Oy sähkömagneettista suojausta muita käyttöominaisuuksia heikentämättä.
- Pumpun asennusaika lyheni 90 %:ia Bronto Skyliftin uudella pumpumoduulilla.
- 18 miljoonan tonnin vuosituotanto kasvoi 36 miljoonaan tonniin vuodessa Bolidenin uuden Aitikin laitosinvestoinnin myötä.
- Ruotsin rautateille tarjottavalle toimitukselle espanjalainen CAF sai lisää uskottavuutta Comatecin tekemällä talviolosuhdeselvityksellä.
- Polttoaineen kulutus aleni jopa 25 %:ia samalla kun avokaivoskäyttöön tarkoitettu Sandvikin Pantera-alustaratkaisu saatiin markkinoille ennätysajassa.
- Uusi WaveRoller-teknologia AW-Energy:llä on ollut Comatecin kiinteästi kehittämä, eli lähellä rantaa meren pohjassa toimiva täysin päästötön aaltovoimala.
- Voimalaitos on merkittävästi ympäristöystävällisempi ja tehokkaampi Foster Wheelerin CFB-kattilalaitoksen uusimman ylikriittisen läpivirtausteknologian avulla, joka on Comatecin kehittämä. (Comatec 2018.)

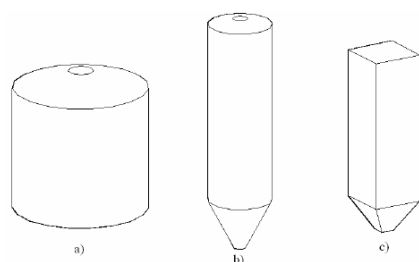
2 SIILORAKENTEET

Tämä luku perustuu *Jimi Pulkan diplomipinnäytetyöhön (2007)* ja julkaisuun *RIL 201-2-2011 Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat*.

Hyvä siilo tai säiliö on yleensä sellainen, joka on tarkoitettu suurien rakeisten kiintoainemäärien varastointiin. Lisäksi silloa voidaan käyttää annosteluun. On olemassa monia erilaisia silloja ja ne on jaettu eri tyyppeihin muodon, käyttötarkoituksen ja rakenneaineen perusteella. Tässä työssä keskitytään pelkästään teräs-materiaalin käyttöön siilon rakentamisessa. Siilon muoto voi olla poikkileikkaukseltaan kulmikas tai pyöreä ja siilo voi sisältää suppilon, tai olla tasapohjainen. Suppilo voi myös olla poikkileikkaukseltaan kulmikas tai pyöreä. (Pulkka 2007, 5.)

Siilon, ja sen sisällön massa, sekä muiden kuormitusten aiheuttamat voimat tulee siilon tuentojen siirtää silloa kannatteleviin rakenteisiin, ja sitä kautta edelleen perustuksiin ja maahan. Tukirakenteiden suunnittelu liittyy olennaisesti mitoitusyökalun rakentamiseen, sillä tuen tyyppi ja tuen rakenne vaikuttavat heti työn lopputulokseen lujuuslaskennallisesti. Primääriset ja sekundääriset tukirakenteet voidaan eritellä sillojen kannalta. Primäärisiä tukia ovat esimerkiksi silloon hitsattu jalka, helma, tai konsoli. Toisaalta rakennuksen runkopalkit, jotka eivät suoranaisesti vaikuta siilon lujuuslaskentaan, katsotaan kuuluvaksi sekundäärisiin rakenteisiin ja niitä ei huomioida lujuuslaskennan yhteydessä. Kuitenkin sekundääriset rakenteet on mitoitettava kestämään siilon, sekä muut kuormitukset. (Pulkka 2007, 5.)

Paras muoto siilolle on poikkileikkaukseltaan pyöreä siilo, sillä se on rakennemateriaalin käytön kannalta edullinen. Suurin osa kuormituksista pyöreässä silossa aiheuttaa kalvojännityksiä. Vain epäjatkuuskohtiin rakenteissa aiheutuu mitoituksen kannalta merkittäviä taivutusjännityksiä. Näitä kohtia ovat esimerkiksi siilon sylinterimäinen osan ja kartion liitos, sekä tiettyjen tuentatapojen yhteydessä tuentakohdat. Mitoitus on yksinkertaista vetosuuntaisia kalvojännityksiä vastaan ja materiaali voidaan hyödyntää tehokkaasti. Siilon pohja voi olla keskeinen -, epäkeskeinen suppilo tai tasapohja. Tässä opinnäytetyössä keskitytään pyöreän siilon mitoittamiseen. (Pulkka 2007, 5-6.) Kuva 1 esittää periaatteelliset siilon päätyypit.



Kuva 1 Pääsiilotyypit. a) tasapohjainen poikkileikkaukseltaan pyöreä siilo, b) suppilolla varustettu poikkileikkaukseltaan pyöreä siilo, c) poikkileikkaukseltaan nelikulmainen siilo

Kuva 1. Pääsiilotyyppejä on kolme erilaista. a) Poikkileikkaukseltaan pyöreä siilo, joka on tasapohjainen, b) Poikkileikkaukseltaan pyöreä hoikka siilo, joka on suppilolla varustettu, c) Poikkileikkaukseltaan nelikulmainen siilo, joka on kuvassa hoikka (Pulkka 2007, 7).

Seuraavat asiat vaikuttavat olennaisesti siilon kuormien mitoittamiseen. Siilokuormat määritellään ottaen huomioon varastoitavan aineen ominaisuudet, siilon rakenne ja siilon tyhjennykseen liittyvät aineen virtauksen tavat ja muodot. Suunnittelussa tulee ottaa huomioon virtaukseen liittyvät epävarmuudet, siilon muodon vaikutus virtaukseen, täytön ja tyhjennyksen aikana esiintyvät epäkeskeisyydet ja ajasta riippuvat täyttö- ja purkupaineet. Nämä asiat vaikuttavat rasiusten jakautumaan ja määrään. Erot todellisten ja suunnittelukuormien välillä aiheutuvat juuri kuormitusmallien ja varastoitavien aineiden vaihteluista. (RIL 201-2-2011 2011, 209.)

3 SIILOJEN MITOITUSKUORMAT

Tässä opinnäytetyössä siilojen mitoituskuormat on kuvattu tarvittavalla tavalla mitoitusvälineen rakentamiseen liittyen. Tarkemmin siilojen mitoituskuormista kerrotaan standardissa SFS-EN 1991-4 + AC, sekä kirjassa RIL 201-2-2011 Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat ja Jimi Pulkan diplominäytetyössä (2007).

Mitoitusvälineen rakentamista varten on tunnettava siilojen mitoituskuormat. Mitä ne ovat ja mihin niitä tarvitaan? Siilojen mitoituskuormat kertovat suunnittelijalle sen kaiken perustan, miltä pohjalta mitoitus työlle tehdään. Tietoina mitoituskuormista tarvitaan muun muassa, mikä on varastoitava materiaali, täyttöjen ja tyhjennysten lukumäärät, ja tilavuus, joka vaaditaan siilolta tai säiliöltä. Kaikkien tarvittavien lähtötietojen tulee olla oikein ja niitä tarvitaan, jotta suunnittelu ja rakentaminen onnistuvat oikein.

Tässä työssä mitoitusohjelmanä on käytetty Excel-ohjelmaa, jossa mitoituskuormia hyödynnetään laskentaohjelmassa, joka määrittää siilon ja suppilon seinämäpaksuudet. Siilojen mitoituskuormat on merkitty Excel-ohjelmassa käytettyihin kaavoihin, joilla siilo mitoitetaan tarkalleen ottaen sellaiseksi, kuin siilon tarvitsee olla. Laskelmissa on huomioitu erityisesti lujuusopilliset laskut, jotta mitoituskuormat ovat kestäväällä pohjalla, eikä ole vaaraa, että syntyisi ongelmia, kuten pölyräjähdys, tai vaarallisen raskas kuorma, tulipalovaara, tai liikenneonnettomuus, sillä nämä kaikki on huomioitu laskennassa ja ympäristön turvallisuuskartoituksessa. Siilon mitoituskuormista olennaisia osuuksia on tietää myös tietyt täyttämisyjärjestelyt, se, mitä materiaalia sisältö on (ja sisällön ominaisuudet), sekä kuormitusyhdistelmät. Ulkoiset kuormat on vielä erikseen mitoitettava, mutta kuten esimerkiksi lumi, joka on ulkoinen kuorma lukeutuu kuormitusyhdistelmiin, kun määritetään yhteensä kuormia, jotka voivat rasittaa siiloa.

3.1 Siilojen kuormitukset yleisesti

Siilon on kestettävä kaikki mahdolliset ennakoitavissa olevat kuormitusyhdistelyt ja siilon kuormituksesta yleisesti tulee huomioida, mihin kohteeseen siilo sijoitetaan – eli ympäristötekijät, sekä siilon itsensä rakennemateriaali ja sisältömateriali. Näiden lisäksi tulee huomioida tuuli, maanjäristys, lumi ja siiloon liittyvät ulkoiset rakenteet ja laitteet. Tärkeää on määrittää kuormat ja kuormitusyhdistelyt oikein. Kuitenkin arvoja ei ole koskaan helppo määrittää tarkalleen ottaen oikein, joten määrittäminen vaatii erityistä tarkkuutta ja erilaisten asioiden huomioon ottamista laskennassa.

Jos siilo mitoitetaan väärin, väärinmitoituksen vuoksi siilo voi rikkoutua helpommin. Pahimmassa tapauksessa siilo voi jopa räjähtää tuhoten paljon ympäristöä. Näin ollen myös siilon ympäristöstä tulee tehdä riskialttiille siilolle turvallinen rakennekokonaisuus. Siihen ei tässä työssä syvennyttä enempää, sillä työn tarkoitus on määrittää siilon seinämien paksuutta, ei ympäristöturvallisuutta. Suunnittelijan pitää tietää, että siilon sisällön aiheuttama paine ja kitka ovat ne tärkeimmät ja merkittävimmät siilon kuormitukset.

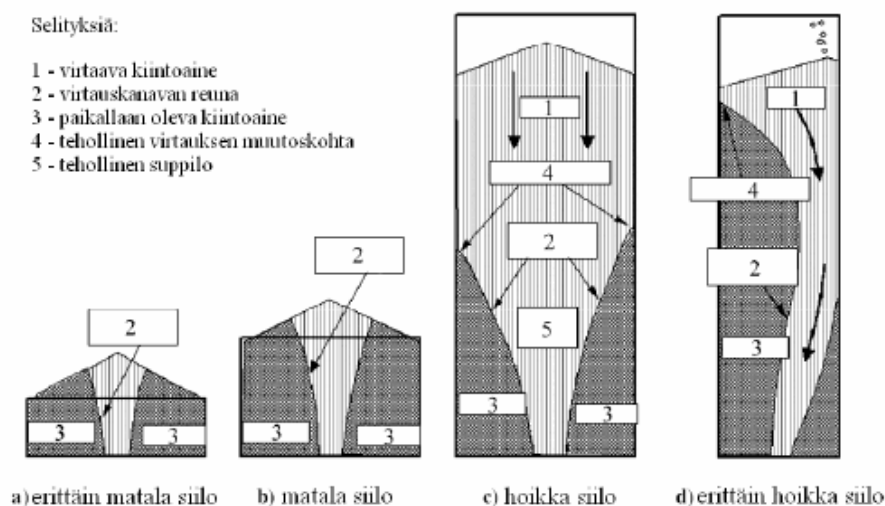
Tämän luvun aiheeseen tarkempaa tietoa löytyy standardista SFS-EN 1991-4 + AC, sekä kirjasta RIL 201-2-2011 Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat ja Jimi Pulkan diplomipinnäytetyöstä (2007).

3.2 Siilokuorma

Siilokuorman määrittäminen liittyy tähän mitoitusvälineen rakentamiseen, sillä se on olennainen tekijä laskentavälineen käyttöön liittyen ja laskennalliseen osuuteen liittyen. Siilokuorma on sellainen kuorma, joka tuodaan siiloon, tai kuorma, joka lähtee siilosta. Siilossa oleva kuorma on myös siilokuorma. Kaikki kuormat, jotka vaikuttavat siiloon, ovat siilokuormia ja ne tulee huomioida mitoituksen laskennassa.

Nämä tiedot ovat olennaisia liittyen mitoitusvälineen tekoon, sillä myös siilokuormien perusteella mitoitusohjelma laskee tarvittavat työn tulokset. Siilokuormia määritettäessä tulee ottaa monia erilaisia tekijöitä huomioon, kuten esimerkiksi siilorakenne tai kiintoaineen ominaisuudet. Näihin liittyen erilaiset painekuormat tulee huomioida niin siilon täytön kuin tyhjennyksenkin aikana. Siilokuormia tulee myös tarvittaessa mitoittaa onnettomuustilanteisiin nähden, kuten maanjäristyskuorman, räjähdyskuorman aiheuttamaan kuorman, tulipalomitointilanteeseen ja ajoneuvon törmäyksen aiheuttamaan kuorman.

Tässä työssä ei perehdytä enempää virtaustyyppiin, mikä on yksi tärkeistä mitoitusperusteista. Kuvasssa 2 on esitetty mittasuhteiltaan erilaisia siloja, sekä niissä esiintyviä kiintoaineen virtaustyyppiä. Kuten jo aiemmin on kerrottu, aiheuttaa silon sisältö siloon erilaisia kuormia. Sekä täytön, että tyhjennyksen kuormat siloon vaihtelevat. Paine- ja kitkavoimat kohdistuvat silon suppilo- ja säiliöosiin. Edellä mainittujen voimien suuruudet riippuvat kuormitustilanteesta, sekä lähtökohdista, jotka silo ja sen sisältö antavat mitoitukselle.



Kuva 2. Siilotyypeissä esiintyvät virtaustyytit sekä siilotyytit mittasuhteiden mukaan (SFS-EN 1991-4 2016, 58).

Tässä mitoitusohjelmassa on hyödynnetty Janssenin kehittämää kaavaa (kaava 1), jota on myöhemmin tarkennettu. Jotta lyhenteet ovat yhtenäiset, käytetään kaavassa standardin SFS-EN 1991-4 mukaisia lyhenteitä. (Pulka 2007, 15-16.)

$$A * (pv + dpv) + U * \mu * K * pv * dz = Y * A * dz + A * pv, \quad (1)$$

jossa:

A = silon poikkileikkauksen pinta-ala

pv = sisällön aiheuttama pystypaine

U = silon sisäpuolisen piirin pituus

μ = silon seinämän kitkakerroin

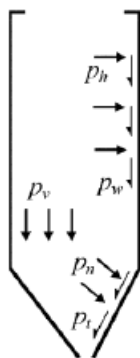
K = vaakapaineen suhde pystysuoraan kitkakuormaan

γ = sisällön tiheys

z = sisällön pinnasta tarkasteltavaan kohtaan koordinaatti

Tästä differentiaaliyhtälöstä saadaan sieventämällä ja ratkaisemalla aikaan kolme eri yhtälöä, joista voidaan laskea sisällön aiheuttamat kuormitukset. Ne ovat: Pystysuuntainen paine p_v , vaakasuuntainen paine p_h , sekä pystysuuntainen kitkavoima p_w . (SFS-EN 1991-4 2016, 18.)

Laskennassa tarvitaan myös arvoja voima/pinta-ala, joka on kaikkien kuormien yksikkö ($\text{N}/\text{mm}^2 = \text{megapascal, MPa}$), sekä lukuarvojen pienuuden vuoksi käytetään myös yksikköä kilopascal, kPa. Siilon seinämien eri kuormat on esitetty kuvassa 3. Normaalisuuntaisesta paineesta suppilon osalta käytetään lyhennettä p_n ja lyhennettä p_t kitkavoimasta. (Pulka 2007, 15-16.)



Kuva 8 Siilokuormat p_h , p_w , p_v lieriöosassa ja p_n sekä p_t suppilossa [SFS-EN 1991-4, s. 9]

Kuva 3. Siilokuormat p_h , p_w , p_v lieriöosassa ja p_n sekä p_t suppilossa (SFS-EN 1991-4 2016, 18).

Tarkemmin siilokuormista kerrotaan standardissa SFS-EN 1991-4 + AC, sekä kirjassa RIL 201-2-2011 Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat ja Jimi Pulkan diplomioinnäytetyössä (2007).

3.2.1 Tuuli

Tuuli on yksi ulkoinen kuormitustekijä, joka tulee huomioonottaa mitoituksessa. Tämä riippuu tietysti siitä, onko siilon tukirakennelma vuorattu, vaiko ei. Jos siilo ei ole suojattu ja tuettu tarpeeksi, aiheuttaa tuulen vaakasuuntainen voima kuormituksia siilon tuennalle. Toki tukienkin kautta tuuli vaikuttaa siilon teräsrakenteisiin. Tuuli tulee joka tapauksessa huomioida vähintään toisarvoisissa kantusrakenteissa. (Pulka 2007, 18.) Tuulen kuorma on kyseisessä mitoitusohjelmassa otettu huomioon arvona, joka määrittää kertoimen tuulikuormalle. Tuuli on yksi ulkoisista kuormitustekijöistä ja seuraavassa luvussa onkin kerrottu toisesta ulkoisesta kuormitustekijästä, maanjäristyskuormituksesta.

3.2.2 Maanjäristys

Kun siiloa ollaan toimittamassa maanjäristysherkillle alueille, on maanjäristyskuorma otettava huomioon siilon mitoituksessa. Silloin maanjäristysmitoitus tehdään vaaka- ja pystysuuntaista korvausvoimaa käyttämällä, mikä kohdistuu massojen painopisteisiin. (Pulka 2007, 18.) Kohdealueella on omat määritellyt kertoimet, joita aina käytetään laskennassa ja standardin SFS-EN 1998-4 mukaisesti tehdään siilojen maanjäristysmitoitus. Tässä opinnäytetyössä mitoitustyökalun maanjäristyskuorma on huomioitu tiettyinä lukuarvona laskennassa.

3.3 Siilojen luokittelu SFS-EN -standardeissa

Kun siilot luokitellaan SFS-EN -standardien mukaisesti mitoituksessa, ne jaetaan kahteen osaan – toinen niistä vaikuttaa lujuusanalyysiin ja toinen kuormitusten määrittämiseen. Mitoitusohjelmassa laskenta määrittää myös, missä kuormitusluokassa silo on. Tämä osa-alue on siis huomioitu laskennallisesti ja siksi siitä kerrotaan tässä opinnäytetyössä. Seuraavassa on kerrottu eri luokittelukategorioista.

3.3.1 Luokittelu SFS-EN 1991-4 mukaan

Siilon herkkyys eri vauriomuodoille ja rakenneratkaisun luotettavuus riippuvat erilaisista tarkkuustasoista, joita käytetään siilon rakenteiden mitoituksessa. Silo mitoitetaan jonkin kolmen seuraavan kuormaluokan (AAC) vaatimusten mukaisesti, sillä näin siilon suunnitelmat vastaavat menettelyjä ja kustannuksia, joiden on tarkoitus vähentää siilon erilaisia vaurioitumisriskejä (EN 1990, kohdat 2.2.(3) ja (4): Kuormaluokka 1 (AAC 1), kuormaluokka 2 (AAC 2), sekä kuormaluokka 3 (AAC 3). Tarvittaessa voi käyttää vaatimuksia korkeampaa kuormaluokkaa, mutta matalampaa ei saa käyttää. (RIL 201-2-2011 2011, 212-213.)

3.3.2 Luokittelu SFS-EN 1993-4-1 mukaan

Likipitäen vastaavin perustein, kuin SFS-EN 1991-4, SFS-EN 1993-4-1 mukaan, siilot luokitellaan vaativuutensa mukaisesti myös kolmeen luokkaan. Tämä seuraamusluokka (eng. Consequence class) perustuu mahdollisen vikaantumisen aiheuttamiin seurauksiin. Vaativimpia ovat luokan 3 siilot.

Tästä määritelmästä on lisää tietoa edellämainituissa standardeissa, RIL:in suunnitteluun liittyvässä kirjassa, sekä Pulkan diplomiopinnäytetyössä (2007).

3.4 Siilokuormien yhdistely

Jotta rajatilamitoitus onnistuu, tulee määritetyistä silo- ja muista kuormista tehdä kuormitusyhdistely. Eri mitoitusilanteita ja niihin liittyviä yhdistelyitä on kolme SFS-EN 1990 mukaisesti ja nämä ovat: maanjäristystilanteiden kuormayhdistelmät, normaalisti vallitsevat ja tilapäiset mitoitusilanteiden kuormitusyhdistelmät ja onnettomuustilanteiden kuormitusyhdistelmät. Näissä tulee aina käyttää kuorman osavarmuuslukua, joka määritetään erikseen pysyville ja muuttuville kuormille. Näitä osavarmuuslukuja on käytetty tämän mitoitusohjelman rakentamisessa soveltaen Jimi Pulkan opinnäytetyön laskentaohjelmaa. (Pulkka 2007, 30.)

Kuormat jaetaan sekä pysyviin, että muuttuviin kuormiin kuormien yhdistelyssä. Muuttuviin kuormiin lukeutuvat luonnollisesti ulkoiset kuormat, kuten tuulikuorma, tai maanjäristyskuorma. Rakenteen oma paino on tyypillinen pysyvä kuorma. Riippuen kuormitusyhdistelyistä, asetetaan yhdistelykerroin sen mukaisesti. Tässä opinnäytetyössä yhdistelykerroimet on huomioitu mitoitusohjelmassa. Tärkeä tehtävä tällä kuormitusyhdistelyllä on ottaa huomioon pahin mahdollinen mitoitusilanne hyväksyttävällä todennäköisyydellä. (Pulkka 2007, 30-31.)

Taulukon 1 mukaiset mitoituslaitteet tulee ottaa huomioon standardin SFS-EN 1991-4 mukaisesti. Jokaisessa kuormitustapauksessa tulee ottaa huomioon sekä määräävä että pysyvä kuormitus. Pie-nennyskerroin ψ soveltuu kuormitusten pienentämiseen ja näin huomioidaan kertoimen avulla kuor-mitusten yhtäaikaisen esiintymisen todennäköisyyttä. (Pulka 2007, 31.) Tämä taustatieto esitellään tässä työssä siksi, että se liittyy olennaisesti mitoitusyökalun rakentamisen perustietoihin.

Taulukko 1. Kuormitusluokissa AAC 2 ja AAC 3 huomioon otettavat suunnittelutilanteet ja kuormitus-yhdistelyt (SFS-EN 1991-4 2016, 76).

Short title	Design situation / Dominant action 1	Permanent actions	Accompanying Action 2	$\psi_{0,2}$	Accompanying Action 3	$\psi_{0,3}$
D	Solids discharge	Self weight	Foundation settlement	1,0	Snow or wind or thermal	0,6
					Imposed loads or deformation	0,7
I	Imposed loads or deformation	Self weight	Solids filling	1,0	Snow or wind or thermal	0,6
S	Snow	Self weight	Solids filling	1,0		
WF	Wind and full silo	Self weight	Solids filling	1,0		
WE	Wind and empty silo	Self weight	Solids empty	0,0		
T	Thermal	Self weight	Solids filling	1,0		
F	Foundation settlement	Self weight	Solids discharge	1,0	Snow or wind or thermal	0,6
				$\psi_{2,2}$		$\psi_{2,3}$
E	Explosion	Self weight	Solids filling	0,9	Imposed loads or deformation	0,3
V	Vehicle impact	Self weight	Solids filling	0,8	Imposed loads or deformation	0,3

NOTE 1: This table refers to terms in the load combination rules of Section 6 in EN 1990.

NOTE 2: The subscripts of ψ have the following significance: first subscript is for the type of design situation: normal combination values are 0; frequent values are 1; quasi-permanent values are 2. The second subscript refers to the load number in the combination.

3.4.1 Normaalisti vallitsevat ja tilapäiset kuormitusyhdistelmät

Sisällön paino, sekä tyhjennys-, lumi-, tuulikuormat ja pakkosiirtymät sekä lämpöliikkeistä aiheutuvat kuormitukset tulee normaalisti ottaa huomioon murtorajatilamitoituksessa taulukon 2 mukaisesti (Pulka 2007, 32).

Taulukko 2 kertoo lukijalle huomioon otettavista tyypillisesti murtorajatilan suunnittelutilanteista ja kuormitusyhdistelystä kuormitusluokissa AAC 2 ja AAC 3 (SFS-EN 1991-4, 2016, 77).

Short title	Design situation / Leading variable action	Permanent actions		Leading variable action		Accompanying variable action 1 (main)		Accompanying variable action 2		Accompanying variable action 3, 4, etc.	
		Description	ξ_1	(See next column, "main")		Description	$\psi_{0,1}$	Description	$\psi_{0,2}$	Description	$\psi_{0,3}$ $\psi_{0,4}$ etc
D	Solids discharge	Self weight	0,9			Solids discharge	1,0	Foundation settlement	0,7	Snow, wind, thermal	0,6
										Imposed loads, imposed deformation	0,7
I	Imposed deformation	Self weight	0,9			Solids filling	1,0	Imposed deformation	0,7	Snow, wind, thermal	0,6
										Imposed loads	0,7
S	Snow	Self weight	0,9			Solids filling	1,0	Snow	0,6	Imposed loads	0,7
WF	Wind and full silo	Self weight	0,9			Solids filling, full silo	1,0	Wind	0,6	Imposed loads	0,7
WE	Wind and empty silo	Self weight	0,9			Solids, empty silo	0,0	Wind	0,6	Imposed loads	0,7
T	Thermal	Self weight	0,9			Solids filling	1,0	Thermal	0,6	Imposed loads	0,7

NOTE: Table A.2 should be used with Expressions (6.10a) and (6.10b) in EN 1990, 6.4.3.2.

3.4.2 Onnettomuustilanteiden kuormayhdistelmät

Yhdisteltynä, taulukon 3 mukaisesti, onnettomuustilanteiden kuormitukset murtorajatilassa voivat sisältää esimerkiksi räjähdyksestä, omasta painosta, tai paineallosta aiheutuvat kuormat (Pulkka 2007, 33).

Taulukko 3. Huomioon otettavat onnettomuusmurtorajatilan suunnittelutilanteet ja kuormitusyhdistelyt kuormitusluokissa AAC 2 ja AAC 3 (SFS-EN 1991-4 2016, 77).

Short title	Design situation / Leading variable action	Permanent actions		Leading accidental action		Accompanying variable action 1 (main)		Accompanying variable action 2		Accompanying variable action 3, 4, etc.	
		Description		Description		Description	$\psi_{1,1}$ or $\psi_{2,1}$	Description	$\psi_{2,2}$	Description	$\psi_{2,3}$ $\psi_{2,4}$ etc
E	Explosion	Self weight		Blast pressure		Solids filling	0,9 or 0,8	Imposed deformation	0,3	Imposed loads	0,3
V	Vehicle impact	Self weight		Vehicle impact		Solids filling	0,9 or 0,8	Imposed deformation	0,3	Imposed loads	0,3

NOTE: Table A.3 should be used with Expression (6.11b) in EN 1990, 6.4.3.3.

3.4.3 Maanjäristystilanteiden kuormayhdistelmät

Kaava 2 esittää maanjäristystilanteen kuormitusyhdistelmässä kuormien vaikutusten yleistä muotoa (Pulka 2007, 34). Tämä kaava esiintyy mitoitusohjelman laskentaohjelmassa. Työ perustuu Jimi Pulkan (2007) diplomityöhön.

$$Ed = E * \{G_{k,j}; P; A_{Ed}; \psi_{2,i} * Q_{k,i}\} \quad j \geq 1; i \geq 1, \quad (2)$$

jossa:

E = kuormien vaikutus

Ed = kuormien vaikutuksen mitoitusarvo

Kaavalla 3 voidaan seuraavasti esittää edellisen kaavan sulkulausekkeen kuormayhdistelmä.

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_{Ed} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (3)$$

Taulukossa 4 on esitetty standardin SFS-EN 1991-4 maanjäristystilanteissa huomioon otettavat kuormitukset. Aina on huomioitava rakenteen oma paino ja mahdolliset pakkokuormat ja -siirtymät. Eriksen kuormat määritetään täydelle, sekä tyhjälle silolle. (Pulka 2007, 34.)

Taulukko 4. Huomioon otettavat seismiset murtorajatilan suunnittelutilanteet ja kuormitusyhdistelyt kuormitusluokissa AAC 2 ja AAC 3 (SFS-EN 1991-4 2016, 77).

Short title	Design situation / Leading variable action	Permanent actions		Leading seismic action		Accompanying variable action 1 (main)		Accompanying variable action 2		Accompanying variable action 3, 4, etc.	
		Description		Description		Description	$\psi_{2,1}$	Description	$\psi_{2,2}$	Description	$\psi_{2,3}$ $\psi_{2,4}$ etc
SF	Seismic action and full silo	Self weight		Seismic action (earthquake)		Solids filling, full silo	0,8	Imposed deformation	0,3	Imposed loads	0,3
SE	Seismic action and empty silo	Self weight		Seismic action (earthquake)		Solids, empty silo	0,8	Imposed deformation	0,3	Imposed loads	0,3

NOTE: Table A.4 should be used with Expression (6.12b) in EN 1990, 6.4.3.4 and those of EN 1998-1 and EN 1998-4.

Maanjäristyskuormia määritettäessä voidaan SFS-EN 1991-4 mukaan käyttää normaalien tyhjennys- ja täyttökuormien määrittelyssä sisällön keskimääräisiä arvoja reunakitkakertoimeen μ , suppilon keskipainesuhteen F ja vaakapainekertoimen K osalta. Kuitenkin yksinkertaisuuden vuoksi käytetään laaditussa mitoitusohjelmassa samoja kuormia, kuin mitoituksessa normaalistikin. (Pulka 2007, 35.) Näitä eri kertoimia ja arvoja on käytetty tämän työn mitoitusohjelmassa.

4 MITOITUSTYÖKALUN RAKENTAMINEN

Tämän opinnäytetyön teoriaosuudessa esitelyihin asioihin liittyen tämä työ on erittäin monikerroksinen käsiteltäväksi. Näin ollen tulee kertoa kaikista niistä työn eri vaiheista, joita oli luotaessa tarvittava mitoitustyökalua rakennettaessa toimeksiantajalle ja tehdessä tämä opinnäytetyöraportti.

Tässä luvussa kerrotaan eri vaiheista mitoitustyökalun rakentamiseen liittyen, sekä mitä olennaisia tietoja järjestelmä tarvitsee toimiakseen oikein. Input-osiossa kerrotaan tarvittavista syöttötiedoista ja siitä, miten tiedot syötetään Exceeliin, ja kuinka ohjelma laaditaan niin, että syötettävien tietojen antaminen onnistuu sujuvasti. Ohjelmaosuudessa kerrotaan koko ohjelmasta ja siitä kuinka ohjelma on laadittu, sekä miksi ohjelma on sellainen kuin on. Output ulostulotiedotosuudessa kerrotaan siitä, mitä ulostulotiedot ovat ja mihin niitä tarvitaan. Osuuksissa on melko lyhyesti ja ytimekkäästi kuvattu se, miksi ne ovat tarpeellisia käytännön työssä.

4.1 Input-lähtötiedot

Input-lähtötiedoilla tarkoitetaan tietoja, jotka syötetään Exceeliin sellaiseen ohjelmaan, josta kerrotaan luvussa 4.2 enemmän, ja ohjelma laskee syötettyjen lähtötietojen avulla lopputuloksen Exceeliin tehdyillä kaavoilla. Tässä ohjelmassa syötettyjä lähtötietoja löytyy useasta kohdasta. Ensimmäisessä kohdassa syötetään projektin perustiedot ja nämä kohdat ovat poissaa laskentaosuudesta. Päämitat-osiossa syötetään usea tieto ja valitaan myös yksi valikon vaihtoehto. Näistä arvoista Excel laskee – tai on jo laskenut toisilla sivuilla valmiiksi – arvot, joista selviää suppilon kulma, sekä suppilon jyrkin ja laakein eli maksimi- ja minimikulma ja suppilon korkeus sekä siilon tai säiliön korkeus.

Tuki-kohdassa on valintapainike vaakasuoran tukipisteen siilon yläosassa ja valikko sen alla, missä on tuen tyyppivalikko. Näiden alla on kaksi kohtaa, joihin merkitään input-tietona tukipisteiden määrä, sekä leveys sylinterin vahvistetulle tukialueelle. Sisällys-kohdan edessä on taas valintapainike – eli halutessaan voi input-säätönä valita kyseisen osa-alueen mukaan laskuihin tai jättää sen valitsematta – tällä kertaa valittuna valikosta on hiekka, kun materiaalivaihtoehtoja on yhteensä kaksikymmentäneljä kappaletta, eli valikossa on vaihtoehdot olemassa. Tämän valikon alla on toinen valikko, joka määrittää siilon seinämän tyyppiä – sileä vai karhea. Sisällysosassa input-tieto on vielä alimmaisena valintapainikkeen ”varastoidun kiinteän aineen dynaamiset lastausolosuhteet” kanssa.

Input-tietoja tarvitaan, jotta voidaan mitoittaa tulevan siilon tai säiliön ja suppilon mitat oikein. Ohjelma-osio laskee input-tietojen perusteella tulokset esitettyyn kysymykseen. Jotta input-tiedot ovat korrekkit, suunnittelijalla tulee olla perustavat tiedot mitoituksessa tarvittavista arvoista, käyttämällä muun muassa standardeja ja muita ohjeistuksia liittyen työhön.

4.2 Ohjelma

Ohjelman on tarkoitus laskea alkutietojen perusteella, kuinka paksu seinämä siilolle tai säiliölle tulee. Ohjelma on yksinkertainen Exceltiedosto, jonne syötettyjen input-tietojen perusteella laskennallinen osio täyttyy automaattisesti output-tietoa varten.

Tällä kertaa ohjelmaa varten ei tarvinnut tehdä yleensä tarvittavaa vuokaaviota, sillä löytyi diplomityö (Pulka 2007), jossa on valmis esimerkkipohja tästä mitoitettavasta suunnittelutyökalusta. Sitä hyödyntämällä saatiin ohjelma uudestaan luotua Exceliin ja päivitettyä tarvittavat kaavat. Ohjelman toimivuutta pystyy testaamaan sen valmistuttua. Työ on erittäin haastava – etenkin kun tarkastelee siltä kannalta, että perustietoa on rajallisesti ja standardit on huomioitava ja laskennallisesti pitää osata rajata työ oikein.

Mitä sitten ohjelma sisältää tässä työssä? Ensimmäinen valittava sarake sisältää projektitiedot. Tietoihin voi kirjoittaa asiakkaan tiedot, projektin numeron tai nimen, siilon nimityksen, tekijän nimen ja tiedoston nimen. Seuraava valittava otsikko on päämitat ja sen alle syötetään tarvittavat mitat, mistä ohjelma laskee seuraavan alla olevan lasketun datan: kulmat ja siilon ja suppilon korkeuden.

Seuraavaksi tukikohdassa on valintapainike kohtaan ”Vaakasuora tukipiste siilon päällä”. Tuki-kohdassa on määritetty myös tuen tyyppi ja kuinka monta tukipistettä on olemassa ja millä etäisyyksillä ne ovat, ja millä korkeudella siiloon tai säiliöön nähden. Valintapainike on sisällyskohdassa, jossa tässä esimerkissä valittuna on hiekka kahdestakymmenestäneljästä eri vaihtoehdosta. Tämän alla on valikko siilon tyypistä. Näiden alla on syötetty arvot, jotka Excelistä on laskettu ohjelmaan, eli sisällysarvot: Yksikön paino, kallistuskulma, sisäisen kitkan muuntokerroksen kulma, sivuttaissuhde muuntokerroin, seinämän kitkakertoimen muuntokerroin ja kiinteäaineen syöttämisen viitekerroin. Alla on vielä valintapainike kohdalle ”Dynaamiset lastausolosuhteet varastoidulle kiinteälle aineelle”.

Luokittelu kohdassa on kerrottu siilon kuutiotilavuus, laskettu paino tonneissa, siilon nettokapasiteetti (jonka voi jättää luokittelematta). Kapasiteetti (joka on käytetty siilon luokittelussa) tonneina, tuen tyyppi (erillinen/yhtenäinen), AAC-luokka standardin EN 1991-4 mukaisesti, seurausluokka standardin EN 1993-4-1 mukaisesti, siilon tyyppi (missä valintapainike siilo on hoikka) ja suppilon tyyppi.

Materiaalirakenne-kohdan edessä on valintapainike, sekä sen jälkeen on kaksi valikkoa, joista ensimmäinen määrittää arvoa ja jälkimmäinen arvorajoja. Näiden alla lukee korroosiovara ja sen alla suppilo millimetreinä, 1. levysarja sylinterissä (lähellä siirtymäaluetta) millimetreinä, toinen sylinteri millimetreinä, myötöraja megapascalina ja murtolujuus megapascalina. Kaikki millimetriarvot määritetään ja jännitysarvot tulee kaavoista laskettuna ohjelmaan valmiiksi. Näiden tietojen alla lukee materiaalien osittaiset turvallisuuskertoimet ja otsikon alla on syötettynä eri turvallisuuskertoimien arvot. Nämä tiedot on syötetty Excelin laskentasivulta esille etusivulle.

Valmistuksen toleranssi Q on ensimmäisen sivun alimmaisena otsikkona ja sen alla on valikko ja vieressä arvo Q ja tämä arvo on syötetty excelistä ohjelmaan. Tämän jälkeen seuraavalla sivulla on valintapainike kohdan kuormat edessä. Otsikon alla on syötettäviä arvoja: Kattorakenteiden painot kN/m^2 :nä, lisätty kuorma katolle kN/m^2 :nä, pistekuorma (jakautuu tasaisesti seinämään) esitettyinä kN :na, seisminen kiihtyvyyys (g) ja tuulen paine (kN/m^2). Näiden syötettävien arvojen alla lukee otsikko 'kuormien osittaiset tekijät' ja tämän alla on kaksi kohtaa – pysyvät kuormat ja vaihtelevat kuormat, joiden arvot vaihtelevat välillä 1,35 – 1,75.

Excel-ohjelman etusivulla loppuyhteenvedossa tulokset näkyvät seuraavasti. Ensimmäisenä tulosyhteenvedokohdassa on kolme saraketta, joista ensimmäisen sarakkeen otsikko on 'siilorakenteiden massa/käyttö', ja toisen sarakkeen otsikko on 'jännitemaksimiarvo' ja kolmannen sarakkeen otsikko on 'massa'. Nämä kolme saraketta ovat siis vierekkäin. Näistä sarakkeista ensimmäisen sarakkeen 'siilorakenteiden massa/käyttö' alle on lueteltu ylhäältä alas sylinteri, suppilo, katto (rakenteita ei mitoitettu), taipuma- ja kestävyysnimikkeet (neljä kappaletta), sekä tuki-sarakkeet. Edellä olevien sarakkeiden - sylinteri, suppilo, katto ja tuki - massat on myös esitetty tuloksena Excelin laskemista kaavoista. Taipumien suhteen tosin on jätetty arvioimatta massaa, mutta prosentuaalinen arvo näytetään, kuten jokaisessa sarakkeen kohdassa.

Lopuksi sivun 2 alimmainen otsikko on 'lisämateriaalin varaus', mihin on syötetty 3 %:ia ja massa on vieressä kg:na. Näiden alla on viiva, minkä alla lukee kokonaismassa. Tämän viereen Excel on laskenut kokonaismassan edelläolevista massoista. Alla on vielä levyjen mitat sylinterille, sekä valitut levyt. Levyt ovat korkeuksittain määritetyt – tietyllä korkeudella on tietynpaksuinen levy. Myös suppilon levyjenpaksuudet ja levyt on määriteltä – mitä laatua ja kokoa ne ovat. Tähän ohjelma antaa oikeat mitat ja painot tarvittaville levyille, joista silo tai säiliö rakennetaan. Juuri tällä ohjelmalla säästetään todella paljon aikaa ja rahaa materiaalikustannuksissa, kuin myös laskennallisessa työssä.

4.3 Output-ulostulotiedot

Output-ulostulotieto on ratkaisu, jota tämän opinnäytetyön tehtävänannolla haetaan. Output-ulostulotieto kertoo, kuinka paksu on silon tai säiliön metalliseinämä. Input määrittää ja ohjelma laskee tulokset ja output-tieto kertoo, mikä on lopputulos.

Output-lopputulos tulee ohjelmaan kaavojen valmiiksi laskemana excelissä. Kun ohjelmaan syöttää Input-tiedot, Excelissä valikko ja syötetyt arvot rajaavat tilannetta niin, että Excel hakee oikein kaavojen antamat tulokset output-tiedoksi ohjelmaan. Näin outputissa näkyy jo aiemmin excelissä lasketut tulokset valmiina. Suunnittelijalle tämä tarkoittaa sitä, että on todella nopeaa laskea tarvittavan levyn paksuudet tietyillä korkeuksilla. Tarjouslaskenta nopeutuu huomattavasti ja työnteko helpottuu myös paljon tähän liittyen.

5 ANALYYSI

Excel-työ oli sekä vanhan kertaamista että uuden päivittämistä vanhaan tietoon, sekä virheiden korjaamista useampaan kertaan peräkkäin. Työ vaati tarkastuskertoja ohjaajien kanssa useampaan kertaan, sekä toimeksiantajan tarkastukset.

Tässä luvussa kerrotaan työn eri vaiheista, sekä sisällöllisesti siitä, mitä teorian avulla ollaan saatu aikaan liittyen tarvittavaan tietoon. Tässä kerrotaan myös työn eri osuuksista ja se, mikä työssä onnistui hyvin ja mikä työssä epäonnistui – missä siis on kehittämisen varaa. Työn onnistumiseen liittyen eri vaiheet kerrataan tässä luvussa, jotta nähdään, kuinka työ eteni lopulta valmiiksi saakka.

Työhön liittyvä analyysi sisältää prosessiin liittyvän tietopohjan analysoinnin – mitä eri vaiheissa tapahtuu – analyysi siitä, miten työ etenee vaiheittain ja mitä missäkin kohdissa on aineistollisesti annettu tietoja. Analyysissä myös arvoidaan, mitä erilaiset tilastot ja taulukot, sekä kuvaajat antavat tietona työntekijälle tai työn lukijalle. Siinä kerrotaan, miksi tietyt asiat tapahtuvat laskennan eri vaiheissa, jotta lopputulos on sellainen kuin sen on haluttu olevan.

Työn alkutehtävänä oli syöttää alkuperäisen diplomityön tiedot omaan uuteen Excel-tiedostoon. Tietojen syöttäminen sujui ongelmitta ja suuremmista virheistä ja valmistui viikon työstön jälkeen helmikuun alussa 2018. Kirjoitusvaiheessa kirjoitettiin kaavat Exceliin teorian pohjalta, käytännön näkökulmasta.

Seuraavassa vaiheessa kaavat syötettiin Exceliin. Tässä vaiheessa tarkistettiin kaavojen laskemien arvojen oikeellisuus ja tämä työosuus tehtiinkin ohjaajan kanssa tarkastaen, että kaavat antoivat oikeat vastaukset, eli arvot. Linkitykseen ei vielä tässä vaiheessa työtä puututtu. Tämä työosuus kesti pidempään, noin kolme viikkoa.

Seuraava vaihe oli Excel-työn tarkistusvaihe. Toimeksiantajan mukaisen ohjeen mukaan määritettiin kohdittain, missä kohtaa linkitys on tehty oikein ja missä väärin – vihreällä ja punaisella värillä koodaten. Tässä vaiheessa myös virheelliset arvot merkittiin punaisella, ja oikeat ja oikein linkitetty arvot merkittiin vihreällä. Tämä vaihe oli erittäin tärkeä, muutoin työn teolle oli sokea, ennen kuin virheet oli tarkistettu näin läpi. Kun työ selkeni, voitiin seuraavaksi korjata virheet. Tämä itsetarkistusvaihe oli todella tarpeellinen.

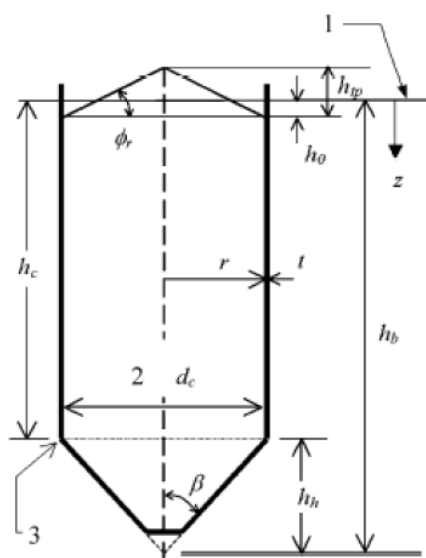
Linkittämissä vaiheissa alkuarvoista lähtien tuli olla kaikki arvot syötetty vain kertaalleen kaavoihin, eli lähtöarvoista olleet tiedot tuli löytyä vain yhdestä paikasta Excel-tiedostossa. Näin alkuarvoja syötettäessä ei seuraavat arvot ole väärin ja ne linkittyvät suoraan alkuarvoihin, jotka syöttyvät tiettyjen määritelmien mukaan. Linkitys tulee olla pitkin työtä tehty täsmällisesti oikein. Näin ollen yksikään lasku ei saa olla väärin, vaan tulee olla täsmälleen oikea lukuarvo.

Linkityksen tarkastuksen jälkeen huomattiin vielä virheellisiä arvoja työssä ja nämä johtuivat muutamasta alkuarvoihin liittyvästä kaavasta, joita ei työssä ollut tässä vaiheessa laskettu lainkaan. Kun nämä vaikeat kaksi kaavaa ja alkuarvojen linkitys oli tehty, löysivät arvot kohdilleen varmasti. Myöhemmin työssä selvisi, ettei edellä mainittuja kahta vaikeata kaavaa tarvittu lainkaan Excelissä, vaan ne olivat Mathcadissa tarvittavia kaavoja. Alkuarvoissa oli kuitenkin pientä korjattavaa, ja kun ne oli toimeksiantajan kanssa tarkastettu läpi, oli työ siltä osin valmis.

Valikko-osuus, jossa on raaka-aineet ja niihin liittyvät kaikki alkuarvot syötettynä takalaskusivulta laskentasisivun kautta – kaavojen kautta – etusivulle input- ja outputarvoiksi, kertoo sen mitkä lähtöarvot raakamateriaali antaa laskukaavoille. Valikossa on kaksikymmentäneljä eri materiaalia (esim. hiekka, jauho, tai hiili) ja näiden ominaisarvot liittyen laskentaan. Excelillä tehtiin valikko, johon arvov valittuaan (esim. hiekka) saa tämän arvov ominaisuudet suoraan esille laskentaosioon, sekä input- ja outputsivulle. Nämä arvot vaikuttavat siilon tai säiliön kokonaismassaan, sekä siihen, mitä paksuutta levyä tarvitsee käyttää milläkin korkeudella siloa tai säiliötä. Takalaskusivulla on myös tietokantasivu liittyen käytettäviin raaka-aineisiin.

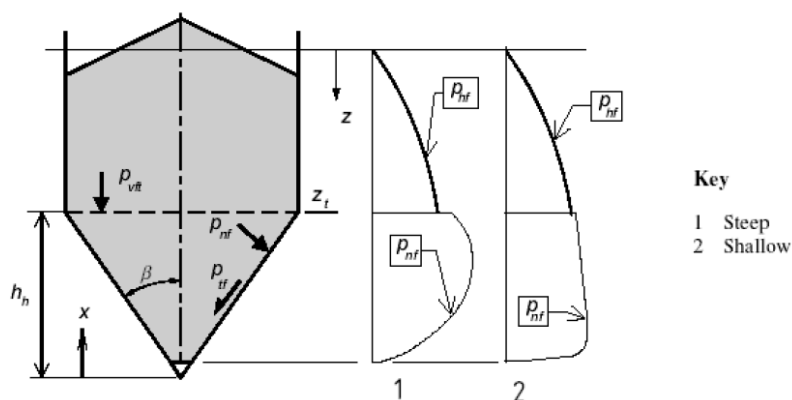
Viimeinen osuus, joka sisältää massalaskennan ja levyjen koon – pinta-alan ja massan eri korkeustasoilla, on laskennallisesti tehtävä toimeksiantajan kanssa loppuun saakka. Tämä osuus laskettiin myös loppuun saakka ja siitä muodostui työhön vielä yksi sivullinen, tulossivu. Sinne, tulossivulle, saatiin ohjelma tuottamaan selkeästi tulokset koko työn annista. Oli erittäin palkitsevaa nähdä, että työ toimi oikein. Tähän liittyen laskennallisissa osuuksissa toimeksiantaja oli laskenut ”Jos”-kaavat läpi, jotta ohjelma laskee kaiken oikein.

Ohessa vielä työhön liittyviä kuvia, joiden alla selitykset, mihin osuuteen kuvat liittyvät (ohessa alkuperäiset lähdetiedot suluissa).



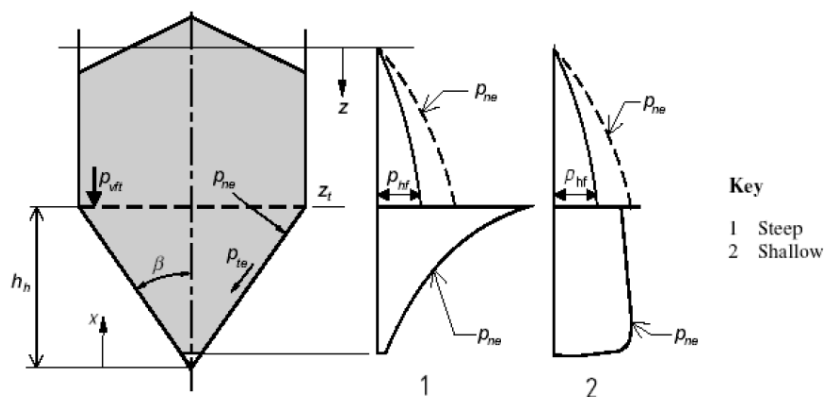
Kuva 4. Tarvittavista päämittatiedoista osa, joita tarvitaan silon laskennassa (SFS-EN 1991-4 2016, 18).

Korkeudeksi on määritelty kokonaiskorkeus, z , joka laskee alaspäin, osittaiset korkeudet h_c , h_n ja h_o , sekä h_{tp} . Leveyksiä ovat halkaisija d_c , levynpaksuus t ja säde r . Kulmia ovat Φ_r ja β . 1 on siilon korkeudella $z(0)$ -rajalla. 2 on siilon halkaisijan leveys ja 3 on kartion ja suppilon erottaja.



Kuva 5. Korkeissa ja matalissa suppiiloissa täyttöpaineiden jakaumat (SFS-EN 1991-4 + AC 2016, 126).

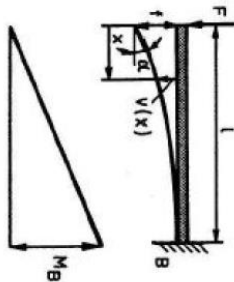
Kuvaajien avulla kuva 5 perustelee, miksi täyttöpaineiden jakaumat matalissa ja korkeissa suppiiloissa ovat kuten ovat. Verrattuna matalaan suppiiloon korkeassa suppiilossa paine p_{nf} on suurempi. Paine p_{nf} jakautuu kuvaajan mukaan eri tavalla kuin korkeassa suppiilossa. p_{nf} on sama molemmissa suppiiloissa.



Kuva 6. Matalan ja korkean suppilon tyhjennyspaineet (SFS-EN 1991-4 + AC 2016, 134).

Matalan ja korkean suppilon tyhjennyspaineet on kuvattu kuvassa 6. p_{ne} muuttuu p_{hf} -kuvaajaksi. p_{ne} korkealla suppilolla muuttuu nousevaksi funktioksi, kun taas matalalla suppilolla funktio kasvaa alkuun tasaiseen lähellä arvoa nolla ja lopulta nousee suoraan ylöspäin.

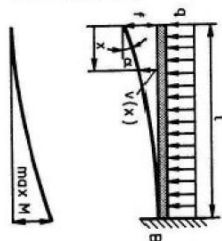
Seismic force from roof load
(top of silo is free):



Kuva 7. Seisminen voima katon kuormituksessa, kun siilon yläosa on vapaa (Pulkka 2007, Liite 1, 14).

Kuvassa 7 lujuuslaskennallinen esimerkki seismissen voiman vaikutuksesta katon kuormitukseen, kun siilon yläosa on vapaa. Eli kun yläosaa ei ole tuettu sinne vaikuttaa voimakkaasti seisminen voima tärinä.

Seismic force from content and shell
(top of silo is free):



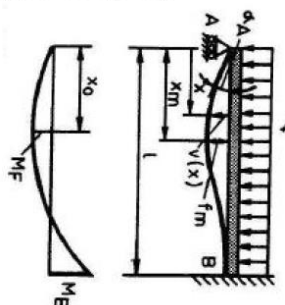
Kuva 8. Seisminen voima sisältä ja kuoresta, kun siilon yläosa on vapaa (Pulkka 2007, Liite 1, 14).

Kuvassa 8 on kuvattu seisminen voima sisältä ja kuoresta. Voimakas vaakavoima tärisyttää siloa, etenkin kun yläosa on vapaana tuettomana.

Seismic force from roof load:
(top of silo supported)

Force is transmitted directly to the upper support as a reaction force.

Seismic force from content and shell
(top of silo supported):



Kuva 9. Esimerkki kuva mitoitustyökalun ohjelmaan sisältyvistä kuvista. Seisminen voima katon kuormituksesta, kun siilon yläosa on tuettu (Pulkka 2007, Liite 1, 14).

Kuvassa 9 on kuvattu seisminen voima katon kuormituksesta, kun siilon yläosa on tuettu. Silloin kuin yläosa on tuettu, on siilon yläosan kuormitus huomattavasti pienempi ja silo lommahtaa paineen x verran riippuen tärinän voimakkuudesta.

6 YHTEENVETO

Tehtävänantona oli tehdä suunnittelijan mitoitustyökalu sillojen ja säiliöiden mitoitukseen. Työn edettyä selvisi, että aiheesta on jo tehty diplomitason opinnäytetyö, jossa myös kyseinen tarvittava mitoitushjelma oli tarjolla. Näin ollen siitä laadittiin koekappale mitoitustyökaluksi yritykselle, sillä juuri vastaavaa työkalua he hakivat toimintaansa. Työssä onnistui moni tekijä, erityisesti lopullinen tulos, joka kertoo, että ohjelma laskee ja mitoittaa tarvittavat levynpaksuudet määritetyillä korkeuksilla. Työssä epäonnistui mahdollisesti valikot etusivulta – niiden määrittely ja yhdistäminen linkittämällä laskennalliseen ohjelmaosioon jäi lopuksi uupumaan aikataulusyistä. Mielestäni tässä projektissa on keskeistä rauhallinen työstäminen, sillä pitkien ja koukeroisten kaavojen oikein merkitsemiseen vaadittiin ”lehmän hermot”.

Excelin input- ja output-sivulle tuli ohjelmaan liittyen arvojen syöttösivu, sekä tulosten näyttösivu. Viereiselle sivulle tuli Excel-laskentasisivusto, missä oli kaikki tarvittavat kaavat liittyen ohjelmaan. Aluksi syötettiin pelkästään tiedot suoraan Exceliin kopioituna paperilta. Näistä arvoista pystyin määrittämään kaavat, jotka sitten lopulta toimivat, kun ne oli laskettu myös Exceliin. Kaavat tuli myös linkittää oikein, jotta ne toimivat aina samalla tavalla laskennan eri vaiheissa. Tuli myös määrittää JOS-kaavat, jotka toimeksiantaja osaltaan määritteli valmiiksi työhön.

Tämän opinnäytetyön osata sovittiin, että riittää jos hiekkasimerkki lasketaan valmiiksi. Kuitenkin tehtävänannossa on tarkoitus laskea hiekkavaihtoehdon lisäksi myös kaikkien eri muiden materiaalien mahdollisuudet sillojen ja säiliöiden kanssa. Näin ollen työ vaatii hieman lisätyötä ja Exceliin tulee syöttää kahdenkymmenen neljän eri materiaalin perustiedot ja tarvittavat tiedot kaavoihin ja ne kohdistetaan valikon kautta valittavaksi niin, että sieltä voi valita kunkin vaihtoehdon. Kun tämän on valinnut, ohjelma syöttää suoraan tulokset esille input-ohjelmasivulle. Korkeus- ja leveysmitat vaikuttavat siihen, millä korkeudella ja kuinka paksua on levy, josta sillo tehdään, ja minkä kokoinen massa silolle tai säiliölle tulee.

Mitotustyökalun suunnittelusta saatiin luotua Excel hyvin, sillä se oli jo valmiiksi tehty, mutta valmiin työn taustalla olikin isompi urakka, kun kaavat piti päivittää toimimaan ja ohjelman toimivuudestakin oli kyse linkittämisessä – eihän tietoa ollut tarjolla kuin esimerkin verran.

Mitotustyökalun teko onnistui melko kivuttomasti. Tosin tarvitsin työn edistymiseen paljon ohjaajien Marko Pekkarisen (Savonia-Amk), Olli-Pekka Kähkösen (Savoniasta-Amk) ja Markku Halttusen (Savonia-Amk) apua. Tekovaiheessa Marko Pekkarinen ja Markku Halttunen auttoivat linkityksessä ja kaavoissa, samoin Olli-Pekka Kähkönen välillä myös. Markku Halttunen auttoi loppusuoralla liittämään ohjelman inputit ja outputit ohjelmaan – eli että tiedot poimituvat Excelistä tietyistä pisteistä input-output-sivulle. Tärkeintä työssä oli hakea tieto oikeasta paikasta ja soveltaa sitä käytäntöön tarvittavin osin. Mitotustyökalu alkoi toimimaan maaliskuun lopussa lopputarkistuksen yhteydessä toimeksiantajan tarkistettua työn laskennalliset tulokset, että ne olivat kohdillaan ja oikein.

Levyn paksuus tietynä massana x pitää tietää siitä syystä tietyillä korkeuksilla, että se säästää laskennallisesti aikaa ja materiaalitilauksissa rahaa. Laskentaohjelma on siis erittäin tarpeellinen työkalu teollisuuden suunnittelijalle.

Kun työ on valmis, toimeksiantaja voi mitoitustyökalun avulla nopeasti määrittää siilon tai säiliön koon ja materiaalien avulla, kuinka paljon siilo tarvitsee raakamateriaalia levyihin ja kuinka paksuilla milläkin korkeudella levyt ovat. Tämä helpottaa huomattavasti suunnittelijan työtaakkaa. Siksi päätettiin tehdä valmiista ohjelmasta uusi versio. Työn tavoitteet onnistuivat hyvin. Exceltyön valmistuttua ohjelma laskee tarvittavat levynpaksuudet määritetyille seinämän korkeuksille. Työn tuloksena suunnittelijan mitoitustyö helpottuu ja nopeutuu, samoin näin ollen tarjouslaskennallinen osuus helpottuu ja työ määrittää nopeasti tarvittavan materiaalin määrän. Ohjelma on monipuolisesti tarpeellinen toimeksiantajalle. Siksi tehtävänanto olikin palkitsevaa toteuttaa.

LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT

Comatec, 2018. Comatec-Group. [Viitattu 2018-03-17.] Saatavissa: <https://www.comatec.fi/comatec-group/>, 17.3.2018

Comatec, 2018. Referenssit. [Viitattu 2018-03-17.] Saatavissa: <https://www.comatec.fi/referenssit/>, 17.3.2018

J. Pulkka, Terässiilojen mitoitusohjelman kehittäminen, Lappeenrannan Teknillinen yliopisto, Diplomityö, s. 12-13

RIL 201-2-2011. Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat. Eurokoodit EN 1991-1-2, EN 1991-1-5, EN 1991-1-6, EN 1991-1-7, EN 1991-3 ja EN 1991-4. Hansaprint Oy, 2011.

SFS-EN 1991-4 + AC, Eurokoodi. Rakenteiden kuormat. Osa 1-4: Siilot ja säiliöt. Sivut 12, 18, 42.

LIITE 1: EXCEL MITOTUSTYÖKALU

LIITE ON SALAINEN