



# **SEMENTTISIILON LUJUUSLAS- KENTA**

Ari-Jaakko Notko

Opinnäytetyö  
Toukokuu 2013  
Kone- ja tuotantotekniikka  
Tuotekehitys

**TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU**  
**Tampere University of Applied Sciences**

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma  
Tuotekehityksen suuntautumisvaihtoehto

NOTKO, ARI-JAAKKO:  
Sementtisiilon lujuuslaskenta

Opinnäytetyö 80 sivua, joista liitteitä 38 sivua  
Toukokuu 2013

---

Opinnäytetyön toimeksiantajana oli Insinööritoimisto Comatec Oy. Comatec on noin 400 työntekijän insinööritoimisto, joka toimii pääasiassa Suomessa. Työn tarkoituksena oli selvittää, että kattaako siilo standardissa EN 1993-4-1 (Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 4-1: Silos) asetetut vaatimukset.

Työ voitiin rajata neljään vaiheeseen. Ensiksi laskettiin lujuuslaskennassa käytetyt kuormat eri standardien antamien ohjeiden avulla. Kuormitustapauksia oli neljä eli sisällöstä syntyvät painekuormat, rakenteen omasta massasta syntyvät kuormat, tuulikuormat ja maanjäristyskuormat. Toisessa vaiheessa rakenteesta oleva 3D-malli yksinkertaistettiin, eli mallista poistettiin kaikki lujuuslaskennan kannalta epäolennainen Spaceclaim-ohjelmalla. Samalla ohjelmalla rakenteesta tehtiin laskennan kannalta kevyempi keskipintamalli. Kolmas vaihe oli rakenteen lujuusopillinen analysointi ANSYS-ohjelmalla. ANSYS-ohjelman ratkaisu perustuu elementtimenetelmään (FEM). Neljännessä vaiheessa laskennasta saatuja tuloksia analysoitiin ja tehtiin niiden avulla esim. väsymistarkasteluja.

Lujuuslaskennan perusteella rakenne voitiin hyväksyä, eli rakenne kattoi standardeissa sille asetetut lujuusvaatimukset. Työn haasteena oli eri standardien tarkka tulkitseminen, jotta rakenne olisi varmasti myös viranomaiskelpoinen.

## **ABSTRACT**

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Degree programme in Mechanical and Production Engineering  
Product Development

NOTKO, ARI-JAAKKO:  
Cement Silo Strength Evaluation

Bachelor's thesis 80 pages, appendices 38 pages  
May 2013

---

The client of the thesis was Insinööritoimisto Comatec Ltd. Comatec is an engineering office and it has about 400 workers. Company works mainly in Finland. The purpose of the thesis was to ensure that the silo structure will satisfy the given standards in standard EN 1993-4-1 (Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 4-1: Silos).

There were four separate steps in this thesis. First step was to calculate loads that will be used in strength evaluations. Loads were calculated by using orders given in different standards. There were four kinds of loads: pressure loads caused by the stored cement, loads caused by the structures self-weight, wind loads and loads caused by an earthquake. Second step was to clean the given 3D-model with Spaceclaim-program from all unnecessary things that does not affect the strength evaluation. Midsurface model were made from the solid model with Spaceclaim-program to reduce calculation time. Third step was to make structure's strength evaluation with ANSYS-program. ANSYS uses finite element method (FEM) to solve the given problem. Fourth step was to analyze the given results and make for example fatigue calculations.

On the basis of the strength evaluation the silo structure will satisfy the given standards. Biggest challenge in this thesis was to read all the standards very carefully so that the structure would also be approved by the local authority.

---

Key words: silo, fem, ansys, eurocode

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	7
2	LASKENNAN LÄHTÖKOHDAT .....	8
2.1	Standardit.....	8
2.2	Kuorma- ja seuraamusluokat .....	9
2.3	Rajatilat.....	9
2.4	Kuormitukset .....	10
2.4.1	Kuormayhdistelmät.....	10
2.4.2	Kuormitustapaukset .....	12
2.4.3	Analyysityypit.....	12
2.4.4	Varastoidun materiaalin ominaisuudet.....	13
3	FEM-ANALYYSI.....	14
3.1	Malli.....	14
3.1.1	Rakenteen materiaalit.....	16
3.1.2	Tuennat.....	17
3.1.3	Kontaktit.....	17
3.2	Kuormat .....	19
3.2.1	Rakenteen omasta massata aiheutuvat kuormat.....	19
3.2.2	Täyttö- ja tyhjennyskuormat .....	19
3.2.3	Tuulikuormat.....	21
3.2.4	Maanjäristyskuormat.....	23
3.3	Mitoituskriteerit .....	24
3.3.1	Plastinen rajatila .....	24
3.3.2	Kimmainen rajatila.....	24
3.3.3	Vaihtoplastisoitumisrajatila .....	25
3.3.4	Lommahdus.....	25
3.3.5	Väsyminen .....	26
3.3.6	Käyttörajatila.....	26
4	TULOKSET .....	27
4.1	Kuormitustapaus LC 1 .....	27
4.2	Kuormitustapaus LC 1 A .....	30
4.3	Kuormitustapaus LC 2 .....	31
4.4	Kuormitustapaukset LC3 A, LC3 B ja LC3 C.....	31
4.4.1	Kuormitustapaus LC3 A .....	31
4.4.2	Kuormitustapaus LC3 B.....	32
4.4.3	Kuormitustapaus LC3 C.....	33
4.5	Kuormitustapaus LC4.....	34

4.5.1 Väsymistapaus 1 .....	34
4.5.2 Väsymistapaus 2 .....	35
4.5.3 Väsymistapaus 3 .....	36
4.6 Kuormitustapaus LC5 .....	36
4.7 Tulosten yhteenveto .....	38
5 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA .....	40
LÄHTEET .....	41
LIITTEET .....	42
Liite 1. Kuormien laskenta .....	42

**ERITYISSANASTO**

ANSYS	Lujuuslaskentaohjelma
Spaceclaim	Ohjelma jota käytetään 3D-mallien muokkaamiseen lujuuslaskentaa varten
FEM	Finite element method, elementtimenetelmä
MPa	Megapascal (Paineen yksikkö)

## 1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tavoitteena oli sementin säilömiseen tarkoitettun teräksestä valmistetun siilon Eurokoodin mukainen lujuuslaskenta, eli piti todentaa laskennallisesti, että siilorakenne kattaa sille Eurokoodissa asetetut vaatimukset. Laskenta suoritettiin FEM-ohjelmalla.

Opinnäytetyö voitiin jakaa kahteen osaan, jotka kuitenkin liittyivät tiiviisti toisiinsa. Molemmat osat olivat välttämättömiä opinnäytetyön tavoitteen saavuttamisessa. Ensimmäinen osa oli selvittää ja laskea rakenteeseen kohdistuvat kuormat. Kuormat laskettiin käyttäen useiden standardien antamia ohjeita ja määräyksiä. Noin puolet koko opinnäytetyöhön kuluneesta ajasta meni kuormien määrittämiseen. Kuormien määrittämissä täytyi tarkasti seurata standardien antamia ohjeita, jotta rakenne todella täyttäisi Eurokoodissa sille asetetut vaatimukset. Kuormat ja niiden laskenta on esitelty liitteessä 1.

Toinen vaihe oli itse lujuustarkastelu. Rakenteen 3-D-mallista karsittiin kaikki laskennan kannalta turhat rakenteet. Rakenteesta tehtiin keskipintamalli, jotta jo muutenkin ison ja raskaan laskentamallin käsittely saataisiin kevyemmäksi. Laskettuja kuormia käytettiin muodostettaessa erilaisia kuormitustapauksia. Tuloksista tehtiin lujuusselvitys, josta viranomaisten pitäisi saada kaikki tarvittava tieto siitä, että rakenne täyttää sille asetetut vaatimukset.

## 2 LASKENNAN LÄHTÖKOHDAT

### 2.1 Standardit

Siilon lujuuslaskenta tehtiin standardin EN 1993-4-1 (Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 4-1: Silos) ja siihen liittyvien standardien mukaisesti. Koska tukirakennetta eli siilon jalvoja ei lasketa osaksi siiloa, tukirakenteiden lujuustarkastelu tehtiin standardin EN 1993-1-1 (Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 1-1: General rules) ja siihen liittyvien standardien mukaisesti. Seisminen analyysi tehtiin standardien EN 1998-1 (Eurocode 8 – Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings) ja EN 1998-4 (Eurocode 8 - Design of structures for earthquake resistance – Part 4: Silos, tanks and pipelines) mukaisesti.

Standardeihin EN 1993-4-1 ja EN 1993-1-1 liittyvät standardit ovat

- EN 1990 (Eurocode – Basis of structural design)
- EN 1991-1-1 (Eurocode 1 – Actions on structures – Part 1-1: General actions. Densities, self-weight, imposed loads for buildings)
- EN 1991-1-4 (Eurocode 1 – Actions on structures – Part 1-4: General actions. Wind actions)
- EN 1991-4 (Eurocode 1 – Actions on structures – Part 4: Silos and tanks)
- EN 1993-1-1 (Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings)
- EN 1993-1-5 (Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-5: Plated structural elements)
- EN 1993-1-6 (Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 1-6: Strength and stability of shell structures)
- EN 1993-1-8 (Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 1-8: Design of joints)
- EN 1993-1-9 (Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 1-9: Fatigue)



## 2.2 Kuorma- ja seuraamusluokat

Standardissa EN 1991-4 kuormaluokkia on kolme, jotka määräytyvät siilon kapasiteetin mukaan. Kuormaluokkien tarkoituksena on pienentää rakenteiden vaurioitumisriskiä ottaen huomioon kustannukset ja menettelytavat (EN 1991-4, 44). Siilon tilavuuskapasiteetti on  $330 \text{ m}^3$ . Sementin tiheys on  $1630 \text{ kg/m}^3$  (EN 199-4 Liite E, taulukko E.1). Kyseisistä arvoista laskemalla saadaan siilon maksimikapasiteetiksi 537,9 tonnia. Rakenteen kuormaluokaksi saatiin Kuormaluokka 2 (EN 1991-4, Taulukko 2.1).

Standardissa EN 1993-4-1 seuraamusluokkia on kolme, jotka riippuvat siilon koosta ja käyttötarkoituksesta. Myös seuraamusluokkien tarkoituksena on pienentää rakenteiden vaurioitumisriskiä ottaen huomioon kustannukset ja menettelytavat (EN 1993-4-1, 19). Rakenteen seuraamusluokaksi saatiin Seuraamusluokka 3 (EN 1993-4-1, Taulukko 2.1)

## 2.3 Rajatilat

Rajatilat ovat tiloja, joiden ylittyessä rakenne ei enää täytä sille asetettuja kriteerejä. Murtorajatiloilla tarkoitetaan tiloja, joiden ylitys johtaa rakenteen romahtamiseen tai samankaltaisiin rakenteellisiin vaurioihin. Eurokoodeissa murtorajatiloista käytetään nimikettä Ultimate Limit State (ULS). Käyttörajatiloilla tarkoitetaan tiloja, joiden ylittäminen aiheuttaa ongelmia rakenteen käytössä tai tekee rakenteesta väliaikaisesti tai pysyvästi käyttökelvottoman. Eurokoodeissa käyttörajatiloista käytetään nimikettä Serviceability limit state (SLS).

EN 1993-4-1 velvoitti käyttämään kyseisessä laskennassa kuutta erilaista rajatilaa, jotka olivat

- Plastinen rajatila, LS1 (EN 1993-1-6 Luku 6)
- Vaihtoplastisoitumisrajatila, LS2 (EN 1993-1-6 Luku 7)
- Lommahdusrajatila, LS3 (EN 1993-1-6 Luku 8)
- Väsymisrajatila, LS4 (EN 1993-1-6 Luku 9)
- Kimmoinen rajatila, LS5 (EN 1998-1 Luku 2)
- Käyttörajatila, SLS (EN 1993-4-1 Luku 5.6)

## 2.4 Kuormitukset

Rakenteeseen voi kohdistua neljä erityyppistä kuormitusta. Kaikki neljä kuormitustyyppiä tuli ottaa huomioon laskentaa tehdessä. Kuormitustyypit olivat

- Rakenteen omasta massasta johtuvat kuormat (EN 1991-1-1, Liite A)
- Sisäiset painekuormat (EN 1991-4)
- Tuulikuormat (EN 1991-1-4)
- Maanjäristyskuormat (EN 1998-1 ja EN 1998-4)

### 2.4.1 Kuormayhdistelmät

Edellä mainitut kuormat yhdistettiin kuormayhdistelmiksi (EN 1991-4, Liite A) käyttäen osavarmuuskertoimia (EN 1990 Liite A1) ja yhdistelmäkerroimia (EN 1991-4, Liite A). Laskenta suoritettiin eri kuormayhdistelmillä ja saatuja tuloksia verrattiin määrättyihin rajatiloihin. Osavarmuuskerroin omamassakuormille oli 1,35 ja kaikille muille kuormille 1,5, paitsi maanjäristyskuormille ja käyttörajatiloja tutkittaessa käytettäville kuormille, joiden osavarmuuskerroin oli 1. Seuraavista kuormayhdistelmätaulukkoista selviää tarkemmin analyyseissa käytetyt kuormitukset ja niiden kertoimet. Taulukossa ensimmäinen kerroin on kuorman osavarmuuskerroin ja toinen on yhdistelmäkerroin. Kertomalla nämä luvut keskenään saadaan analyyseissä käytettävä kuormakerroin.

TAULUKKO 1. Kuormayhdistelmät murtorajatiloina (ULS) tutkittaessa

Lyhenne	Mitoitus-tilanne	Pysyvät kuormat		Samanaikainen muuttuva kuorma 1.		Samanaikainen muuttuva kuorma 2.	
			Kertoimet		Kertoimet		Kertoimet
D (ULS)	Aineen tyhjennys	Oma paino	1,35 * 0,9	Aineen tyhjennys	1,5 * 1,0	Tuuli	1,5 * 0,6
WF (ULS)	Tuuli ja täysi siilo	Oma paino	1,35 * 0,9	Aineen täyttö	1,5 * 1,0	Tuuli	1,5 * 0,6
WE (ULS)	Tuuli ja tyhjä siilo	Oma paino	1,35 * 0,9	Tyhjä siilo	0,0	Tuuli	1,5 * 0,6
SF (ULS)	Maanjäristys ja täysi siilo	Oma paino	1*1	Varastoidun sementin massa	1*1		
SE (ULS)	Maanjäristys ja tyhjä siilo	Oma paino	1*1	Varastoidun sementin massa	1*0		

TAULUKKO 2. Kuormayhdistelmät käyttörajatiloina (SLS) tutkittaessa

Lyhenne	Mitoitus-tilanne	Pysyvät kuormat		Samanaikainen muuttuva kuorma 1.		Samanaikainen muuttuva kuorma 2.	
			Kertoimet		Kertoimet		Kertoimet
D (SLS)	Aineen tyhjennys	Oma paino	1	Aineen tyhjennys	1 * 0,9	Tuuli	1 * 0
WF (SLS)	Tuuli ja täysi siilo	Oma paino	1	Aineen täyttö	1 * 0,9	Tuuli	1*0
WE (SLS)	Tuuli ja tyhjä siilo	Oma paino	1	Tyhjä siilo	0,0	Tuuli	1 * 0,6

## 2.4.2 Kuormitustapaukset

Kuormitustapaukset, jotka analysoitiin FEM-ohjelmalla, selviävät taulukosta 3.

TAULUKKO 3. Kuormitustapaukset

Kuormitustapaus	Mitoitustilanne	Tutkittu rajatila
LC1	pahin (D, WF, WE) (ULS)	LS1 (plastinen rajatila)
LC1 a	SF (ULS)	LS5 (kimmoinen rajatila)
LC2	pahin (D, WF, WE) (ULS)	LS2 (vaihtoplastisoitumisra- jatila)
LC3 a	WE (ULS)	LS3 (lommahdusrajatila)
LC3 b	D (ULS)	LS3 (lommahdusrajatila)
LC3 c	SF (ULS)	LS3 (lommahdurajatila)
LC4	pahin (D, WF, WE) (SLS)	LS4 (väsymisrajatila)
LC5	(D, WF, WE) (ULS)	SLS (käyttörajatila)

## 2.4.3 Analyysityypit

Seuraamusluokka 3 velvoittaa käyttämään (EN 1993-4-1, luku 4.2.2.2 lauseke 1) globaalia numeerista FE-analyysia (EN 1993-1-6). Kyseinen analyysi suoritettiin koko rakenteelle. Materiaalisesti epälineaarista analyysia (MNA) (EN 1993-1-6) käytettiin rajatilojen LS1, LS2, LS4 ja käyttörajatilan (SLS) tutkimiseen. Lineaarisen kimmoteorian mukaista haarautumisanalyysia (LBA) (EN 1993-1-6) käytettiin rajatilan LS4 tutkimiseen. Lineaarisen kimmoteorian mukaista kuoren analyysia (LA) (EN 1993-1-6) käytettiin rajatilan LS5 tutkimiseen.

#### **2.4.4 Varastoidun materiaalin ominaisuudet**

Varastoidun materiaalin ominaisuudet ovat EN 1991-4 liite A:n taulukosta E.1 kohdasta sementti.

### 3 FEM-ANALYYSI

#### 3.1 Malli

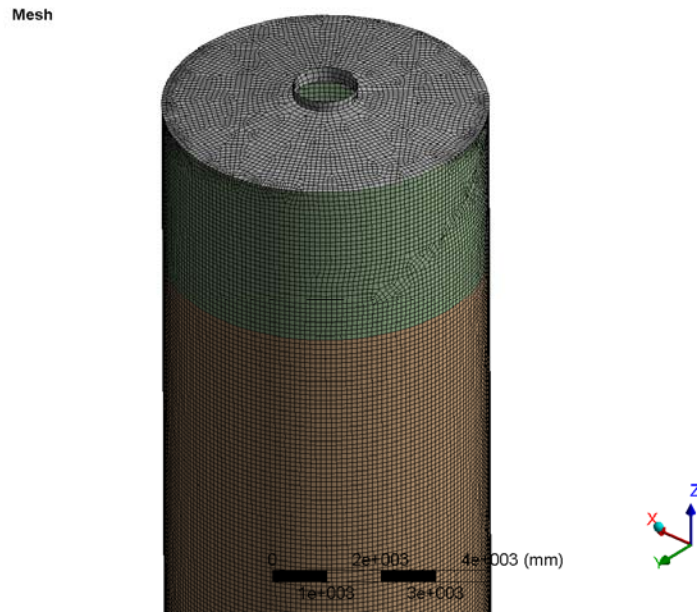
Laskennassa käytettiin ANSYS FEM-ohjelmaa. Laskettuja kuormia ja niiden yhdistelmiä sovellettiin FEM-mallissa. Mallin geometria selviää kuvasta 1. Solidimallista tehtiin keskipintamalli Spaceclaim-ohjelmalla. Malli jaettiin osiin vaakatason suuntaisilla leikkauksilla, koska täyttö-, tyhjennys- ja tuulikuormat ovat korkeuden funktioita. Malli on jaettu osiin myös säteittäissuuntaisilla leikkauksilla, koska tuulikuormat ovat myös pyörähdyskulman funktioita.

Levyn paksuuksia pienennettiin mallissa 2 mm siilon kartiossa ja seinissä. Standardissa EN 1993-4-1 luvussa 4.1.4 suositellaan 2 mm korroosio ja kulumisvaraa. Näin laskennassa otetaan huomioon levyjen mahdollinen kulumisen rakenteen eliniän aikana.

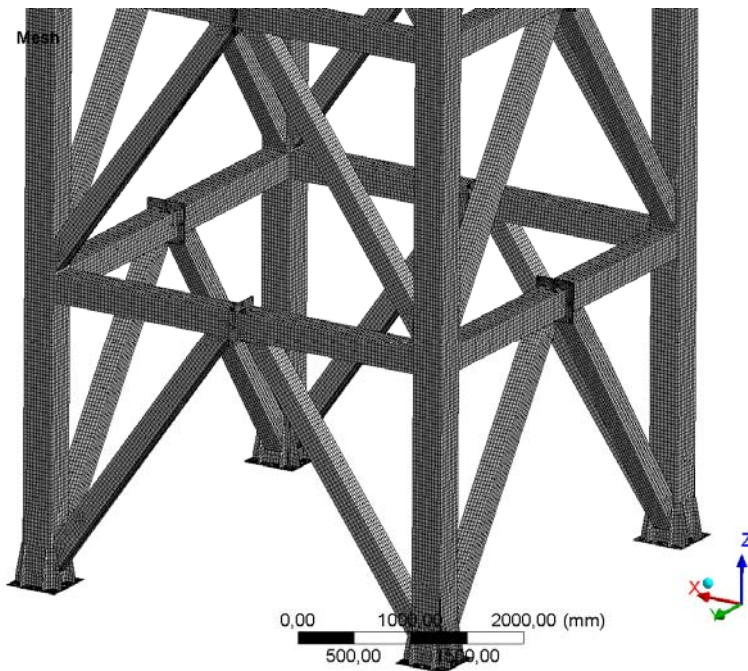
Koko rakenne on mallinnettu kuorielementeillä. Elementtiverkossa oli 772 245 solmua ja 262 065 elementtiä. Elementtiverkko on esitelty kuvissa 2 ja 4.



KUVA 1. Laskennassa käytetty geometria



KUVA 2. Elementtiverkko siilon yläosassa



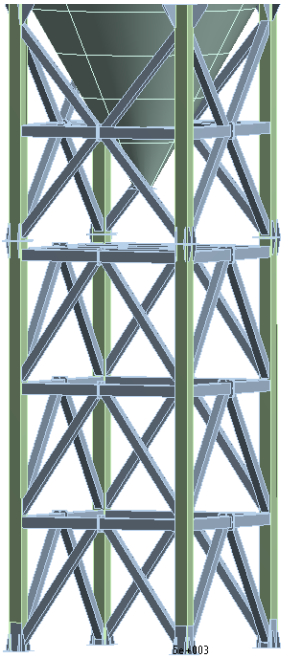
KUVA 3. Elementtiverkko siilon alaosassa

### 3.1.1 Rakenteen materiaalit

Rakenteessa käytetyt materiaalit olivat rakenneteräs S355 ja rakenneteräs S420. Niiden ominaisuudet ovat taulukossa 4. Materiaalia S420 käytettiin neljässä pystytukijalassa (kuva 4.). Rakenteen muissa osissa käytettiin materiaalia S355. Tangenttimoduulia 20 MPa (EN 1993-1-5, Liite C, Kuva C.2) käytettiin rajatilojen LS1, LS2, LS4 ja käyttörajatilojen tutkimisessa. Tangenttimoduulilla tarkoitetaan materiaalin ”kimmokerrointa” myötörajan jälkeen. Arvo on hyvin pieni verrattuna oikeaan kimmokertoimeen. Laskennan helpomman konvergoinnin takia käytettiin nollasta poikkeavaa lukua. Lineaarista materiaalmallia käytettiin rajatilojen LS3 ja LS5 tutkimiseen.

TAULUKKO 4. Materiaaliominaisuudet (EN 1993-1-1)

Materiaali	Kimmokerroin E [GPa]	Poissonin vakio $\nu$	Myötölujuus $f_y$ [MPa]	Murtolujuus $f_u$ [MPa]	Tiheys $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
S355	210	0,3	355	510	7850
S420	210	0,3	420	500	7850

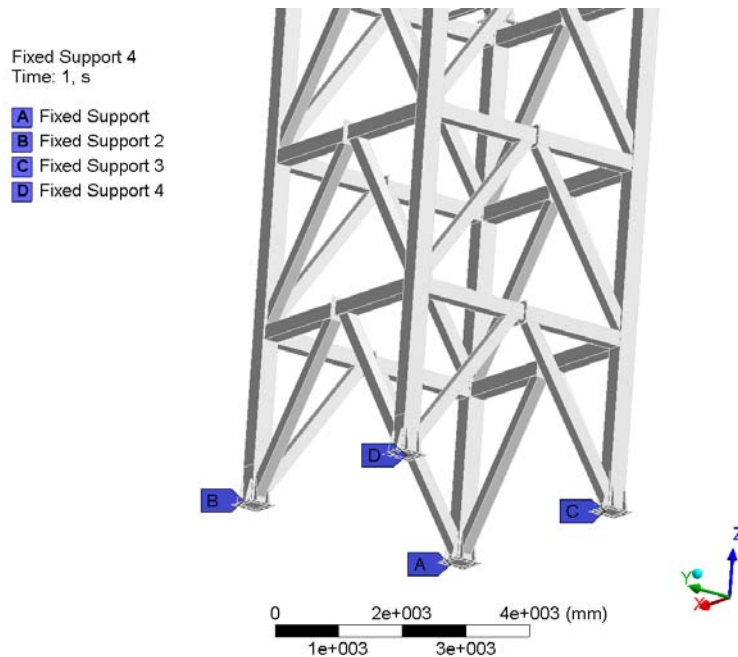


KUVA 4. Materiaalia S420 on käytetty vihreällä merkityissä osissa



### 3.1.2 Tuennat

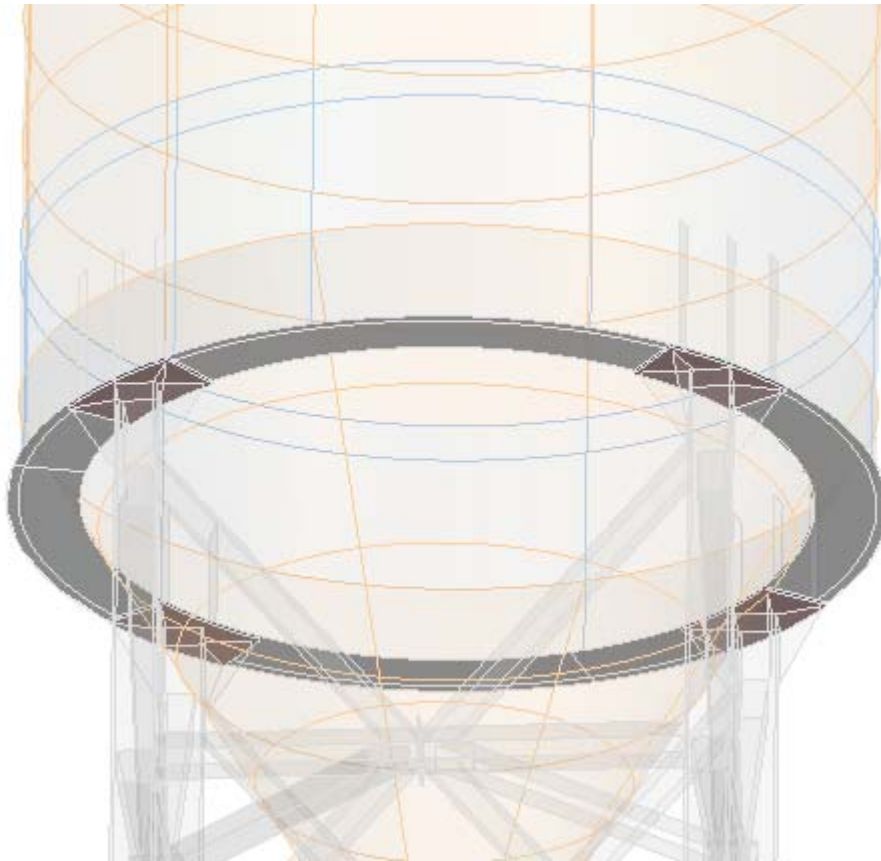
Siilo on tuettu jäykästi (fixed support) jalkojen alaosasta (kuva 5.)



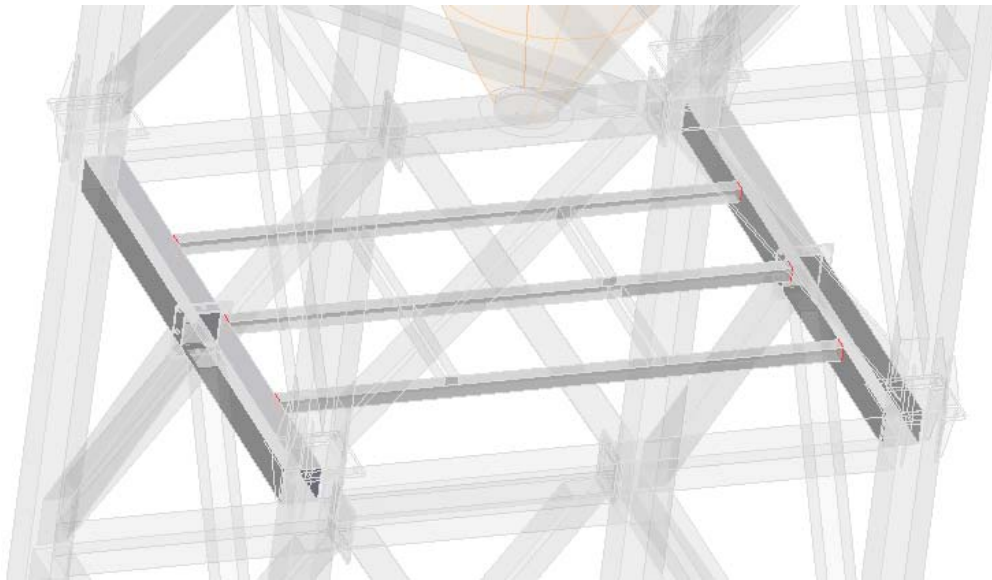
KUVA 5. Tuennat

### 3.1.3 Kontaktit

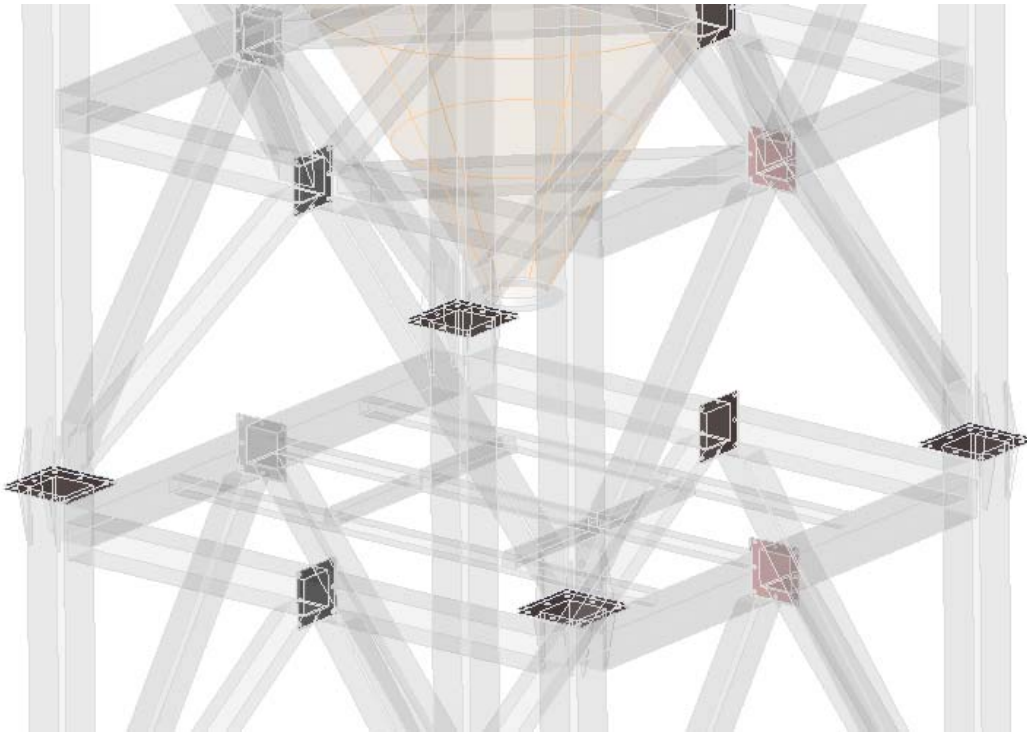
Siilo mallinnettiin kymmeneksi itsenäiseksi osaksi. Osat olivat, siilo-osa, työtaso ja kahdeksan erillistä tukijalka osaa. Jokaisella itsenäisellä osalla oli yhteinen topologia, joka mahdollisti yhtenäisen elementtiverkon koko osalle. Kontaktit olivat näin ollen ainoastaan tarpeellisia kohdissa, joissa eri osat liittyivät toisiinsa. Kaikki käytetyt kontaktit olivat bonded-kontakteja, eli osat ovat ikään kuin liimatut toisiinsa äärettömän jäykällä liimalla.



KUVA 6. Kontaktit siilon ja tukijalkojen välillä



KUVA 7. Kontaktit työtason ja tukijalkojen välillä



KUVA 8. Kontaktit tukijalkaosien välillä

## 3.2 Kuormat

Kaikki kuormat on laskettu ja esitelty liitteessä 1.

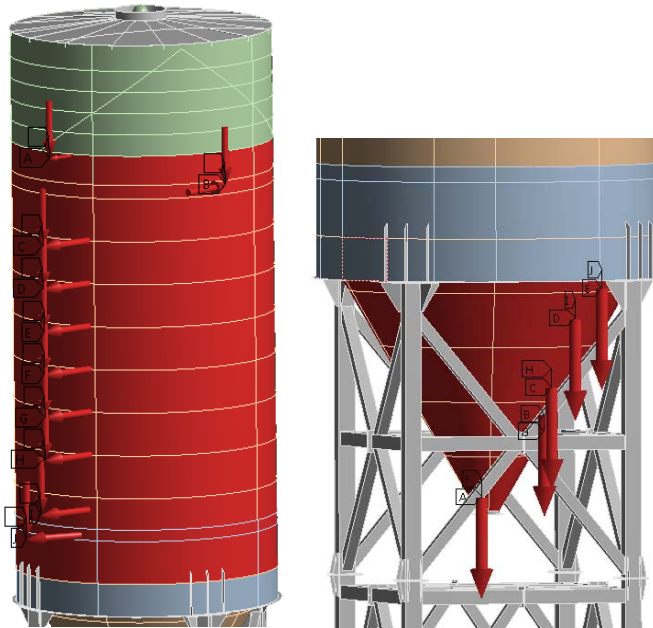
### 3.2.1 Rakenteen omasta massata aiheutuvat kuormat

Omamassakuormia aiheuttivat siilon rakennemateriaalit ja asennetut komponentit, kuten suodatin yksikkö (100 kg), joka oli asennettu siilon katolle. Maanvetovoimakiikhtyvyys  $9,81 \text{ m/s}^2$  kerrottiin varmuuskertoimella 1,35. Painohäviö, joka syntyi levypaksuuksien vähentämisestä (kuluminen ja korroosio), otettiin huomioon laskemalla kyseisille levyille uudet tiheydet. Tiheydet on laskettu liitteessä 1.

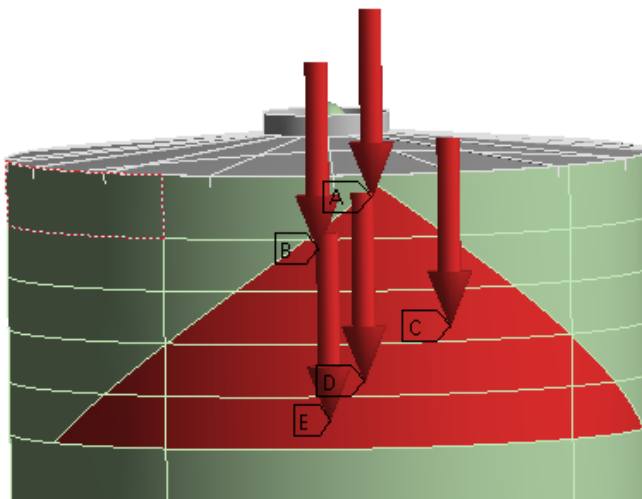
### 3.2.2 Täyttö- ja tyhjennyskuormat

Täytöstä johtuvat kuormat koostuivat kahdesta paineesta, eli kohtisuoraan siilon seiniin kohdistuvasta paineesta ja siilon seinissä alaspäin vaikuttavasta paineesta, joka kuvastaa sisällön eli sementin ja siilon seinän välistä kitkavoimaa. Alaspäin vaikuttavat paineet

tuottivat kuormituksen siilon jaloille, jolloin ne kuvastivat myös sisällön massan painovoima kuormitusta. Täytössä muodostuvan sementtikasan aiheuttama epätasainen kuormitus siilon jaloille otettiin huomioon laskennassa asettamalla alueelle, jossa kasa kosketti siilon seinää, alaspäin vaikuttava paine. Paineet asetettiin alla olevien kuvien mukaisesti siilon seinien ja kartion sisäpinnoille. Paineet olivat korkeuden funktioita ja niiden laskenta esitetään liitteessä 1.



KUVA 9. Täytön aiheuttamat paineet siilon seinissä ja kartiossa

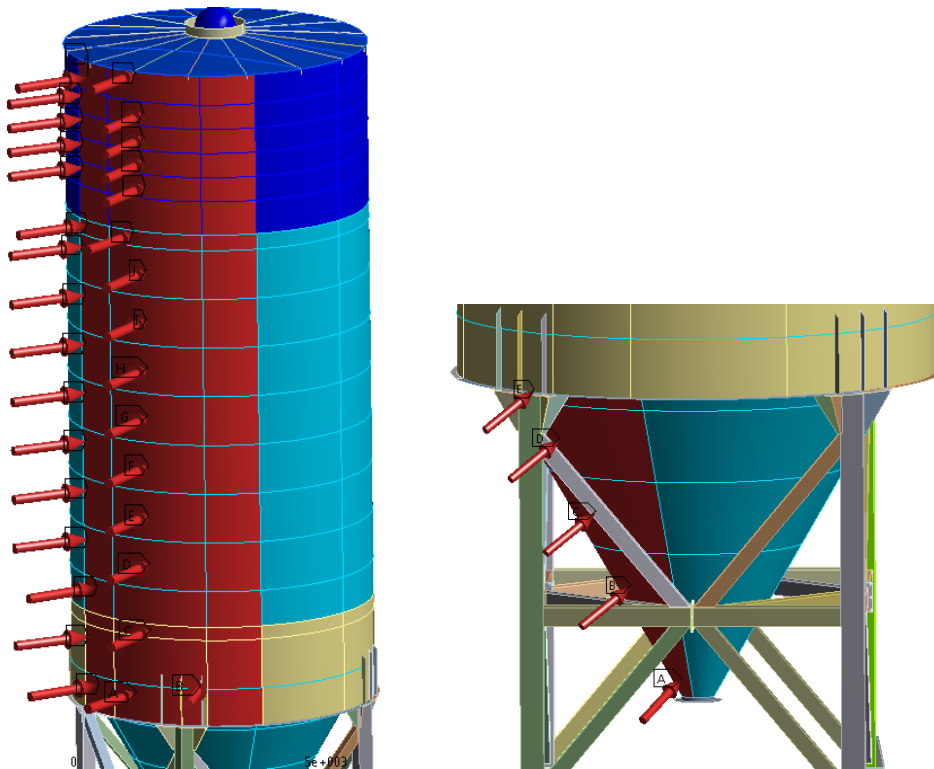


KUVA 10. Kasaa kuvastava alaspäin vaikuttava paine

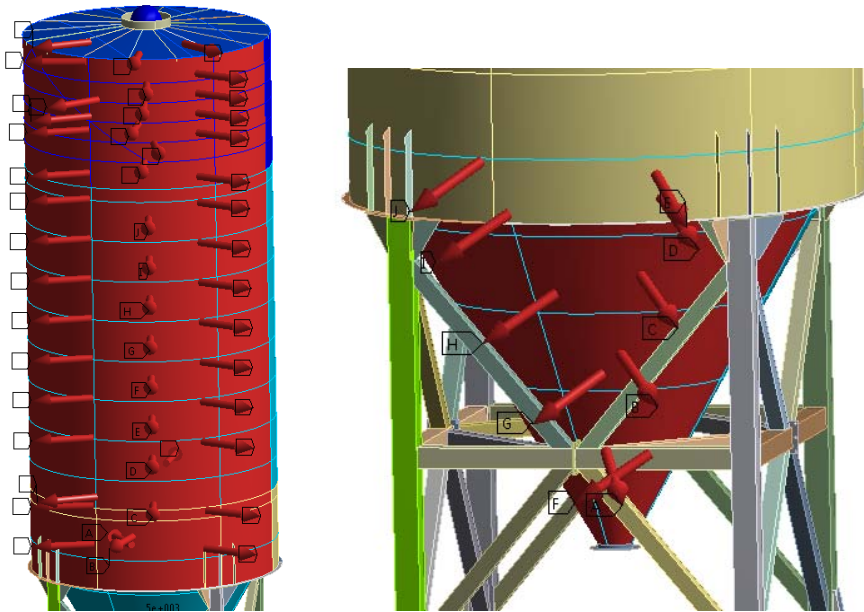
Tyhjennyskuormat olivat samankaltaisia kuin täyttökuormat. Tyhjennyskuormien paineet olivat vain isommat kuin täyttökuormien paineet. Paineiden laskenta esitetään liitteessä 1.

### 3.2.3 Tuulikuormat

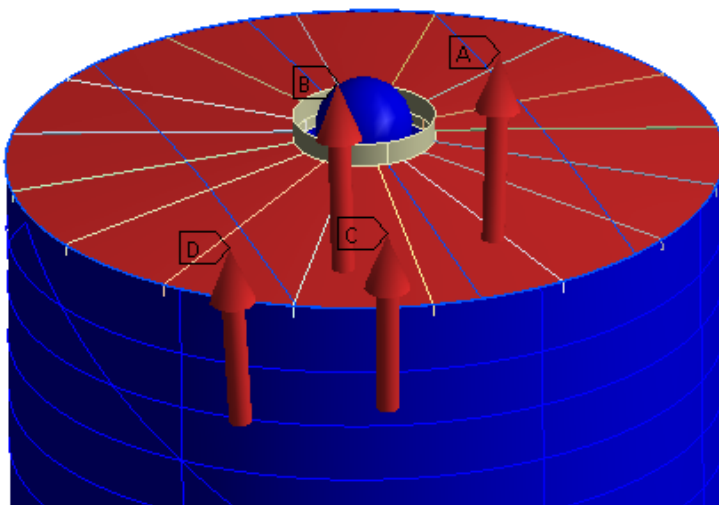
Tuulikuormat vaikuttivat siilon kartioon, siilon seiniin ja sen kattoon. Jalkoihin vaikuttava tuulikuorma voitiin sivuuttaa sen hyvin pienen vaikutuksen vuoksi. Tuuli aiheutti ylipainetta siilon etuosaan, joka oli tuulen suuntaa vastaan. Muille pinnoille tuuli aiheutti alipainetta. Siilon sisällä vaikutti tuulen aiheuttama osittainen alipaine. Koska tuulta kuvaava painekuorma oli korkeuden ja pyörähdyskulman funktio, oli siilon pinta jaettava osiin pysty- ja pyörähdys suunnassa. Paineet asetettiin alla olevien kuvien mukaisesti siilon seinien ja kartion sisäpinnoille. Paineiden laskenta esitetään liitteessä 1.



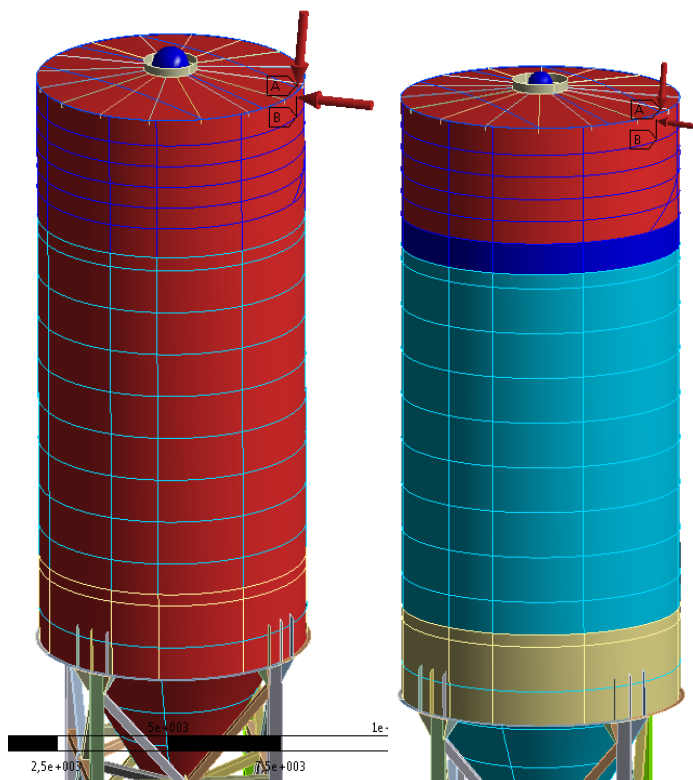
KUVA 11. Siiloon kohdistuva tuulen aiheuttama ylipaine, tuulen suunta on vasemmalta



KUVA 12. Siilon kohdistuva tuulen aiheuttama alipaine, tuulen suunta on oikealta



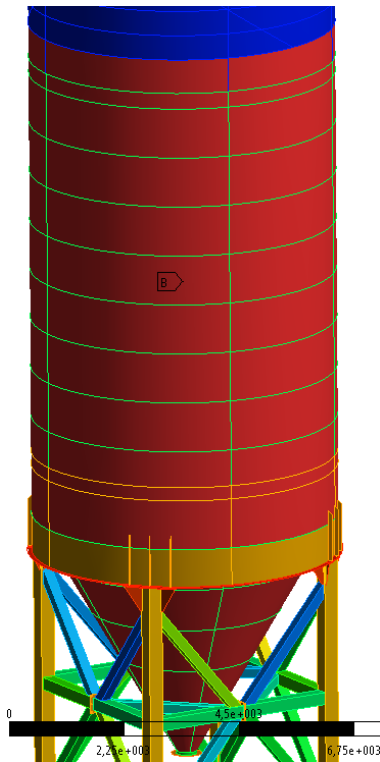
KUVA 13. Siilon kattoon kohdistuva tuulen aiheuttama alipaine



KUVA 14. Tuulen aiheuttama alipaine siilon sisällä. Vasen on tyhjä siilo ja oikea on täysi siilo.

### 3.2.4 Maanjäristyskuormat

Analyysimenetelmänä käytettiin vaakasuuntaista voimamenetelmää (EN 1998-4 2.3.1(7)). Kyseistä menetelmää voidaan käyttää rakenteille, jotka käyttäytyvät seismisessä tilanteessa lähes kuin yksivapausasteinen systeemi. Tällaisiksi rakenteiksi voidaan laskea siilot, joiden tukijalat ovat suhteellisen joustavat ja tukijalkojen massa on pieni verrattuna rakenteen kokonaismassaan (EN 1998-4 2.3.1(7)). Rakenteeseen kohdistuvat kuormat mallinnettiin pistemassan ja sivuttaiskiihtyvyyden avulla. Pistemassa (537,9 tonnia) oli sisällön massa. Vaakasuuntainen kiihtyvyys  $0,18 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2$  on laskettu liitteessä 1. Kiihtyvyys oli suurin mahdollinen suunnitteluspektrikiihtyvyys kyseisellä alueella, johon siilo aiotaan rakentaa. Kiihtyvyyden suunta oli pahin mahdollinen.



KUVA 15. Sisältöä kuvastava pistemassa on asetettu punaisella merkityille pinnoille.

### 3.3 Mitoituskriteerit

#### 3.3.1 Plastinen rajatila

Materiaalisesti epälineaarista analyysia (MNA) (EN 1993-1-6) käytettiin rajatilojen LS1, LS2, LS4 ja käyttörajatilan SLS tutkimiseen. Mitoituskriteerinä käytettiin standardin EN 1993-1-5 liitteen C.8 suosittelemaa 5 % kokonaisvenymää. Rakenteen voidaan todeta kestävän mitoitustilanne, mikäli siihen ei synny yli 5 % kokonaisvenymää.

#### 3.3.2 Kimmoinen rajatila

Lineaarisen kimmoteorian mukaista kuoren analyysia (LA) (EN 1993-1-6) käytettiin rajatilan LS5 tutkimiseen. Mitoituskriteerinä käytettiin materiaalin myötölujuutta. Sallittu maksimi von Mises-jännitys saatiin kaavoista EN 1993-1-6 kaava 6,5 ja EN 1993-1-7 kaava 6,2.



Materiaali S355

$$f_{eq,Rd} = f_{yd} = f_{yk}/\gamma_{MO} = 355 \text{ MPa}/1.0 = 355 \text{ MPa}$$

Materiaali S420

$$f_{eq,Rd} = f_{yd} = f_{yk}/\gamma_{MO} = 420 \text{ MPa}/1.0 = 420 \text{ MPa}$$

### 3.3.3 Vaihtoplastisoitumisrajatila

Vaihtoplastisoitumisella tarkoitetaan tilannetta, jossa vaihtelevat erisuuntaiset kuormitukset aiheuttava rakenteen samaan pisteeseen myötörajan ylittäviä veto- ja puristusjännityksiä. Tämä voi lopulta johtaa rakenteen repeämiseen.

Sallittu von Mises-jännitysvaihteluväli saatiin kaavoista EN 1993-1-6 kaava 7.2 ja EN 1993-1-7 kaava 6.5.

Materiaali S355

$$\Delta f_{eq,Rd} = 2 f_{yd} = 2 f_{yk}/\gamma_{M4} = 2 * 355 \text{ MPa}/1.0 = 710 \text{ MPa}$$

Materiaali S420

$$\Delta f_{eq,Rd} = 2 f_{yd} = 2 f_{yk}/\gamma_{M4} = 2 * 420 \text{ MPa}/1.0 = 840 \text{ MPa}$$

Kyseisessä laskenta tapauksessa määrävän kuorman (tyhjennyskuorma) suunta oli aina sama (alaspäin). Tämä ei aiheuta vaihtoplastisoitumista. Vaihtoplastisoitumisrajatilan mitoituskriteeriä ei voitu ylittää.

### 3.3.4 Lommahdus

Lommahduksella tarkoitetaan tilannetta, jossa puristusjännitys aiheuttaa rakenteen äkillisen stabiiliteetin menettämisen. Stabiiliteetin menettäminen aiheuttaa äkillisiä suuria siirtymiä, jotka voivat aiheuttaa rakenteen sortumisen. Lommahdus voi olla paikallinen eli lokaalilommahdus tai laaja eli globaalilommahdus. Useissa tilanteissa globaalilommahdusta voidaan pitää vaarallisempana tilanteena, sillä siirtymät syntyvät laajoille alueille. Tässä tapauksessa myös siilon lieriön alaosaan syntyvä lokaalilommahdus voi

aiheuttaa ketjureaktion, mikä johtaa koko rakenteen sortumiseen. Siilon lieriöosan lommahdustarkastelu tehtiin EN 1993-1-6 mukaan. Laskennat ovat liitteessä 1. Siilon tukijalkojen lommahdustarkastelu tehtiin EN 1993-1-1 ja EN 1993-1-5 mukaan. Laskennat ovat myös liitteestä 1.

### 3.3.5 Väsyminen

Väsymisellä tarkoitetaan tilannetta, jossa toistuva jännityksen vaihtelu aiheuttaa rakenteeseen murtuman. Kyseistä murtumaa kutsutaan usein väsymismurtumaksi. EN 199-1-6 kohdassa 4.1.4 sanotaan, että kaikki yli 10 000:n menevät vaihtelusyklit, jotka kohdistuvat siilon lieriöosaan, tulee ottaa huomioon väsymislaskennassa. Siilon suunniteltu kesto oli 10 000 sykliä siilon suunnitellun eliniän aikana, joten siilon yläosan väsymistä ei tarvinnut tutkia. Siilon alaosan eli tukijalkojen väsymiskestävyys täytyi kuitenkin todentaa. Todentaminen tehtiin standardin EN 1993-1-9 mukaan.

### 3.3.6 Käyttörajatila

Käyttörajatila määritellään pyöreille teräsiiloille standardin EN 1993-4-1 kohdassa 5.6.1 seuraavasti. ”Terässiilojen lieriömuotoisten levyseinien käyttörajatiloina käytetään”:

- ”muodon vääristymiä tai taipumia, jotka haittaavat rakenteen tehokasta käyttöä”
- ”muodon vääristymiä, taipumia ja värähtelyjä, jotka vahingoittavat sekä rakenteen kantavia että ei-kantavia osia.”

Vaakasuuntaisen kokonaistaipuman raja-arvo saadaan EN 1993-4-1 kaavasta 5.90.

$$w_{max} = k_{d2} H = 0,02 * 27,4 \text{ m} = 548 \text{ mm}$$

jossa  $k_{d2} = 0,02$  saadaan EN 1993-4-1 kohdasta 5.6.2 ja  $H$  on rakenteen kokonaiskorkeus.

Säteen suuntaisen paikallisen taipuman raja-arvo saadaan EN 1993-4-1 kaavasta 5.91.

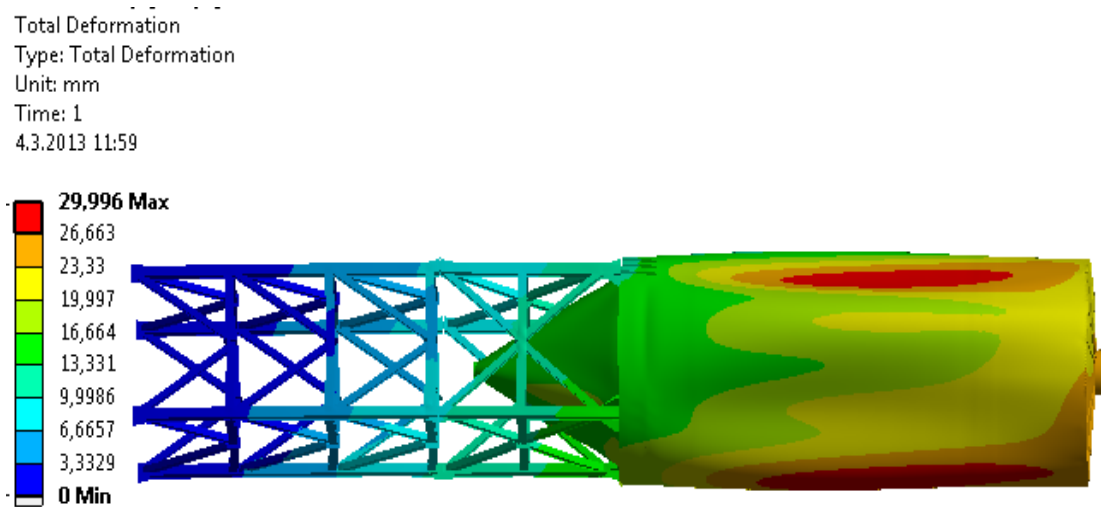
$$w_{r,max} = k_{d3} r = 0,05 * 3 \text{ m} = 150 \text{ mm}$$

jossa  $k_{d3} = 0,05$  saadaan EN 1993-4-1 kohdasta 5.6.2 ja  $r$  siilo-osan säde.

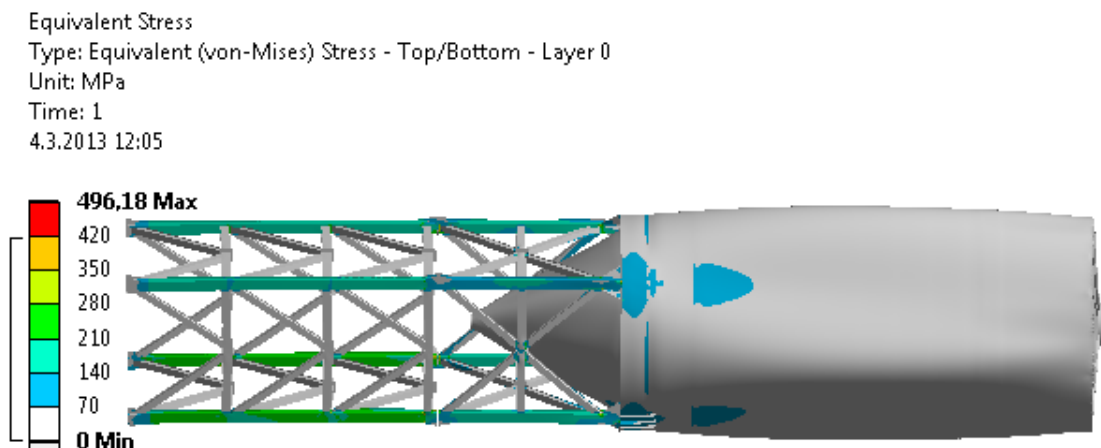
## 4 TULOKSET

### 4.1 Kuormitustapaus LC 1

Pahin mitoitustilanne oli aineen tyhjennys D (ULS). Koska tyhjennyskuormat olivat isompia kuin täyttökuormat, ei mitoitustilannetta tuuli ja täysisiilo WF (ULS) tarvinnut tutkia.



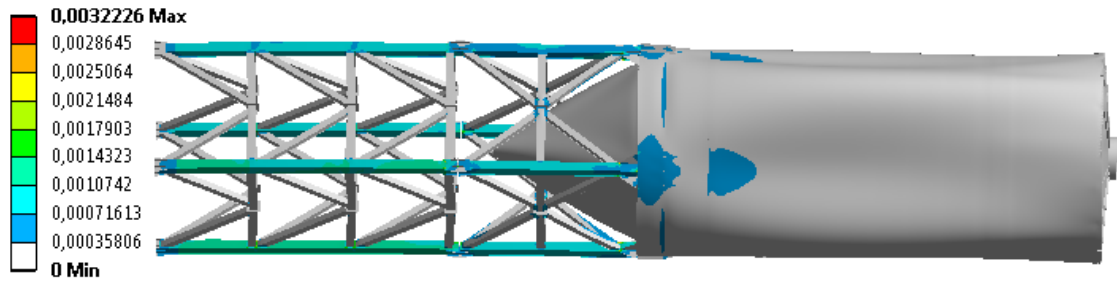
KUVA 16. Yleiskuva rakenteen siirtymistä



KUVA 17. Yleiskuva rakenteen jännityksistä

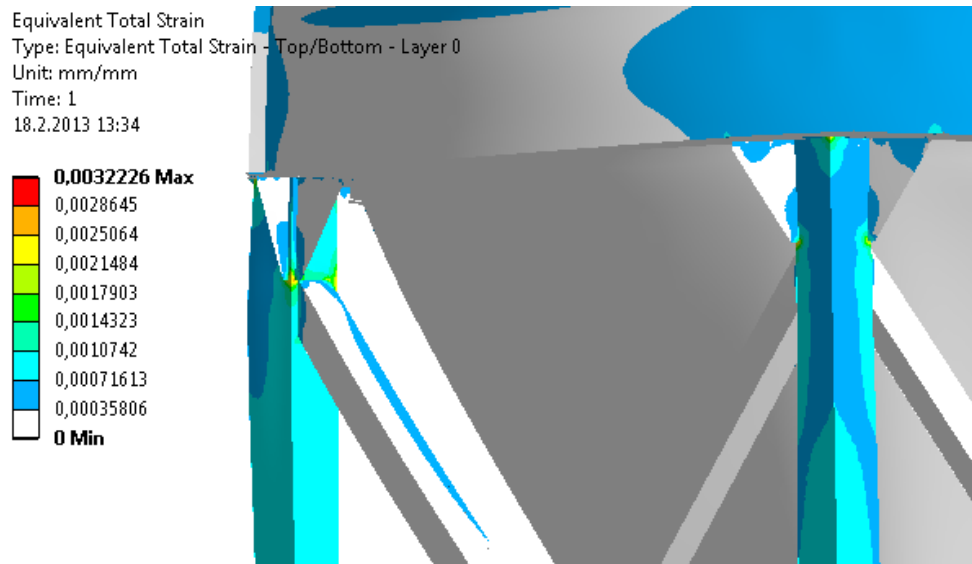
Koska von-Mises jännityksen huippuarvo 496 MPa oli erittäin pienellä alueella (yksi solmu), huippuarvoa ei tarvinnut huomioida.

Equivalent Total Strain  
 Type: Equivalent Total Strain - Top/Bottom - Layer 0  
 Unit: mm/mm  
 Time: 1  
 18.2.2013 13:18

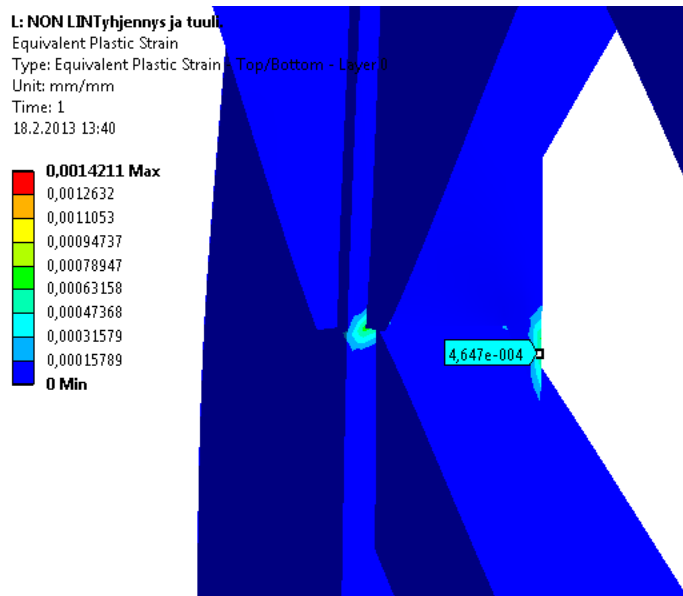


KUVA 18. Yleiskuva rakenteen kokonaisvenymistä

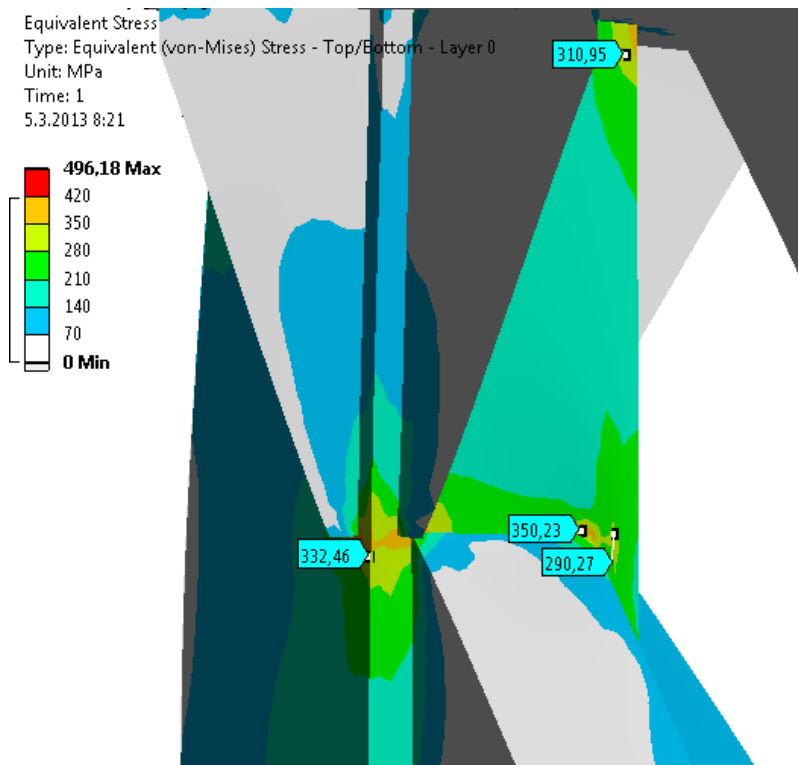
Myötöraja ylitettiin lokaalisti pienillä alueilla siilon tukijaloissa, mutta kuten kuvasta 18 voi huomata, oli kokonaisvenymän suurin arvo 0,32 %, joka on alle suositellun 5 % ( EN 1993-1-5; Liite C.8).



KUVA 19. Suurin venymä oli tukijalkojen yläosassa



KUVA 20. Plastinen venymä tukijalkojen yläosassa

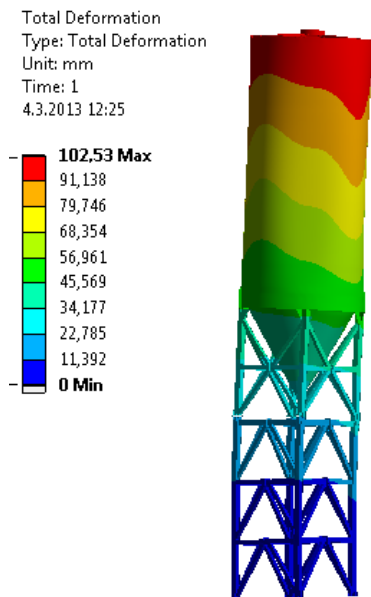


KUVA 21. Jännitykset jalkojen yläosassa

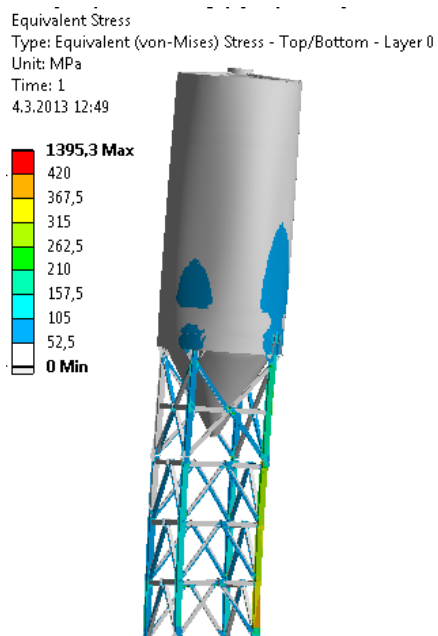
Yksikään mitoitustilanne, joita käytettiin kuormitustapauksessa 1 (LC 1), ei ylittänyt suositeltua 5 % kokonaisvenymää, mikä oli mitoituskriteeri, joten rajatila LS 1 oli varmistettu.

## 4.2 Kuormitustapaus LC 1 A

Tässä kuormitustapauksessa käytettiin mitoitustilannetta maanjäristys ja täysi siilo SF (ULS).

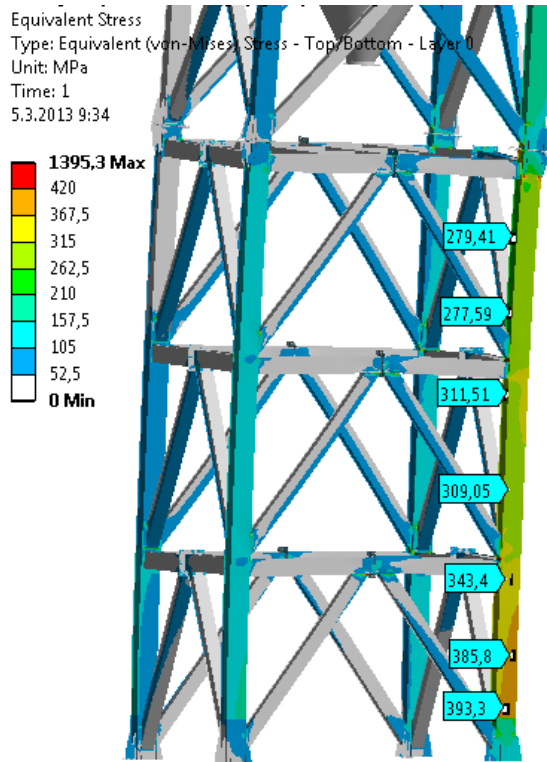


KUVA 22. Yleiskuva rakenteen siirtymistä



KUVA 23. Yleiskuva rakenteen jännityksistä

Koska von-Mises jännityksen huippuarvo 1395 MPa oli erittäin pienellä alueella (yksi solmu), huippuarvoa ei tarvinnut huomioida.



KUVA 24. Jännitykset tukijaloissa

Määnjäristyskuorman aiheuttamat jännitykset olivat alle materiaalien myötörajojen (355 MPa ja 420 MPa). Suurin jännitys oli tukijalan alaosassa (kuva 24), joten rajatila LS 5 oli varmistettu.

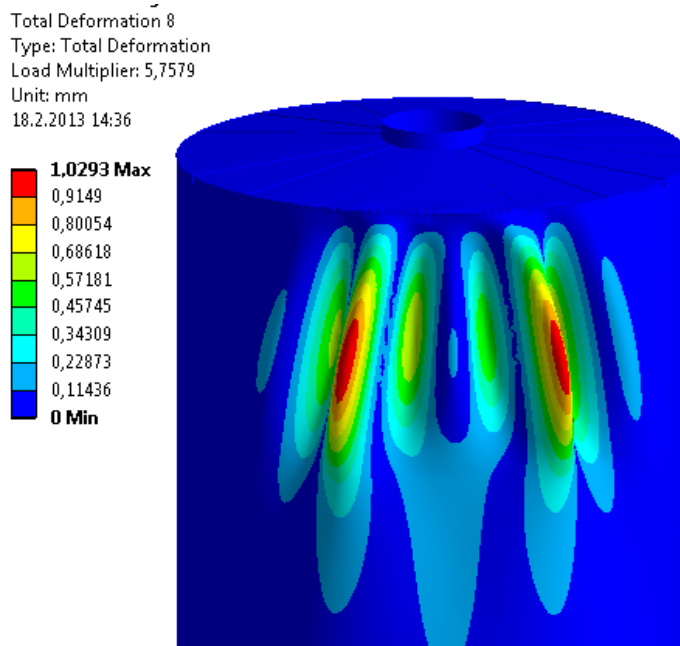
#### 4.3 Kuormitustapaus LC 2

Vaihtoplastisoitumisrajatilaa ei tarvinnut tutkia. Katso kappale 3.3.3.

#### 4.4 Kuormitustapaukset LC3 A, LC3 B ja LC3 C

##### 4.4.1 Kuormitustapaus LC3 A

Tuulen vaikutuksen alaisena olevan tyhjän siilon elastinen stabiilitetti eli lommahduslujuus tutkittiin tässä kuormitustapauksessa.

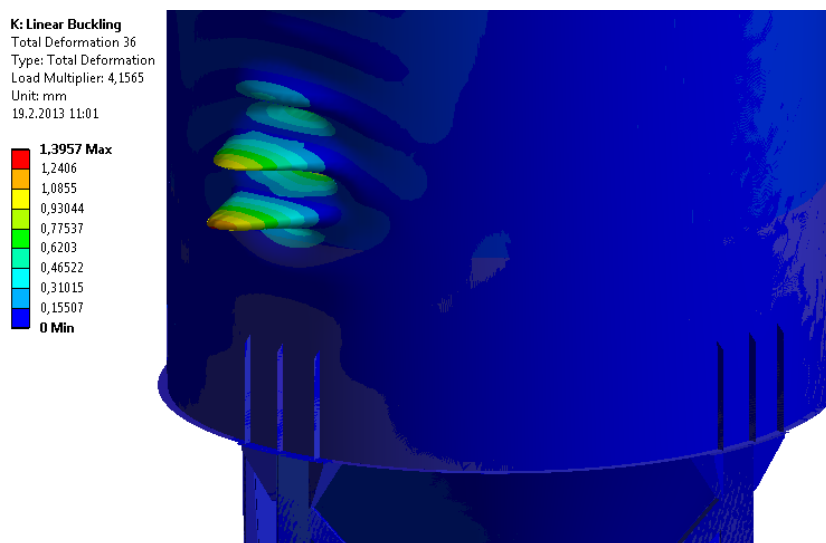


KUVA 25. Lommahdus siilon seinässä (tuulikuorma)

Kyseisen lommahduksen lommahdulajuudeksi (liite 1) saatiin 2,6. Kaikki ykkösen ylittävät lommahdulajuuden arvot olivat sallittuja, joten kyseinen tilanne oli varmistettu.

#### 4.4.2 Kuormitustapaus LC3 B

Mitoitustilanne D:n alaisena olevan siilon elastinen stabiilitetti tutkittiin tässä kuormitustapauksessa. Mitoitustilanne D sisältää tyhjennys- ja tuulikuormia.



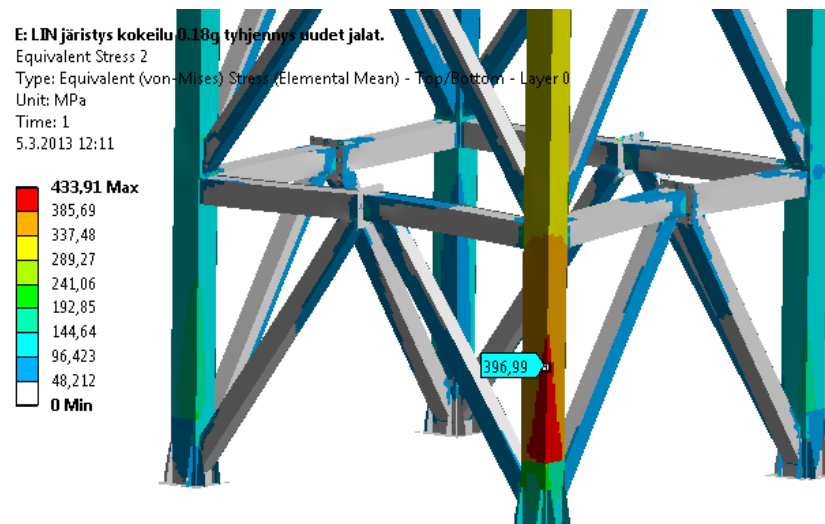
KUVA 26. Lommahdus siilon seinän alaosassa



Kyseisen lommahduksen lommahduljuudeksi (liite 1) saatiin 1,66. Kaikki ykkösen ylittävät lommahduslujuuden arvot olivat sallittuja, joten kyseinen tilanne oli varmistettu.

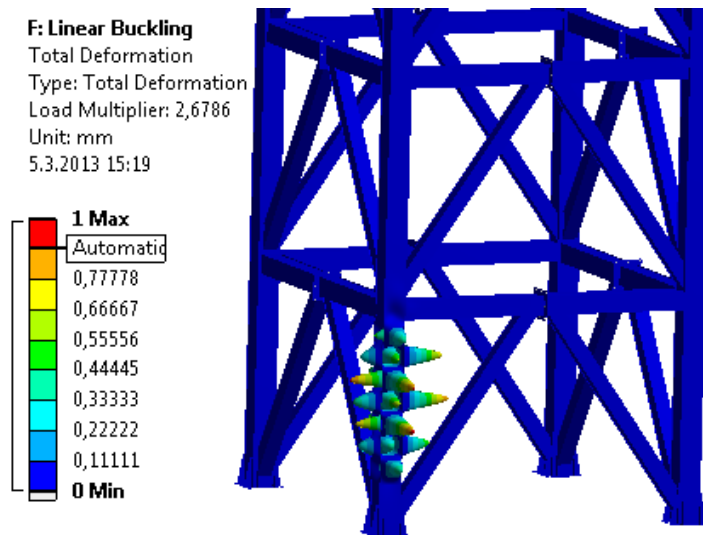
#### 4.4.3 Kuormitustapaus LC3 C

Mitoitustilanne SF:n alaisena olevan siilon elastinen stabiliteetti tutkittiin tässä kuormitustapauksessa. Mitoitustilanne SF sisälsi maanjäristyksestä aiheutuvat kuormat täydelle siilolle. Myös rakenteen globaalistabiliteetti tutkittiin tässä kuormitustapauksessa. Järistyskuorma aiheutti suurimmat kuormat juuri rakenteen tukijalkoihin, mitkä voivat menettää globaalin stabiliteetin.



KUVA 27. Laskennassa käytetty kalvojäännitys

Rakenteen globaalistabiliteetti oli varmistettu, mikäli rakenteeseen ei synny globaaleja lommahdusmuotoja, joiden kuormakerroin oli alle 10,9. Vertailukuormakerroin on laskettu liitteessä 1. Rakenteeseen syntyi 600 lommahdusmuotoa, joiden kuormakerroin oli alle 10,9. Tutkin jokaisen muodon, eikä yksikään muoto ollut globaalilommahdusmuoto. Näin rakenteen globaalistabiliteetti oli varmistettu.



KUVA 28. Lokaalilomahdusmuoto tukijaloissa

Rakenteen lokaalistasiteetti oli varmistettu, mikäli rakenteeseen ei synny lokaaleja lommahdusmuotoja, joiden kuormakerroin on alle 1,563. Luku 1,563 on johdettu EN 1993-1-5 kaavasta B.1. Luvun johtaminen on tehty Lauri Toropaisen diplomityössä ”Vaativien kanavien vaatimusten mukainen mitoitus kattilalaitoksissa” sivuilla 33-35. Pienin kuormakerroin oli 2,67, joten myös rakenteen lokaalistasiteetti oli varmistettu.

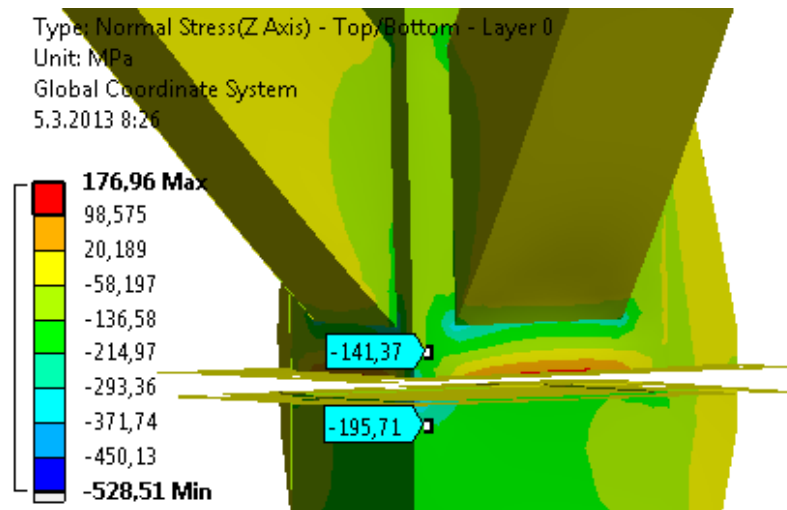
#### 4.5 Kuormitustapaus LC4

Siilo-osan väsymistä ei tarvinnut tutkia. Katso kappale 3.3.5.

Tukijalkojen väsymisen tutkimiseen jaettiin kolmeen tapaukseen. Jokaisella tapauksella oli oma väsymisloukka ja siten myös erisuuruinen jännitysvaihteluväli. Jännitysvaihteluvälit jokaiselle tapaukselle on laskettu liitteessä 1. Kuvissa esitetyt normaalijännitykset vastaavat kyseisen kohdan jännitysvaihtelua.

##### 4.5.1 Väsymistapaus 1

Yksityiskohtana oli palkin ja pätylevyn välinen hitsi.

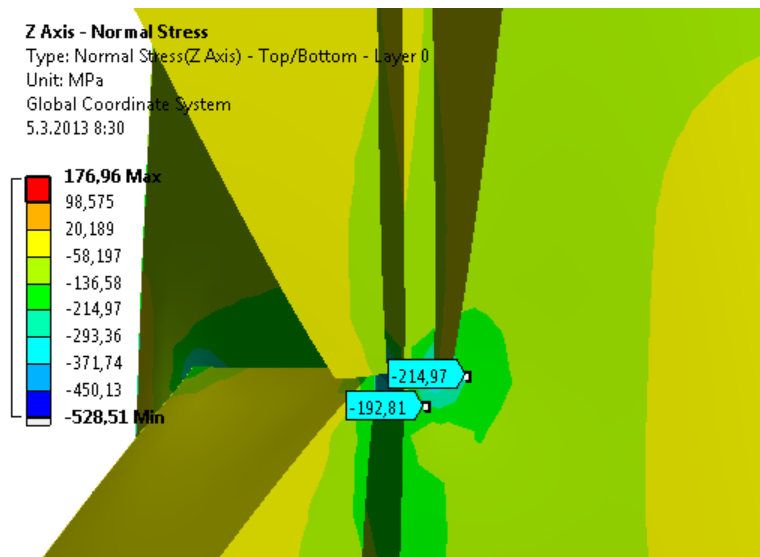


KUVA 29. Jännitysvaihteluväli väsymistapauksessa 1

Suurin jännitysvaihteluväli 196 MPa oli pienempi kuin tälle tapaukselle liitteessä 1 laskettu maksimijännitysvaihteluväli 208 MPa.

#### 4.5.2 Väsymistapaus 2

Yksityiskohtana oli palkin ja jäykistelevyn välinen hitsi.

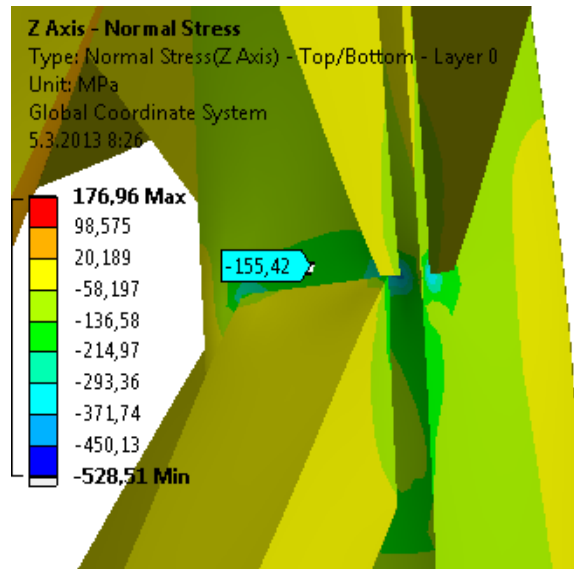


KUVA 30. Jännitysvaihteluväli väsymistapauksessa 2

Suurin jännitysvaihteluväli 214 MPa oli pienempi kuin tälle tapaukselle liitteessä 1 laskettu maksimijännitysvaihteluväli 259 MPa.

### 4.5.3 Väsymistapaus 3

Yksityiskohtana oli kahden palkin välinen hitsi.



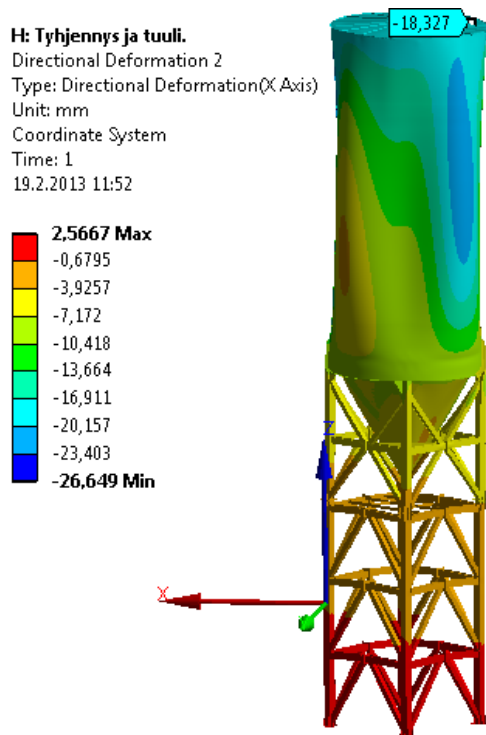
KUVA 31. Jännitysvaihteluväli väsymistapauksessa 3

Suurin jännitysvaihteluväli 155 MPa oli pienempi kuin tälle tapaukselle liitteessä 1 laskettu maksimijännitysvaihteluväli 247 MPa.

### 4.6 Kuormitustapaus LC5

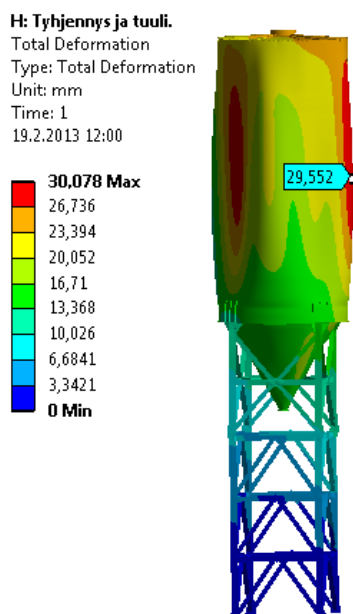
Tässä kuormitustapauksessa käytettiin mitoitusilannetta D (ULS). Murtorajatilakuormilla saatiin konservatiivisempia tuloksia.

Vaakasuuntainen kokonaistaipuma oli 18 mm raja-arvon ollessa 548 mm.



KUVA 32. Maksimi vaakasuuntainen kokonaistaipuma (tuuli ja tyhjennys)

Suurin säteen suuntainen paikallinen taipuma oli noin 30 mm raja-arvon ollessa 150 mm.



KUVA 33. Maksimi säteen suuntainen paikallinen taipuma.

Globaalit tai lokaalit taipumat eivät olleet lähelläkään raja-arvoja, vaikka kuormina käytettiin murtorajatilakuormia.

#### 4.7 Tulosten yhteenveto

Laskenta suoritettiin standardin EN 1993-4-1 (Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 4-1: Silos) ja siihen liittyvien standardien mukaisesti. Laskennassa analysoitiin viisi erilaista kuormitustapausta. Kuormitustapaukset löytyvät taulukosta 5.

TAULUKKO 5. Tutkitut kuormitustapaukset

Kuormitustapaus	Mitotustilanne	Tutkittu rajatila
LC1	Tyhjennys, tuuli ja täysi siilo, tuuli ja tyhjä siilo	Plastinen rajatila
LC1 a	Maanjäristys	Kimmoisen rajatila
LC2	Tyhjennys, tuuli ja täysi siilo, tuuli ja tyhjä siilo	Vaihtoplastisoitumisrajatila
LC3 a	Tuuli	Lommahdusrajatila
LC3 b	Tyhjennys	Lommahdusrajatila
LC3 c	Maanjäristys	Lommahdusrajatila
LC4	(Tyhjennys, tuuli ja täysi siilo, tuuli ja tyhjä siilo) SLS	Väsymisrajatila
LC5	Tyhjennys, tuuli ja täysi siilo, tuuli ja tyhjä siilo	Käyttörajatila

Plastisen rajatilan asettamat ehdot täytyivät koko rakenteen osalta. Suositeltua maksimikonaisvenymän arvoa 5 % ei ylitetty.

Maanjäristysanalyysissä käytetyn kimmoisen rajatilan ehdot täytyivät, koska kyseisessä analyysissä materiaalien myötörajoja ei ylitetty.

Vaihtoplastisoitumisrajatilan ehdot täytyivät, koska tässä tapauksessa merkittävän kuorman (tyhjennyskuorma) suunta on aina sama eli alaspäin. Näin ollen rakenteeseen ei voinut kohdistua vaihtoplastisoitumista.

Tyhjennys- ja tuulikuorma aiheutti lommahduksen siilon seinään tukijalan yläpuolelle. Lommahduskestävyyden arvoksi saatiin 1,66 ja kaikki yli ykkösen olevat arvot olivat

sallittuja. Tuulikuorma aiheutti lommahduksen siilon yläosaan. Lommahduskestävyyden arvoksi saatiin 1,66. Rakenteen globaalistabiliteetti oli myös varmistettu kaikissa mitoitustilanteissa.

10 000 kuormitusyökin kestävyys saavutettiin koko rakenteessa niin siilo-osassa kuin tukijaloissakin.

Käyttörajatilojen vaatimukset on täytetty koko rakenteessa. Globaalit tai lokaalit taipumat olivat raja-arvoja pienemmät.

Rakenteen voitiin todeta täyttävän Eurokoodin mukaiset vaatimukset.

## 5 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Tämä opinnäytetyö sisälsi useiden standardien tulkitsemista, kuormituskuormien laskentaa ja lujuuslaskentaa. Kuormien laskennasta tehtiin kattava selostus, josta selviää kuormien suuruudet ja miten ne on laskettu. Jokaisessa käytetyssä kaavassa on viittaus standardiin, joten kuormien laskenta on tarvittaessa tarkistettavissa. Myös itse lujuuslaskennasta tehty raportointi on tehty siten, että laskenta on toistettavissa, mikäli tarvetta sellaiselle ilmenee.

Opinnäyte oli haastava ja kehittävä. Erityisesti haastavuutta toivat lukuisat standardit, joita sovellettiin opinnäytetyössä. Standardien luettavuus ja tulkittavuus eivät aina ole kovinkaan selkeää ja helppoa, mikä loi omalta osaltaan lisää haasteita. Myös lujuuslaskennasta saatujen tulosten analysointi piti tehdä mahdollisimman tarkasti. Rakenteen monimutkaisuudesta ja suuresta koosta johtuen saatujen tulosten tarkastelussa täytyi olla tarkkana, jottei syntyneet jännitykset jääneet huomioimatta. Kuormitusten asettamisessa sai myös olla hyvin tarkkana, sillä kuormituksia ja pintoja joille kuormia annettiin, oli erittäin paljon. Opinnäytetyön tekeminen kehitti mielestäni merkittävästi osaamistani ja tietämystäni työelämässä tehtävästä lujuuslaskennasta.

Laskenta saatiin suoritettua ja rakenteen todettiin kattavan sille eri standardeissa asetetut vaatimukset. Täten voidaan todeta, että opinnäytetyö saavutti hyvin kaikki sille asetetut tavoitteet.



## LÄHTEET

SFS-EN 1993-4-1. 2007. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

SFS-EN 1993-1-1. 2005. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

SFS-EN 1998-1. 2005. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

SFS-EN 1998-4. 2007. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

SFS-EN 1990. 2006. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

SFS-EN 1991-1-1. 2002. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

SFS-EN 1991-1-4. 2011. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

SFS-EN 1991-4. 2006. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

SFS-EN 1993-1-5. 2006. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

SFS-EN 1993-1-6. 2007. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

SFS-EN 1993-1-8. 2005. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

SFS-EN 1993-1-9. 2005. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

Toropainen, L. 2011. Vaativien kanavien vaatimusten mukainen mitoitus kattilalaitoksissa. Konetekniikan koulutusohjelma. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Diplomityö.

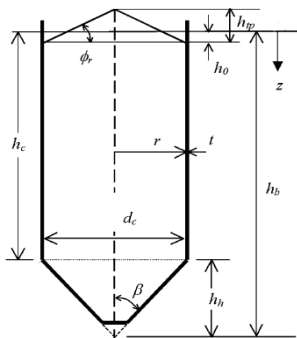
## **LIITTEET**

Liite 1. Kuormien laskenta

**Calculating general actions on silos according Eurocode 1 - Actions on structures -  
Part:4 Silos and tanks**

**General geometry dimensions of the silo as described in EN 1991-4:**

Characteristic dimension of inside of silo cross-section	$d_c := 6000\text{mm}$
Height of vertical -walled segment of silo from the transition to the equivalent surface (calculated below, and must be updated manually)	$h_c := 9.94188 \times 10^3 \text{ mm}$
Height of hopper from the apex to the transition (from sketch)	$h_h := 5190\text{mm}$
Overall height of silo from the hopper apex to the equivalent surface (calculated below)	$h_b := 1.51319 \times 10^4 \text{ mm}$
Total height of the top pile of solid (calculated below)	$h_{tp} := 4.35926 \times 10^3 \text{ mm}$
Depth below the equivalent surface of the base of the top pile (calculated below)	$h_o := 0\text{mm}$
Angle of inclination of hopper wall measured from the vertical	$\beta := 30\text{deg}$
Angle of repose of a particulate solid (conical pile)	$\phi_T := 36\text{deg}$
Maximum eccentricity of the surface pile during the filling process	$e_f := 3000\text{mm}$
Eccentricity of the centre of the top of the surface pile when the silo is full	$e_t := 3000\text{mm}$
Eccentricity of the centre of the outlet	$e_0 := 0\text{mm}$
Height of the top dome	$f := 210\text{mm}$
Height of the whole structure	$h_{\text{structure}} := 27405\text{mm}$
Total height of the silo structure	$h_{\text{silo}} := 17821\text{mm}$



(EN 1991-4 Picture 1.1)

**Other constants:**

Equivalent diameter of the bottom hole in the hopper cone

$$d_{\text{hopper\_hole}} := 400\text{mm}$$

Density of particulate solid cement

$$\rho_{\text{material}} := 1630 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Total material capacity of the silo

$$V_{\text{material}} := 330\text{m}^3$$

Fundamental value of the basic wind velocity

$$v_{b,0} := 32.8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Air density

$$\rho_{\text{air}} := 1.2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

**General geometry dimension calculations:**

Total height of the top pile of solid

$$h_{\text{tp\_calc}} := d_c \cdot \tan(\phi_r) = 4.35926 \times 10^3 \cdot \text{mm}$$

Material volume in the hopper:

Height of the "imaginary" hopper cone

$$h_{\text{im\_cone}} := \frac{d_{\text{hopper\_hole}}}{2 \cdot \tan(\beta)} = 346.41016 \cdot \text{mm}$$

$$V_{\text{hopper}} := \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_c}{2}\right)^2 \cdot h_h - \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_{\text{hopper\_hole}}}{2}\right)^2 \cdot h_{\text{im\_cone}} = 48.90009 \cdot \text{m}^3$$

Material volume in the top pile( from 3D model):

$$V_{\text{top}} := 53.55\text{m}^3$$

Equivalent hight of the pile:

$$h_{\text{tp\_ekv}} := \frac{V_{\text{top}}}{\pi \cdot \left(\frac{d_c}{2}\right)^2} = 1.89394 \text{ m}$$

Total material volume which forms a circular cylinder in the silo and its height:

$$V_{\text{cylinder}} := V_{\text{material}} - V_{\text{hopper}} - V_{\text{top}} = 227.54991 \cdot \text{m}^3$$

$$h_{\text{cylinder}} := \frac{V_{\text{cylinder}}}{\pi \cdot \left(\frac{d_c}{2}\right)^2} = 8.04793 \text{ m}$$

Height of vertical -walled segment of silo from the transition to the equivalent surface:

$$h_{\text{c\_calc}} := h_{\text{cylinder}} + h_{\text{tp\_ekv}} = 9.94188 \times 10^3 \cdot \text{mm}$$

For a not symmetrically filled circular silo  $h_o$  should be determined as (EN 1991-4 Eq-5.96):

$$h_{\text{o\_calc}} := \frac{\frac{d_c}{2} \cdot \tan(\phi_r) \cdot \left[1 - \left(\frac{e_t}{\frac{d_c}{2}}\right)^2\right]}{3} = 0 \cdot \text{mm}$$

Overall height of silo from the hopper apex to the equivalent surface:

$$h_{\text{b\_calc}} := h_{\text{c\_calc}} + h_{\text{h}} = 1.51319 \times 10^4 \cdot \text{mm}$$

### Action assessment classification (EN 1991-4 Section 2.5)

As the capacity of the silo is 538 tonnes and neither a) nor b) case will emerge the recommended classification of silo for action assessments is Class 2

Action Assessment Class	Description
Action Assessment Class 3	Silos with capacity in excess of 10 000 tonnes Silos with capacity in excess of 1000 tonnes in which any of the following design situations occur: a) eccentric discharge with $e_o/d_c > 0,25$ (see figure 1.1b) b) squat silos with top surface eccentricity with $e_t/d_c > 0,25$
Action Assessment Class 2	All silos covered by this standard and not placed in another class
Action Assessment Class 1	Silos with capacity below 100 tonnes

(EN 1991-4 Table 2.1)

### Particulate solids properties (EN 1991-4 Section 4.2)

The wall surface category is D3 as described in image below.

D3	High friction classed as "Raspy"	Off form concrete, steel finished concrete or aged concrete Aged (corroded) carbon steel Abrasion resistant steel Ceramic tiles
----	--	--

(EN 1991-4 Table 4.1)

The properties of particulate solid is taken as represented by the Cement given in EN 1991-4 Table E.1.

Unit weight (lower):	$\gamma_l := \rho_{\text{material}} \cdot g$
Unit weight (upper)	$\gamma_u := \rho_{\text{material}} \cdot g$
Angle of repose:	$\phi_r = 36\text{-deg}$
Angle of internal friction (mean)	$\phi_{im} := 30\text{deg}$
Angle of internal friction (factor)	$a_\phi := 1.22$
Lateral pressure ratio (mean)	$K_m := 0.54$
Lateral pressure ratio (mean)	$a_k := 1.20$
Wall friction coefficient (mean, wall type D3)	$\mu_m := 0.51$
Wall friction coefficient (factor)	$a_\mu := 1.07$
Patch load solid reference factor	$C_{op} := 0.5$

To determine the characteristic values of  $\mu$ ,  $K$  and  $\phi_i$ , the tabulated values  $\mu_m$ ,  $K_m$  and  $\phi_{im}$  should be multiplied and divided by the conversion factors  $a$  given in table E.1. Thus in calculating maximum loads the following combinations are used:

$$\text{Upper characteristic value of } K \quad K_{\text{upper}} := a_k \cdot K_m = 0.648$$

$$\text{Lower characteristic value of } K \quad K_{\text{lower}} := \frac{K_m}{a_k} = 0.45$$

$$\text{Upper characteristic value of } \mu \quad \mu_{\text{upper}} := a_\mu \cdot \mu_m = 0.5457$$

$$\text{Lower characteristic value of } \mu \quad \mu_{\text{lower}} := \frac{\mu_m}{a_\mu} = 0.47664$$

$$\text{Upper characteristic value of } \phi_i \quad \phi_{i\_upper} := a_\phi \cdot \phi_{im} = 0.63879$$

Lower characteristic value of  $\phi_i$       $\phi_{i\_lower} := \frac{\phi_{im}}{a_\phi} = 0.42918$

	Characteristic value to be adopted		
<b>Purpose:</b>	Wall friction coefficient $\mu$	Lateral pressure ratio $K$	Angle of internal friction $\psi_i$
<b>For the vertical wall or barrel</b>			
Maximum normal pressure on vertical wall	Lower	Upper	Lower
Maximum frictional traction on vertical wall	Upper	Upper	Lower
Maximum vertical load on hopper or silo bottom	Lower	Lower	Upper
<b>Purpose:</b>	Wall friction coefficient $\mu$	Hopper pressure ratio $F$	Angle of internal friction $\psi_i$
<b>For the hopper wall</b>			
Maximum hopper pressures on filling	Lower value for hopper	Lower	Lower
Maximum hopper pressures on discharge	Lower value for hopper	Upper	Upper

(EN 1991-4 Table 3.1)

### Slenderness of the silo (EN 1991-4 Section 5.1 Clause (2P))

$$\frac{h_c}{d_c} = 1.65698$$

The loads on silo vertical walls shall be evaluated according to the slenderness of the silo, in this case silo is classified as "intermediate slenderness silos". Because  $1,0 < h_c/d_c < 2,0$ .

### Determination of thin/thick-walled silo (EN 1991-4 Definition 1.5.44)

If  $d_c/t > 200$  silo is defined as thin walled.

$$\frac{d_c}{10\text{mm}} = 600 > 200 \quad \text{Silo is thin walled}$$

### Material properties and partial safety factors

Material S355:

$$f_{y355} := 355 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad f_{u355} := 510 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad E_{355} := 210000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \nu_{355} := 0.3 \quad \rho_{355} := 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Material S420:

$$f_{y420} := 420 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad f_{u420} := 500 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad E_{420} := E_{355} \quad \nu_{420} := \nu_{355} \quad \rho_{420} := \rho_{355}$$

Safety factors for resistance of material (EN 1993-4-1 + AC Table 2.2):

Resistance of welded or bolted shell wall to plastic limit state	$\gamma_{M0} := 1.0$
Resistance of shell wall to stability	$\gamma_{M1} := 1.1$
Resistance of welded or bolted shell wall to rupture	$\gamma_{M2} := 1.25$
Resistance of shell wall to cyclic plasticity	$\gamma_{M4} := 1.0$
Resistance of connections	$\gamma_{M5} := 1.25$
Resistance of shell wall to fatigue	$\gamma_{M6} := 1.1$

Partial factors for actions (EN 1990 Table A.1.2):

Partial factor for variable actions, also accounting for model uncertainties and dimensional variations	$\gamma_Q := 1.5$
Partial factor for permanent actions, also accounting for model uncertainties and dimensional variations	$\gamma_G := 1.35$

### Loads on the vertical walls of silos

Not Symmetrical filling load:

Plan cross-sectional area of silo:

$$A_{\text{silo}} := \frac{\pi \cdot d_c^2}{4} = 28.27433 \text{ m}^2$$

Internal perimete of the plan cross-section of the silo:

$$U := d_c \cdot \pi = 18.84956 \text{ m}$$

Janssen characteristic depth (EN 1991-4 Eq. 5.5):

$$z_{0\_hf} := \frac{1}{K_{\text{upper}} \cdot \mu_{\text{lower}}} \cdot \frac{A_{\text{silo}}}{U} = 4.85657 \text{ m}$$



$$z_{0\_wf} := \frac{1}{K_{upper} \cdot \mu_{upper}} \cdot \frac{A_{silo}}{U} = 4.24192 \text{ m}$$

$$z_{0\_vf} := \frac{1}{K_{lower} \cdot \mu_{lower}} \cdot \frac{A_{silo}}{U} = 6.99346 \text{ m}$$

Asymptotic horizontal pressure at great depth due to stored particulate solid (EN 1991-4 Eq. 5.75):

$$Pho\_hf := \gamma_I \cdot K_{upper} \cdot z_{0\_hf} = 50.30523 \cdot \text{kPa}$$

$$Pho\_wf := \gamma_I \cdot K_{upper} \cdot z_{0\_wf} = 43.93854 \cdot \text{kPa}$$

$$Pho\_vf := \gamma_I \cdot K_{lower} \cdot z_{0\_vf} = 50.30523 \cdot \text{kPa}$$

Janssen pressure depth variation function (EN 1991-4 Eq. 5.74 & 5.73):

$$n_{hf} := -(1 + \tan(\phi_r)) \cdot \left(1 - \frac{h_o}{z_{0\_hf}}\right) = -1.726542528$$

$$n_{wf} := -(1 + \tan(\phi_r)) \cdot \left(1 - \frac{h_o}{z_{0\_wf}}\right) = -1.726542528$$

$$n_{vf} := -(1 + \tan(\phi_r)) \cdot \left(1 - \frac{h_o}{z_{0\_vf}}\right) = -1.726542528$$

$$Y_{R\_hf}(z) := 1 - \left[ \frac{(z - h_o)}{(z_{0\_hf} - h_o)} + 1 \right]^{n_{hf}}$$

$$Y_{R\_wf}(z) := 1 - \left[ \frac{(z - h_o)}{(z_{0\_wf} - h_o)} + 1 \right]^{n_{wf}}$$

The values of horizontal pressure  $p_{hf}$  and wall frictional traction  $p_{wf}$  at any depth after filling and during storage are determined as (EN 1991-4 Equations 5.71 & 5.72, Partial safety factor included):

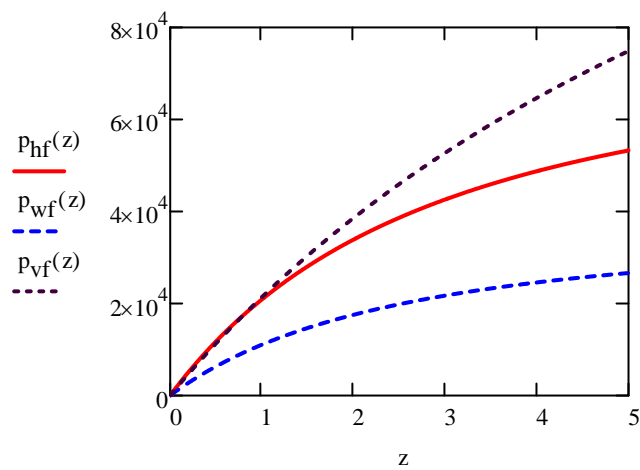
$$p_{hf}(z) := (p_{ho\_hf} \cdot Y_{R\_hf}(z)) \cdot \gamma_Q$$

$$p_{wf}(z) := (\mu_{upper} \cdot p_{ho\_wf} \cdot Y_{R\_wf}(z)) \cdot \gamma_Q$$

The value of vertical pressure  $p_{vf}$  at any depth after filling is determined as (EN 1991-4 Equations 5.79 & 5.80, Partial safety factor included):

$$z_v(z) := \left[ \frac{h_o}{m} - \frac{1}{(n_{vf} + 1)} \cdot \left[ \frac{z_{0\_vf}}{m} - \frac{h_o}{m} - \frac{\left( \frac{z}{m} + \frac{z_{0\_vf}}{m} - 2 \cdot \frac{h_o}{m} \right)^{(n_{vf}+1)}}{\left( \frac{z_{0\_vf}}{m} - \frac{h_o}{m} \right)^{(n_{vf})}} \right] \right] \cdot m$$

$$p_{vf}(z) := (\gamma_u \cdot z_v(z)) \cdot \gamma_Q$$



The resulting characteristic value of the vertical force (compressive) in the wall  $n_{zSk}$  per unit length of perimeter after filling at any depth  $z$  is determined as:

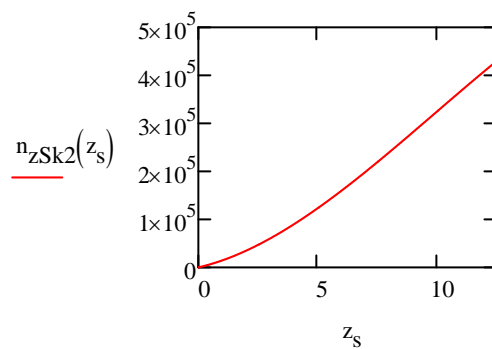
5.92-5.95

$$B := \frac{\frac{d_c}{2}}{2 \cdot \mu_{\text{upper}} \cdot K_{\text{upper}}} - h_o = 4.24192 \text{ m}$$

$$Z(z_s) := \frac{z_s}{B}$$

$$p_{ho} := \frac{\gamma_1}{\mu_{\text{upper}}} \cdot \frac{A_{\text{silos}}}{U} = 4.39385 \times 10^4 \text{ Pa}$$

$$n_{zSk2}(z_s) := \left[ 0.04 \cdot p_{ho} \cdot z_s \cdot \tan(\phi_r) \cdot \left( \frac{3000\text{mm}}{\frac{d_c}{2}} \right) \cdot \left[ 6 + 7Z(z_s) - (Z(z_s))^2 \right] \right] \cdot \gamma_Q$$



Filling patch load (EN 1991-4 Section 5.2.1.2)

Flow channel eccentricity to silo radius ratio

$$E_f := 2 \cdot \frac{3000\text{mm}}{d_c} = 1$$

Filling patch load factor (load magnifying factor)

$$C_{pf} := \max \left[ 0.21 \cdot C_{op} \cdot (1 + 2 \cdot E_f^2) \cdot \left[ 1 - e^{-1.5 \cdot \left( \frac{h_c}{d_c} - 1 \right)} \right], 0 \right] = 0.19742$$

Patch pressure after filling  $p_{pf}(z) := C_{pf} \cdot p_{hf}(z)$

#### Discharge loads on vertical walls (EN 1991-4 Section 5.3.2.1)

For intermediate silos in Action Assessment Classes 2 and 3 the discharge factors should be taken as:

Slenderness adjustment factor	$C_s := \left( \frac{h_c}{d_c} \right) - 1$
Horizontal pressure discharge factor	$C_h := 1.0 + 0.15 \cdot C_s = 1.09855$
Wall frictional traction discharge factor	$C_w := 1.0 + 0.1 \cdot C_s = 1.0657$
Horizontal pressure during discharge	$p_{he}(z) := C_h \cdot p_{hf}(z)$
Wall frictional traction during discharge	$p_{we}(z) := C_w \cdot p_{wf}(z)$
Characteristic value of the vertical force in the wall per unit length of perimeter during discharge	$n_{zSk,d}(z) := C_w \cdot n_{zSk2}(z)$

#### Substitute uniform pressure increase for filling and discharge patch loads (EN 1991-4 Section 5.2.3)

$$E_{su} := \frac{\max(e_f, e_0)}{d_c} = 0.5$$

Discharge patch load factor (EN 1991-4 Eq. 5.28):

$$C_{pe} := 0.42 \cdot C_{op} \cdot (1 + 2 \cdot E_{su}^2) \cdot \left[ 1 - e^{-1.5 \cdot \left( \frac{h_c}{d_c} - 1 \right)} \right] = 0.19742$$

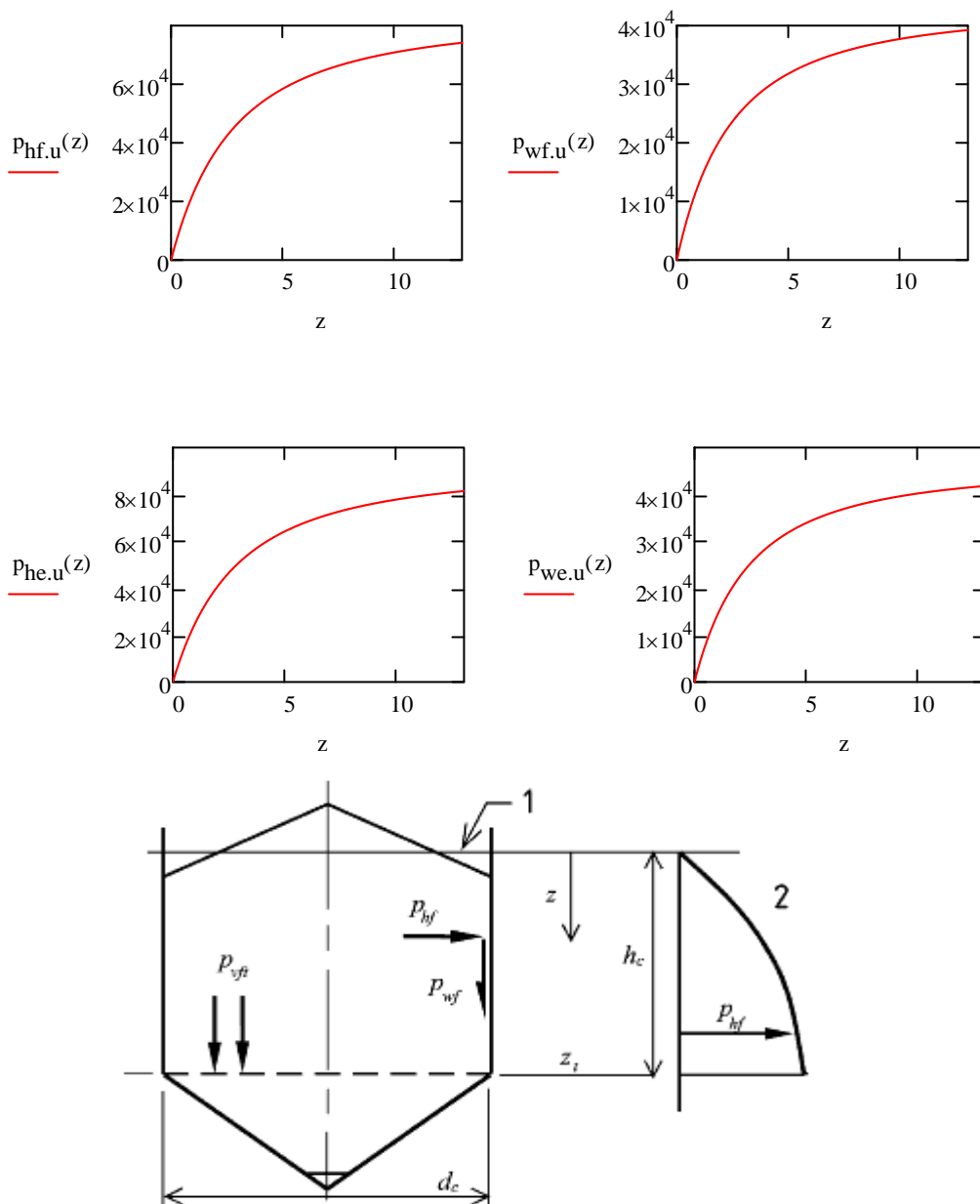
For thin-walled circular silos, the resulting total symmetrical horizontal pressures for filling  $p_{hf,u}$  and discharge  $p_{he,u}$  and the resulting total symmetrical frictional traction for filling  $p_{wf,u}$  and discharge  $p_{we,u}$  are determined as (EN 1991-4 Equations 5.42-5.45)

$$p_{hf,u}(z) := p_{hf}(z) \cdot (1 + 0.5 \cdot C_{pf})$$

$$p_{wf,u}(z) := p_{wf}(z) (1 + C_{pf})$$

$$p_{he,u}(z) := p_{he}(z) (1 + 0.5 C_{pe})$$

$$p_{we,u}(z) := p_{we}(z) (1 + C_{pe})$$



## Loads on silo hoppers and silo bottoms

The loads on the walls of silo hoppers are evaluated according to the steepness of the hopper. If the equation (EN 1991-4 Eq. 6.1) below is "true", the hopper is classified as steep.

$$\tan(\beta) < \frac{1 - K_{\text{lower}}}{2 \cdot \mu_{\text{lower}}} \qquad \frac{1 - K_{\text{lower}}}{2 \cdot \mu_{\text{lower}}} = 0.577 \qquad \tan(\beta) = 0.577$$

The boundary between steep and shallow hoppers is smooth, with the same pressures applied to a hopper that is at the boundary whether it is in either category (wall friction just fully mobilized).

It is supposed that the stored solid cannot develop dynamic loading conditions (EN 1991-4 Section 6.1.2 (5):

- The stored solid is not identified as susceptible to mechanical interlocking.
- The stored solid can be classed as of low cohesion

Because Action Assessment Class of the silo is 2, the bottom load magnifier is determined as (EN 1991-4 Section 6.1.2 (3):

$$C_b := 1.0$$

The mean vertical pressure at the transition between the vertical walled segment and the hopper is determined as (EN 1991-4 Section 6.1.2 (2):

$$p_{\text{vft}} := C_b \cdot p_{\text{vf}}(h_c) = 109.41247 \cdot \text{kPa}$$

For conical and square pyramidal hoppers (EN 1991-4 Eq. 6.9)

$$S_c := 2$$

For both filling and discharge conditions, the effective or mobilized wall friction is  $\mu_{\text{heff}} = \mu_h$ , where  $\mu_h$  is the lower characteristic value of wall friction coefficient in the hopper. (EN 1991-4 Section 6.3.1)

$$\mu_h := \mu_{\text{lower}}$$

$$\mu_{\text{heff}} := \mu_h$$

### Filling loads in steep hoppers

Hopper pressure ratio after filling (EN 1991-4 Eq. 6.17)

$$F_f := 1 - \frac{0.2}{\left(1 + \frac{\tan(\beta)}{\mu_h}\right)} = 0.90956$$

Power in hopper pressure relationship (EN 1991-4 Eq. 6.18)

$$n_f := S_c \cdot (1 - 0.2) \cdot \mu_h \cdot \cot(\beta) = 1.32089$$

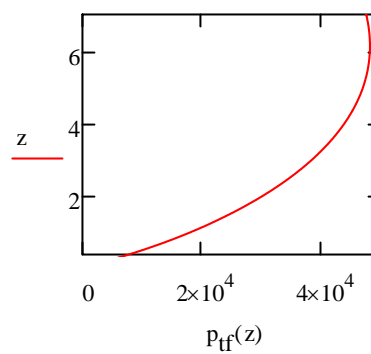
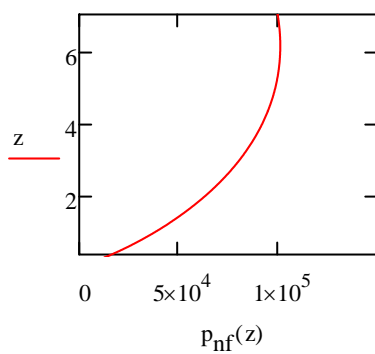
The mean vertical stress in the solid at height  $x$  above the apex of the hopper after filling (EN 1991-4 Eq. 6.7):

$$p_{v\_filling}(x) := \left[ \left( \frac{\gamma_u \cdot h_h}{n_f - 1} \right) \cdot \left[ \left( \frac{x}{h_h} \right) - \left( \frac{x}{h_h} \right)^{n_f} \right] + \frac{p_{vft}}{\gamma_Q} \cdot \left( \frac{x}{h_h} \right)^{n_f} \right] \cdot \gamma_Q$$

The normal pressure  $p_{nf}$  and frictional traction  $p_{tf}$  at any point on the wall of a steep hopper after filling are (EN 1991-4 Equations 6.19 and 6.20)

$$p_{nf}(x) := F_f \cdot p_{v\_filling}(x)$$

$$p_{tf}(x) := \mu_h \cdot F_f \cdot p_{v\_filling}(x)$$



Discharge loads in steep hoppers:

Hopper wall friction angle between a particulate solid and the hopper wall (EN 1991-4 Eq. 6.23):

$$\phi_{wh} := \text{atan}(\mu_h)$$

Constant (EN 1991-4 Eq. 6.22)

$$\varepsilon_c := \phi_{wh} + \text{asin}\left(\frac{\sin(\phi_{wh})}{\sin(\phi_{im})}\right)$$

Hopper pressure ratio during discharge

$$F_e := \frac{1 + \sin(\phi_{im}) \cdot \cos(\varepsilon_c)}{1 - \sin(\phi_{im}) \cdot \cos(2 \cdot \beta + \varepsilon_c)} = 0.74159$$

Power in hopper pressure relationship (EN 1991-4 Eq. 6.8)

$$n_e := S_c \cdot (F_e \cdot \mu_{heff} \cdot \cot(\beta) + F_e) - 2 = 0.70762$$

The mean vertical stress in the solid at height x above the apex of the hopper after filling (EN 1991-4 Eq. 6.7):

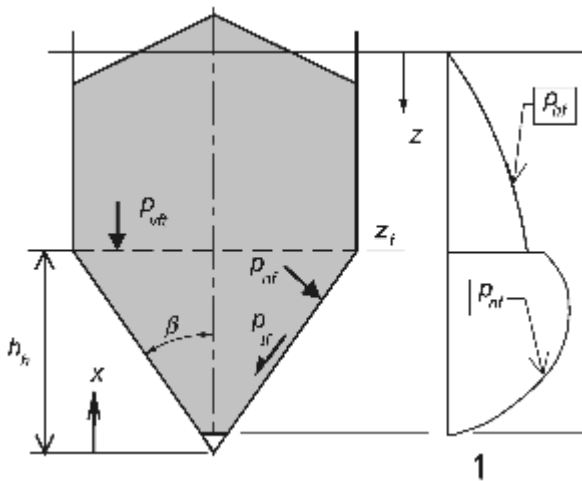
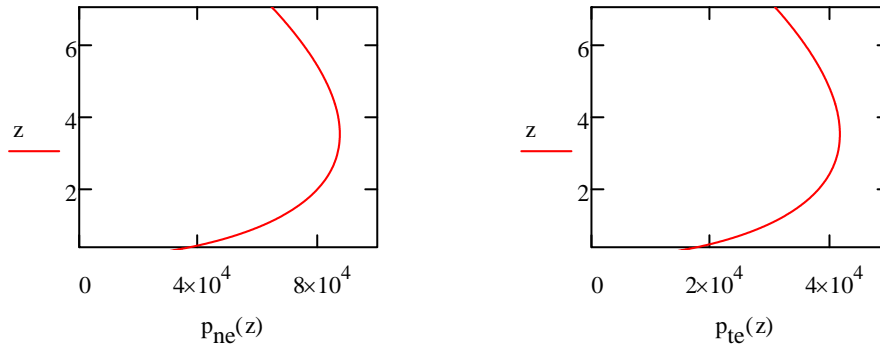
$$p_{v\_discharge}(x) := \left[ \left( \frac{\gamma_u \cdot h_h}{n_e - 1} \right) \cdot \left[ \left( \frac{x}{h_h} \right) - \left( \frac{x}{h_h} \right)^{n_e} \right] + \frac{p_{vft}}{\gamma_Q} \cdot \left( \frac{x}{h_h} \right)^{n_e} \right] \cdot \gamma_Q$$



The normal pressure  $p_{ne}$  and frictional traction  $p_{te}$  at any point on the wall of a steep hopper during discharge are (EN 1991-4 Equations 6.24 and 6.25)

$$p_{ne}(x) := F_e \cdot p_{v\_discharge}(x)$$

$$p_{te}(x) := \mu_h \cdot F_e \cdot p_{v\_discharge}(x)$$



## Wind loads

The recommended value for the value of the directional fraction:  $c_{dir} := 1$   
(EN 1991-1-4 Section 4.2)

The recommended value for the value of the season fraction:  $c_{season} := 1$   
(EN 1991-1-4 Section 4.2)

The basic wind velocity is then (EN 1991-1-4 Eq. 4.1)

$$v_b := c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} = 32.8 \frac{m}{s}$$

Terrain category is II (EN 1991-1-4 Table 4.1)

$$\text{roughness length: } z_0 := 0.05\text{m}$$

$$\text{terrain category: } z_{0,II} := 0.05\text{m}$$

$$\text{minimum height: } z_{\min} := 2\text{m}$$

The ortography factor (EN 1991-1-4 Section 4.3.1)

$$c_o(h) := 1.0$$

Terrain factor depending on the roughness length  $z_0$  calculatec (EN 1991-1-4 Eq. 4.5)

$$k_t := 0.19 \cdot \left( \frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0.07} = 0.19$$

The roughness factor at height h (EN 1991-1-4 Eq. 4.4)

$$c_r(h) := k_t \cdot \ln \left( \frac{h}{z_0} \right)$$

The mean wind velocity  $v_m(h)$  at a height z above the terrain (EN 1991-1-4 Eq. 4.3)

$$v_m(h) := c_r(h) \cdot c_o(h) \cdot v_b$$

Turbulence factor (EN 1991-1-4 Section 4.4 Note 2)

$$k_I := 1.0$$

The standard deviation of the turbulence (EN 1991-1-4 Eq. 4.6)

$$\sigma_v := k_t \cdot v_b \cdot k_I = 6.232 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

The turbulence intensity at height h (EN 1991-1-4 Eq. 4.7)

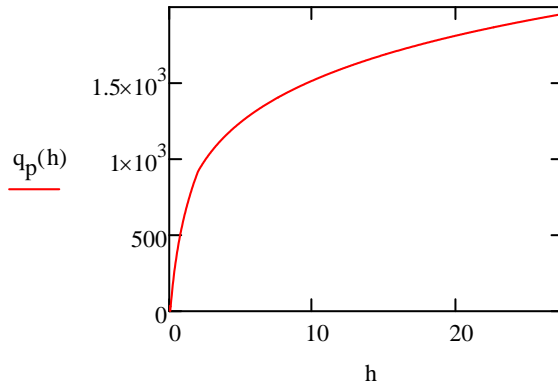
$$I_{v1}(h) := \frac{\sigma_v}{v_m(h)} \quad z_{\min} \leq h \leq z_{\max}$$

$$I_{v2}(h) := I_{v1}(z_{\min}) \quad h < z_{\min}$$

$$I_v(h) := \frac{\sigma_v}{v_m(h)} \cdot (h \geq z_{\min}) + I_{v1}(z_{\min}) \cdot (h < z_{\min})$$

Peak velocity pressure at height h (EN 1991-1-4 Eq. 4.8)

$$q_p(h) := (1 + 7 \cdot I_v(h)) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{air}} \cdot (v_m(h))^2$$

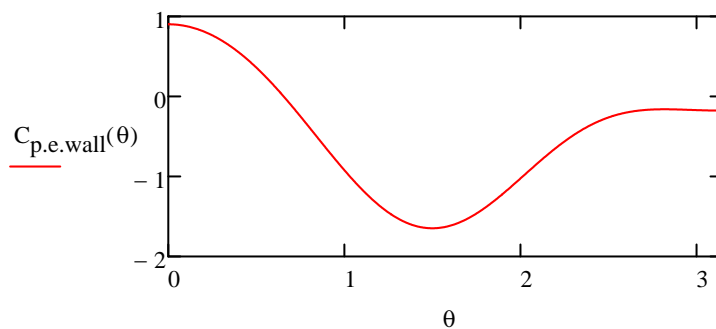


Pressure coefficient for circular silo outside wall (positive inwards) (EN 1993-4-1 + AC Eq. C.1)

$$C_{p,e,\text{wall}}(\theta) := -0.54 + 0.16 \cdot \left( \frac{d_c}{h_{\text{structure}}} \right) + \left[ 0.28 + 0.04 \cdot \left( \frac{d_c}{h_{\text{structure}}} \right) \right] \cdot \cos(\theta) \dots$$

$$+ \left[ 1.04 - 0.20 \cdot \left( \frac{d_c}{h_{\text{structure}}} \right) \right] \cdot \cos(2\theta) \dots$$

$$+ \left[ 0.36 - 0.5 \cdot \left( \frac{d_c}{h_{\text{structure}}} \right) \right] \cos(3\theta) - \left[ 0.14 - 0.05 \cdot \left( \frac{d_c}{h_{\text{structure}}} \right) \right] \cos(4\theta)$$



Pressure coefficient for circular silo inside wall (positive inwards) (EN 1993-4-1 + AC Picture C3 note b)

$$C_{p,i,\text{wall}} := 0.4$$

Pressure coefficient for domes with circular base in locations A, B and C (can be linear interpolated between) (EN 1991-1-4 Picture 7.12). The roof of the silo is a circular cone, but because SFS-EN lacks such a case, the dome is used instead.

$$\text{For graph: } \frac{h_c}{d_c} = 1.65698 \quad \frac{f}{d_c} = 0.035$$

$$C_{p,e,\text{roof},A} := -1.4$$

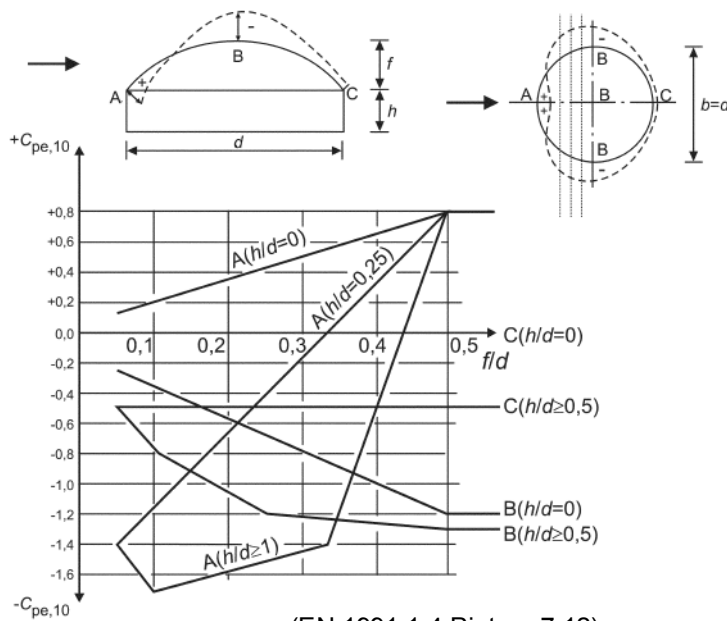
$$C_{p,e,\text{roof},B} := -0.5$$

$$C_{p,e,\text{roof},C} := -0.5$$

Wind pressures on surfaces in general form (EN 1991-1-4 Section 5.2)

$$\text{Extrenal surfaces: } w_e = q_p(z_e) \cdot C_{p,e} \cdot \gamma_Q$$

$$\text{Internal surfaces: } w_i = q_p(z_i) \cdot C_{p,i} \cdot \gamma_Q$$



## Eathquake

Given spectral acceleration is not for Eurocode and it is modified so that it can be used in Eurocode based analysis.

Short Period Spectral Acceleration:  $S_s := 0.25$

Soil profile type:  $S_c$

Importance factor:  $\gamma_I := 1$

Reference peak ground acceleration for Eurocode was calculated from given Short Period Spectral Acceleration.

Reference peak ground acceleration:  $a_{gR} := 0.08$

Design ground acceleration:

$$a_g := a_{gR} \cdot \gamma_I = 0.08$$

Shear wave velocity for soil profile type  $S_c$  (soft rock) is 365-762 m/s.

Eurocode Ground type from ( EN 1998-1:2004 table 3.1 )

Ground type: B

Shear wave velocity for ground type B is 360-800 m/s.

Soil factor from ( EN 1998-1:2004 Table 3.3 ). Table 3.3 is used for more conservative results.

Soil factor:  $S := 1.35$

Behaviour factor  $q$  for steel or composite steel concrete buildings, this limiting value of the  $q$  factor may be taken as being between 1,5 and 2 (EN 1998-4:2004 Section 2.2.2) .

Behaviour factor (conservative):  $q := 1.5$

Maximum spectral acceleration ( EN 1998-1:2004 Eq 3.14)

$$S_d := a_g \cdot S \cdot \frac{2.5}{q} = 0.18$$

Acceleration used in analyse:

$$a_{an} := g \cdot S_d = 1.7652 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

## Silo wall calculations

Silo wall is divided into 10 (994 mm) vertical sections, a constant surface pressure is calculated for every section. Constant pressure value is calculated so that the z-coordinate value is in the middle of the section. Where pile touch the silo wall the silo wall is divided into 5 (493 mm) vertical sections

$$h_{\text{wall\_sect}} := \frac{h_c}{10} = 0.99419 \text{ m}$$

$$h_{\text{pile\_sect}} := \frac{2.46531 \text{ m}}{5} = 0.49306 \text{ m}$$

Section middle heights are:

$$h_{\text{wall1}} := \frac{h_{\text{wall\_sect}}}{2} = 0.49709 \text{ m}$$

$$h_{\text{wall2}} := h_{\text{wall1}} + h_{\text{wall\_sect}} = 1.49128 \text{ m}$$

$$h_{\text{wall3}} := h_{\text{wall2}} + h_{\text{wall\_sect}} = 2.48547 \text{ m}$$

$$h_{\text{wall4}} := h_{\text{wall3}} + h_{\text{wall\_sect}} = 3.47966 \text{ m}$$

$$h_{\text{wall5}} := h_{\text{wall4}} + h_{\text{wall\_sect}} = 4.47385 \text{ m}$$

$$h_{\text{wall6}} := h_{\text{wall5}} + h_{\text{wall\_sect}} = 5.46803 \text{ m}$$

$$h_{\text{wall7}} := h_{\text{wall6}} + h_{\text{wall\_sect}} = 6.46222 \text{ m}$$

$$h_{\text{wall8}} := h_{\text{wall7}} + h_{\text{wall\_sect}} = 7.45641 \text{ m}$$

$$h_{\text{wall9}} := h_{\text{wall8}} + h_{\text{wall\_sect}} = 8.4506 \text{ m}$$

$$h_{\text{wall10}} := h_{\text{wall9}} + h_{\text{wall\_sect}} = 9.44479 \text{ m}$$

Pile section middle heights are::

$$h_{\text{pile1}} := \frac{h_{\text{pile\_sect}}}{2} = 0.24653 \text{ m}$$

$$h_{\text{pile2}} := h_{\text{pile1}} + h_{\text{pile\_sect}} = 0.73959 \text{ m}$$

$$h_{\text{pile3}} := h_{\text{pile2}} + h_{\text{pile\_sect}} = 1.23265 \text{ m}$$

$$h_{\text{pile4}} := h_{\text{pile3}} + h_{\text{pile\_sect}} = 1.72572 \text{ m}$$

$$h_{\text{pile5}} := h_{\text{pile4}} + h_{\text{pile\_sect}} = 2.21878 \text{ m}$$

## Hopper calculations

Hopper wall is divided into 5 (970 mm) vertical sections, a constant surface pressure is calculated for every section. Constant pressure value is calculated so that the x-coordinate value is in the middle of the section. Because x-coordinate starts from the imaginary apex an offset dimension of 346 mm is added.

$$h_{\text{offsethopper}} := 346\text{mm}$$

$$h_{\text{hopper\_sect}} := \frac{4850\text{mm}}{5} = 970\cdot\text{mm}$$

Section middle heights are:

$$h_{\text{hopper1}} := h_{\text{offsethopper}} + \frac{h_{\text{hopper\_sect}}}{2} = 831\cdot\text{mm}$$

$$h_{\text{hopper2}} := h_{\text{hopper1}} + h_{\text{hopper\_sect}} = 1.801 \times 10^3\cdot\text{mm}$$

$$h_{\text{hopper3}} := h_{\text{hopper2}} + h_{\text{hopper\_sect}} = 2.771 \times 10^3\cdot\text{mm}$$

$$h_{\text{hopper4}} := h_{\text{hopper3}} + h_{\text{hopper\_sect}} = 3.741 \times 10^3\cdot\text{mm}$$

$$h_{\text{hopper5}} := h_{\text{hopper4}} + h_{\text{hopper\_sect}} = 4.711 \times 10^3\cdot\text{mm}$$

Because the hopper surface is conical, we will calculate areas of the sections so that force loads instead of pressure loads can be applied in the FEM-model. (Areas are obtained from 3D CAD)

$$A_{\text{hopper1}} := 3413631\text{mm}^2 = 3.41363\text{ m}^2$$

$$A_{\text{hopper2}} := 7353635\text{mm}^2 = 7.35363\text{ m}^2$$

$$A_{\text{hopper3}} := 11294730\text{mm}^2 = 11.29473\text{ m}^2$$

$$A_{\text{hopper4}} := 15235963\text{mm}^2 = 15.23596\text{ m}^2$$

$$A_{\text{hopper5}} := 19177195\text{mm}^2 = 19.17719\text{ m}^2$$

## CALCULATION OF SILO WALL FILLING LOADS

### Horizontal

$$\begin{aligned} \text{phf1} &:= p_{\text{hf.u}}(h_{\text{wall1}}) = 0.01284 \cdot \text{MPa} \\ \text{phf2} &:= p_{\text{hf.u}}(h_{\text{wall2}}) = 0.03069 \cdot \text{MPa} \\ \text{phf3} &:= p_{\text{hf.u}}(h_{\text{wall3}}) = 0.04229 \cdot \text{MPa} \\ \text{phf4} &:= p_{\text{hf.u}}(h_{\text{wall4}}) = 0.05029 \cdot \text{MPa} \\ \text{phf5} &:= p_{\text{hf.u}}(h_{\text{wall5}}) = 0.05605 \cdot \text{MPa} \\ \text{phf6} &:= p_{\text{hf.u}}(h_{\text{wall6}}) = 0.06036 \cdot \text{MPa} \\ \text{phf7} &:= p_{\text{hf.u}}(h_{\text{wall7}}) = 0.06367 \cdot \text{MPa} \\ \text{phf8} &:= p_{\text{hf.u}}(h_{\text{wall8}}) = 0.06627 \cdot \text{MPa} \\ \text{phf9} &:= p_{\text{hf.u}}(h_{\text{wall9}}) = 0.06836 \cdot \text{MPa} \\ \text{phf10} &:= p_{\text{hf.u}}(h_{\text{wall10}}) = 0.07006 \cdot \text{MPa} \end{aligned}$$

### Friction

$$\begin{aligned} \text{pwf1} &:= p_{\text{wf.u}}(h_{\text{wall1}}) = 7.49935 \times 10^{-3} \cdot \text{MPa} \\ \text{pwf2} &:= p_{\text{wf.u}}(h_{\text{wall2}}) = 0.01747 \cdot \text{MPa} \\ \text{pwf3} &:= p_{\text{wf.u}}(h_{\text{wall3}}) = 0.02364 \cdot \text{MPa} \\ \text{pwf4} &:= p_{\text{wf.u}}(h_{\text{wall4}}) = 0.02776 \cdot \text{MPa} \\ \text{pwf5} &:= p_{\text{wf.u}}(h_{\text{wall5}}) = 0.03064 \cdot \text{MPa} \\ \text{pwf6} &:= p_{\text{wf.u}}(h_{\text{wall6}}) = 0.03276 \cdot \text{MPa} \\ \text{pwf7} &:= p_{\text{wf.u}}(h_{\text{wall7}}) = 0.03435 \cdot \text{MPa} \\ \text{pwf8} &:= p_{\text{wf.u}}(h_{\text{wall8}}) = 0.03559 \cdot \text{MPa} \\ \text{pwf9} &:= p_{\text{wf.u}}(h_{\text{wall9}}) = 0.03658 \cdot \text{MPa} \\ \text{pwf10} &:= p_{\text{wf.u}}(h_{\text{wall10}}) = 0.03737 \cdot \text{MPa} \end{aligned}$$



**Pile friction**

$$p_{wf1\_pile} := p_{wf.u}(h_{pile1}) = 4.00214 \times 10^{-3} \cdot \text{MPa}$$

$$p_{wf2\_pile} := p_{wf.u}(h_{pile2}) = 0.01044 \cdot \text{MPa}$$

$$p_{wf3\_pile} := p_{wf.u}(h_{pile3}) = 0.01534 \cdot \text{MPa}$$

$$p_{wf4\_pile} := p_{wf.u}(h_{pile4}) = 0.01918 \cdot \text{MPa}$$

$$p_{wf5\_pile} := p_{wf.u}(h_{pile5}) = 0.02224 \cdot \text{MPa}$$

**CALCULATION OF SILO WALL DISCHARGE LOADS****Horizontal**

$$p_{he1} := p_{he.u}(h_{wall1}) = 0.0141 \cdot \text{MPa}$$

$$p_{he2} := p_{he.u}(h_{wall2}) = 0.03372 \cdot \text{MPa}$$

$$p_{he3} := p_{he.u}(h_{wall3}) = 0.04646 \cdot \text{MPa}$$

$$p_{he4} := p_{he.u}(h_{wall4}) = 0.05524 \cdot \text{MPa}$$

$$p_{he5} := p_{he.u}(h_{wall5}) = 0.06158 \cdot \text{MPa}$$

$$p_{he6} := p_{he.u}(h_{wall6}) = 0.06631 \cdot \text{MPa}$$

$$p_{he7} := p_{he.u}(h_{wall7}) = 0.06994 \cdot \text{MPa}$$

$$p_{he8} := p_{he.u}(h_{wall8}) = 0.0728 \cdot \text{MPa}$$

$$p_{he9} := p_{he.u}(h_{wall9}) = 0.0751 \cdot \text{MPa}$$

$$p_{he10} := p_{he.u}(h_{wall10}) = 0.07696 \cdot \text{MPa}$$

**Friction**

$$p_{we1} := p_{we.u}(h_{wall1}) = 0.007992 \cdot \text{MPa}$$

$$p_{we2} := p_{we.u}(h_{wall2}) = 0.01861 \cdot \text{MPa}$$

$$p_{we3} := p_{we.u}(h_{wall3}) = 0.0252 \cdot \text{MPa}$$

$$p_{we4} := p_{we.u}(h_{wall4}) = 0.02958 \cdot \text{MPa}$$

$$pwe5 := p_{we.u}(h_{wall5}) = 0.03266 \cdot \text{MPa}$$

$$pwe6 := p_{we.u}(h_{wall6}) = 0.03491 \cdot \text{MPa}$$

$$pwe7 := p_{we.u}(h_{wall7}) = 0.03661 \cdot \text{MPa}$$

$$pwe8 := p_{we.u}(h_{wall8}) = 0.03793 \cdot \text{MPa}$$

$$pwe9 := p_{we.u}(h_{wall9}) = 0.03898 \cdot \text{MPa}$$

$$pwe10 := p_{we.u}(h_{wall10}) = 0.03982 \cdot \text{MPa}$$

### **Pile friction**

$$pwe1_{pile} := p_{we.u}(h_{pile1}) = 0.004265 \cdot \text{MPa}$$

$$pwe2_{pile} := p_{we.u}(h_{pile2}) = 0.01112 \cdot \text{MPa}$$

$$pwe3_{pile} := p_{we.u}(h_{pile3}) = 0.01635 \cdot \text{MPa}$$

$$pwe4_{pile} := p_{we.u}(h_{pile4}) = 0.02044 \cdot \text{MPa}$$

$$pwe5_{pile} := p_{we.u}(h_{pile5}) = 0.0237 \cdot \text{MPa}$$

## **CALCULATION OF HOPPER FILLING LOADS**

### **Normal**

$$F_{nf1} := p_{nf}(h_{hopper1}) \cdot A_{hopper1} = 115.90697 \cdot \text{kN}$$

$$F_{nf2} := p_{nf}(h_{hopper2}) \cdot A_{hopper2} = 440.01486 \cdot \text{kN}$$

$$F_{nf3} := p_{nf}(h_{hopper3}) \cdot A_{hopper3} = 878.62222 \cdot \text{kN}$$

$$F_{nf4} := p_{nf}(h_{hopper4}) \cdot A_{hopper4} = 1.37023 \times 10^3 \cdot \text{kN}$$

$$F_{nf5} := p_{nf}(h_{hopper5}) \cdot A_{hopper5} = 1.86717 \times 10^3 \cdot \text{kN}$$

### **Friction**

$$F_{tf1} := p_{tf}(h_{hopper1}) \cdot A_{hopper1} = 55.24538 \cdot \text{kN}$$

$$F_{tf2} := p_{tf}(h_{hopper2}) \cdot A_{hopper2} = 209.72671 \cdot \text{kN}$$

$$F_{tf3} := p_{tf}(h_{hopper3}) \cdot A_{hopper3} = 418.78255 \cdot \text{kN}$$

$$F_{tf4} := p_{tf}(h_{hopper4}) \cdot A_{hopper4} = 653.09911 \cdot \text{kN}$$

$$F_{tf5} := p_{tf}(h_{hopper5}) \cdot A_{hopper5} = 889.95935 \cdot \text{kN}$$

Normal and Friction component must be divided into radial and axial component because of FE-calculation.

### Radial

$$\text{Frf1} := \text{Fnf1} \cdot \sin(90\text{deg} - \beta) - \text{Ftf1} \cdot \sin(\beta) = 7.27557 \times 10^4 \cdot \text{N}$$

$$\text{Frf2} := \text{Fnf2} \cdot \sin(90\text{deg} - \beta) - \text{Ftf2} \cdot \sin(\beta) = 2.76201 \times 10^5 \cdot \text{N}$$

$$\text{Frf3} := \text{Fnf3} \cdot \sin(90\text{deg} - \beta) - \text{Ftf3} \cdot \sin(\beta) = 5.51518 \times 10^5 \cdot \text{N}$$

$$\text{Frf4} := \text{Fnf4} \cdot \sin(90\text{deg} - \beta) - \text{Ftf4} \cdot \sin(\beta) = 8.60102 \times 10^5 \cdot \text{N}$$

$$\text{Frf5} := \text{Fnf5} \cdot \sin(90\text{deg} - \beta) - \text{Ftf5} \cdot \sin(\beta) = 1.17204 \times 10^6 \cdot \text{N}$$

### Axial

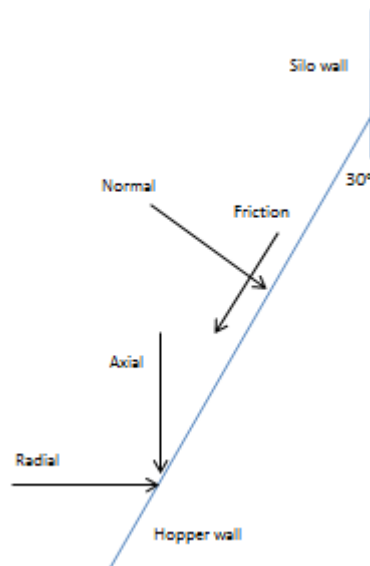
$$\text{Faf1} := \text{Fnf1} \cdot \cos(90\text{deg} - \beta) + \text{Ftf1} \cdot \cos(\beta) = 1.05797 \times 10^5 \cdot \text{N}$$

$$\text{Faf2} := \text{Fnf2} \cdot \cos(90\text{deg} - \beta) + \text{Ftf2} \cdot \cos(\beta) = 4.01636 \times 10^5 \cdot \text{N}$$

$$\text{Faf3} := \text{Fnf3} \cdot \cos(90\text{deg} - \beta) + \text{Ftf3} \cdot \cos(\beta) = 8.01987 \times 10^5 \cdot \text{N}$$

$$\text{Faf4} := \text{Fnf4} \cdot \cos(90\text{deg} - \beta) + \text{Ftf4} \cdot \cos(\beta) = 1.25071 \times 10^6 \cdot \text{N}$$

$$\text{Faf5} := \text{Fnf5} \cdot \cos(90\text{deg} - \beta) + \text{Ftf5} \cdot \cos(\beta) = 1.70431 \times 10^6 \cdot \text{N}$$



## CALCULATION OF HOPPER DISCHARGE LOADS

### Normal

$$F_{ne1} := p_{ne}(h_{hopper1}) \cdot A_{hopper1} = 197.99187 \cdot \text{kN}$$

$$F_{ne2} := p_{ne}(h_{hopper2}) \cdot A_{hopper2} = 574.25858 \cdot \text{kN}$$

$$F_{ne3} := p_{ne}(h_{hopper3}) \cdot A_{hopper3} = 971.15205 \cdot \text{kN}$$

$$F_{ne4} := p_{ne}(h_{hopper4}) \cdot A_{hopper4} = 1.32879 \times 10^3 \cdot \text{kN}$$

$$F_{ne5} := p_{ne}(h_{hopper5}) \cdot A_{hopper5} = 1.61075 \times 10^3 \cdot \text{kN}$$

### Friction

$$F_{te1} := p_{te}(h_{hopper1}) \cdot A_{hopper1} = 94.36996 \cdot \text{kN}$$

$$F_{te2} := p_{te}(h_{hopper2}) \cdot A_{hopper2} = 273.71203 \cdot \text{kN}$$

$$F_{te3} := p_{te}(h_{hopper3}) \cdot A_{hopper3} = 462.88555 \cdot \text{kN}$$

$$F_{te4} := p_{te}(h_{hopper4}) \cdot A_{hopper4} = 633.34909 \cdot \text{kN}$$

$$F_{te5} := p_{te}(h_{hopper5}) \cdot A_{hopper5} = 767.73829 \cdot \text{kN}$$

Normal and Friction component must be divided into radial and axial component because of FE-calculation.

### Radial

$$F_{re1} := F_{ne1} \cdot \sin(90\text{deg} - \beta) - F_{te1} \cdot \sin(\beta) = 1.24281 \times 10^5 \cdot \text{N}$$

$$F_{re2} := F_{ne2} \cdot \sin(90\text{deg} - \beta) - F_{te2} \cdot \sin(\beta) = 3.60467 \times 10^5 \cdot \text{N}$$

$$F_{re3} := F_{ne3} \cdot \sin(90\text{deg} - \beta) - F_{te3} \cdot \sin(\beta) = 6.096 \times 10^5 \cdot \text{N}$$

$$F_{re4} := F_{ne4} \cdot \sin(90\text{deg} - \beta) - F_{te4} \cdot \sin(\beta) = 8.34092 \times 10^5 \cdot \text{N}$$

$$F_{re5} := F_{ne5} \cdot \sin(90\text{deg} - \beta) - F_{te5} \cdot \sin(\beta) = 1.01108 \times 10^6 \cdot \text{N}$$

### Axial

$$F_{ae1} := F_{ne1} \cdot \cos(90\text{deg} - \beta) + F_{te1} \cdot \cos(\beta) = 1.80723 \times 10^5 \cdot \text{N}$$

$$F_{ae2} := F_{ne2} \cdot \cos(90\text{deg} - \beta) + F_{te2} \cdot \cos(\beta) = 5.24171 \times 10^5 \cdot \text{N}$$

$$F_{ae3} := F_{ne3} \cdot \cos(90\text{deg} - \beta) + F_{te3} \cdot \cos(\beta) = 8.86447 \times 10^5 \cdot \text{N}$$

$$F_{ae4} := F_{ne4} \cdot \cos(90\text{deg} - \beta) + F_{te4} \cdot \cos(\beta) = 1.21289 \times 10^6 \cdot \text{N}$$

$$F_{ae5} := F_{ne5} \cdot \cos(90\text{deg} - \beta) + F_{te5} \cdot \cos(\beta) = 1.47025 \times 10^6 \cdot \text{N}$$

## CALCULATION OF SILO OWN WEIGHT LOAD CASE

An 2 mm corrosion and abrasion loss has been agreed with the client and it has been taken into account in silo wall and silo hopper. Weight loss caused by that must be compensated with modified densities in FE-model.

$$\rho_{\text{plate\_4mm}} := \frac{6\text{mm}}{4\text{mm}} \cdot \rho_{355} = 1.1775 \times 10^4 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_{\text{plate\_8mm}} := \frac{10\text{mm}}{8\text{mm}} \cdot \rho_{355} = 9.8125 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_{\text{plate\_14mm}} := \frac{16\text{mm}}{14\text{mm}} \cdot \rho_{355} = 8.97143 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

## CALCULATION OF SILO WIND LOADS

Wind loads are calculated on the silo wall. Wind effects on the hopper are calculated so that the area is same as in the wall (safe side assumption). Because silo wall is divided into 16 sections and hopper into 5 sections, reference heights for velocity pressures are calculated with the upper values of the section dimensions from the 0-level.

$z_{\text{external.s1}} := 14888\text{mm}$	$z_{\text{external.s9}} := 22840\text{mm}$
$z_{\text{external.s2}} := 15882\text{mm}$	$z_{\text{external.s10}} := 23834\text{mm}$
$z_{\text{external.s3}} := 16876\text{mm}$	$z_{\text{external.s11}} := 24830\text{mm}$
$z_{\text{external.s4}} := 17870\text{mm}$	$z_{\text{external.s12}} := 25323\text{mm}$
$z_{\text{external.s5}} := 18864\text{mm}$	$z_{\text{external.s13}} := 25816\text{mm}$
$z_{\text{external.s6}} := 19858\text{mm}$	$z_{\text{external.s14}} := 26309\text{mm}$
$z_{\text{external.s7}} := 20852\text{mm}$	$z_{\text{external.s15}} := 26802\text{mm}$
$z_{\text{external.s8}} := 21846\text{mm}$	$z_{\text{external.s16}} := 27399\text{mm}$

$z_{\text{external.h1}} := 11008\text{mm}$
$z_{\text{external.h2}} := 11978\text{mm}$
$z_{\text{external.h3}} := 12948\text{mm}$
$z_{\text{external.h4}} := 13918\text{mm}$
$z_{\text{external.h5}} := 14137\text{mm}$

Silo is divided into 5 vertical sections to simplify pressure coefficient function. Angle 0 deg is towards wind direction. Because of symmetry angles from 0 deg to 180 deg are calculated.

#### **SILO WALL Angle 0 deg - 20 deg (FRONT), calculated at angle 0 deg**

$$w_{e.s.1.0} := q_p(z_{\text{external.s1}}) \cdot C_{p.e.wall}(0\text{deg}) \cdot \gamma_Q = 2.27888 \times 10^{-3} \cdot \text{MPa}$$

$$w_{e.s.2.0} := q_p(z_{\text{external.s2}}) \cdot C_{p.e.wall}(0\text{deg}) \cdot \gamma_Q = 2.31647 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$w_{e.s.3.0} := q_p(z_{\text{external.s3}}) \cdot C_{p.e.wall}(0\text{deg}) \cdot \gamma_Q = 2.35201 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$w_{e.s.4.0} := q_p(z_{\text{external.s4}}) \cdot C_{p.e.wall}(0\text{deg}) \cdot \gamma_Q = 2.38574 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$w_{e.s.5.0} := q_p(z_{\text{external.s5}}) \cdot C_{p.e.wall}(0\text{deg}) \cdot \gamma_Q = 2.41782 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$w_{e.s.6.0} := q_p(z_{\text{external.s6}}) \cdot C_{p.e.wall}(0\text{deg}) \cdot \gamma_Q = 2.44843 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$w_{e.s.7.0} := q_p(z_{\text{external.s7}}) \cdot C_{p.e.wall}(0\text{deg}) \cdot \gamma_Q = 2.4777 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$w_{e.s.8.0} := q_p(z_{\text{external.s8}}) \cdot C_{p.e.wall}(0\text{deg}) \cdot \gamma_Q = 2.50575 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$w_{e.s.9.0} := q_p(z_{\text{external.s9}}) \cdot C_{p.e.wall}(0\text{deg}) \cdot \gamma_Q = 2.53267 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$w_{e.s.10.0} := q_p(z_{\text{external.s10}}) \cdot C_{p.e.wall}(0\text{deg}) \cdot \gamma_Q = 2.55857 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$w_{e.s.11.0} := q_p(z_{\text{external.s11}}) \cdot C_{p.e.wall}(0\text{deg}) \cdot \gamma_Q = 2.58356 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$w_{e.s.12.0} := q_p(z_{\text{external.s12}}) \cdot C_{p.e.wall}(0\text{deg}) \cdot \gamma_Q = 2.5956 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$w_{e.s.13.0} := q_p(z_{\text{external.s13}}) \cdot C_{p.e.wall}(0\text{deg}) \cdot \gamma_Q = 2.60744 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$w_{e.s.14.0} := q_p(z_{\text{external.s14}}) \cdot C_{p.e.wall}(0\text{deg}) \cdot \gamma_Q = 2.61907 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$w_{e.s.15.0} := q_p(z_{\text{external.s15}}) \cdot C_{p.e.wall}(0\text{deg}) \cdot \gamma_Q = 2.6305 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$w_{e.s.16.0} := q_p(z_{\text{external.s16}}) \cdot C_{p.e.wall}(0\text{deg}) \cdot \gamma_Q = 2.6441 \times 10^3 \text{ Pa}$$

#### **SILO WALL Angle 20 deg - 40 deg (FRONT), calculated at angle 30 deg**

$$w_{e.s.1.30} := q_p(z_{\text{external.s1}}) \cdot C_{p.e.wall}(30\text{deg}) \cdot \gamma_Q = 7.77932 \times 10^{-4} \cdot \text{MPa}$$

$$w_{e.s.2.30} := q_p(z_{\text{external.s2}}) \cdot C_{p.e.wall}(30\text{deg}) \cdot \gamma_Q = 790.76389 \text{ Pa}$$

$$w_{e.s.3.30} := q_p(z_{\text{external.s3}}) \cdot C_{p.e.wall}(30\text{deg}) \cdot \gamma_Q = 802.89808 \text{ Pa}$$

$$w_{e.s.4.30} := q_p(z_{\text{external.s4}}) \cdot C_{p.e.wall}(30\text{deg}) \cdot \gamma_Q = 814.41022 \text{ Pa}$$

$$w_{e.s.5.30} := q_p(z_{\text{external.s5}}) \cdot C_{p.e.wall}(30\text{deg}) \cdot \gamma_Q = 825.36386 \text{ Pa}$$

$$w_{e.s.6.30} := q_p(z_{\text{external.s6}}) \cdot C_{p.e.wall}(30\text{deg}) \cdot \gamma_Q = 835.81316 \text{ Pa}$$

$$w_{e.s.7.30} := q_p(z_{\text{external.s7}}) \cdot C_{p.e.wall}(30\text{deg}) \cdot \gamma_Q = 845.80461 \text{ Pa}$$

$$w_{e.s.8.30} := q_p(z_{\text{external.s8}}) \cdot C_{p.e.wall}(30\text{deg}) \cdot \gamma_Q = 855.37849 \text{ Pa}$$

$$w_{e.s.9.30} := q_p(z_{\text{external.s9}}) \cdot C_{p.e.wall}(30\text{deg}) \cdot \gamma_Q = 864.56988 \text{ Pa}$$

$$w_{e.s.10.30} := q_p(z_{\text{external.s10}}) \cdot C_{p.e.wall}(30\text{deg}) \cdot \gamma_Q = 873.40957 \text{ Pa}$$

$$w_{e.s.11.30} := q_p(z_{\text{external.s11}}) \cdot C_{p.e.wall}(30\text{deg}) \cdot \gamma_Q = 881.94153 \text{ Pa}$$

$$w_{e.s.12.30} := q_p(z_{\text{external.s12}}) \cdot C_{p.e.wall}(30\text{deg}) \cdot \gamma_Q = 886.05167 \text{ Pa}$$

$$w_{e.s.13.30} := q_p(z_{\text{external.s13}}) \cdot C_{p.e.wall}(30\text{deg}) \cdot \gamma_Q = 890.09063 \text{ Pa}$$

$$w_{e.s.14.30} := q_p(z_{\text{external.s14}}) \cdot C_{p.e.wall}(30\text{deg}) \cdot \gamma_Q = 894.06097 \text{ Pa}$$

$$w_{e.s.15.30} := q_p(z_{\text{external.s15}}) \cdot C_{p.e.wall}(30\text{deg}) \cdot \gamma_Q = 897.96507 \text{ Pa}$$

$$w_{e.s.16.30} := q_p(z_{\text{external.s16}}) \cdot C_{p.e.wall}(30\text{deg}) \cdot \gamma_Q = 902.60736 \text{ Pa}$$

#### **SILO WALL Angle 40 deg - 80 deg (FRONT), calculated at angle 60 deg**

$$w_{e.s.1.60} := q_p(z_{\text{external.s1}}) \cdot C_{p.e.wall}(60\text{deg}) \cdot \gamma_Q = -2.64094 \times 10^{-3} \cdot \text{MPa}$$

$$w_{e.s.2.60} := q_p(z_{\text{external.s2}}) \cdot C_{p.e.wall}(60\text{deg}) \cdot \gamma_Q = -2.6845 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$w_{e.s.3.60} := q_p(z_{\text{external.s3}}) \cdot C_{p.e.wall}(60\text{deg}) \cdot \gamma_Q = -2.72569 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$w_{e.s.4.60} := q_p(z_{\text{external.s4}}) \cdot C_{p.e.wall}(60\text{deg}) \cdot \gamma_Q = -2.76477 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$w_{e.s.5.60} := q_p(z_{\text{external.s5}}) \cdot C_{p.e.wall}(60\text{deg}) \cdot \gamma_Q = -2.80196 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$w_{e.s.6.60} := q_p(z_{\text{external.s6}}) \cdot C_{p.e.wall}(60\text{deg}) \cdot \gamma_Q = -2.83743 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$w_{e.s.7.60} := q_p(z_{\text{external.s7}}) \cdot C_{p.e.wall}(60\text{deg}) \cdot \gamma_Q = -2.87135 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$w_{e.s.8.60} := q_p(z_{\text{external.s8}}) \cdot C_{p.e.wall}(60\text{deg}) \cdot \gamma_Q = -2.90385 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$w_{e.s.9.60} := q_p(z_{\text{external.s9}}) \cdot C_{p.e.wall}(60\text{deg}) \cdot \gamma_Q = -2.93506 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$w_{e.s.10.60} := q_p(z_{\text{external.s10}}) \cdot C_{p.e.wall}(60\text{deg}) \cdot \gamma_Q = -2.96507 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$w_{e.s.11.60} := q_p(z_{\text{external.s11}}) \cdot C_{p.e.wall}(60\text{deg}) \cdot \gamma_Q = -2.99403 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$w_{e.s.12.60} := q_p(z_{\text{external.s12}}) \cdot C_{p.e.wall}(60\text{deg}) \cdot \gamma_Q = -3.00798 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$w_{e.s.13.60} := q_p(z_{\text{external.s13}}) \cdot C_{p.e.wall}(60\text{deg}) \cdot \gamma_Q = -3.0217 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$w_{e.s.14.60} := q_p(z_{\text{external.s14}}) \cdot C_{p.e.wall}(60\text{deg}) \cdot \gamma_Q = -3.03517 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$w_{e.s.15.60} := q_p(z_{\text{external.s15}}) \cdot C_{p.e.wall}(60\text{deg}) \cdot \gamma_Q = -3.04843 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$w_{e.s.16.60} := q_p(z_{\text{external.s16}}) \cdot C_{p.e.wall}(60\text{deg}) \cdot \gamma_Q = -3.06419 \times 10^3 \text{ Pa}$$

#### **SILO WALL Angle 80 deg - 140 deg (SIDE), calculated at angle 90 deg**

$$w_{e.s.1.90} := q_p(z_{\text{external.s1}}) \cdot C_{p.e.wall}(90\text{deg}) \cdot \gamma_Q = -4.12113 \times 10^{-3} \cdot \text{MPa}$$

$$w_{e.s.2.90} := q_p(z_{\text{external.s2}}) \cdot C_{p.e.wall}(90\text{deg}) \cdot \gamma_Q = -4.18911 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$w_{e.s.3.90} := q_p(z_{\text{external.s3}}) \cdot C_{p.e.wall}(90\text{deg}) \cdot \gamma_Q = -4.25339 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$w_{e.s.4.90} := q_p(z_{\text{external.s4}}) \cdot C_{p.e.wall}(90\text{deg}) \cdot \gamma_Q = -4.31437 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$w_{e.s.5.90} := q_p(z_{\text{external.s5}}) \cdot C_{p.e.wall}(90\text{deg}) \cdot \gamma_Q = -4.3724 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$w_{e.s.6.90} := q_p(z_{\text{external.s6}}) \cdot C_{p.e.wall}(90\text{deg}) \cdot \gamma_Q = -4.42776 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$w_{e.s.7.90} := q_p(z_{\text{external.s7}}) \cdot C_{p.e.wall}(90\text{deg}) \cdot \gamma_Q = -4.48069 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$w_{e.s.8.90} := q_p(z_{\text{external.s8}}) \cdot C_{p.e.wall}(90\text{deg}) \cdot \gamma_Q = -4.53141 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$w_{e.s.9.90} := q_p(z_{\text{external.s9}}) \cdot C_{p.e.wall}(90\text{deg}) \cdot \gamma_Q = -4.5801 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$w_{e.s.10.90} := q_p(z_{\text{external.s10}}) \cdot C_{p.e.wall}(90\text{deg}) \cdot \gamma_Q = -4.62693 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$w_{e.s.11.90} := q_p(z_{\text{external.s11}}) \cdot C_{p.e.wall}(90\text{deg}) \cdot \gamma_Q = -4.67212 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$w_{e.s.12.90} := q_p(z_{\text{external.s12}}) \cdot C_{p.e.wall}(90\text{deg}) \cdot \gamma_Q = -4.6939 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$w_{e.s.13.90} := q_p(z_{\text{external.s13}}) \cdot C_{p.e.wall}(90\text{deg}) \cdot \gamma_Q = -4.71529 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$w_{e.s.14.90} := q_p(z_{\text{external.s14}}) \cdot C_{p.e.wall}(90\text{deg}) \cdot \gamma_Q = -4.73633 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$w_{e.s.15.90} := q_p(z_{\text{external.s15}}) \cdot C_{p.e.wall}(90\text{deg}) \cdot \gamma_Q = -4.75701 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$w_{e.s.16.90} := q_p(z_{\text{external.s16}}) \cdot C_{p.e.wall}(90\text{deg}) \cdot \gamma_Q = -4.7816 \times 10^3 \text{ Pa}$$

#### **SILO WALL Angle 140 deg - 180 deg (REAR), calculated at angle 160 deg**

$$w_{e.s.1.160} := q_p(z_{\text{external.s1}}) \cdot C_{p.e.wall}(160\text{deg}) \cdot \gamma_Q = -4.06607 \times 10^{-4} \cdot \text{MPa}$$

$$w_{e.s.2.160} := q_p(z_{\text{external.s2}}) \cdot C_{p.e.wall}(160\text{deg}) \cdot \gamma_Q = -413.31404 \text{ Pa}$$

$$w_{e.s.3.160} := q_p(z_{\text{external.s3}}) \cdot C_{p.e.wall}(160\text{deg}) \cdot \gamma_Q = -419.6563 \text{ Pa}$$

$$w_{e.s.4.160} := q_p(z_{\text{external.s4}}) \cdot C_{p.e.wall}(160\text{deg}) \cdot \gamma_Q = -425.67343 \text{ Pa}$$



$$\begin{aligned}
w_{e.s.5.160} &:= q_p(z_{\text{external.s5}}) \cdot C_{p.e.wall}(160\text{deg}) \cdot \gamma_Q = -431.39865 \text{ Pa} \\
w_{e.s.6.160} &:= q_p(z_{\text{external.s6}}) \cdot C_{p.e.wall}(160\text{deg}) \cdot \gamma_Q = -436.86025 \text{ Pa} \\
w_{e.s.7.160} &:= q_p(z_{\text{external.s7}}) \cdot C_{p.e.wall}(160\text{deg}) \cdot \gamma_Q = -442.08255 \text{ Pa} \\
w_{e.s.8.160} &:= q_p(z_{\text{external.s8}}) \cdot C_{p.e.wall}(160\text{deg}) \cdot \gamma_Q = -447.0866 \text{ Pa} \\
w_{e.s.9.160} &:= q_p(z_{\text{external.s9}}) \cdot C_{p.e.wall}(160\text{deg}) \cdot \gamma_Q = -451.89072 \text{ Pa} \\
w_{e.s.10.160} &:= q_p(z_{\text{external.s10}}) \cdot C_{p.e.wall}(160\text{deg}) \cdot \gamma_Q = -456.51103 \text{ Pa} \\
w_{e.s.11.160} &:= q_p(z_{\text{external.s11}}) \cdot C_{p.e.wall}(160\text{deg}) \cdot \gamma_Q = -460.97048 \text{ Pa} \\
w_{e.s.12.160} &:= q_p(z_{\text{external.s12}}) \cdot C_{p.e.wall}(160\text{deg}) \cdot \gamma_Q = -463.11876 \text{ Pa} \\
w_{e.s.13.160} &:= q_p(z_{\text{external.s13}}) \cdot C_{p.e.wall}(160\text{deg}) \cdot \gamma_Q = -465.22983 \text{ Pa} \\
w_{e.s.14.160} &:= q_p(z_{\text{external.s14}}) \cdot C_{p.e.wall}(160\text{deg}) \cdot \gamma_Q = -467.30504 \text{ Pa} \\
w_{e.s.15.160} &:= q_p(z_{\text{external.s15}}) \cdot C_{p.e.wall}(160\text{deg}) \cdot \gamma_Q = -469.34562 \text{ Pa} \\
w_{e.s.16.160} &:= q_p(z_{\text{external.s16}}) \cdot C_{p.e.wall}(160\text{deg}) \cdot \gamma_Q = -471.77204 \text{ Pa}
\end{aligned}$$

#### **HOPPER Angle 0 deg - 40 deg (FRONT), calculated at angle 0 deg**

$$\begin{aligned}
w_{e.h.1.0} &:= q_p(z_{\text{external.h1}}) \cdot C_{p.e.wall}(0\text{deg}) \cdot \gamma_Q = 2.10676 \times 10^{-3} \cdot \text{MPa} \\
w_{e.h.2.0} &:= q_p(z_{\text{external.h2}}) \cdot C_{p.e.wall}(0\text{deg}) \cdot \gamma_Q = 2.15432 \times 10^3 \text{ Pa} \\
w_{e.h.3.0} &:= q_p(z_{\text{external.h3}}) \cdot C_{p.e.wall}(0\text{deg}) \cdot \gamma_Q = 2.19858 \times 10^3 \text{ Pa} \\
w_{e.h.4.0} &:= q_p(z_{\text{external.h4}}) \cdot C_{p.e.wall}(0\text{deg}) \cdot \gamma_Q = 2.23998 \times 10^3 \text{ Pa} \\
w_{e.h.5.0} &:= q_p(z_{\text{external.h5}}) \cdot C_{p.e.wall}(0\text{deg}) \cdot \gamma_Q = 2.24896 \times 10^3 \text{ Pa}
\end{aligned}$$

#### **HOPPER Angle 40 deg - 140 deg (SIDE), calculated at angle 90 deg**

$$\begin{aligned}
w_{e.h.1.90} &:= q_p(z_{\text{external.h1}}) \cdot C_{p.e.wall}(90\text{deg}) \cdot \gamma_Q = -3.80988 \times 10^3 \text{ Pa} \\
w_{e.h.2.90} &:= q_p(z_{\text{external.h2}}) \cdot C_{p.e.wall}(90\text{deg}) \cdot \gamma_Q = -3.89589 \times 10^3 \text{ Pa} \\
w_{e.h.3.90} &:= q_p(z_{\text{external.h3}}) \cdot C_{p.e.wall}(90\text{deg}) \cdot \gamma_Q = -3.97592 \times 10^3 \text{ Pa} \\
w_{e.h.4.90} &:= q_p(z_{\text{external.h4}}) \cdot C_{p.e.wall}(90\text{deg}) \cdot \gamma_Q = -4.05078 \times 10^3 \text{ Pa} \\
w_{e.h.5.90} &:= q_p(z_{\text{external.h5}}) \cdot C_{p.e.wall}(90\text{deg}) \cdot \gamma_Q = -4.06704 \times 10^3 \text{ Pa}
\end{aligned}$$

**HOPPER Angle 140 deg - 180 deg (REAR), calculated at angle 160 deg**

$$w_{e.h.1.160} := q_p(z_{\text{external.h1}}) \cdot C_{p.e.wall}(160\text{deg}) \cdot \gamma_Q = -3.75898 \times 10^{-4} \cdot \text{MPa}$$

$$w_{e.h.2.160} := q_p(z_{\text{external.h2}}) \cdot C_{p.e.wall}(160\text{deg}) \cdot \gamma_Q = -384.3839 \text{ Pa}$$

$$w_{e.h.3.160} := q_p(z_{\text{external.h3}}) \cdot C_{p.e.wall}(160\text{deg}) \cdot \gamma_Q = -392.27982 \text{ Pa}$$

$$w_{e.h.4.160} := q_p(z_{\text{external.h4}}) \cdot C_{p.e.wall}(160\text{deg}) \cdot \gamma_Q = -399.66602 \text{ Pa}$$

$$w_{e.h.5.160} := q_p(z_{\text{external.h5}}) \cdot C_{p.e.wall}(160\text{deg}) \cdot \gamma_Q = -401.27001 \text{ Pa}$$

**SILO ROOF WIND LOADS**

Wind loads affecting to the silo roof are calculated so that roof is divided to 4 sections and wind pressure is linearly interpolated to the middle of the sections. Areas of the sections are estimated using 3D CAD. Pressure loads are converted to force loads with horizontal and vertical components and applied to the upmost edge of the silo wall. Wind effect on the roof is quite minor, so estimated values are used.

$$A_{\text{roofsection1}} := 5.6\text{m}^2$$

$$A_{\text{roofsection2}} := 8.1\text{m}^2$$

$$A_{\text{roofsection3}} := 8.1\text{m}^2$$

$$A_{\text{roofsection4}} := 5.6\text{m}^2$$

Inclination angle of the roof (*estimated* from CAD model)

$$\alpha_{\text{roof}} := 5\text{deg}$$

**Roof wind loads in the 1st section (front)**

$$w_{e.roof.1} := q_p(h_{\text{structure}}) \cdot \left[ C_{p.e.roof.B} + \frac{3}{4} \cdot (C_{p.e.roof.A} - C_{p.e.roof.B}) \right] \cdot \gamma_Q = -3.44654 \times 10^{-3} \cdot \text{MPa}$$

$$F_{e.roof1.hor} := A_{\text{roofsection1}} \cdot w_{e.roof.1} \cdot \sin(\alpha_{\text{roof}}) = -1.68216 \times 10^3 \text{ N}$$

$$F_{e.roof1.vert} := A_{\text{roofsection1}} \cdot w_{e.roof.1} \cdot \cos(\alpha_{\text{roof}}) = -1.92272 \times 10^4 \text{ N}$$

**Roof wind loads in the 2nd section (front)**

$$w_{e.roof.2} := q_p(h_{\text{structure}}) \cdot \left[ C_{p.e.roof.B} + \frac{1}{4} \cdot (C_{p.e.roof.A} - C_{p.e.roof.B}) \right] \cdot \gamma_Q = -2.12659 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$F_{e.roof2.hor} := A_{\text{roofsection2}} \cdot w_{e.roof.2} \cdot \sin(\alpha_{\text{roof}}) = -1.50129 \times 10^3 \text{ N}$$

$$F_{e,\text{roof}2,\text{vert}} := A_{\text{roofsection}2} \cdot w_{e,\text{roof}2} \cdot \cos(\alpha_{\text{roof}}) = -1.71598 \times 10^4 \text{ N}$$

#### Roof wind loads in the 3rd section (rear)

$$w_{e,\text{roof}3} := q_p(h_{\text{structure}}) \cdot \left[ C_{p,e,\text{roof}3,C} + \frac{3}{4} \cdot (C_{p,e,\text{roof}3,B} - C_{p,e,\text{roof}3,C}) \right] \cdot \gamma_Q = -1.46661 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$F_{e,\text{roof}3,\text{hor}} := A_{\text{roofsection}3} \cdot w_{e,\text{roof}3} \cdot \sin(\alpha_{\text{roof}}) = -1.03537 \times 10^3 \text{ N}$$

$$F_{e,\text{roof}3,\text{vert}} := A_{\text{roofsection}3} \cdot w_{e,\text{roof}3} \cdot \cos(\alpha_{\text{roof}}) = -1.18344 \times 10^4 \text{ N}$$

#### Roof wind loads in the 4rd section (rear)

$$w_{e,\text{roof}4} := q_p(h_{\text{structure}}) \cdot \left[ C_{p,e,\text{roof}4,C} + \frac{1}{4} \cdot (C_{p,e,\text{roof}4,B} - C_{p,e,\text{roof}4,C}) \right] \cdot \gamma_Q = -1.46661 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$F_{e,\text{roof}4,\text{hor}} := A_{\text{roofsection}4} \cdot w_{e,\text{roof}4} \cdot \sin(\alpha_{\text{roof}}) = -715.81268 \text{ N}$$

$$F_{e,\text{roof}4,\text{vert}} := A_{\text{roofsection}4} \cdot w_{e,\text{roof}4} \cdot \cos(\alpha_{\text{roof}}) = -8.18178 \times 10^3 \text{ N}$$

#### Internal pressure (lower pressure) in the silo:

$$w_{\text{inside}} := q_p(h_{\text{structure}}) C_{p,i,\text{wall}} \cdot \gamma_Q = 1.17329 \times 10^{-3} \cdot \text{MPa}$$

## **BUCKLING CALCULATIONS (EN 1993-1-6)**

### **Wind load LC3 a**

Elastic critical buckling resistance ratio is obtained from FEM analysis

$$r_{Rcr\_WE} := 5.73$$

Plastic reference resistance value can be conservatively approximated and is calculated from EN 1993-1-6 Eq. 8.24. The stresses are obtained from FEM. Stresses are three buckling relevant membrane stresses from the location where buckling is predicted to happen.

$$r_{Rpl\_WE} := \frac{f_{y355}}{12\text{MPa}} = 29.58333$$

The overall relative slenderness for the shell is determined from EN 1993-1-6 Eq. 8.25

$$\lambda_{ov\_WE} := \sqrt{\frac{r_{Rpl\_WE}}{r_{Rcr\_WE}}} = 2.2722$$

Following parameters are taken from EN 1993-1-6 Annex D)

Squash limit relative slenderness:

$$\lambda_0 := 0.2$$

Plastic range factor

$$\beta_b := 0.60$$

Interaction exponent

$$\eta_b := 1$$

Elastic imperfection reduction factor

$$\alpha := 0.5$$

Plastic limit relative slenderness (EN 1993-1-6 Eq. 8.16)

$$\lambda_{p\_WE} := \sqrt{\frac{\alpha}{1 - \beta_b}} = 1.11803$$

Buckling reduction factor (EN 1993-1-6 Eq. 8.14)

$$\chi_{\_WE} := \frac{\alpha}{\lambda_{ov\_WE}^2} = 0.09685$$

Characteristic buckling resistance ratio (EN 1993-1-6 Eq. 8.26)

$$r_{Rk\_WE} := \chi_{WE} \cdot r_{Rpl\_WE}$$

The design buckling resistance value (EN 1993-1-6 Eq. 8.27) should be bigger than 1

$$r_{Rd\_WE} := \frac{r_{Rk\_WE}}{\gamma_{M1}} = 2.60455$$

### Discharge LC3 b

Elastic critical buckling resistance ratio is obtained from FEM analysis

$$r_{Rcr\_D} := 4.12$$

Plastic reference resistance value can be conservatively approximated and is calculated from EN 1993-1-6 Eq. 8.24. The stresses are obtained from FEM. Stresses are three buckling relevant membrane stresses from the location where buckling is predicted to happen.

$$r_{Rpl\_D} := \frac{f_{y355}}{105\text{MPa}} = 3.38095$$

The overall relative slenderness for the shell is determined from EN 1993-1-6 Eq. 8.25

$$\lambda_{ov\_D} := \sqrt{\frac{r_{Rpl\_D}}{r_{Rcr\_D}}} = 0.90588$$

Plastic limit relative slenderness (EN 1993-1-6 Eq. 8.16)

$$\lambda_{p\_D} := \sqrt{\frac{\alpha}{1 - \beta_b}} = 1.11803$$

Buckling reduction factor (EN 1993-1-6 Eq. 8.14)

$$\chi_{D} := 1 - \beta_b \cdot \left( \frac{\lambda_{ov\_D} - \lambda_0}{\lambda_{p\_D} - \lambda_0} \right)^{\eta_b}$$

Characteristic buckling resistance ratio (EN 1993-1-6 Eq. 8.26)

$$r_{Rk\_D} := \chi_{D} \cdot r_{Rpl\_D}$$

The design buckling resistance value (EN 1993-1-6 Eq. 8.27) should be bigger than 1

$$r_{Rd\_D} := \frac{r_{Rk\_D}}{\gamma_{M1}} = 1.65561$$

### **BUCKLING CALCULATIONS (EN 1993-1-1)**

#### **Earthquake LC3 c**

The stress is obtained from FEM. Stress is buckling relevant membrane stress from the location where buckling is predicted to happen. Maximum stress is used in this calculation.

$$\sigma_{\text{prim}} := 396 \text{MPa}$$

$$\alpha_{\text{yield}} := \frac{f_{y420}}{\sigma_{\text{prim}}} = 1.06061$$

$$\chi_{\text{lim}} := \frac{1}{\alpha_{\text{yield}}} = 0.94286$$

$\alpha$  from EN 1993-1-1 table 6.2 and table 6.1. 0.49 is used for conservative result.

$$\alpha_{\text{SF}} := 0.49$$

EN 1993-1-1 Eq. 6.49

$$f(\lambda) := \frac{1}{\lambda^2} \quad \phi(\lambda) := \left(\frac{1}{2}\right) \cdot [1 + \alpha_{\text{SF}} \cdot (\lambda - 0.2) + \lambda^2]$$

$$k(\lambda) := \frac{1}{\phi(\lambda) + \sqrt{\phi(\lambda)^2 - \lambda^2}}$$

Given

$$\frac{k(\lambda)}{\chi_{\text{lim}}} = 1$$

$$\text{Find}(\lambda) \rightarrow 0.312311116840131517$$

Load multiplier for global stability.

$$\alpha_{cr\_lim} := \frac{\alpha_{yield}}{0.312^2} = 10.89544$$

Structures global stability is ensured if there is not any global buckling modes below this load multiplier. Over 600 buckling modes where investigated and any fatal global buckling modes where found. Global stability is satisfied.

### **FATIGUE CALCULATIONS FOR SUPPORT STRUCTURE (EN 1993-1-9)**

Case 1:

Endurance should be more than 10 000 cycles (same as silo)

$$N_{R1} := 10000$$

Partial factor for equivalent constant amplitude stress range (EN 1993-1-9 Table 3.1)  
Damage tolerant / high consequence.

$$\gamma_{Ff1} := 1.15$$

Fatigue class for these structural details in the support structure (EN 1993-1-9 Tables 8.6)

$$\Delta\sigma_{c1} := 45\text{MPa}$$

Maximum stress range to achieve endurance  $N_{R1}$  (EN 1993-1-9 Section 7.1 (3))

$$\Delta\sigma_{R1} := \frac{\sqrt[3]{\left(\frac{\Delta\sigma_{c1}}{\gamma_{M6}}\right)^3 \cdot \frac{2 \cdot 10^6}{N_{R1}}}}{\gamma_{Ff1}} = 208.03288 \cdot \text{MPa}$$

Stress range in these regions is lower than maximum stress range.  
Fatigue OK!

### **FATIGUE CALCULATIONS FOR SUPPORT STRUCTURE (EN 1993-1-9)**

Case 2:

Endurance should be more than 10 000 cycles (same as silo)

$$N_{R2} := 10000$$

Partial factor for equivalent constant amplitude stress range (EN 1993-1-9 Table 3.1)  
Damage tolerant / high consequence.

$$\gamma_{Ff2} := 1.15$$

Fatigue class for these structural details in the support structure (EN 1993-1-9 Tables 8.4)

$$\Delta\sigma_{c2} := 56\text{MPa}$$

Maximum stress range to achieve endurance  $N_{R2}$  (EN 1993-1-9 Section 7.1 (3))

$$\Delta\sigma_{R2} := \frac{\sqrt[3]{\left(\frac{\Delta\sigma_{c2}}{\gamma_{M6}}\right)^3 \cdot \frac{2 \cdot 10^6}{N_{R2}}}}{\gamma_{Ff2}} = 258.88536 \cdot \text{MPa}$$

Stress range in these regions is lower than maximum stress range.  
Fatigue OK!

### **FATIGUE CALCULATIONS FOR SUPPORT STRUCTURE (EN 1993-1-9)**

Case 3:

Endurance should be more than 10 000 cycles (same as silo)

$$N_{R3} := 10000$$

Partial factor for equivalent constant amplitude stress range (EN 1993-1-9 Table 3.1)  
Damage tolerant / high consequence.

$$\gamma_{Ff3} := 1.15$$

Fatigue class for these structural details in the support structure (EN 1993-1-9 Tables 8.7)

$$\Delta\sigma_{c3} := 53.5\text{MPa}$$

Maximum stress range to achieve endurance  $N_{R3}$  (EN 1993-1-9 Section 7.1 (3))

$$\Delta\sigma_{R3} := \frac{\sqrt[3]{\left(\frac{\Delta\sigma_{c3}}{\gamma_{M6}}\right)^3 \cdot \frac{2 \cdot 10^6}{N_{R3}}}}{\gamma_{Ff3}} = 247.32798 \cdot \text{MPa}$$

Stress range in these regions is lower than maximum stress range.  
Fatigue OK!