

Modelvorming van stalen silo's

Berekeningen van de verplaatsingen en de kolomkrachten onder invloed van een horizontale belasting met het gebruik van analyseprogramma's en dynamische modellen

Geschreven door:
Mohammad Suleiman Noor
Delft, 04-09-2017
Technische Universiteit Delft

Begeleiders:
Dr.ir. P.C.J. Hoogenboom
Ir. A. Schroten

Voorwoord

Voor u ligt het onderzoeksrapport 'Aardbevingen en silo's'. Dit onderzoek is geschreven in het kader bachelor eindwerk voor de studie Civiele techniek aan de TU Delft. Samen met mijn begeleider, Dr.ir. P.C.J. Hoogenboom, heb ik de onderzoeksvraag voor deze scriptie bedacht. Na uitvoerig onderzoek is deze onderzoeksvraag beantwoord. Tijdens dit onderzoek stonden mijn begeleider van uit de opleiding, Dr.ir. P.C.J. Hoogenboom, en mijn begeleider vanuit de opdrachtgever, Ir. A. Schroten, voor mij klaar. Zij hebben steeds mijn vragen beantwoord en geadviseerd waar nodig, waardoor ik verder kon met mijn onderzoek. Bij deze wil ik mijn begeleiders bedanken voor hun hulp.

Mohammad Suleiman Noor

28-10-2017

Inhoudsopgave

LIJST VAN TABELLEN EN FIGUREN	- 4 -
SAMENVATTING	- 7 -
1. INLEIDING	- 8 -
PLANNING	- 10 -
2. LITERATUURONDERZOEK	- 11 -
2.1 HANDBEREKENING VAN REIMBERT & REIMBERT	- 11 -
2.1.1 <i>Normaalkracht in kolommen</i>	- 11 -
2.2 HANDBEREKENING IN DE PRAKTIJK	- 13 -
2.3 VERGELIJKING HANDBEREKENING VAN REIMBERT & REIMBERT MET DE HANDBEREKENING IN DE PRAKTIJK ..	- 18 -
3. MODELLEREN MET STRUCTUREEL ANALYSEPROGRAMMA'S	- 19 -
3.1 MATRIXFRAME	- 19 -
3.2 SCIA ENGINEER	- 22 -
3.3 VERGELIJKING RESULTATEN MATRIXFRAME EN SCIA ENGINEER	- 24 -
3.4 VERKLARING VERSCHIL	- 25 -
4. WANDELEMENT MODELLEREN MET SCIA ENGINEER	- 26 -
4.1 SCIA-ENGINEER MODEL MET GLADWANDELEMENTEN (GWS)	- 26 -
4.1.1 <i>Model met 1 eindig element (GWS)</i>	- 28 -
4.1.2 <i>Model met 4 en 216 eindige elementen (GWS)</i>	- 30 -
4.1.3 <i>Model met 864 eindige elementen (GWS)</i>	- 30 -
4.2 MOGELIJKE VERKLARING VERSCHIL RESULTATEN VAN HET MODEL MET GLADWANDELEMENTEN (GWS) MET HET MODEL MET DIAGONALEN	- 34 -
4.3 INVLOED SCHUIFWEERSTAND TUSSEN (GWS) WANDELEMENTEN	- 35 -
4.4 VERGELIJKING SCIA ENGINEERMODEL MET WANDELEMENTEN MET MATRIXFRAME MODEL MET STIJFHEID ..	- 38 -
4.5 SCIA ENGINEER MODEL MET PROFIELWANDELEMENTEN (PWS)	- 41 -
5. DYNAMISCHE ASPECT AARDBEVING OP SILO	- 42 -
5.1 MODELFORMING	- 42 -
5.1.1 <i>Model met één vrijheidsgraad</i>	- 42 -
5.1.2 <i>Vergelijkingen opstellen</i>	- 43 -
5.1.3 <i>Parameters vergelijking</i>	- 43 -
5.2 OPLOSSEN EVENWICHTSVERGELIJKING	- 45 -
5.2.1 <i>Numeriek oplossen evenwichtsvergelijking met sinusfunctie voor agrond</i>	- 47 -
5.2.2 <i>Oplossen evenwichtsvergelijking met realistische aardbevingssignalen voor agrond</i> ..	- 50 -
6. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	- 54 -
6.1 ALGEMENE CONCLUSIES	- 54 -
6.2 CONCLUSIE OVER HET MODEL MET WANDELEMENTEN EN DE HANDBEREKENING	- 54 -
6.3 CONCLUSIE OVER DE MODELLEN MET WANDELEMENTEN EN DIAGONALEN	- 54 -
6.4 CONCLUSIE OVER HET EFFECT VAN DE AFSCHUIFWEERSTAND	- 54 -
6.5 CONCLUSIE OVER DE VERGELIJKING SCIA ENGINEERMODEL MET WANDELEMENTEN MET MATRIXFRAME MODEL MET STIJFHEID	- 55 -
6.5 CONCLUSIE OVER HET DYNAMISCH MODEL	- 55 -
AANBEVELINGEN	- 55 -
BIBLIOGRAFIE	- 56 -
BIJLAGE A: SILOSISTEEM	- 57 -
BIJLAGE B: BELASTINGEN	- 60 -
BIJLAGE C: RESULTATEN 4 EN 216 EINDIGE ELEMENTEN	- 64 -

BIJLAGE D: RESULTATEN TEST HALVE E-MODULUS.....	- 67 -
BIJLAGE E: MATLAB SCRIPT.....	- 69 -
BIJLAGE F: HET GEBRUIK VAN SCIA-ENGINEER OP MAC-OS	- 71 -

Lijst van tabellen en figuren

Tabel 1 - Eigenschappen van elementen gebruikt in de Mechanicamodel van Matrix-frame (Kapteijn, 2017).	- 20 -
-	
Tabel 2 - Vergelijking van de resultaten van het mechanicamodel, zoals weergegeven in figuur 7 met de resultaten van de handberekening met de positieve y-richting omhoog en positieve x-richting naar rechts.	- 20 -
Tabel 3 - Vergelijking van de resultaten van de oplegreacties van het mechanicamodel gemodelleerd met SCIA-Engineer met de resultaten van het mechanica model van MatrixFrame.	- 24 -
Tabel 4 - Resultaten van de verplaatsing gevonden met het programma SCIA Engineer vergeleken met de resultaten van de verplaatsing gevonden met het programma MatrixFrame.	- 24 -
Tabel 5 - Eigenschappen van elementen gebruikt in de Mechanicamodel van Matrix-frame (Kapteijn, 2017).	- 26 -
-	
Tabel 6 - Vergelijking resultaten van de modellen met diagonalen en wandelement (met 1 eindig element). Beide modellen gemodelleerd met SCIA-Engineer.	- 29 -
Tabel 7 - Vergelijking resultaten voor de verplaatsing van de modellen met diagonalen en wandelement (met 1 eindig element). Beide modellen gemodelleerd met SCIA Engineer.	- 30 -
Tabel 8 - Vergelijking resultaten van de modellen met wandelement wandelement met 1 eindig element en 864 eindige elementen. Beide modellen gemodelleerd met SCIA Engineer.	- 31 -
Tabel 9 - Vergelijking resultaten voor de verplaatsing van de modellen met wandelementen (1 eindig element met 864 eindige elementen). Beide zijn modellen gemodelleerd met SCIA Engineer.	- 31 -
Tabel 10 - Vergelijking resultaten van de modellen met diagonalen en wandelementen (met 864 eindige elementen). Beide modellen zijn gemodelleerd met SCIA Engineer.	- 32 -
Tabel 11 - Vergelijking resultaten voor de verplaatsing van de modellen met diagonalen en wandelement (met 864 eindige elementen). Beide modellen zijn gemodelleerd met SCIA Engineer.	- 32 -
Tabel 12 - Vergelijking resultaten van het model met wandelementen (met 864 eindige elementen) met de handberekening uit Hoofdstuk 2. Gemodelleerd met SCIA Engineer.	- 33 -
Tabel 13 - Vergelijking resultaten van de modellen met wandelementen koud op elkaar gestapeld en wandelementen met een leegte van 5 millimeter boven elk wandelement (met 864 eindige elementen).	- 36 -
Tabel 14 - Vergelijking resultaten voor de verplaatsing van de modellen met wandelementen koud op elkaar gestapeld en wandelement met een leegte van 5 millimeter boven elk wandelement (met 864 eindige elementen).	- 37 -
Tabel 15 - Vergelijking resultaten van het model met wandelementen met een leegte van 5 millimeter boven elk wandelement (met 864 eindige elementen) met de handberekening.	- 37 -
Tabel 16 - Vergelijking resultaten van het mechanicamodel met wandelementen (met 864 eindige elementen) in SCIA Engineer met het mechanicamodel in MatrixFrame uit het onderzoek van Kapteijn (2017).	- 40 -
Tabel 17 - Verschil verplaatsing statische en dynamische verplaatsing.	- 53 -
Tabel 18 - Verschil in de resultaten van de referentiewaarde en de onstante veerkracht.	- 53 -
Tabel 19 - Vergelijking resultaten van het model met diagonalen met het model met wandelementen (met 1 eindig element). Beide gemodelleerd in SCIA Engineer.	- 64 -
Tabel 20 - Vergelijking resultaten van het model met diagonalen met het model met wandelementen (met 1 eindig element). Beide gemodelleerd in SCIA-Engineer.	- 65 -
Tabel 21 - Vergelijking resultaten van de oplegreacties van het model met diagonalen met het model met wandelementen (met 1 eindig element).	- 66 -
Tabel 22 - Vergelijking resultaten van de verplaatsing van het model met diagonalen met het model met wandelementen (met 216 eindige elementen) in SCIA-Engineer.	- 66 -
Tabel 23 - Vergelijking resultaten van de oplegreacties tussen het model met wandelementen (met 846 eindige elementen) met een E-modulus van 2.1 GPA met het model met wandelementen (met 846 eindige elementen) met een E-modulus van 1,55 GPA.	- 67 -
Tabel 24 - Vergelijking resultaten voor de verplaatsing van het model met wandelementen met een normale E-modulus en het model waarbij de wandelementen een halve E-modulus bevatten.	- 68 -

<i>Figuur 1 - Benoeming van de palen in de onderconstructie van de silo.</i>	<i>11 -</i>
<i>Figuur 2 - Resultaten van de horizontale windlast grijpt aan op het punt bovenaan de de onderconstructie (Reimbert & Reimbert, 1976).....</i>	<i>12 -</i>
<i>Figuur 3 - Geschematiseerd model van een silo onderhevig aan een horizontale last ten gevolge van een aardbeving.</i>	<i>13 -</i>
<i>Figuur 4 -Equivalente belastingcombinaties en de krachten die in de kolommen ontstaan bij het verplaatsen van de horizontale last.</i>	<i>14 -</i>
<i>Figuur 5 - Ontbinding van de horizontale kracht ten gevolge van een aardbeving met behulp van Driehoeks verbanden.</i>	<i>15 -</i>
<i>Figuur 6 - Geschematiseerd model van de silo op vijf veren die de kolommen moeten voorstellen.</i>	<i>16 -</i>
<i>Figuur 7 - Mechanicamodel van silo onderhevig aan een horizontale puntlast ten gevolge van een aardbeving... 19 -</i>	
<i>Figuur 8 - Vervormde constructie bij een horizontale last van 854 kN. Gemodelleerd met het programma MatrixFrame.....</i>	<i>21 -</i>
<i>Figuur 9 - Mechanicamodel gemodelleerd in SCIA-Engineer.....</i>	<i>22 -</i>
<i>Figuur 10 - Mechanica-model gemodelleerd met SCIA Engineer met berekende oplegreacties ten gevolge van een horizontale last ter grootte van 854 kN.....</i>	<i>23 -</i>
<i>Figuur 11 - Verplaatsing van constructie silo ten gevolge van een horizontale last ter grootte van 854 kN in SIA Engineer.</i>	<i>23 -</i>
<i>Figuur 12 - Doorsnede gladwandpaneel</i>	<i>27 -</i>
<i>Figuur 13 - SCIA Engineermodel met wandelementen [1 eindig element].....</i>	<i>28 -</i>
<i>Figuur 14 - Resultaten oplegreacties van het SCIA Engineermodel met wandelementen [1 eindig element] met de positieve y- en x-richting afgebeeld in figuur 15.....</i>	<i>29 -</i>
<i>Figuur 15 - Resultaat verplaatsing van het SCIA Engineermodel met wandelementen [1 eindig element] ten gevolge van een horizontale puntlast ter grootte van 854 kN.</i>	<i>29 -</i>
<i>Figuur 16- Resultaat verplaatsing van het SCIA Engineermodel met wandelementen [864 eindige elementen] ten gevolge van een horizontale puntlast ter grootte van 854 kN.</i>	<i>31 -</i>
<i>Figuur 17- Resultaten oplegreacties van het SCIA Engineermodel met wandelementen [eindige elementen] met de positieve y- en x-richting afgebeeld in figuur 16.....</i>	<i>31 -</i>
<i>Figuur 18 - Visuele afbeelding van de resultaten uit tabel 11.....</i>	<i>34 -</i>
<i>Figuur 19 - Close up van het model met wandelementen.</i>	<i>35 -</i>
<i>Figuur 20 - Resultaten oplegreacties van het SCIA Engineermodel met wandelementen waarbij boven elk wandelement een leegte van 5 millimeter is aangenomen [864 eindige elementen] met de positieve y- en x-richting afgebeeld in figuur 21.</i>	<i>36 -</i>
<i>Figuur 21 - Resultaat verplaatsing van het SCIA Engineermodel met wandelementen waar boven elk wandelement een leegte van 5 millimeter is aangenomen [864 eindige elementen] ten gevolge van een horizontale puntlast ter grootte van 854 kN.</i>	<i>36 -</i>
<i>Figuur 22 - Tweedimensionaal MatrixFrame model van het GWS-systeem met een horizontale verdeelde belasting naar links ten gevolge van een aardbeving (Kapteijn, 2017).....</i>	<i>38 -</i>
<i>Figuur 23 - Mechanicamodel van de siloconstructie onderhevig aan een zijdelingse verdeelde belasting ten gevolge van een aardbeving. Gemodelleerd in SCIA Engineer.</i>	<i>39 -</i>
<i>Figuur 24 - Resultaten van de oplegreacties van de siloconstructie onderhevig aan een zijdelingse verdeelde belasting als weergegeven in figuur 21.....</i>	<i>39 -</i>
<i>Figuur 25 - Geschematiseerd model van de silo met massa M1, onderhevig aan een horizontale last ten gevolge van een aardbeving, met de draagconstructie gemodelleerd als een veer met veerstijfheid K1.</i>	<i>43 -</i>
<i>Figuur 26 - Resultaat van het in figuur 21 gevonden verplaatsing gesplitst in componenten.</i>	<i>44 -</i>
<i>Figuur 27 - Resultaat van de verplaatsing van het SCIA Engineermodel met wandelementen (864 eindige elementen) ten gevolge van een horizontale last van 100 kN.....</i>	<i>44 -</i>
<i>Figuur 28 - Plot van Python script oplossing evenwichtsvergelijking. Boven: de resultaten gevonden voor een tijdsplan van 2 seconden, onder: de resultaten gevonden voor een tijdsplan van 2 seconden.....</i>	<i>49 -</i>
<i>Figuur 29 - Plot van MATLAB-script oplossing evenwichtsvergelijking. Op de verticale as de verplaatsing in mm .- 50 -</i>	
<i>Figuur 30 - Aardbevingssignalen in de x-richting</i>	<i>51 -</i>
<i>Figuur 31 - Aardbevingssignalen in de y-richting</i>	<i>51 -</i>
<i>Figuur 32 - Plot van MATLAB script oplossing evenwichtsvergelijking met realistische aardbevingssignalen voor Groningen. Op de verticale as de verplaatsing in mm.....</i>	<i>52 -</i>
<i>Figuur 33 - Voorbeeld van een silo met de wandelementen koud op elkaar gestapeld</i>	<i>57 -</i>

<i>Figuur 34 - Links: structuur gladwandsilo; rechts: structuur profielwandsilo (Kapteijn, 2017).....</i>	<i>- 58 -</i>
<i>Figuur 35 - Afbeelding van een sandwichpaneel verkregen via PETKUS (2017).</i>	<i>- 59 -</i>
<i>Figuur 36 - Afbeelding van een damwandpaneel verkregen via PETKUS (2017).</i>	<i>- 59 -</i>
<i>Figuur 37 - Afbeelding van een silo</i>	<i>- 59 -</i>
<i>Figuur 37 - Equivalente mechanicamodellen met links een horizontale puntlast en rechts een zijdelingse verdeelde belasting</i>	<i>- 63 -</i>
<i>Figuur 38 - Resultaten oplegreacties van het SCIA Engineermodel met wandelementen [4 eindige elementen] met de positieve y- en x-richting afgebeeld in figuur 39.</i>	<i>- 64 -</i>
<i>Figuur 39 - Resultaat verplaatsing van het SCIA Engineermodel met wandelementen [4 eindige elementen] ten gevolge van een horizontale puntlast ter grootte van 854 kN.</i>	<i>- 64 -</i>
<i>Figuur 40 - Resultaten oplegreacties van het SCIA-Engineer model met wandelementen [216 eindige elementen] met de positieve y- en x-richting afgebeeld in figuur 41.</i>	<i>- 65 -</i>
<i>Figuur 41 - Resultaat verplaatsing van het SCIA-Engineer model met wandelementen [216 eindige elementen] ten gevolge van een horizontale puntlast ter grootte van 854 kN.</i>	<i>- 65 -</i>
<i>Figuur 42 - Resultaten oplegreacties van het SCIA Engineermodel met wandelementen waarbij de wandelementen een halve E-modulus hebben [864 eindige elementen] met de positieve y- en x-richting afgebeeld in figuur 43.</i>	<i>- 67 -</i>
<i>Figuur 43 - Resultaat verplaatsing van het SCIA Engineermodel met wandelementen waarbij de wandelementen een halve E-modulus hebben [864 eindige elementen] ten gevolge van een horizontale puntlast ter grootte van 854 kN.</i>	<i>- 67 -</i>

Samenvatting

In het onderzoek van Kapteijn (2017) is de stijfheid van de silowand onderzocht door gebruik te maken van het analyseprogramma MatrixFrame. De silowand is daarbij vervangen door diagonalen en resultaten van het model, dat geconstrueerd is en onderhevig aan een aardbevingsbelasting, zijn vergeleken met de handberekening die hedendaags in de praktijk wordt gebruikt. In dit onderzoek is een model geconstrueerd in het programma SCIA Engineer waarbij gebruikt is gemaakt van 2d eindige elementen om de wandelementen te representeren. Op dit model is een aardbevingsbelasting aangenomen en zijn de resultaten voor de oplegreacties en verplaatsingen bepaald. In dit onderzoek is ook gekeken in hoeverre reële aardbevingen in Nederland invloed hebben op de veiligheid van de silo. Dit is gedaan door een dynamisch model te construeren en op te lossen voor verschillende parameters.

Voor het statische gedeelte is begonnen met een grof model in SCIA Engineer dat de gladwandsilo moet voorstellen en is deze zo verfijnd tot een uiteindelijk model dat dichtbij komt tot de werkelijke structuur van de siloconstructie. In het model is gewerkt met 2d eindige elementen die de wandelementen representeren. Vervolgens is dit model vergeleken met het model met diagonalen uit het onderzoek van Kapteijn (2017) en met de handberekening. Verklaringen voor de verschillen die zijn ontstaan zijn hierna gegeven. Tevens is de invloed van de afschuifweerstand van de wandelementen onderzocht. Vervolgens is gegeven wat de invloed van de E-modulus is op de resultaten van de oplegreacties, om zo vast te stellen of er veel verschil zit in een model dat gladwandpanelen representeert met een model dat profielwandpanelen representeert. Er was geen tot weinig verschil in deze resultaten en daarom zijn de profielwandpanelen niet verder behandeld. Als laatste is het uiteindelijke model uit dit onderzoek vergeleken met het model dat een bepaalde stijfheid had gekregen uit het onderzoek van Kapteijn (2017). De verschillen waren significant en een mogelijke verklaring is dat er in het model uit dit onderzoek niet is gecorrigeerd voor de traagheidsmomenten van de werkelijke wandpanelen.

Voor het dynamische gedeelte is er een simpele massa-veer systeem onderhevig aan een horizontale belasting, die de aardbevingsbelasting moet voorstellen, bedacht en opgelost. Het massa-veer model resulteerde in een tweedegraads differentiaalvergelijking. Voor het oplossen van deze differentiaalvergelijking is gebruik gemaakt van de methode van Euler. Eerst is een simpele sinusfunctie aangenomen voor de aardbevingsbelasting. Vervolgens is deze vervangen door reële aardbevingssignalen. Voor beide belastingen zijn de verplaatsingen en de snelheid van de verplaatsingen tegen de tijd berekend en afgebeeld.

Uit de resultaten van het model met 2d eindige elementen en de handberekening kan worden opgemaakt dat er een significant verschil zit in de oplegreacties. Het grootste verschil is gevonden in de horizontale oplegreactie met een verschil van 63,53 kN. Uit de resultaten volgt ook dat er geen sprake is van een uniforme verdeling in het model van SCIA Engineer terwijl dit wel het geval is bij de handberekening. Voor een vervolgonderzoek is aanbevolen om te verbeteringen aan de handberekening te onderzoeken.

Uit de resultaten van het dynamisch model kan worden opgemaakt dat silo's in Nederland veilig zijn tegen de aardbevingen die hier voorkomen.

1. Inleiding

Wereldwijd worden silo's gebruikt voor de opslag van bulkgoederen. Deze silo's, die onder te verdelen zijn in profielwandsilo's en gladwandsilo's, komen dus ook voor in gebieden waar aardbevingen en hoge windbelastingen voorkomen, die resulteren in een grote horizontale belasting. In deze gebieden moeten de silo's zo geconstrueerd zijn, dat zij de krachten van deze natuurlijke fenomenen zonder problemen kunnen opnemen.

Voor dit onderzoek zijn de oplegreacties van de onderconstructie van de silo bepaald aan de hand van een 2D handberekening en wordt de profielwand als oneindig stijf aangenomen. Het vermoeden is ontstaan dat de stijfheid van de profielwand wel degelijk invloed heeft op de oplegreacties en zo dus ook de 2D-handberekening beïnvloedt.

Bij een oneindig stijve silowand gedraagt de ligger onderaan de silowand zich volgens de hypothese van Bernoulli (Hartsuijker & Welleman, 2006). Dit houdt in dat de opname van het moment resulteert in een lineair verband tussen de kolomkrachten en dat de onderregel van de silowand vervormt als een rechte lijn. Zoals eerder vermeld werd, zal het toekennen van een bepaalde stijfheid aan de profielwand mogelijk resulteren in een andere verdeling van deze normaalkrachten en dus een andere verdeling van de oplegreacties. Een beter begrip van de krachten die ontstaan in de onderconstructie van de silo's zal leiden tot een veiliger ontwerp. Dit onderwerp is in 2017 eveneens behandeld in het onderzoek van Kapteijn. Het grootste verschil met het onderzoek met Kapteijn is dat het plaalement van de silo niet is vervangen door één enkele diagonaal, maar als volledig plaalement is aangenomen.

Het doel van dit onderzoek is om de kolomkrachten in zowel profielwandsilo's als gladwandsilo's ten gevolge van een aardbevingsbelasting nauwkeurig te bepalen. Daartoe zijn twee verbeteringen aangebracht ten opzichte van voorgaande berekeningen. De eerste verbetering is dat de wanden zijn gemodelleerd met eindige elementen in plaats van diagonale staven. De tweede is dat het dynamische gedrag tevens is berekend in plaats van alleen het equivalente statische belasting.

Aanpak model met eindige elementen

De eerste stap hield kennis opdoen van het MatrixFrame-programma en SCIA Engineer-programma in, aangezien voor deze programma's is gekozen om de problemen die dit onderzoek behandelt te modelleren. Vervolgens is gekeken naar een simpel probleem, dat is uitgerekend met een handberekening in 2D. Dit probleem is vervolgens uitgewerkt met MatrixFrame en SCIA Engineer, waarna de resultaten met elkaar zijn vergeleken. In eerste instantie is de invloed van de golfstructuur die het plaalement bevat, verwaarloosd. Als laatste gedeelte van het eindige element-onderdeel zijn de resultaten van dit onderzoek vergeleken met de resultaten van het onderzoek van Kapteijn (2017).

Aanpak dynamische model

Voor het dynamische model 'Opstellen van de silo onderhevig aan grote horizontale krachten', is allereerst begonnen met een versimpeld massa-veer-systeemmodel. Om de silo te schematiseren, zijn de eigenschappen bepaald met behulp van SCIA Engineer en de verkregen algemene gegevens. Het model is uitgewerkt met formules en kennis die is opgedaan tijdens het vak 'Dynamica van systemen'. De verplaatsing in mm is als onbekende factor in de

berekeningen aangenomen om veranderingen in verplaatsingen in de tijd te kunnen bekijken en vergelijken. Vervolgens zijn de berekeningen numeriek opgelost met de Forward Eulermethode met behulp van het programma MATLAB. Vervolgens is de hele programma gecontroleerd met elementaire gevallen in het dynamicadictaat. Tot slot is het programma gebruikt om het effect van een recente aardbeving op een silo in Groningen te beschrijven. In hoofdstuk 2 zijn de twee berekeningen die met de hand gedaan beschreven en vergeleken. Een van de berekeningen stamt uit de jaren 70 en de andere wordt nog steeds in de praktijk gebruikt. In hoofdstuk 3 zijn de modellen van de verschillende programma's (MatrixFrame en SCIA Engineer) met elkaar vergeleken om zo te kijken of het programma SCIA Engineer betrouwbaar is om vervolgberekeningen mee te doen. Vervolgens is in hoofdstuk 4 de diagonalen, die gebruikt zijn in het onderzoek van Kapteijn (2017), vervangen door plaalementen in het programma SCIA Engineer. Deze moeten de wandelementen van de silo representeren. Er is begonnen met een grof model en gewerkt naar een verfijnd model. De resultaten van de modellen zijn onderling en met de resultaten van het onderzoek van Kapteijn (2017) vergeleken. Ook is in dit hoofdstuk gekeken naar het effect van de afschuifweerstand van de wandelementen. Als laatste onderdeel van dit hoofdstuk zijn de resultaten van het mechanisch model in MatrixFrame, waar in het onderzoek van Kapteijn de silowand een stijfheid kreeg, vergeleken met het mechanisch model met wandelementen in het programma SCIA Engineer. In hoofdstuk 5 is het dynamische probleem in beeld gebracht. Dit met behulp van de programma's Python en MATLAB. Tot slot zijn in hoofdstuk 6 de conclusies geformuleerd.

Planning

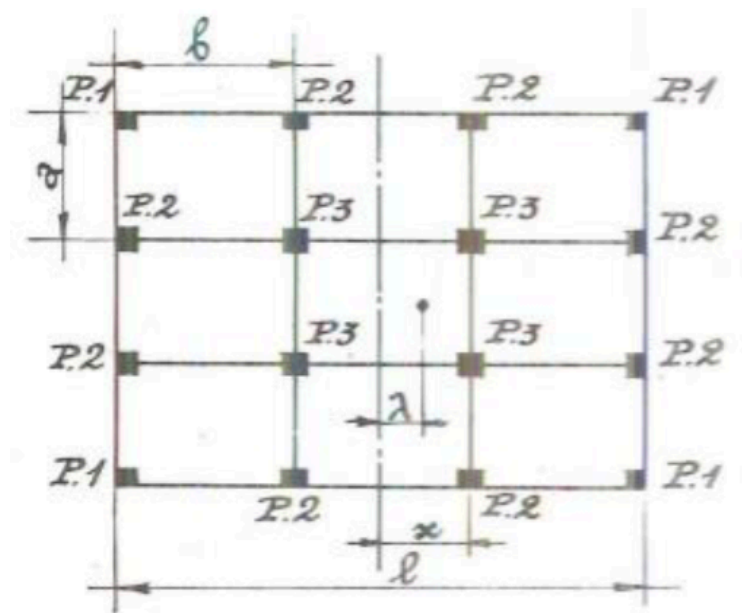
Week 1 (maandag 4 september):	Onderwerp kiezen.
Week 2 (maandag 11 september):	Startnotitie opstellen, informatie verzamelen planning opstellen.
Week 3 (maandag 18 september):	Beginnen met berekenen van de onderconstructie van de silo en deze modelleren in Matrixframe en SCIA Engineer.
Week 4 (maandag 25 september):	Resultaten vergelijken en beginnen met een dynamische model opstellen voor de silo.
Week 5 (maandag 2 oktober):	Programma voor het dynamische model zoeken en gebruiken.
Week 6 (maandag 9 oktober):	Resultaten vergelijken en opnemen in het verslag.
Week 7 (maandag 16 oktober):	Resultaten opnemen in het verslag en het eindverslag maken.
Week 8 (maandag 23 oktober):	Eindverslag afmaken en eindpresentatie voorbereiden.
Week 9 (maandag 30 oktober):	Eindpresentatie houden en verslag inleveren.

2. Literatuuronderzoek

Dit hoofdstuk gaat kort in op de handberekening van een discreet ondersteunde silo die uit de jaren 70 stamt (Reimbert & Reimbert, 1976) en op de handberekening die momenteel in de praktijk wordt gebruikt voor soortgelijke constructies. De resultaten van de twee handberekeningen worden tot slot vergeleken. Deze twee handberekeningen zijn uitvoerig behandeld in het onderzoek van Kapteijn (2017).

2.1 Handberekening van Reimbert & Reimbert

In de handberekening volgens de richtlijnen van Reimbert & Reimbert (1976) wordt onderscheid gemaakt tussen normaalkrachten in de kolommen van de onderconstructie.



Figuur 1 - Benoeming van de palen in de onderconstructie van de silo.

Daarnaast zijn ook de grootheden gebruikt voor de handberekening (λ , x , a en b) weergegeven. (Reimbert & Reimbert, 1976)

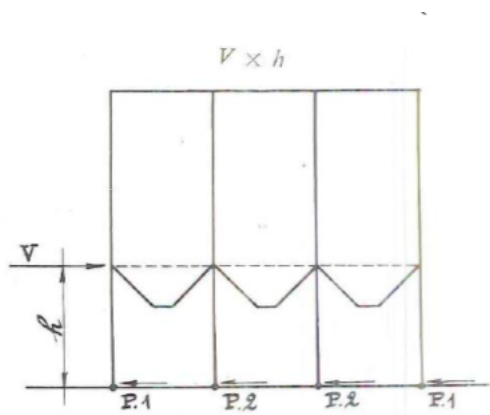
Deze normaalkrachten ontstaan ten gevolge van verticale belastingen (eigengewicht en gewicht bulkgoed) en ten gevolge van het moment veroorzaakt door een horizontale windbelasting.

2.1.1 Normaalkracht in kolommen

Normaalkracht in kolom ten gevolge van het moment

Ten gevolge van de windlast die aangrijpt op de silo ontstaat een moment M . Wanneer er een totale overspanning van 1 meter wordt beschouwd, waarbij de som van de normaalkrachten op de rij kolommen gelijk is aan ΣN , geldt voor de excentriciteit van de resultante:

$$\lambda = \frac{M}{\Sigma N} \quad - \lambda \text{ in centimeters}$$



Figuur 2 - Resultaten van de horizontale windlast grijpt aan op het punt bovenaan de de onderconstructie (Reimbert & Reimbert, 1976)

Voor de kolommen aan de zijde waar de wind aangrijpt geldt voor de oplegreactie:

$$N'' = N \left(1 - \frac{12 * \lambda * x}{l^2} \right)$$

- x = afstand tot de symmetrieliijn (afgebeeld in figuur 2.1)

Normaalkracht in kolom ten gevolge van verticale last

Voor de kolommen op de hoekpunten (P1) geldt:

$$N1 = \frac{Q * \frac{a}{2} * \frac{b}{2}}{n * a * b} = \frac{Q}{4 * n}$$

- Q = Totale verticale gewicht

- n = Het aantal cellen met een oppervlak a * b

Voor de kolommen P2 geldt:

$$N2 = \frac{Q * \frac{a * b}{2}}{n * a * b} = \frac{Q}{4 * n}$$

Voor de interne kolommen P3 geldt:

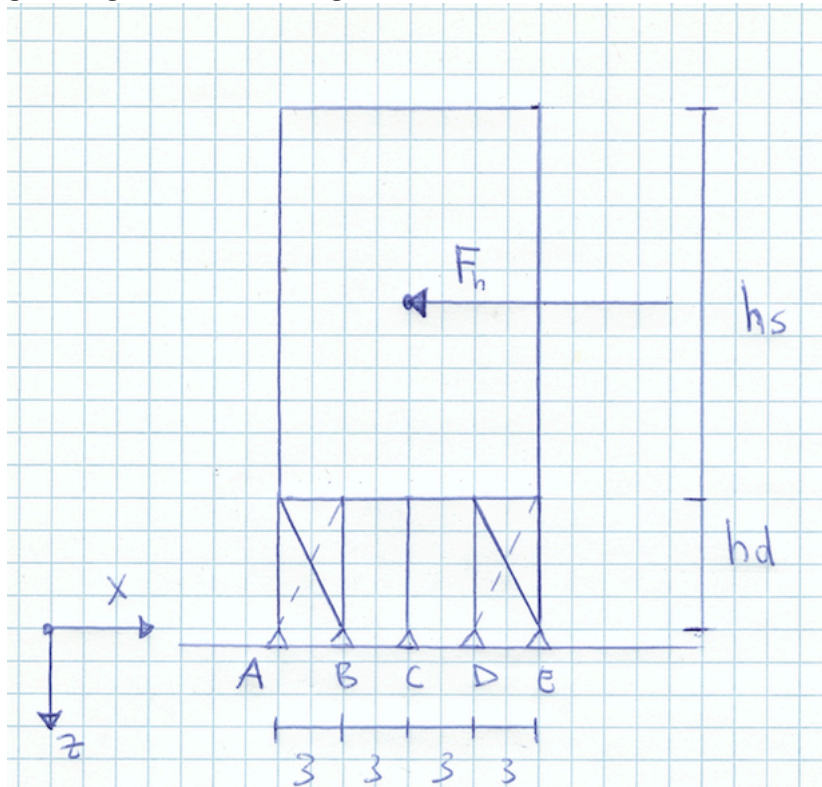
$$N1 = \frac{Q * a * b}{n * a * b} = \frac{Q}{4 * n}$$

2.2 Handberekening in de praktijk

Bij de methode dat in de praktijk wordt toegepast, wordt de silowand als een oneindig stijf element aangenomen. Dit zorgt ervoor dat er een lineair verband tussen de kolomkrachten in de draagconstructie ontstaat bij de opname van het moment. Doordat er in het mechanisch model dat voor de handberekening in de praktijk stabiliteitsverbanden aanwezig zijn, verschilt deze handberekening met de handberekening van Reimbert en Reimbert behandeld in de vorige paragraaf. Er is een horizontale last aangenomen die uniform wordt verdeeld over de stabiliteitsverbanden. Deze stabiliteitsverbanden bestaan uit de aanwezige trekdiagonalen. De drukdiagonalen dragen niets bij bij de opname van de horizontale last.

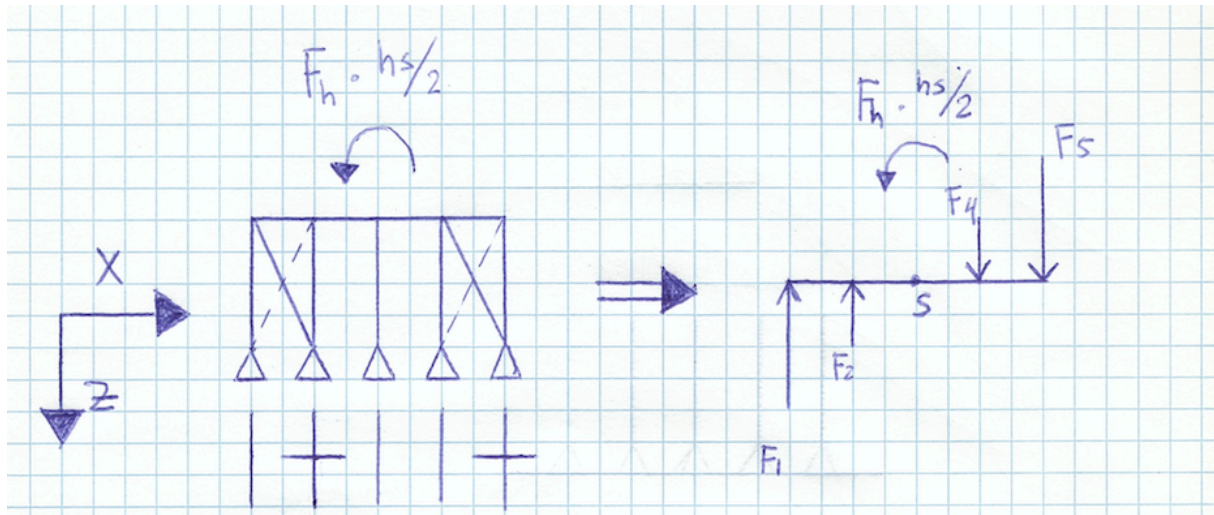
Normaalkracht in kolom ten gevolge van het moment

Voor het berekenen van de normaalkracht in de kolom ten gevolge van het moment is gebruikgemaakt van het geschematiseerd model dat hieronder afgebeeld is in figuur 3.



Figuur 3 - Geschematiseerd model van een silo onderhevig aan een horizontale last ten gevolge van een aardbeving.

h_s is de hoogte van de silo en h_d is de hoogte van de draagconstructie. De drukdiagonalen zijn gestippeld getekend aangezien deze niet bijdragen aan het opnemen van de horizontale last. In dit model is er een horizontale puntlast aangenomen genaamd F_h . Deze representeert de horizontale traagheidskracht ten gevolge van een aardbeving (Bijlage B). Deze kracht is verticaal een hoogte $h_s/2$ naar beneden verplaatst onder toevoeging van een moment linksom. De belastingcombinatie die hieruit ontstaat is afgebeeld in figuur 4. In figuur 4 zijn de nog onbekende oplegreacties ook weergegeven.



Figuur 4 -Equivalente belastingcombinaties en de krachten die in de kolommen ontstaan bij het verplaatsen van de horizontale last.

Links beeldt een equivalente belastingcombinatie zoals die in Figuur 3 af. Voor deze belastingcombinatie is de horizontale last verplaatst met een hoogte van $hs/2$ in de positieve z -richting. Om dit te mogen doen is een moment toegevoegd met grootte $F_h \cdot hs/2$. De oplegreacties zijn nog onbekend.

Rechts geeft krachten weer die in de kolommen ontstaan ten gevolge van het moment dat is toegevoegd bij het verplaatsen van de horizontale last F_h . De momentensom is om punt s genomen.

Voor deze belastingcombinatie geldt de hypothese van Bernoulli (Hartsuijker & Welleman, 2006), wat betekent dat rechte doorsneden recht blijven. Hierdoor ontstaat er tussen de kolomkrachten in de draagconstructie een lineair verband. Deze ontstaat ten gevolge van het moment. Met behulp van de formules hieronder, die ontstaan uit de momentensom besproken en afgebeeld in figuur 2.4, worden de kolomkrachten F_1 , F_2 , F_3 , F_4 en F_5 bepaald

$$F = F_1 = F_5 = 2 * F_2 = 2 * F_4$$

$$d = 2 * \left(2 * b + \frac{b}{2} \right)$$

- b = de breedte tussen de kolommen

$$F_1 = \frac{M}{d}$$

$$F_2 = \frac{F_1}{2}$$

$$F_3 = 0$$

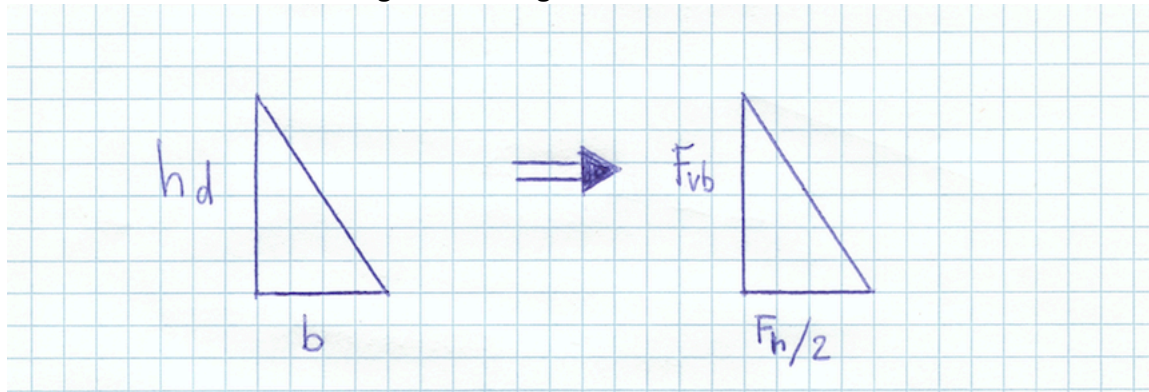
$$F_4 = -F_2$$

$$F_5 = -F_1$$

Hierbij is het assenstelsel van figuur 3 is gehanteerd.

Normaalkracht in kolom ten gevolge van de horizontale belasting

De kolomkrachten in kolommen A en D worden ook beïnvloed door de opname van de horizontale belasting. Dit komt doordat de horizontale belasting wordt opgenomen door de stabiliteitsverbanden. De grootte van deze kolomkracht is bepaald doormiddel van een simpel krachtendriehoek. Deze is afgebeeld in figuur 5.



Figuur 5 - Ontbinding van de horizontale kracht ten gevolge van een aardbeving met behulp van Driehoeks verbanden.

Links representeert de hoogte van de draagconstructie [h_d] en de breedte tussen de kolommen [b ;3m] en rechts representeert de krachten waar de verticale kracht F_{vb} uit volgt.

De oplegreacties bestaan dus uit een combinatie van de opname van het moment en een kracht die ontstaat in de kolom door de opname van de horizontale belasting. De resultaten voor de oplegreacties zijn als volgt:

$$A_v = -F_1 - \frac{hs}{b} * \frac{Fh}{2}$$
$$B_v = -F_2 + \frac{hs}{b} * \frac{Fh}{2}$$

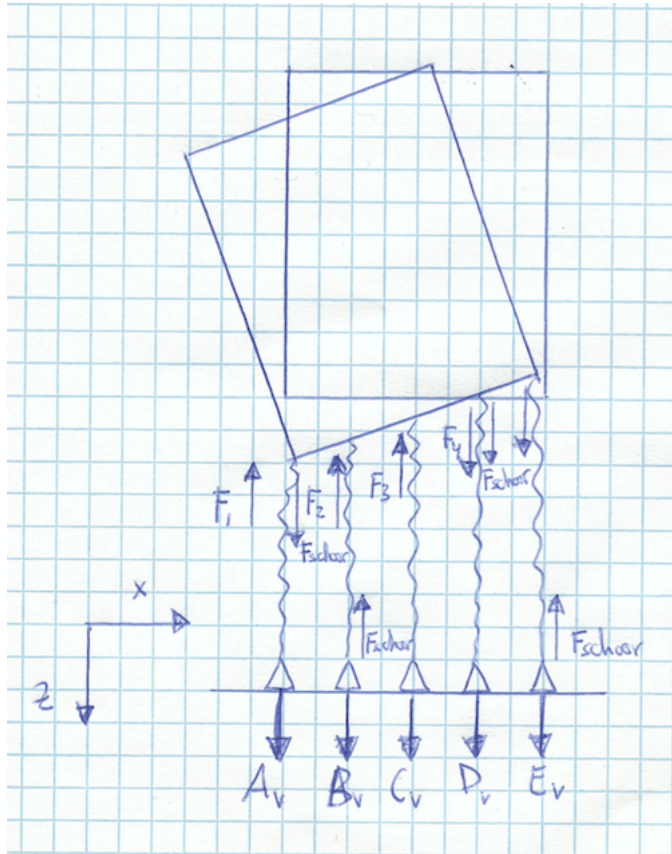
$$C_v = 0$$
$$D_v = F_4 - \frac{hs}{b} * \frac{Fh}{2}$$

$$E_v = F_5 + \frac{hs}{b} * \frac{Fh}{2}$$
$$B_h = \frac{Fh}{2}$$
$$E_h = \frac{Fh}{2}$$

Hierbij is het assenstelsel van figuur 3 is gehanteerd.

Verbeterde handberekening

In het onderzoek van Kapteijn (2017) is de handberekening verbeterd. Een constante is toegevoegd aan de kolomkrachten ten gevolge van de opname van het moment. Hierdoor ontstaat ook een kolomkracht in kolom C. De silo is hiervoor geschematiseerd als een blok op veren. Deze schematisering is afgebeeld in figuur 6. Hier nog steeds sprake van een uniforme verdeling van de horizontale belasting over de stabiliteitsverbanden.



Figuur 6 - Geschematiseerd model van de silo op vijf veren die de kolommen moeten voorstellen.

Onder de oneindig stijve silowand zijn de reactiekrachten op de silowand getekend. De stabiliteitsverbanden zorgen voor een drukkracht in de kolommen. De oplegreacties van de punten A, B, C, D, en E zijn bepaald met behulp van het programma Maple en het script en de resultaten zijn te vinden op de volgende bladzijde. Voor de horizontale kracht F_h ten gevolge van de aardbeving, is een waarde van 854 kN aangenomen. Deze representatieve waarde is bepaald in bijlage B.

$$\begin{aligned}
&restart; \\
&b := 3 \text{ m} : \\
&h_s := 18 \text{ m} : \\
&h_d := 4.5 \text{ m} : \\
&b_{tot} := 4 \cdot b = 12 \text{ m} : \\
&Fh := 854 \text{ kN} \\
&Fh := 854 \text{ kN} \tag{1}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M &:= \frac{Fh \cdot h_s}{2} \\
M &:= 7686 \text{ kN m} \tag{2}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
F1 &:= C1 + 2 \cdot F : \\
F2 &:= C1 + F : \\
F3 &:= C1 : \\
F4 &:= -C1 + F : \\
F5 &:= -C1 + 2 \cdot F :
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Fschoor &:= \left(\frac{h_d}{b} \right) \cdot \left(\frac{Fh}{2} \right) \\
Fschoor &:= 640.5000000 \text{ kN} \tag{3}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
eq1 &:= 2 \cdot Fschoor - F1 - F2 - F3 + F4 + F5 = 0 : \\
eq2 &:= -(b \cdot F2) - (2 \cdot b \cdot F1) + (2 \cdot b \cdot Fschoor) - (b \cdot F4) - (2 \cdot b \cdot F5) - b \cdot Fschoor + M = 0 : \\
sol &:= solve(\{eq1, eq2\}, \{F, C1\}); assign(sol); \\
sol &:= \{C1 = 256.2000000 \text{ kN}, F = 320.2500000 \text{ kN}\} \tag{4}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Av &:= -(F1); \\
Av &= -896.7000000 \text{ kN} \tag{5}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Bv &:= -(F2 - Fschoor); \\
Bv &= 64.0500000 \text{ kN} \tag{6}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Cv &:= -(F3) \\
Cv &= -256.2000000 \text{ kN} \tag{7}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Dv &:= F4 \\
Dv &= 64.0500000 \text{ kN} \tag{8}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Ev &:= -(-F5 - Fschoor) \\
Ev &= 1024.8000000 \text{ kN} \tag{9}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Bh &:= \frac{Fh}{2} \\
Bh &= 427 \text{ kN} \tag{10}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Eh &:= \frac{Fh}{2} \\
Eh &= 427 \text{ kN} \tag{11}
\end{aligned}$$

2.3 Vergelijking Handberekening van Reimbert & Reimbert met de handberekening in de praktijk

De verticale belasting is meegenomen in de berekening van de oplegreacties volgens Reimbert & Reimbert, waarbij in de handberekening dit niet het geval is. De silowand wordt in de handberekening als een oneindig stijf element aangenomen, wat resulteert in een lineair verband tussen de kolomkrachten ten gevolge van de opname van het moment. De opname van het moment door de kolommen is in de berekening volgens Reimbert & Reimbert afhankelijk van de normaalkracht in de kolommen ten gevolge van de verticale belasting.

De constructie, weergegeven in figuur 2, bevat in de handberekening van Reimbert & Reimbert geen stabiliteitsverbanden. De opname van de horizontale belasting wordt verricht door buigstijve kolommen en de horizontale belasting wordt niet uniform verdeeld over de kolommen in de constructie. De opname van de horizontale belasting is proportioneel met de normaalkracht in het kwadraat in de desbetreffende kolom. In de handberekening is de horizontale belasting uniform verdeeld over de aanwezige trekdiagonalen.

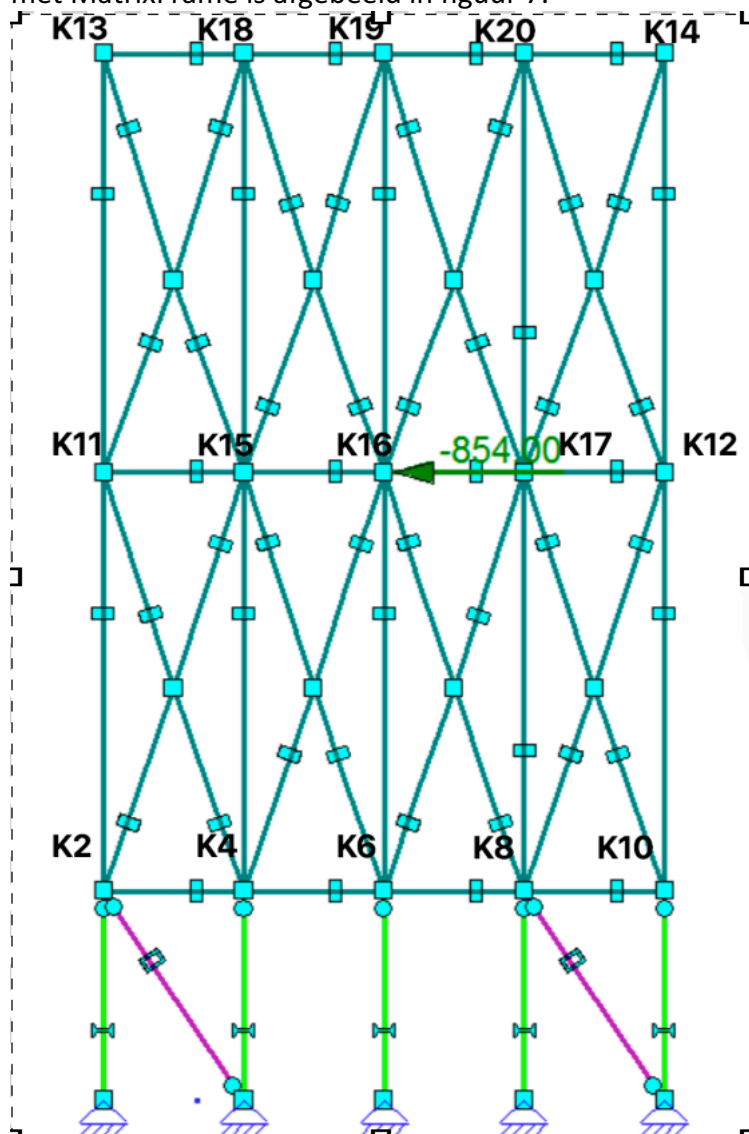
De overeenkomst tussen de beide berekeningen is dat een equivalente belastingsituatie is opgesteld. De horizontale belasting is verschoven naar de onderregel van de silowand onder toevoeging van een moment

3. Modelleren met structureel analyseprogramma's

In dit hoofdstuk is gebruik gemaakt van de programma's MatrixFrame en SCIA Engineer. Met deze programma's is de silo gemodelleerd en zijn de resultaten die verkregen zijn vergeleken met de handberekening. Omdat het niet mogelijk is om met wandelementen te werken met het programma van MatrixFrame, is de constructie met diagonalen gemodelleerd. Dit is al uitvoerig behandeld in het rapport van Kapteijn (2017) en is dan ook enkel ter controle uitgevoerd. Voor het modelleren met wandelementen is vervolgd met het programma SCIA Engineering.

3.1 MatrixFrame

Het programma MatrixFrame is in dit onderzoek gebruikt om de resultaten te vergelijken met de resultaten van het programma SCIA Engineer. De vergelijking geeft aan in welke mate de resultaten van SCIA-Engineer te gebruiken zijn voor dit onderzoek. Het model geproduceerd met MatrixFrame is afgebeeld in figuur 7.

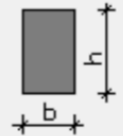
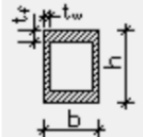
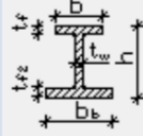


Figuur 7 - Mechanicamodel van silo onderhevig aan een horizontale puntlast ten gevolge van een aardbeving

De knopen zijn genummerd en de horizontale last ter grootte van 854 kN, ten gevolge van een aardbeving, grijpt aan in Knoop nr. 16.

De eigenschappen van het materiaal van de silo zijn overgenomen uit het rapport van Kapteijn (2017). Tabel 1 geeft deze eigenschappen weer.

Tabel 1 - Eigenschappen van elementen gebruikt in de Mechanicamodel van Matrix-frame (Kapteijn, 2017).

Constructieonderdeel	Staalsoort	Profiel	Vorm
Elementen silowand*	S355	Rechthoekig h = 1000 mm b = 1000 mm	
Trekdiagonalen onderconstructie	S355	Kokerprofiel h = 80 mm b = 80 mm t _w = 8 mm t _f = 8 mm	
Kolommen onderconstructie	S355	HEA220 b = 220 mm h = 210 mm t _w = 7 mm t _f = 11 mm	

De resultaten voor de oplegreacties van het programma zijn afgebeeld en vergeleken met de oplegreacties van de handberekening in tabel 2.

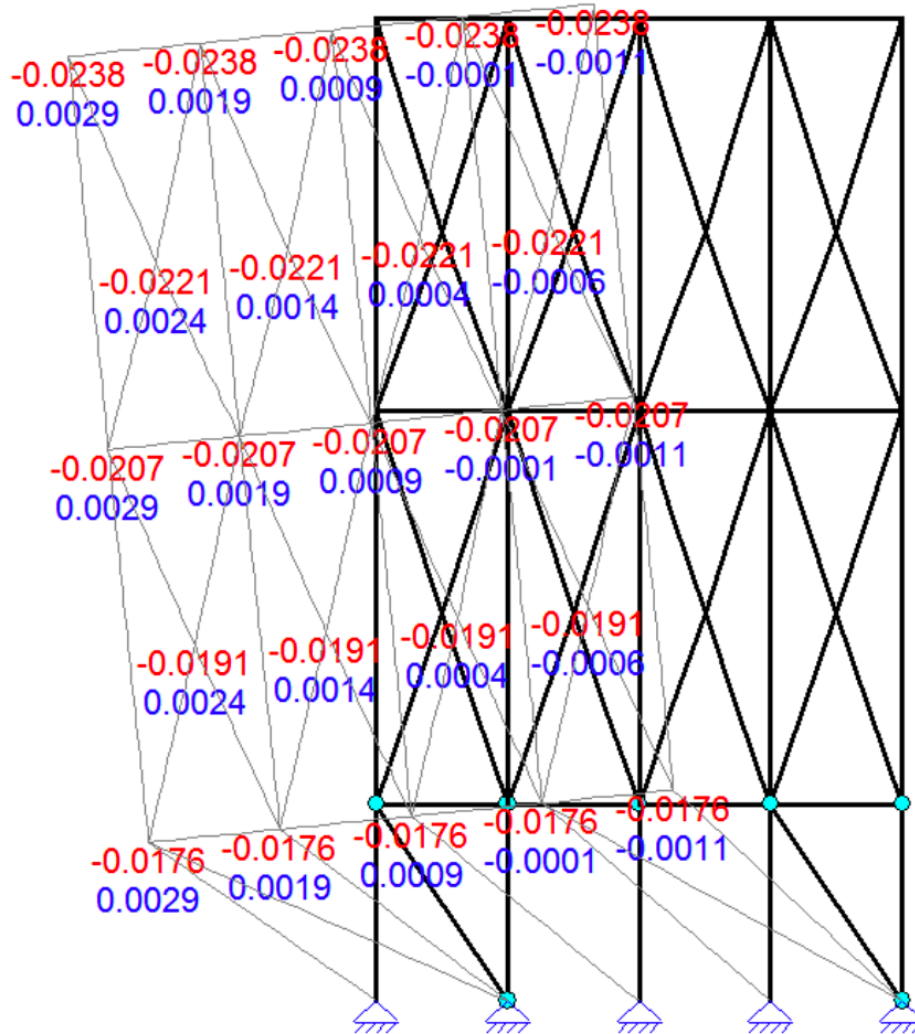
Tabel 2 - Vergelijking van de resultaten van het mechanicamodel, zoals weergegeven in figuur 7 met de resultaten van de handberekening met de positieve y-richting omhoog en positieve x-richting naar rechts.

Oplegreacties	Handberekening [kN]	MatrixFrame [kN]	Richting komt overeen?	Afwijking [kN]	Percentage [%]
Av	-896,7	-841,32	Ja	55,38	6,58
Bv	64,05	-0,27	Nee	64,32	*
Cv	-256,2	-255,23	Ja	0,97	0,38
Dv	64,05	33,57	Ja	30,48	*
Ev	1024,8	1068,25	Ja	43,45	4,07
Ah	0	0	Ja	0	0,00
Bh	427	364,09	Ja	62,91	17,28
Ch	0	0	Ja	0	0,00
Dh	0	0	Ja	0	0,00
Eh	427	489,91	Ja	62,91	12,84

* Het percentuele verschil hoog omdat de waarde van de verkregen oplegreactie van MatrixFrame erg dicht bij 0 ligt. Om deze reden is dit verschil niet meegenomen

Tabel 2 laat zien dat de grootste verschillen bestaan in de horizontale oplegreacties. Dit komt doordat het programma MatrixFrame de horizontale belasting niet uniform verdeelt over de aanwezige stabiliteitsverbanden. In de handberekening is dit namelijk wel aangenomen.

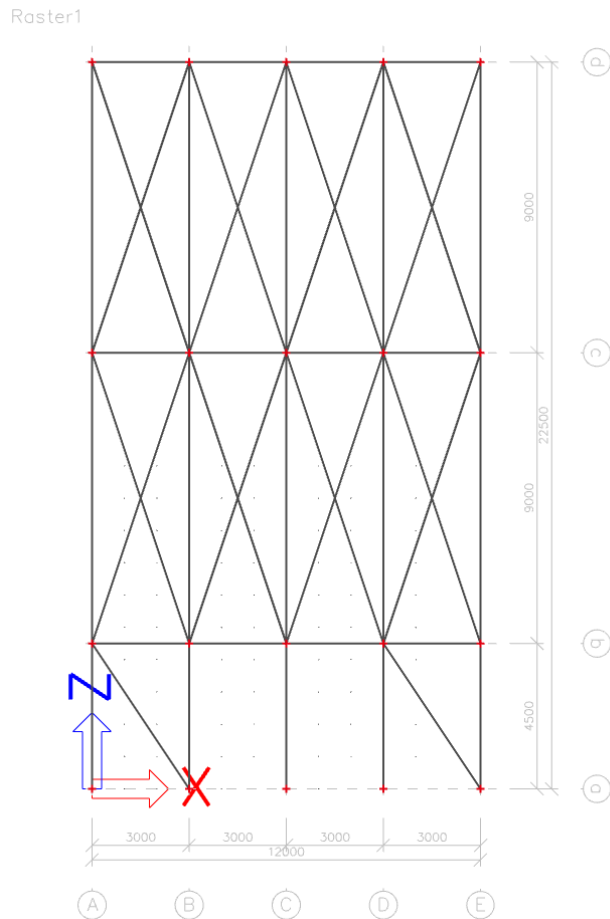
In figuur 8 is de vervormde constructie weergegeven bij een horizontale belasting.



Figuur 8 - Vervormde constructie bij een horizontale last van 854 kN. Gemodelleerd met het programma MatrixFrame.

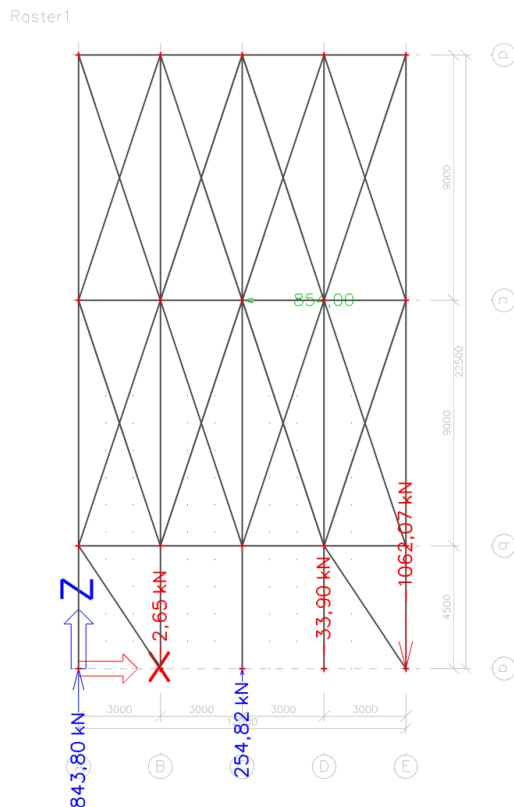
3.2 SCIA Engineer

Zoals eerder vermeld is er in dit onderzoek er voor gekozen om te modelleren met het programma SCIA Engineer, omdat dit programma de mogelijkheid geeft om met wand-elementen te modelleren. Allereerst is het mechanica-model van MatrixFrame, zoals weergegeven in figuur 7, na gemodelleerd. Dit om resultaten van eenzelfde constructie te vergelijken. Het mechanica-model dat gemodelleerd is in SCIA Engineer is hieronder afgebeeld in figuur 9.



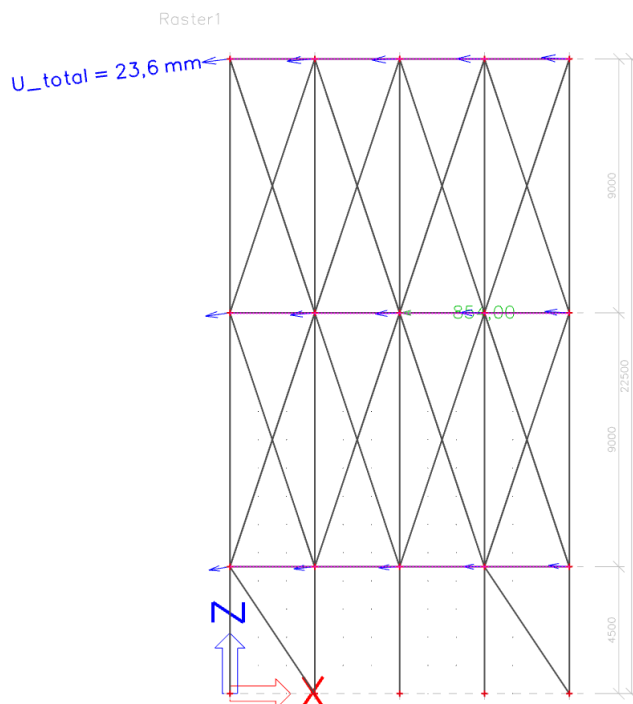
Figuur 9 - Mechanica-model gemodelleerd in SCIA-Engineer.

Dit mechanica-model heeft dezelfde profielen als het model dat gebruikt is voor de berekeningen gemaakt met MatrixFrame. Deze profielen zijn terug te vinden in tabel 1. In figuur 10 is het mechanica-model afgebeeld met de berekende oplegreacties.



Figuur 10 - Mechanica-model gemodelleerd met SCIA Engineer met berekende oplegreacties ten gevolge van een horizontale last ter grootte van 854 kN.

In figuur 11 is de verplaatsing van de silo in het programma SCIA Engineer afgebeeld. Deze waarden zijn volledig afgebeeld en vergeleken met de waarden gevonden met het programma MatrixFrame in paragraaf 3.3. De knopen met bijbehorende knooppnummers zijn terug te vinden in figuur 7.



Figuur 11 - Verplaatsing van constructie silo ten gevolge van een horizontale last ter grootte van 854 kN in SIA Engineer.

3.3 Vergelijking resultaten MatrixFrame en SCIA Engineer

In tabel 3 zijn de oplegreacties van het SCIA-Engineer mechanica model weergegeven en zijn deze resultaten vergeleken met de resultaten van het MatrixFrame mechanica model.

Tabel 3 - Vergelijking van de resultaten van de oplegreacties van het mechanica model gemodelleerd met SCIA-Engineer met de resultaten van het mechanica model van MatrixFrame.

Oplegreacties	SCIA Engineer [kN]	MatrixFrame [kN]	Richting komt overeen?	Afwijking [kN]	Percentage [%]
Av	-843,8	-841,32	Ja	2,48	0,29
Bv	2,65	-0,27	Nee	2,92	*
Cv	-254,82	-255,23	Ja	0,41	0,16
Dv	33,9	33,57	Ja	0,33	0,97
Ev	1062,07	1068,25	Ja	6,18	0,58
Ah	0	0	Ja	0	0,00
Bh	366,58	364,09	Ja	2,49	0,68
Ch	0	0	Ja	0	0,00
Dh	0	0	Ja	0	0,00
Eh	487,42	489,91	Ja	2,49	0,51

* Het percentuele verschil hoog omdat de waarde van de verkregen oplegreactie van MatrixFrame erg dicht bij 0 ligt. Om deze reden is dit verschil niet meegenomen.

In tabel 4 zijn de resultaten van de verplaatsing van het SCIA Engineer mechanica model weergegeven en vergeleken met de resultaten van het MatrixFrame-mechanica model.

Tabel 4 - Resultaten van de verplaatsing gevonden met het programma SCIA Engineer vergeleken met de resultaten van de verplaatsing gevonden met het programma MatrixFrame.

Knoop	u_X SCIA [mm]	u_X MatrixFrame [mm]	verschil u_X [mm]	u_N SCIA [mm]	u_N MatrixFrame [mm]	verschil u_N [mm]
2	-17,5	-17,6	0,01	2,8	2,9	0,1
6	-17,5	-17,6	0,01	0,8	0,9	0,1
10	-17,5	-17,6	0,01	-1,1	-1,1	0
11	-20,5	-20,7	0,02	2,8	2,9	0,1
16	-20,5	-20,7	0,02	0,8	0,9	0,1
12	-20,5	-20,7	0,02	-1,1	-1,1	0
13	-23,5	-23,8	0,03	2,8	2,9	0,1
19	-23,5	-23,8	0,03	0,8	0,9	0,1
14	-23,5	-23,8	0,03	-1,1	-1,1	0

Uit tabel 3 en 4 blijkt dat de verschillen tussen de resultaten van dezelfde constructie met de twee verschillende programma's niet groot zijn. De verschillen in de oplegreacties zijn minimaal (tabel 3). Het grootste verschil is de verticale oplegreactie op punt B, met een verschil van 0.97%. De verdeling van de krachten over de kolommen komen overeen. Net als in het model dat met MatrixFrame gemodelleerd is, zijn de horizontale krachten in het model

dat met SCIA Engineer gemodelleerd is, niet uniform verdeeld. Ook de verschillen tussen de resultaten van de verplaatsingen van de twee programma's zijn ook klein (tabel 4). Het grootste verschil is 0.1 mm in de verticale richting (N-as).

Dat de verschillen klein zijn, is gunstig. Dit betekent dat aangenomen kan worden dat het programma SCIA Engineer een betrouwbaar programma is om verder mee te werken. Dit is nodig, omdat er - zoals eerder vermeld - in dit onderzoek met wandelementen is gewerkt. Dit is mogelijk met het programma SCIA Engineer en niet met het programma MatrixFrame

3.4 Verklaring verschil

Een mogelijke verklaring voor de voorkomende verschillen is dat de programma's verschillende theorieën gebruiken. MatrixFrame gebruikt de Euler-Bernoulli theorie, zonder dat gebruikgemaakt wordt van afschuifvervorming. SCIA Engineer gebruikt de Timoshenko-beam theorie. In deze theorie wordt er wel gebruikgemaakt van afschuifvervorming. Dit kan in grotere verschillen resulteren, wanneer de liggers of kolommen uitzonderlijk lang of kort zijn.

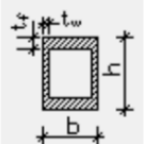
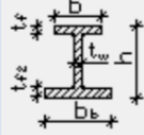
4. Wandelement modelleren met SCIA Engineer

Dit hoofdstuk vervangt met behulp van het programma SCIA Engineer de diagonaal, die gebruikt is in het onderzoek van Kapteijn (2017), door wandelementen. In dit onderzoek is eerst een grof begin gemaakt en geleidelijk gewerkt naar een verfijnd model dat de werkelijkheid kan representeren. De resultaten van de modellen zijn uiteindelijk vergeleken met de handberekening en met de resultaten van het model met diagonalen. Eerst zal het gladwandelement (GWS) worden onderzocht en daarna het profielwandelement (PWS).

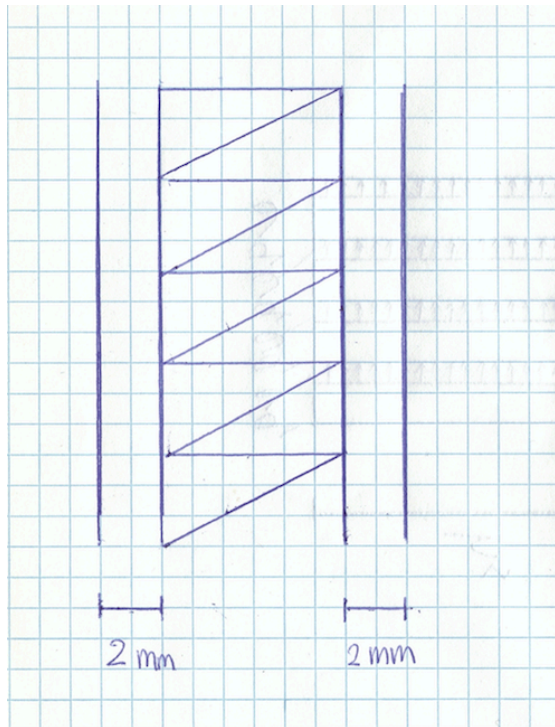
4.1 SCIA-Engineer model met gladwandelementen (GWS)

De elementen van de silowand, de kolommen van de draagconstructie en de trekdiagonalen van de draagconstructie hebben dezelfde eigenschappen als weergegeven in tabel 1 (deze is hieronder wederom weergegeven als tabel 5).

Tabel 5 - Eigenschappen van elementen gebruikt in de Mechanicamodel van Matrix-frame (Kapteijn, 2017).

Constructieonderdeel	Staalsoort	Profiel	Vorm
Elementen silowand*	S355	Rechthoekig $h = 1000 \text{ mm}$ $b = 1000 \text{ mm}$	
Trekdiagonalen onderconstructie	S355	Kokerprofiel $h = 80 \text{ mm}$ $b = 80 \text{ mm}$ $t_w = 8 \text{ mm}$ $t_f = 8 \text{ mm}$	
Kolommen onderconstructie	S355	HEA220 $b = 220 \text{ mm}$ $h = 210 \text{ mm}$ $t_w = 7 \text{ mm}$ $t_f = 11 \text{ mm}$	

De wandelementen zijn gemodelleerd met een dikte van 4 mm. Dit is een waarde dat is aangenomen aan de hand van een schematisering van de doorsnede van een gladwandpaneel dat is weergegeven in figuur 12. Het stalen “skelet” van het wandelement bedraagt 4 mm in de breedte en wat ertussen in zit wordt verwaarloosd. Later in dit onderzoek is gekeken wat voor invloed de dikte van het wandelement waar gemodelleerd mee wordt heeft op de berekening van de oplegreacties. Dit is gedaan in paragraaf 4.5.



Figuur 12 - Doorsnede gladwandpaneel

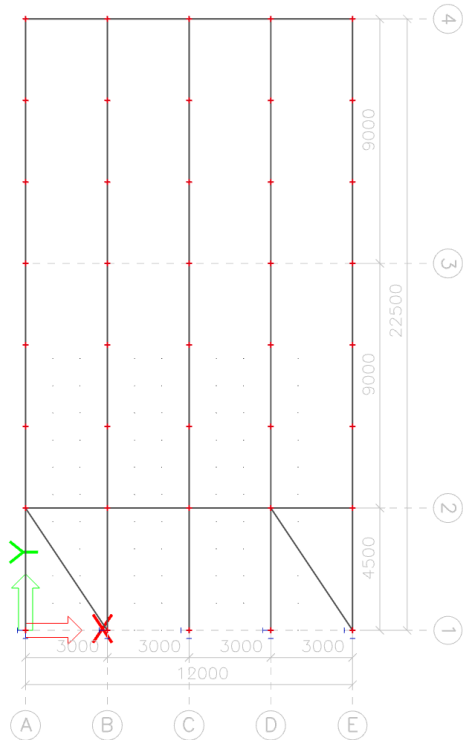
De draagconstructie is volledig hetzelfde gebleven. De elementen van de silowand bestaan alleen uit kolommen met een hoogte van 3 meter. Daartussen in zitten de wandelementen, met een hoogte van 1 meter koud op elkaar. Dit geldt als voorbeeld van een afbeelding van een silo waarbij de wandelementen koud op elkaar gestapeld zijn (figuur A.1, Bijlage A). Deze wandelementen worden in SCIA Engineer gemodelleerd als eindige elementen. Er geldt dat hoe meer eindige elementen, hoe nauwkeuriger, maar na een bepaald aantal eindige elementen geeft een vermeerdering niet langer een significant verschil in de resultaten.

Stappen SCIA-model:

- Allereerst is er gekozen met welke staalsoort gewerkt is. In dit rapport is gewerkt met het staalsoort S355.
- Hierna is een lijnrastermodel gemaakt wat het modelleren eenvoudiger en overzichtelijker maakt.
- Dan zijn de eigenschappen aan de elementen silowand, trekdiagonalen, kolommen onderconstructie en de wandelementen toegekend. In dit rapport geldt dat alle materialen bestaan uit het staalsoort S355 met een E-modulus van 2,10 GPa. De profielen met afmetingen gebruikt in dit rapport, zijn weergegeven in tabel 5.
- De eigenschappen van de wandelementen zijn gemodelleerd met eindige elementen met een dikte van 4 mm en met verschillende breedte en hoogte (afhankelijk van de eindige elementen).
- De hoogte van de onderconstructie bedraagt 4,5 meter en de totale hoogte van de silo bedraagt 18 meter. De breedte van de silo bedraagt 12 meter. De silo is ten voorbeeld van figuur 3 gemodelleerd.
- De silo is gemodelleerd op vaste scharnierende steunpunten.
- Vervolgens zijn de belastingen aangebracht en uitgerekend.

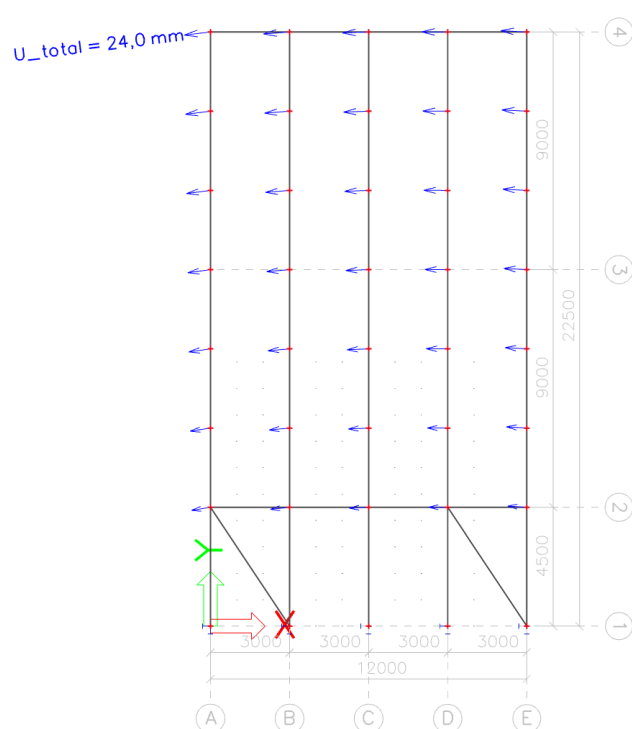
4.1.1 Model met 1 eindig element (GWS)

Zoals eerder is vermeld is er in dit onderzoek begonnen met een grof model. Dit grove model bestaat uit een draagconstructie met kolommen en 1 eindig element dat de wandelementen representeert. Dit model is afgebeeld in figuur 13. Zoals in de modellen in hoofdstuk 3 is in dit model ook een horizontale puntlast aangenomen van 854 kN. Deze is aangenomen op dezelfde plek als ervoor.



Figuur 13 - SCIA Engineermodel met wandelementen [1 eindig element]

De resultaten voor de oplegreacties en verplaatsing zijn respectievelijk afgebeeld in figuren 14 en 15.



Figuur 15 - Resultaat verplaatsing van het SCIA Engineermodel met wandelementen [1 eindig element] ten gevolge van een horizontale puntlast ter grootte van 854 kN.

Naam	BG	R _x [kN]	R _y [kN]	M _z [kNm]
Sn1/K1	BG2	2,09	849,46	0,00
Sn2/K3	BG2	363,17	-8,22	0,00
Sn3/K5	BG2	2,15	247,38	0,00
Sn4/K7	BG2	2,11	-24,95	0,00
Sn5/K9	BG2	484,48	-1063,67	0,00

Figuur 14 - Resultaten oplegreacties van het SCIA Engineermodel met wandelementen [1 eindig element] met de positieve y- en x-richting afgebeeld in figuur 15.

In tabel 5 en 6 zijn respectievelijk de resultaten van de oplegreacties en de resultaten van de verplaatsing van het model met één eindig element vergeleken met de resultaten van de verplaatsingen van het model met diagonalen die zijn gevonden in paragraaf 3.2.

Tabel 6 - Vergelijking resultaten van de modellen met diagonalen en wandelement (met 1 eindig element). Beide modellen gemodelleerd met SCIA-Engineer.

Oplegreacties	SCIA Engineer (Diagonaal) [kN]	SCIA Engineer (Wandelementen 1 eindig element) [kN]	Richting komt overeen?	Afwijking [kN]	Percentage [%]
Av	-843,8	-849,46	Ja	5,66	0,67
Bv	2,65	8,22	Ja	5,57	*
Cv	-254,82	-247,38	Ja	7,44	3,01
Dv	33,9	24,95	Ja	8,95	*
Ev	1062,07	1063,67	Ja	1,6	0,15
Ah	0	2,09	-	2,09	*
Bh	366,58	363,17	Ja	3,41	0,94
Ch	0	2,15	-	2,15	*
Dh	0	2,11	-	2,11	*
Eh	487,42	484,48	Ja	2,94	0,61

* Waarde ligt relatief gezien erg dichtbij 0 of is gelijk aan 0, waardoor de percentuele afwijking er hoog is. Om die reden is deze niet meegenomen.

Tabel 7 - Vergelijking resultaten voor de verplaatsing van de modellen met diagonalen en wandelement (met 1 eindig element). Beide modellen gemodelleerd met SCIA Engineer.

Verplaatsing SCIA-Engineer (Diagonaal) [mm]	Verplaatsing SCIA-Engineer (Wandelement) 1 eindig element [mm]	Vershil [mm]	Percentage [%]
23,6	24	0,4	1,67

Uit tabel 5 blijkt dat de resultaten voor de oplegreacties erg dicht bij elkaar liggen. Het grootste verschil is gevonden in de verticale oplegreactie op punt D, met een waarde van 8.95 kN. De verdeling van de krachten is grotendeels hetzelfde, behalve dat er in het model met de wandelementen (1 eindig element) de linker kolommen (A en B) meer verticale kracht opnemen dan in het model met diagonalen.

4.1.2 Model met 4 en 216 eindige elementen (GWS)

Bij het verfijnen van het model met één eindig element is ervoor gekozen om de volgende stappen 4 en 216 eindige elementen te laten zijn. Dit gaf een verschil in resultaten. Figuren van de resultaten van verplaatsingen en oplegreacties en tabellen met vergelijkingen met eerder gevonden resultaten zijn te vinden in Bijlage C.

4.1.3 Model met 864 eindige elementen (GWS)

Het model met 864 eindige elementen is het model dat gebruikt is in dit onderzoek om het model met wandelementen van een silo te representeren. In figuur 16 is de verplaatsing van de constructie afgebeeld en figuur 17 zijn de resultaten van de oplegreacties afgebeeld. In tabel 7 en 8 zijn respectievelijk de resultaten van de oplegreacties en de verplaatsing vergeleken met het model met één eindig element. In tabel 9 en 10 zijn respectievelijk de resultaten van de oplegreacties en de verplaatsing vergeleken met de gevonden resultaten in paragraaf 3.3 en in tabel 11 zijn de resultaten voor de oplegreacties vergeleken met de resultaten van de handberekening.



figuur 16- Resultaat verplaatsing van het SCIA Engineermodel met wandelementen [864 eindige elementen] ten gevolge van een orizontale puntlast ter grootte van 854 kN.

Tabel 8 - Vergelijking resultaten van de modellen met wandelement met 1 eindig element en 864 eindige elementen. Beide modellen gemodelleerd met SCIA Engineer.

Oplegreacties	SCIA Engineer (1 eindig element) [kN]	SCIA Engineer (864 eindige elementen) [kN]	Richting komt overeen?	Afwijking [kN]	Percentage [%]
Av	-849,46	-853,69	Ja	4,23	0,50
Bv	8,22	13,58	Ja	5,36	39,47
Cv	-247,38	-245,74	Ja	1,64	0,67
Dv	24,95	22,49	Ja	2,46	10,94
Ev	1063,67	1063,35	Ja	0,32	0,03
Ah	2,09	2,12	-	0,03	1,42
Bh	363,17	363,47	Ja	0,3	0,08
Ch	2,15	2,16	-	0,01	0,46
Dh	2,11	2,15	-	0,04	1,86
Eh	484,48	484,11	Ja	0,37	0,08

Tabel 9 - Vergelijking resultaten voor de verplaatsing van de modellen met wandelementen (1 eindig element met 864 eindige elementen). Beide zijn modellen gemodelleerd met SCIA Engineer.

Verplaatsing SCIA-Engineer (wandelement) 1 eindig element[mm]	Verplaatsing SCIA-Engineer (Wandelement) 864 eindige elementen [mm]	Verschil [mm]	Percentage [%]
24	24,8	0,8	3,23

Knoopreacties

Naam	BG	R _x [kN]	R _y [kN]	M _z [kNm]
Sn1/K1	BG2	2,12	853,69	0,00
Sn2/K3	BG2	363,47	-13,58	0,00
Sn3/K5	BG2	2,16	245,74	0,00
Sn4/K7	BG2	2,15	-22,49	0,00
Sn5/K9	BG2	484,11	-1063,35	0,00

Figuur 17- Resultaten oplegreacties van het SCIA Engineermodel met wandelementen [eindige elementen] met de positieve y- en x-richting afgebeeld in figuur 16.

Tabel 10 - Vergelijking resultaten van de modellen met diagonalen en wandelementen (met 864 eindige elementen). Beide modellen zijn gemodelleerd met SCIA Engineer.

Oplegreacties	SCIA Engineer (Diagonaal) [kN]	SCIA Engineer (Wandelementen) 864 eindige elementen [kN]	Richting komt overeen?	Afwijking [kN]	Percentage [%]
Av	-843,8	-853,69	Ja	9,89	1,16
Bv	2,65	13,58	Ja	10,93	*
Cv	-254,82	-245,74	Ja	9,08	3,69
Dv	33,9	22,49	Ja	11,41	*
Ev	1062,07	1063,35	Ja	1,28	0,12
Ah	0	2,12	-	2,12	*
Bh	366,58	363,47	Ja	3,11	0,86
Ch	0	2,16	-	2,16	*
Dh	0	2,15	-	2,15	*
Eh	487,42	484,11	Ja	3,31	0,68

* Waarde ligt relatief gezien erg dichtbij 0 of is gelijk aan 0, waardoor de percentuele afwijking er hoog is. Om die reden is deze niet meegenomen.

Tabel 11 - Vergelijking resultaten voor de verplaatsing van de modellen met diagonalen en wandelement (met 864 eindige elementen). Beide modellen zijn gemodelleerd met SCIA Engineer.

Verplaatsing SCIA-Engineer (Diagonaal) [mm]	Verplaatsing SCIA-Engineer (Wandelement) 864 eindige elementen [mm]	Vershil [mm]	Percentage [%]
23,6	24,8	1,2	4,84

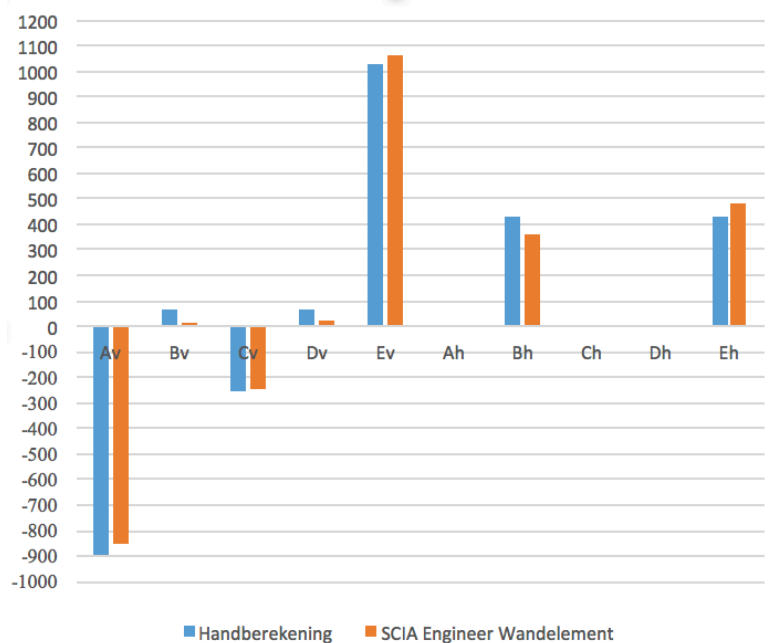
Uit tabel 9 kan worden opgemerkt dat de verschillen voor de oplegreacties tussen de resultaten van het model met diagonalen en het model met wandelementen (met 864 eindige elementen), klein zijn. Het grootste verschil in oplegreacties is gevonden op knooppunt D in de verticale, met een verschil van 11.41 kN. Ook is het verschil tussen de resultaten van de verplaatsing klein (tabel 10). Het verschil tussen het model met diagonalen en het model met wandelementen (864 eindige elementen) bedraagt 1.2 millimeter. Dit is een verschil van 4,84%. De verdeling van de krachten over de kolommen komt ongeveer op hetzelfde neer, behalve dat de kolommen B en D in verticale richting relatief meer opnemen in het model van de handberekening.

Tabel 12 - Vergelijking resultaten van het model met wandelementen (met 864 eindige elementen) met de handberekening uit Hoofdstuk 2. Gemodelleerd met SCIA Engineer.

Oplegreacties	Handberekening [kN]	SCIA Engineer (Wandelement) 864 eindige elementen [kN]	Richting komt overeen?	Afwijking [kN]	Percentage [%]
Av	-896,7	-853,69	Ja	43,01	5,04
Bv	64,05	13,58	Ja	50,47	*
Cv	-256,2	-245,74	Ja	10,46	4,26
Dv	64,05	22,49	Ja	41,56	*
Ev	1024,8	1063,35	Ja	38,55	3,63
Ah	0	2,12	-	2,12	*
Bh	427	363,47	Ja	63,53	17,48
Ch	0	2,16	-	2,16	*
Dh	0	2,15	-	2,15	*
Eh	427	484,11	Ja	57,11	11,80

* Waarde ligt relatief gezien erg dichtbij 0 of is gelijk aan 0, waardoor de percentuele afwijking er hoog is. Om die reden is deze niet meegenomen.

Uit tabel 11 kan worden opgemerkt dat de verschillen voor de oplegreacties tussen de resultaten van het mechanisch model, dat gemodelleerd is in SCIA Engineer, met de handberekening, verschillen vertoont. Het grootste verschil is gevonden in de horizontale oplegreactie in punt B, met een verschil van 63,53 kN. Uit deze resultaten blijkt dat de horizontale krachten in het mechanisch model dat gemodelleerd is met SCIA Engineer, niet uniform verdeeld zijn. De percentuele verschillen zijn veelal niet veel groter dan 10%. Hieronder (figuur 18) zijn de verschillen in de oplegreacties uit tabel 11 afgebeeld in een staafdiagram.



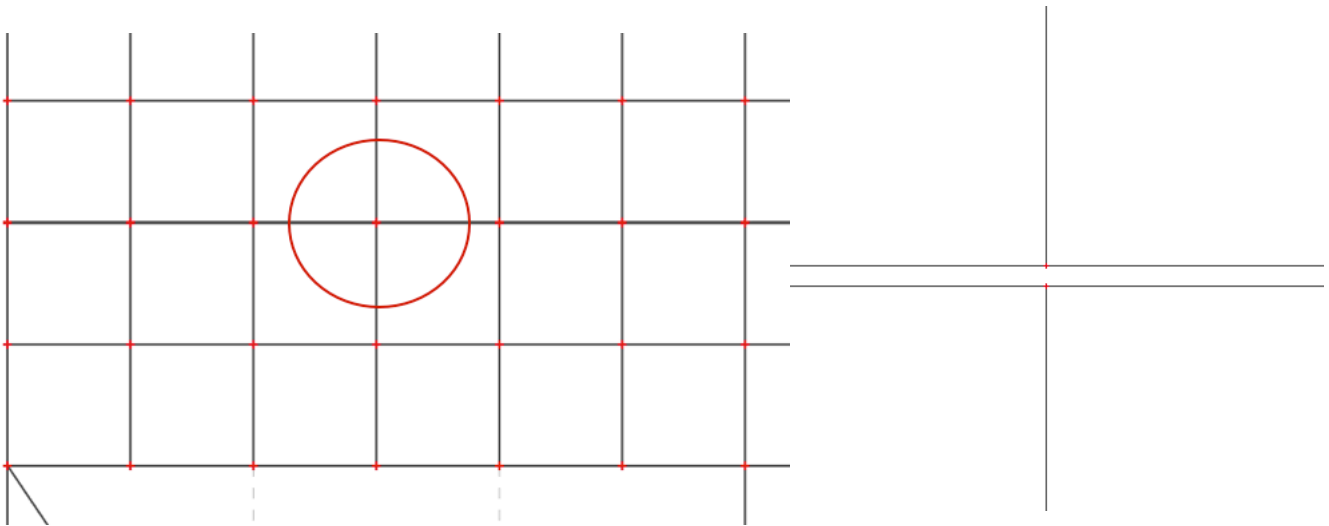
Figuur 18 - Visuele afbeelding van de resultaten uit tabel 11

4.2 Mogelijke verklaring verschil resultaten van het model met gladwandelementen (GWS) met het model met diagonalen

Een mogelijke verklaring voor het verschil in de resultaten is dat het model met wandelementen zich minder stijf gedraagt dan het model met diagonalen. Het diagonaal vervangt 2 complete wandelementen, terwijl in het model van SCIA Engineer de wandelementen uit meerdere eindige elementen bestaan. Wel is waar dat tussen de wandelementen krachten ontstaan ten gevolge van de schuifweerstand. Alleen is de verwachting dat deze niet zo groot is dat de twee wandelementen kunnen worden vervangen door diagonalen. De invloed van de schuifweerstand is in de volgende paragraaf onderzocht.

4.3 Invloed schuifweerstand tussen (GWS) wandelementen

In dit onderzoek is tevens de invloed van de schuifweerstand van de wandelementen bekeken. Zoals paragraaf 4.1 vermeldde, zijn de wandelementen 1 meter hoog en 3 meter breed. Om ervoor te zorgen dat de schuifweerstand geen invloed had op de resultaten, is een model in SCIA Engineer geconstrueerd, waarbij gebruik is gemaakt van het model met wandelementen dat bestaat uit 864 eindige elementen. Ook is ervoor gekozen om na elke meter in verticale hoogte een leegte van 5 millimeter open te laten. Een close-up van deze leegte is hieronder afgebeeld in figuur 19.



Figuur 19 - Close up van het model met wandelementen.

Boven elk wandelement is een leegte van 5 millimeter opengelaten om de invloed van schuifweerstand te tonen. In het figuur rechts is ingezoomd op de lege ruimte. Op dit model is op dezelfde plek als voorgaande modellen een horizontale last van 854 kN aangenomen en zijn de resultaten bepaald en vergeleken met de resultaten gevonden in paragraaf 4.1. Het resultaat voor de verplaatsing is afgebeeld in figuur 21 en is vervolgens vergeleken met de resultaten van de modellen wandelementen zonder een lege ruimte van 5 millimeter. Ook is dit model vergeleken met het model waarbij uitsluitend diagonalen zijn gebruikt. De resultaten zijn weergegeven in de tabellen 12 en 13. De resultaten gevonden voor de oplegreacties, figuur 20, zijn eveneens vergeleken met de resultaten van het model met wandelementen zonder een lege ruimte van 5 millimeter en het model met uitsluitend diagonalen. De resultaten zijn weergegeven in de tabellen 13 en 14.



Figuur 21 - Resultaat verplaatsing van het SCIA Engineermodeel met wandelementen waar boven elk wandelement een leegte van 5 millimeter is aangenomen [864 eindige elementen] ten gevolge van een horizontale puntlast ter grootte van 854 kN.

Knoopreacties

Naam	BG	R _x [kN]	R _y [kN]	M _z [kNm]
Sn1/K1	BG2	2,11	860,90	0,00
Sn2/K3	BG2	363,56	-23,80	0,00
Sn3/K5	BG2	2,17	242,34	0,00
Sn4/K7	BG2	2,15	-13,90	0,00
Sn5/K9	BG2	484,02	-1065,55	0,00

Figuur 20 - Resultaten oplegreacties van het SCIA Engineermodeel met wandelementen waarbij boven elk wandelement een leegte van 5 millimeter is aangenomen [864 eindige elementen] met de positieve y- en x-richting afgebeeld in figuur 21.

Tabel 13 - Vergelijking resultaten van de modellen met wandelementen koud op elkaar gestapeld en wandelementen met een leegte van 5 millimeter boven elk wandelement (met 864 eindige elementen).

Oplegreacties	SCIA Engineer (Wandelement) 864 eindige elementen [kN]	SCIA Engineer (Wandelement met leegte van 5mm) 864 eindige elementen [kN]	Richting komt overeen?	Afwijking [kN]	Percentage [%]
Av	-853,69	-860,9	Ja	7,21	0,84
Bv	13,58	23,8	Ja	10,22	*
Cv	-245,74	-242,34	Ja	3,4	1,38
Dv	22,49	13,9	Ja	8,59	*
Ev	1063,35	1065,55	Ja	2,2	0,21
Ah	2,12	2,11	Ja	0,01	0,47
Bh	363,47	363,56	Ja	0,09	0,02
Ch	2,16	2,17	ja	0,01	0,46
Dh	2,15	2,15	Ja	0	0,00
Eh	484,11	484,02	Ja	0,09	0,02

* Waarde ligt relatief gezien erg dichtbij 0 of is gelijk aan 0, waardoor de percentuele afwijking er hoog is. Om die reden is deze niet meegenomen.

Tabel 14 - Vergelijking resultaten voor de verplaatsing van de modellen met wandelementen koud op elkaar gestapeld en wandelement met een leegte van 5 millimeter boven elk wandelement (met 864 eindige elementen)

Verplaatsing SCIA Engineer (Wandelement) 864 eindige elementen [mm]	Verplaatsing SCIA Engineer (Wandelement met leegte van 5mm) 864 eindige elementen[mm]	Vershil [mm]	Percentage [%]
24,8	26,8	2	7,46

Uit tabel 12 blijkt dat er geen significante verschillen zitten in de grootte van de oplegreacties. Het grootste verschil dat gevonden is in tabel 12, is in de verticale oplegreactie van punt B, namelijk een verschil van 10,22 kN. De rest van de oplegreacties komen overeen in de richting en de verdeling van de krachten is ongeveer hetzelfde. Uit tabel 13 blijkt dat de percentuele verschillen in de verplaatsingen significant groot zijn (7,46%). De schuifweerstand heeft dus wel degelijk invloed heeft op de verplaatsing van het model, namelijk dat deze ervoor zorgt dat de verplaatsing kleiner wordt en dat de silo zich stijver gedraagt.

Tabel 15 - Vergelijking resultaten van het model met wandelementen met een leegte van 5 millimeter boven elk wandelement (met 864 eindige elementen) met de handberekening.

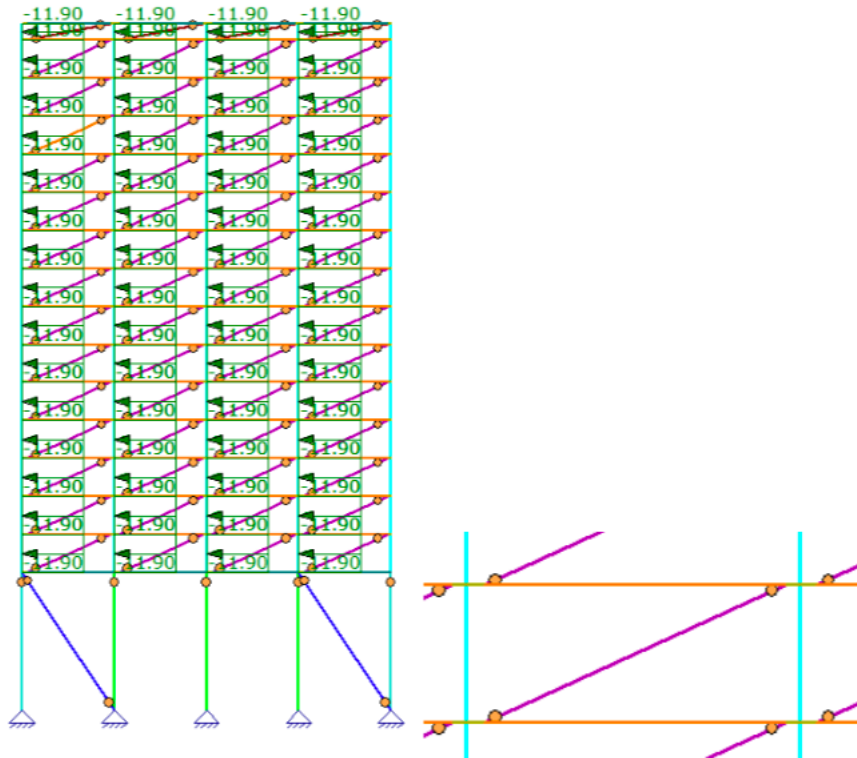
Oplegreacties	SCIA Engineer (Diagonaal) [kN]	SCIA Engineer (Wandelement met leegte van 5mm) [kN]	Richting komt overeen?	Afwijking [kN]	Percentage [%]
Av	-896,7	-860,9	ja	35,8	3,99
Bv	64,05	23,8	ja	40,25	*
Cv	-256,2	-242,34	ja	13,86	5,41
Dv	64,05	13,9	ja	50,15	*
Ev	1024,8	1065,55	ja	40,75	3,98
Ah	0	2,11	-	2,11	*
Bh	427	363,56	ja	63,44	14,86
Ch	0	2,17	-	2,17	*
Dh	0	2,15	-	2,15	*
Eh	427	484,02	ja	57,02	13,35

* Waarde ligt relatief gezien erg dichtbij 0 of is gelijk aan 0, waardoor de percentuele afwijking er hoog is. Om die reden is deze niet meegenomen.

Uit tabel 14 blijkt dat de verschillen tussen de resultaten van het model met wandelementen waar tussen elk wandelement in verticale richting een leegte is gelaten van 5 mm, significant verschillen van de resultaten van de handberekening. Het grootste verschil is gevonden in de horizontale oplegreactie in punt B, met een verschil van 63,44 kN.

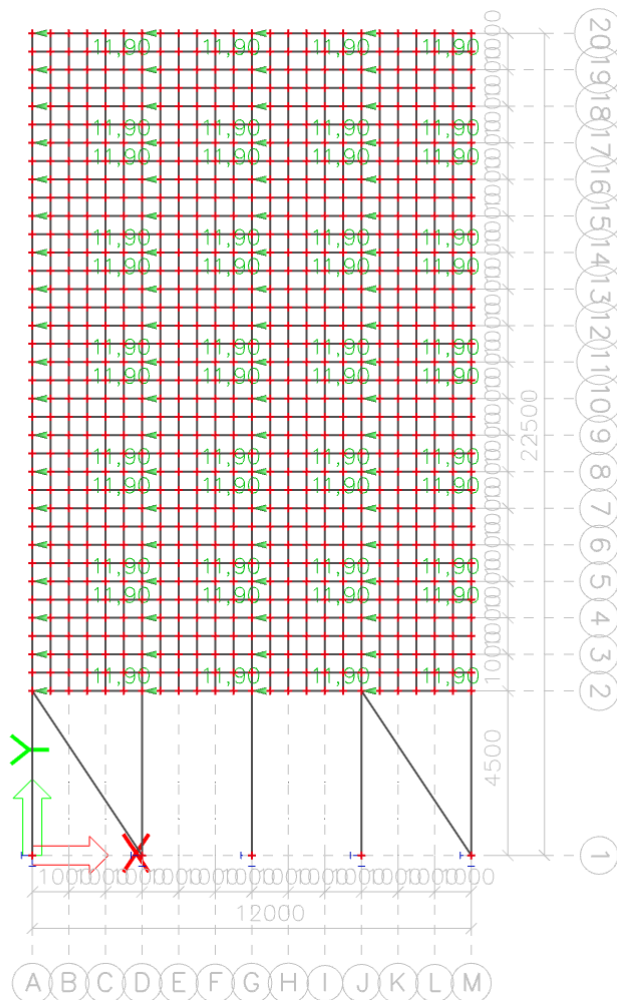
4.4 Vergelijking SCIA Engineermodel met wandelementen met MatrixFrame model met stijfheid

In hoofdstuk 7 van het onderzoek van Kapteijn (2017) is het aan het model in matrixframe een stijfheid gegeven. Kapteijn heeft het model zo geconstrueerd in zijn onderzoek dat in het model de silowand niet oneindig stijf is. Aangezien er niet met eindige elementen is gewerkt in het onderzoek van Kapteijn, is dit weer gedaan met diagonalen. Het model dat gebruikt is in het onderzoek van Kapteijn (2017) is afgebeeld in figuur 22.



Figuur 22 - Tweedimensionaal MatrixFrame model van het GWS-systeem met een horizontale verdeelde belasting naar links ten gevolge van een aardbeving (Kapteijn, 2017).

Rechts in figuur 22 is het model van één paneel afgebeeld. De verschillende kleuren geven aan dat er onderscheid is in de profielen dat is gebruikt. Het onderzoek van Kapteijn gaf aan dat er verschil van 6,7% zat in de grootste oplegreactie wanneer er een stijfheid was toegekend aan de silowand. In dit paragraaf wordt opnieuw het mechanica-model van MatrixFrame met de diagonalen vergeleken met een mechanica-model geconstrueerd in SCIA Engineer. Voor de vergelijking zal gebruik worden gemaakt van het model met 864 eindige elementen, geconstrueerd in paragraaf 4.13. Het grootste verschil met de voorgaande modellen in SCIA Engineer is dat nu de belasting wat realistischer wordt aangenomen. De belastingen is aangenomen als een horizontale verdeelde kracht. De berekening van de belasting op de siloconstructie kan gevonden worden in bijlage B. Het model geconstrueerd in SCIA Engineer is op de volgende bladzijde afgebeeld in figuur 23.



Figuur 23 - Mechanicamodel van de siloconstructie onderhevig aan een zijdelingse verdeelde belasting ten gevolge van een aardbeving. Gemodelleerd in SCIA Engineer.

De resultaten van de oplegreacties zijn hieronder afgebeeld in figuur 24. De resultaten van de oplegreacties zijn in tabel 15 vergeleken met de resultaten van het model in MatrixFrame dat gebruikt is in het onderzoek van Kapteijn (2017).

Knoopreacties

Naam	BG	R_x [kN]	R_y [kN]	M_z [kNm]
Sn1/K1	BG2	2,13	858,02	0,00
Sn2/K3	BG2	364,51	-14,35	0,00
Sn3/K5	BG2	2,17	244,94	0,00
Sn4/K7	BG2	2,16	-23,34	0,00
Sn5/K9	BG2	485,84	-1065,28	0,00

Figuur 24 - Resultaten van de oplegreacties van de siloconstructie onderhevig aan een zijdelingse verdeelde belasting als weergegeven in figuur 21.

Tabel 16 - Vergelijking resultaten van het mechanica model met wandelementen (met 864 eindige elementen) in SCIA Engineer met het mechanica model in MatrixFrame uit het onderzoek van Kapteijn (2017).

Oplegreacties	MatrixFrame zijdelingse verdeelde belasting [kN]	SCIA Engineer zijdelingse verdeelde belasting[kN]	Richting komt overeen?	Afwijking [kN]	Percentage [%]
Av	-994,7	-858,02	Ja	136,68	13,74
Bv	228,9	14,35	Ja	214,55	*
Cv	-140,2	-244,94	Ja	104,74	*
Dv	-235,7	23,34	Nee	259,04	*
Ev	1141,7	1065,28	Ja	76,42	6,69
Ah	0	2,13	-	2,13	*
Bh	394,5	364,51	Ja	29,99	7,60
Ch	0	2,17	-	2,17	*
Dh	0	2,16	-	2,16	*
Eh	455,9	485,84	Ja	29,94	6,57

Uit tabel 15 blijkt dat de verschillen significant groot zijn. Het grootste verschil is gevonden in de verticale oplegreactie in punt D met een verschil in waarde van 259,04 kN. Uit de resultaten blijkt dat in het mechanica model van MatrixFrame dat de verticale oplegreacties wat groter zijn dan in het mechanica model van SCIA Engineer. In de verticale oplegreactie van D in het mechanica model van MatrixFrame, is te zien dat de kracht naar beneden werkt terwijl in het mechanica model van SCIA Engineer werkt deze kracht omhoog.

Uit de resultaten van de oplegreacties van het mechanica model in SCIA Engineer is te zien dat de verticale krachten wat minder verdeeld zijn over de kolommen B en D en meer over de buitenste kolommen A en E en de middelste kolom C. Terwijl in het mechanica model van MatrixFrame, de kolommen B en C aanzienlijk meer krachten opnemen vergeleken met het mechanica model van SCIA Engineer. Uit tabel 15 blijkt dat de horizontale verdeling van de krachten meer door de rechter kolom (E) wordt opgenomen in het mechanica model van SCIA Engineer.

Het verschil in de resultaten kan zitten in het feit dat er verkeerde waarden zijn ingevoerd voor het traagheidsmoment dat is gebruikt. In dit onderzoek is niet gecorrigeerd voor het feit dat het traagheidsmoment van het wandelement het traagheidsmoment van de diagonaal representeert.

4.5 SCIA Engineer model met profielwandelementen (PWS)

Om te onderzoeken of er een verschil bestaat tussen de resultaten van gladwandelementen en profielwandelementen, is het model met gladwandelementen (met 864 eindige elementen) naar voorbeeld van dat in paragraaf 4.1.3 nageemaakt, met in dit geval een halvering van de E-modulus van de wandelementen. De E-modulus van de wandelementen was 2.10 GPa en is verlaagd naar 1.55 GPa. De reden dat dit is onderzocht is dat, wanneer dit geen significant verschil zou laten zien in de resultaten, de wandelementen met een profiel niet onderzocht hoeven te worden. De resultaten met bijbehorende figuren en afbeeldingen zijn weergegeven in Bijlage D.

Uit Bijlage D kan de conclusie worden getrokken dat er geen significant verschil bestaat tussen de modellen met een verschillende E-moduli. Dit betekent dat er geen significant verschil bestaat in de resultaten van de oplegreacties en verplaatsing van een model met gladwandpanelen met een model met profielwandpanelen. Tevens betekent dit dat de dikte van de eindige elementen niet ertoe doet bij het berekenen van de oplegreacties aangezien er in paragraaf 4.1 een aanname is gedaan van 4mm. Er wordt dus verder geen tijd besteedt aan het modelleren van het profiel van de wandelementen en een precieze dikte toekennen aan de eindige elementen waar gemodelleerd mee is.

5. Dynamische aspect aardbeving op Silo

Dit hoofdstuk onderzoekt het dynamische aspect ten gevolge van een aardbeving op een silo. Eerst volgt een analyse, met daarin de uitleg van het probleem en de methodologie die gebruikt is om het probleem aan te pakken.

5.1 Modelvorming

Met de kennis van het vak 'Dynamica van systemen' (CTB2300) en het bijbehorende dictaat 'Dynamica van systemen', zijn de elementen van het probleem geschematiseerd weergegeven, om het probleem te kunnen vertalen in een model waarbij gebruik gemaakt kan worden van evenwichtsvergelijkingen. Zo is getracht het dynamische invloed in beeld te brengen.

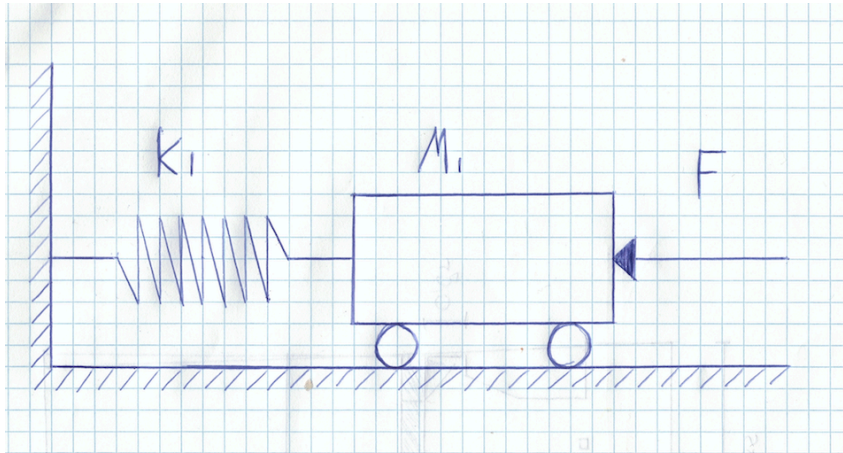
5.1.1 Model met één vrijheidsgraad

In het model met één vrijheidsgraad wordt gekeken naar rechtlijnige bewegingen in het x-y vlak. Hierbij is dus nog geen sprake van een rotatie. Het doel is om een model te vormen dat de bewegingen van de silo weergeeft door de invloed van een horizontale last, bijvoorbeeld een aardbeving. De componenten die invloed hebben op de bewegingen van de silo worden geschematiseerd en versimpeld weergegeven in het model.

De silo, die gebouwd is op vaste grond, wordt door middel van een horizontale last in beweging gebracht. De draagconstructie zorgt ervoor dat de silo zich standhoudt. Dit onderzoek geeft de bewegingen van de silo weer en bekijkt of deze gevaarlijk zijn voor de silo zelf en voor de omgeving van de silo. De massa van de silo met de draagconstructie en de additionele massa waar de silo mee te maken krijgt wanneer deze gevuld is, wordt vereenvoudigd weergegeven als een blokje op rolscharnieren met een massa M_1 . De kolommen van de draagconstructie waar de silo op staat hebben een verende werking en zullen worden weergegeven als een veer met veerstijfheid K_1 .

Nu de elementen geschematiseerd zijn, moeten de krachten worden aangebracht. Voor dit model is gekeken naar de invloed die een grote horizontale last, bijvoorbeeld als resultaat van een aardbeving, heeft op de silo. Deze krachten worden geschematiseerd als een enkelvoudige kracht F die aangrijpt op het blokje met M_1 .

In figuur 25 hieronder, zijn de elementen en krachten die hierboven besproken zijn weergegeven in een model.



Figuur 25 - Geschematiseerd model van de silo met massa $M1$, onderhevig aan een horizontale last ten gevolge van een aardbeving, met de draagconstructie gemodelleerd als een veer met veerstijfheid $K1$.

5.1.2 Vergelijkingen opstellen

Nu het probleem geschematiseerd is tot een eenvoudig model, kan met behulp van kennis verkregen van het vak 'Dynamica van systemen' dynamische evenwichtsvergelijkingen worden opgesteld. Met behulp van deze dynamische evenwichtsvergelijkingen kunnen onbekenden in het model worden opgelost. De volgende evenwichtsvergelijking is opgesteld:

$$1. \quad M1 * \ddot{w}1 + K1 * w1 = F \Rightarrow M * \ddot{w} + K * w = F$$

5.1.3 Parameters vergelijking

Kracht F

Voor de kracht F is in dit onderzoek gebruikt gemaakt van de tweede wet van Newton, $F = m * a$. Hierbij zal m de massa van de silo voorstellen en voor de versnelling a zullen waardes voor a_{grond} ¹ worden gebruikt. In eerste instantie is uitgegaan van een simpele sinusfunctie die de versnelling van de grond representeert. De sinusfunctie ziet er als volgt uit:

$$a_{grond} = c * \sin(2 * \pi * f * t)$$

- c = de amplitude in $\frac{m}{s^2}$
- f = frequentie in Hz
- t = tijd in seconden.

Voor de waardes c en f zijn respectievelijk $3 \frac{m}{s^2}$ en 2 Hz aangenomen. Dit is een aanname waarbij een relatief grote uitwijking is gekozen met een frequentie die kan voorkomen bij een aardbeving. Voor de tijd is een aardbeving beschouwd die 12 seconden duurt waarbij bij elk tijdstap van 0.005 seconden is gekeken naar de verandering in verplaatsing en de snelheid van de verplaatsing. F ziet er dan als volgt uit:

$$F = M * c * \sin(2 * \pi * f * t)$$

Massa $M1$

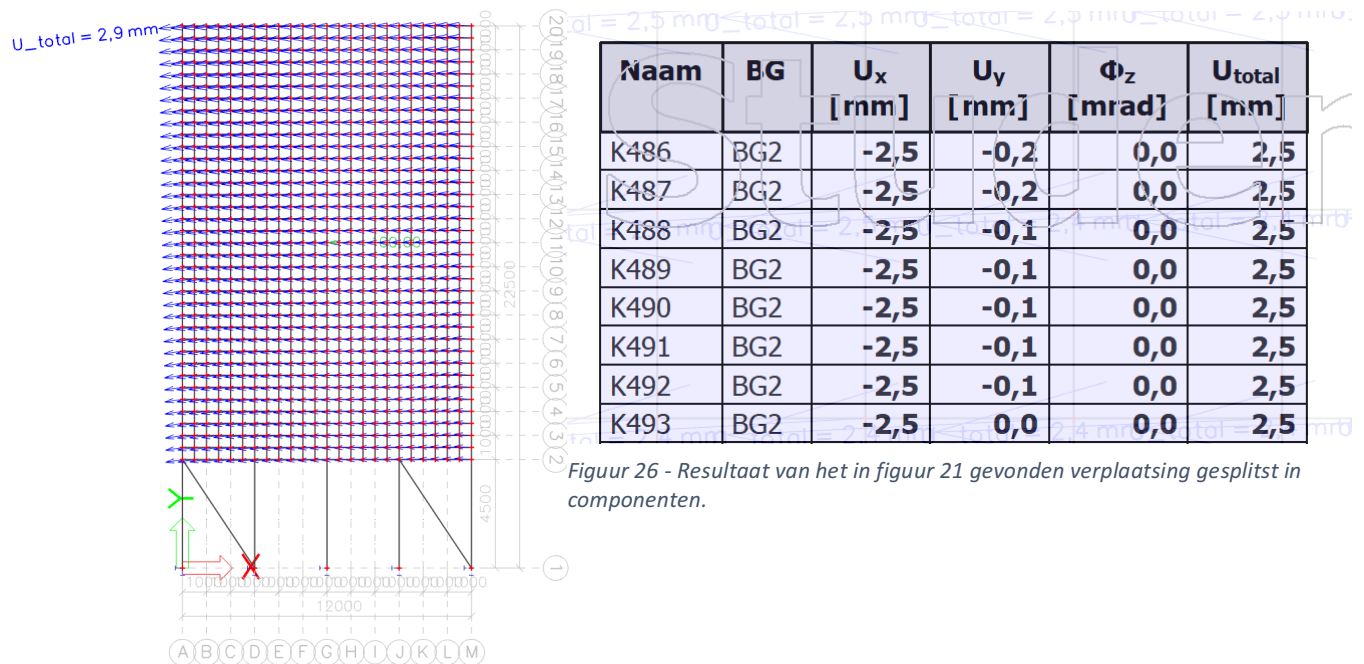
De massa van de silo is gelijk aan 622 ton. De berekening hiervoor is te vinden in Bijlage B.

$$M = m_{tot} = 622 \text{ ton } kg = 662000 \text{ kg}$$

¹ Verstrekt door begeleider Dr.ir. P.C.J. Hoogenboom

Veerstijfheid K1

Voor het berekenen van de veerstijfheid is gebruik gemaakt van het programma SCIA-Engineer en de volgende formule: $F = K * u$. Waarbij u de verplaatsing is. Deze formule heet Hooke's law (Hartsuijker & Welleman, 2006). De formule is omgeschreven naar $K = F/u$. In het programma SCIA-Engineer is in het model met 864 eindige elementen een horizontale kracht ter grootte van 100 kN in knoop 16 van figuur 7 aangebracht. Door de verplaatsing op hetzelfde punt als de aangebrachte kracht uit te laten rekenen, is de veerstijfheid zo gevonden. In dit geval is de horizontale kracht in knoop 490 aangebracht met naam K490. Het resultaat voor de gehele verplaatsing van het model is te zien in figuur 26 en de resultaten van de verplaatsing in tabelvorm van de knooppunten, waar de verplaatsing is opgesplitst in een verticale en horizontale verplaatsing, is te zien in figuur 27.



Figuur 26 - Resultaat van het in figuur 21 gevonden verplaatsing gesplitst in componenten.

Figuur 27 - Resultaat van de verplaatsing van het SCIA Engineermodel met wandelementen (864 eindige elementen) ten gevolge van een horizontale last van 100 kN.

Uit figuur 26 blijkt dat de horizontale en verticale waarde voor de verplaatsing van knooppunt 490 een waarde van respectievelijk 2.5 naar links en 0.1 naar beneden heeft. Aangezien de verplaatsing in de verticale richting minimaal is en het een horizontale veer voorstelt (figuur 25) is deze verwaarloosd.

Nu de verplaatsing is gevonden kan de volgende formule worden ingevuld om de waarde voor de veerstijfheid K te krijgen:

$$K = \frac{F}{u} = \frac{100 * 10^3 N}{2,5 * 10^{-3} mm}$$

$$K = 40.000.000.000,00 N/mm$$

$$K = 40000 \frac{kN}{m}$$

Tevens is de eigenfrequentie van de constructie bepaald in dit rapport. Dit is gedaan aan de van de volgende formule:

$$f = \frac{1}{2\pi} * \sqrt{\frac{K}{M}}$$

Met de eerder bepaalde waarden voor m en k is de formule als volgt ingevuld:

$$f = \frac{1}{2\pi} * \sqrt{\frac{40000}{662000}} = 0.039 \text{ Hz}$$

Tijdstap dt

In dit rapport is begonnen met een waarde voor de tijdstap dt van 0.005 s. Om te controleren of dit tijdstap klein genoeg is, is later in dit rapport gekeken naar verschillen in de resultaten wanneer de tijdstap dt nog kleiner aangenomen is.

5.2 Oplossen evenwichtsvergelijking

De enige onbekende uit de evenwichtsvergelijking is de w_1 . De evenwichtsvergelijking die in paragraaf 5.2.2 is opgesteld is een tweedegraads differentiaalvergelijking. Deze tweedegraads differentiaalvergelijking is in dit verslag op twee manieren getracht op te lossen, namelijk met het gebruik van een particuliere oplossing en numeriek oplossen van de vergelijking met behulp van de voorwaartse Euler methode.

5.2.1 homogene evenwichtsvergelijking met sinusfunctie voor a_{grond}

Allereerst is de evenwichtsvergelijking beperkt tot de particuliere oplossing. Voor eigenhoekfrequenties $\omega \neq \omega_0$ is er gekozen voor een particuliere oplossing in dezelfde vorm als de belasting. Er is aangenomen dat op tijdstip $t = 0$ de veer ontspannen en de silo in rust is, oftewel de begintoestand is:

$$w(0) = 0 \text{ en } v(0) = 0$$

Er is gekozen voor de volgende particuliere oplossing:

$$w(t) = C_1 \sin(\omega t) + C_2 \cos(\omega t)$$

Dan geldt:

$$\begin{aligned} \dot{w}(t) &= \omega C_1 \cos(\omega t) - \omega C_2 \sin(\omega t) \\ \ddot{w}(t) &= -\omega^2 C_1 \sin(\omega t) - \omega^2 C_2 \cos(\omega t) \end{aligned}$$

Dit invullen in de evenwichtsvergelijking van paragraaf 5.1.2 geeft:

$$-M\omega^2 C_1 \sin(\omega t) - M\omega^2 C_2 \cos(\omega t) + KC_1 \sin(\omega t) + KC_2 \cos(\omega t) = F$$

Zoals in paragraaf 5.1.3 is vermeld geldt voor de waarde voor de kracht F :

$$M * c * \sin(2 * \pi * f * t)$$

Deze kracht F wordt versimpeld tot:

$$\hat{F} \sin(\omega t) \text{ met } \hat{F} = M * c \text{ en } \omega = 2 * \pi * f$$

De vergelijking wordt dan:

$$-M\omega^2 C_1 \sin(\omega t) - M\omega^2 C_2 \cos(\omega t) + KC_1 \sin(\omega t) + KC_2 \cos(\omega t) = \hat{F} \sin(\omega t)$$

Het linker- en het rechterlid moeten voor elk willekeurig tijdstip gelijk aan elkaar zijn. Aan deze voorwaarde wordt voldoen als de coëfficiënten voor $\sin(\omega t)$ en $\cos(\omega t)$ uit het linker- en rechterlid aan elkaar gelijk te stellen. Dit lever de volgende vergelijkingen met twee onbekenden op:

- $-M\omega^2 C_1 \sin(\omega t) + KC_1 \sin(\omega t) = \hat{F} \sin(\omega t)$
- $-M\omega^2 C_2 \cos(\omega t) + KC_2 \cos(\omega t) = 0$

Versimpeld geeft dat:

- $-M\omega^2 C_1 + KC_1 = \hat{F}$
- $-M\omega^2 C_2 + KC_2 = 0$

Hieruit volgen de onbekende coëfficiënten C_1 en C_2 :

$$C_1 = \frac{\hat{F}}{-M\omega^2 + K} \text{ en } C_2 = 0$$

Dit geeft de volgende particuliere oplossing:

$$w(t) = \frac{\hat{F}}{K - M\omega^2} \sin(\omega t) \text{ met } \hat{F} = M * c$$

De amplitude van de uitwijking is dan $\left| \frac{\hat{F}}{K - M\omega^2} \right|$ met $\hat{F} = M * c$. Voor de aangenomen waarden uit paragraaf 5.1.3 geldt de waarde voor de amplitude:

$$w(t) = \left| \frac{M * c}{K - M\omega^2} \right| = \left| \frac{662000 * 3}{40000 - 662000 * (2 * \pi * 2)^2} \right| = 0,019 \text{ m} = 19 \text{ mm}$$

Met deze informatie is de bijbehorende veerkracht F_k bepaald, aangezien F_k af te leiden is, zoals eerder vermeld, uit de formule van Hooke's law.

$$F_k = u * K$$

Als aangenomen wordt dat de veerstijfheid niet veranderd, kan de formule worden ingevuld als volgt:

$$F_k = 0.019 \text{ m} * 40000 \frac{\text{kN}}{\text{m}} = 760 \text{ kN}$$

De maximaal resulterende veerkracht die is ontstaan onder de horizontale kracht $F = M * c * \sin(2 * \pi * f * t)$ is gelijk aan 760 kN. Dit is een lagere waarde in vergelijking met de waarde 854 kN, bepaald in bijlage B, en vormt dus geen gevaar voor de silo.

5.2.2 Numerieke oplossing evenwichtsvergelijking met sinusfunctie voor a_{grond}

Het is van belang om de evenwichtsvergelijking om te schrijven zodat de vergelijking numeriek kan worden opgelost. Allereerst is de u omgeschreven naar x en de afgeleiden van de u naar afgeleiden van de x . Dit is hieronder te zien.

$$\begin{aligned}w &= x \\ \dot{w} &= \frac{dx}{dt} \\ \ddot{w} &= \frac{d^2x}{dt^2}\end{aligned}$$

Vervolgens zijn deze onbekenden in de evenwichtsvergelijking ingevuld en is dit de evenwichtsvergelijking:

$$M * \frac{d^2x}{dt^2} + K * x = F$$

De vergelijking dient zo opgeschreven te worden dat de tweede afgeleide links van het '=' teken staat en de rest rechts. Met als resultaat:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{F}{M} - K * \frac{x}{M}$$

De beginvoorwaarden voor deze evenwichtsvergelijking zijn:

$$\begin{aligned}x(0) &= 0 \\ \frac{dx}{dt}(0) &= 0\end{aligned}$$

De tweedegraads differentiaalvergelijking dient zo om te worden geschreven, dat twee eerstegraads differentiaalvergelijkingen ontstaan. Dit is hieronder gedaan.

$$X_1 = x \qquad X_2 = \frac{dx}{dt}$$

$$X_1' = \frac{dx}{dt} \qquad X_2' = \frac{d^2x}{dt^2}$$

De twee differentiaalvergelijkingen zijn zo geschreven, dat er een matrixvergelijking is ontstaan. Deze is hieronder afgebeeld.

$$\begin{bmatrix} X_1' \\ X_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{K}{M} & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{F}{M} \end{bmatrix}$$

Om de set van vergelijkingen op te lossen met een tijdstap t is in dit onderzoek gebruik gemaakt van de methode van Euler. De methode van Euler is hieronder afgebeeld.

$$\text{Euler forward} = w_{n+1} = w_n + \Delta t * f(t_n, w_n)$$

Met de hand is de eerste stap van de Euler methode uitgevoerd zonder het invullen van de parameters

1 stap met de Euler methode:

$$\begin{bmatrix} w_{1,1} \\ w_{2,1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_{1,0} \\ w_{2,0} \end{bmatrix} + \Delta t \left(\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{K}{M} & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} w_{1,0} \\ w_{2,0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{F}{M} \end{bmatrix} \right)$$

Om de volgende stappen te berekenen, met ingevulde parameters, is gebruik gemaakt van het programma Python en hierna nog een keer gecontroleerd met MATLAB. Het script van python is hieronder te vinden.

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.integrate import odeint
import time
```

```
def MassSpring(state,t):

    # 2nd ode omschrijven naar 1e graad differentiaal vergelijkingen
    x = state[0]
    xd = state[1]

    # constanten
    k = 40000 # kiloNewtons per m
    m = 662000 # Kilogram
    c = 3 # m/s^2
    f = 2 # Hz

    xdd = ((-k*x)/m) + c*np.sin(2*np.pi*f*t)

    return [xd, xdd]

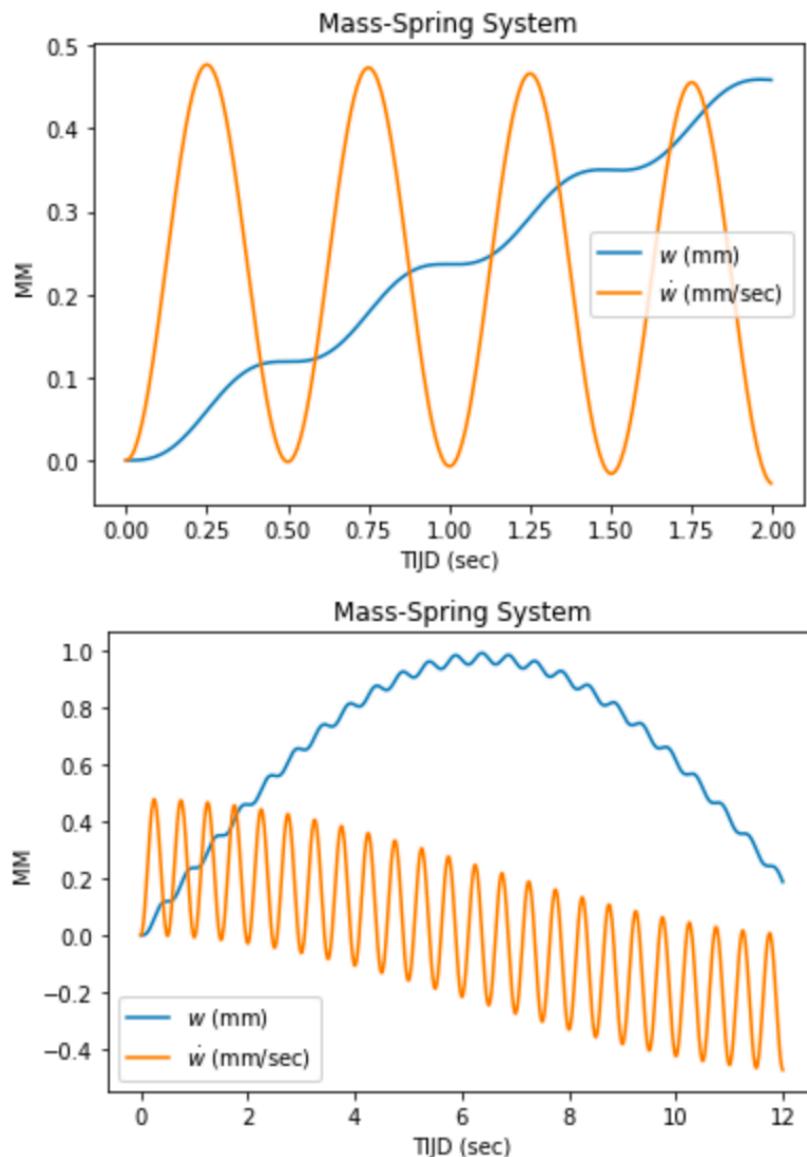
# initiele voorwaarden
state0 = [0.0, 0.0]
t = np.arange(0.0, 12, 0.005)

state = odeint(MassSpring, state0, t)

plt.plot(t, state)
plt.xlabel('TIJD (sec)')
plt.ylabel('MM')
plt.title('Mass-Spring System')
plt.legend(('w$ (mm)', '$\dot{w}$ (mm/sec)'))
plt.show()
```

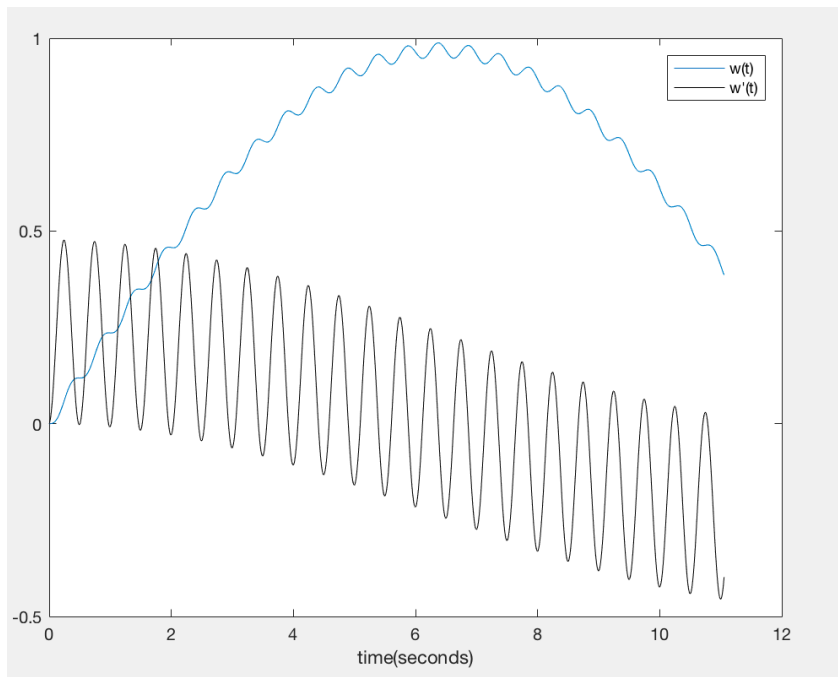
In figuur 28 zijn de resultaten van deze script geplott. In figuur 27 is de verplaatsing (in mm) en de snelheid (in mm/s) tegen de tijd uitgezet. De blauwe lijn representeert de verandering in verplaatsing (in mm) over de tijd (s) en de oranje lijn de verandering in snelheid (in mm/s) over de tijd.

In het script is een stapgrootte (dt) met een grootte van 0.005 s aangenomen. Dit is voldoende klein aangenomen, aangezien kleinere stapgrootten geen verschillen in de resultaten laten zien. Bij een halvering van de stapgrootte berekent het script nog steeds dezelfde bewegingen met dezelfde uitwijkingen.



Figuur 28 - Plot van Python script oplossing evenwichtsvergelijking. Boven: de resultaten gevonden voor een tijdspan van 2 seconden, onder: de resultaten gevonden voor een tijdspan van 2 seconden.

Daarnaast is tevens eenzelfde code geschreven in MATLAB om de resultaten te vergelijken. De code is te vinden in Bijlage E. De figuur dat ontstaan is uit deze code, is hieronder onder afgebeeld in figuur 29.



Figuur 29 - Plot van MATLAB-script oplossing evenwichtsvergelijking. Op de verticale as de verplaatsing in mm

Uit figuren 28 en 29 blijkt dat er na 7 seconden een piek is in de verplaatsing ter grootte van 0,18 mm. Met deze informatie is de bijbehorende veerkracht F_k bepaald. Als aangenomen wordt dat de veerstijfheid niet veranderd, kan de F_k worden bepaald als volgt:

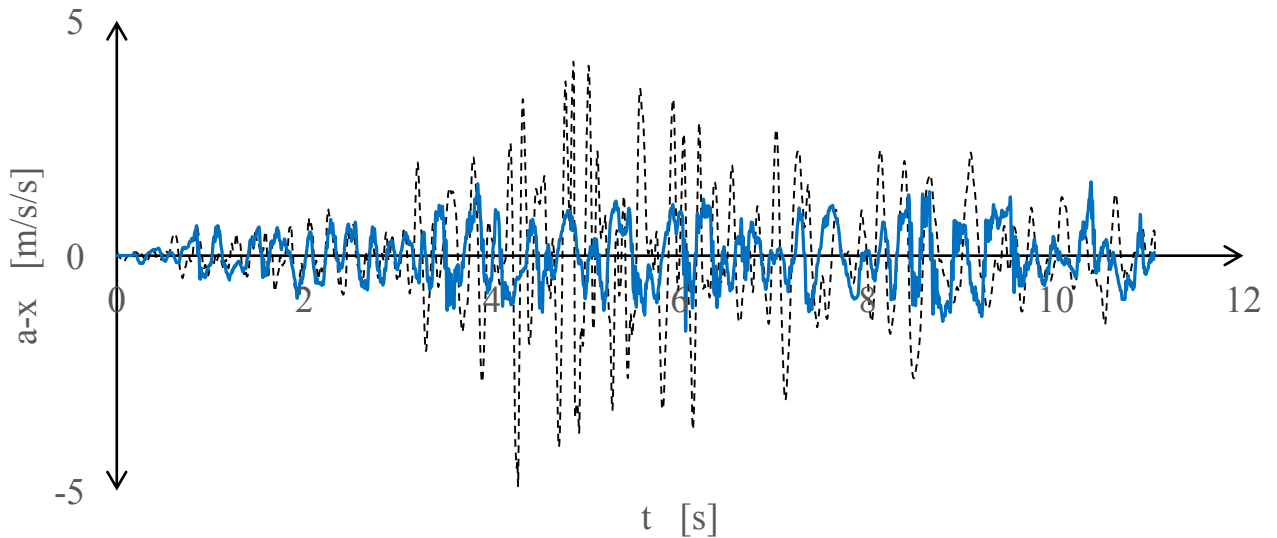
$$F_k = 0.001 \text{ m} * 40000 \frac{\text{kN}}{\text{m}} = 40 \text{ kN}$$

De maximaal resulterende veerkracht die is ontstaan onder de horizontale kracht $F = M * c * \sin(2 * \pi * f * t)$ is gelijk aan 40 kN. Dit is een lage waarde in vergelijking met de waarde 854 kN, bepaald in bijlage B, en vormt dus geen gevaar voor de silo.

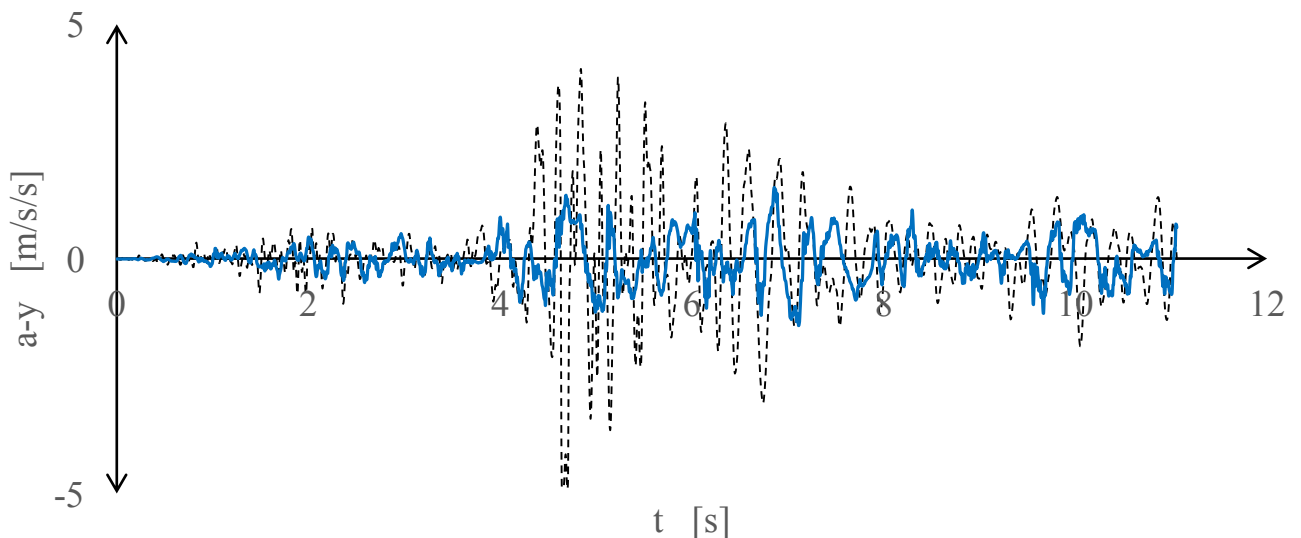
5.2.2 Oplossen evenwichtsvergelijking met realistische aardbevingssignalen voor a_{grond}

In dit paragraaf is wederom de Euler methode gebruikt om de verplaatsing en de snelheid van de verplaatsing van de silo te modelleren. Alleen is nu gebruik gemaakt van realistische aardbevingssignalen² voor de provincie Groningen. Dit omdat aangenomen is dat de silo zich in de provincie Groningen bevindt (Bijlage A). De aardbevingssignalen zijn verkregen in een Excel bestand met meer dan 2200 waarden over een tijdsplan van 11 seconden. De aardbevingssignalen bestaan uit versnellingen in drie verschillende richtingen, namelijk de horizontale x- en y-richting en de verticale z-richting. Voor dit onderzoek zijn alleen de x- en de y-richtingen interessant. Dit omdat de versnelling in de z-richting niet tot horizontale verplaatsingen van de silo leidt. De aardbevingssignalen zijn hieronder in de figuren 29 en 30 afgebeeld.

² Verkregen door Adarsha, student aan TU Delft



Figuur 30 - Aardbevingssignalen in de x-richting



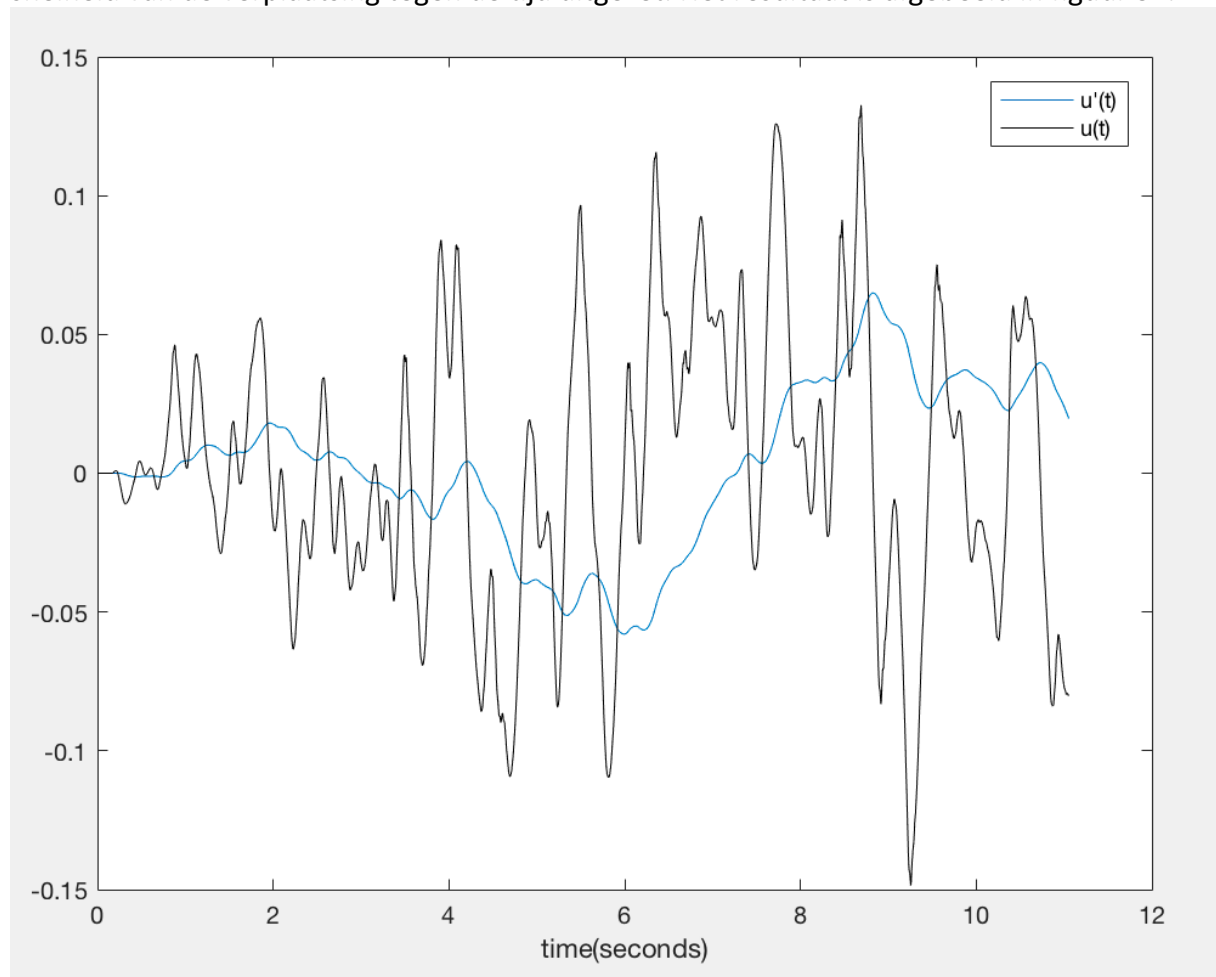
Figuur 31 - Aardbevingssignalen in de y-richting

Uit de figuren 30 en 31 blijkt dat de aardbevingssignalen in de x-richting maatgevend zijn want deze heeft de grootste uitwijkingen. De eigenfrequentie van de aardbevingssignalen is simpelweg geschat aan de hand van figuur 30. Hiervoor is het figuur uitvergroot en zijn de pieken geteld per seconde. De waarde voor de eigenfrequentie is geschat op 5 Hz. Dit is in vergelijking met de eigenfrequentie van de silo relatief hoog. Met de waarden van de verkregen aardbevingssignalen is ook de evenwichtsvergelijking, dat in paragraaf 5.2.2 is opgesteld, opgelost. Hiervoor is een script geschreven in MATLAB. Deze is weergegeven in bijlage E

De parameters zijn niet veranderd en hebben nog dezelfde waarde:

- $M = 662$ ton
- $K = 40000$ kN/m

Na deze parameters te hebben ingevuld is wederom geplot en zijn de verplaatsing en de snelheid van de verplaatsing tegen de tijd uitgezet. Het resultaat is afgebeeld in figuur 31.



Figuur 32 - Plot van MATLAB script oplossing evenwichtsvergelijking met realistische aardbevingssignalen voor Groningen. Op de verticale as de verplaatsing in mm.

In het script is een stapgrootte (dt) met een grootte van 0.005 s genomen. Dit is voldoende klein aangenomen, aangezien kleinere stapgrootten geen verschillen in resultaten laten zien. Bij een halvering van de stapgrootte berekent het script nog steeds dezelfde bewegingen met dezelfde uitwijkingen.

Uit figuur 32 blijkt dat de verplaatsing nergens groter is dan 15 mm. Met deze informatie is de bijbehorende veerkracht F_k bepaald. Als aangenomen wordt dat de veerstijfheid niet veranderd, kan de F_k worden bepaald als volgt:

$$F_k = 0.015 \text{ m} * 40000 \frac{\text{kN}}{\text{m}} = 600 \text{ kN}$$

De maximaal resulterende veerkracht die is ontstaan onder de horizontale kracht $F = M * c * \sin(2 * \pi * f * t)$ is gelijk aan 600 kN. Dit is een waarde dat kleiner is dan de referentiewaarde 854 kN, berekend in bijlage B waarbij in hoofdstuk 4 de verplaatsing en de oplegreacties van zijn berekend. De verplaatsing is ook kleiner dan de verplaatsing dat is berekend bij een horizontale puntlast van 854 kN. De verschillen zijn hieronder weergegeven in tabellen 17 en 18.

Tabel 17 - Verschil verplaatsing statische en dynamische verplaatsing.

Statische verplaatsing SCIA Engineer (Wandelement) 864 eindige elementen [mm]	Dynamische verplaatsing reële aardbevingssignalen berekend met MATLAB [mm]	Verschil [mm]	Percentage [%]
24,8	15	9,8	65,33

Tabel 18 - Verschil in de resultaten van de referentiewaarde en de onstante veerkracht.

Referentiewaarde voor de horizontale puntlast ten gevolge van een aardbeving (bepaald in bijlage B) [kN]	Ontstane veerkracht ten gevolge van de verplaatsing ontstaan door de reële aardbevingssignalen [kN]	Verschil [mm]	Percentage [%]
854	600	254	42,3

6. Conclusies en aanbevelingen

In dit hoofdstuk zijn de conclusies getrokken en geformuleerd aan de hand van de resultaten die in de hoofdstukken 4 en 5 zijn gevonden. Het doel van dit onderzoek is om de kolomkrachten nauwkeuriger te bepalen dan eerder is gedaan in het onderzoek van Kapteijn (2017) en om de dynamisch invloed van een aardbeving in beeld te brengen en te beschrijven. Aan de hand van de gevonden resultaten in de hoofdstukken 3, 4 en 5 zijn conclusies getrokken. De conclusies gelden voor zowel gladwandsilo's (GWS) als profielwandsilo's (PWS) omdat in paragraaf 4.5 is aangetoond dat de E-modulus geen tot weinig verschil inbrengt in de resultaten van de oplegreacties.

6.1 Algemene conclusies

- De resultaten van de mechanicamodellen, gemodelleerd met de verschillende programma's, komen zo overeen dat gezegd kan worden dat het programma SCIA Engineer zodanig betrouwbaar is dat hiermee verder gemodelleerd kan worden.
- Uit paragraaf 4.5 blijkt dat het overbodig is om de eindige elementen in SCIA Engineer zo te bewerken dat zij op een reëel profielwandelement lijken. Het verschil zou in de E-modulus moeten zitten en aangezien er geen tot weinig veranderingen in de resultaten van de oplegreacties zit wanneer eindige elementen worden gebruikt met een halve E-modulus dan normaal gebruikt wordt. Ook de dikte van het wandelement heeft verder geen of weinig invloed op de resultaten van de oplegreacties.

6.2 Conclusie over het model met wandelementen en de handberekening

- De resultaten van het model met wandelementen verschillen met de resultaten van de handberekening maar de verschillen zijn niet groter dan 10%. Tabel 11 geeft aan dat het model in SCIA Engineer verschillen geeft in de tientallen kN's. De voorkeur gaat uiteindelijk naar het modelleren met SCIA Engineer aangezien met SCIA Engineer meer factoren worden betrokken dan in een simpele handberekening maar een simpele handberekening geeft al snel een goed overzicht van de krachten die ontstaan met een foutschatting kleiner dan 10%. De handberekening is daarom een goeder vervanging voor het ingewikkelde computerprogramma.

6.3 Conclusie over de modellen met wandelementen en diagonalen

- De resultaten van het model met wandelementen verschillen significant met de resultaten van het model met diagonalen. Dit geeft aan dat de berekeningen nauwkeuriger zijn met het programma SCIA Engineer. Met SCIA Engineer kan het wandelement worden vervangen door eindige elementen, waaraan eigenschappen gegeven kan worden die de reële wandelementen ook hebben. Hierdoor komt dit dichterbij de werkelijkheid dan het geheel aan wandelementen vervangen door diagonalen.

6.4 Conclusie over het effect van de afschuifweerstand

- Uit de resultaten van paragraaf 4.3 blijkt dat de afschuifweerstand geringe invloed heeft op de oplegreacties, maar dat de invloed op de verplaatsing significant is. De silo verliest stijfheid wanneer de panelen alleen aan de zijkanten vastgeschroefd zijn en niet aan elkaar verbonden zijn in verticale richting. Hierdoor verplaatst deze zich dan meer onder invloed van een horizontale kracht.

6.5 Conclusie over de vergelijking SCIA Engineermodel met wandelementen met MatrixFrame model met stijfheid

- De resultaten van het model met wandelementen, gemodelleerd in SCIA Engineer, geven significante verschillen met het MatrixFrame model, waarbij beide modellen onderhevig zijn aan een zijdelingse verdeelde belasting. De verschillen bedragen tientallen kN's, met het grootste verschil in de verticale oplegreactie in punt D, namelijk 259,04 kN (tabel 16). Dit kan zijn omdat er in dit onderzoek niet gecorrigeerd is naar het traagheidsmoment van de diagonalen die zijn gebruikt in het onderzoek van Kapteijn (2017).

6.5 Conclusie over het dynamisch model

- Uit de resultaten van het dynamisch model dat opgelost is met gebruik van de reële aardbevingssignalen is gebleken dat de verplaatsing en de kracht dat is ontstaan is kleiner zijn dan de waarden bepaald in de eerdere hoofdstukken. Het verschil in verplaatsing is 65,33% kleiner en het verschil in de ontstane veerkracht met de horizontale puntlast van 854 kN is 42,3%.

Aanbevelingen

In dit onderzoek is de silo, onder statische omstandigheden, gemodelleerd met eindige elementen die de wandelementen representeren. Dit model komt in de buurt van de werkelijkheid en de berekende oplegreacties is een goede representatie van de werkelijke oplegreacties die ontstaan. In dit onderzoek zijn de eindige elementen niet gecorrigeerd met de traagheidsmomenten die de wandelementen in werkelijkheid hebben. Daarom wordt er aanbevolen om in het vervolgonderzoek de wandelementen met eindige elementen te modelleren waarbij de traagheidsmomenten zijn gecorrigeerd aan de werkelijkheid.

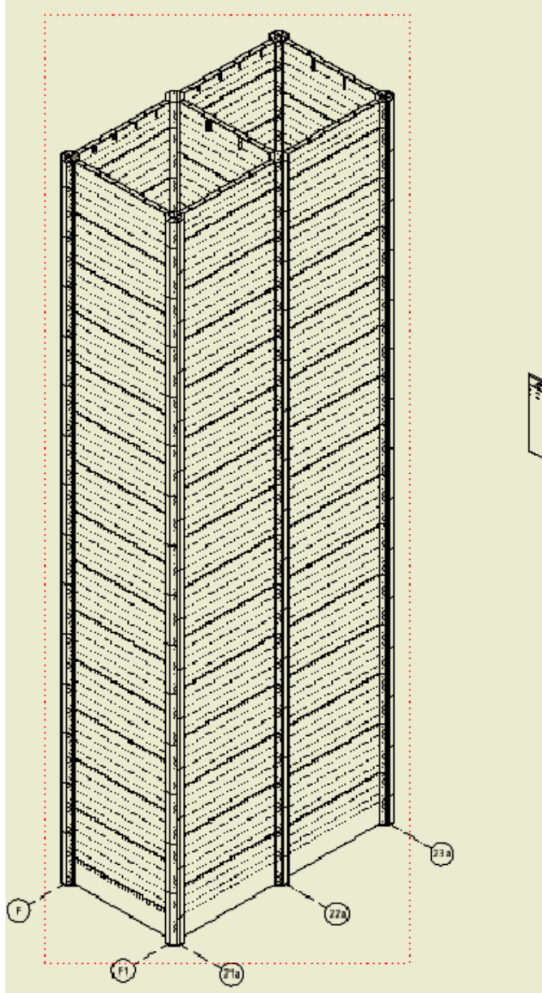
In dit onderzoek komen de resultaten van de homogene oplossing niet overeen met de resultaten van de numerieke oplossing. Te verwachten is dat dit wel zou moeten. In verband met het tijdsbestek voor dit rapport is het niet gelukt om de fout te vinden. Duidelijk is dat de fout er wel is en de tweede aanbeveling is dan ook om in het vervolgonderzoek deze fout te vinden en op te lossen.

Bibliografie

- Bastiaens, A. (2012, 3 juni). SCIA Engineer on Mac OS X. Geraadpleegd van http://resources.scia.net/nl/articles/general/scia_engineer_on_macosx.htm
- Hartsuijker, C., & Welleman, J. W. (2006). *Engineering Mechanics, Volume 1 - Equilibrium*. Dordrecht, Nederland: Springer.
- Kapteijn, T. S. (2017). *De wandstijfheid van een profiel- en gladwandsilo*. Geraadpleegd van http://homepage.tudelft.nl/p3r3s/BSc_projects/eindrapport_kapteijn.pdf
- PETKUS. (2017). *Products storing*. Opgehaald van PETKUS:
<Http://www.petkus.com/products/-/info/storing/profile-wall-silo/profile-wall-silo>
- Reimbert, M. L., & Reimbert, A. M. (1976). Posts Supporting Silos. In M. L. Reimbert, & A. M. Reimbert, *SILOS Theory and Practise* (pp. 91-93). Trans Tech Publications.

Bijlage A: Silosysteem

Silo's worden gebruikt voor de opslag van stort- of bulkgoederen, zoals cement, graan, kolen enzovoort. Het silosysteem bestaat uit profielwandsilo's (PWS) en gladwandsilo's (GWS). Een voorbeeld van een silo met gestapelde wandpanelen is afgebeeld in figuur 33.



Figuur 33 - Voorbeeld van een silo met de wandelementen koud op elkaar gestapeld

De in dit onderzoek besproken silo's worden geproduceerd door het bedrijf PETKUS. De kolommen van de cellen zijn holle staalprofielen gevuld met beton. Het betreft hier een modulaire silo. Deze wordt samengesteld uit het gewenste aantal silocellen, elk met een eigen trechter. Over de stalen constructie is een laag zink aangebracht waardoor roest wordt voorkomen. Dit wordt gegalvaniseerd staal genoemd. De wandelementen variëren in lengte van 2000 mm tot 4000 mm. (PETKUS, 2017)

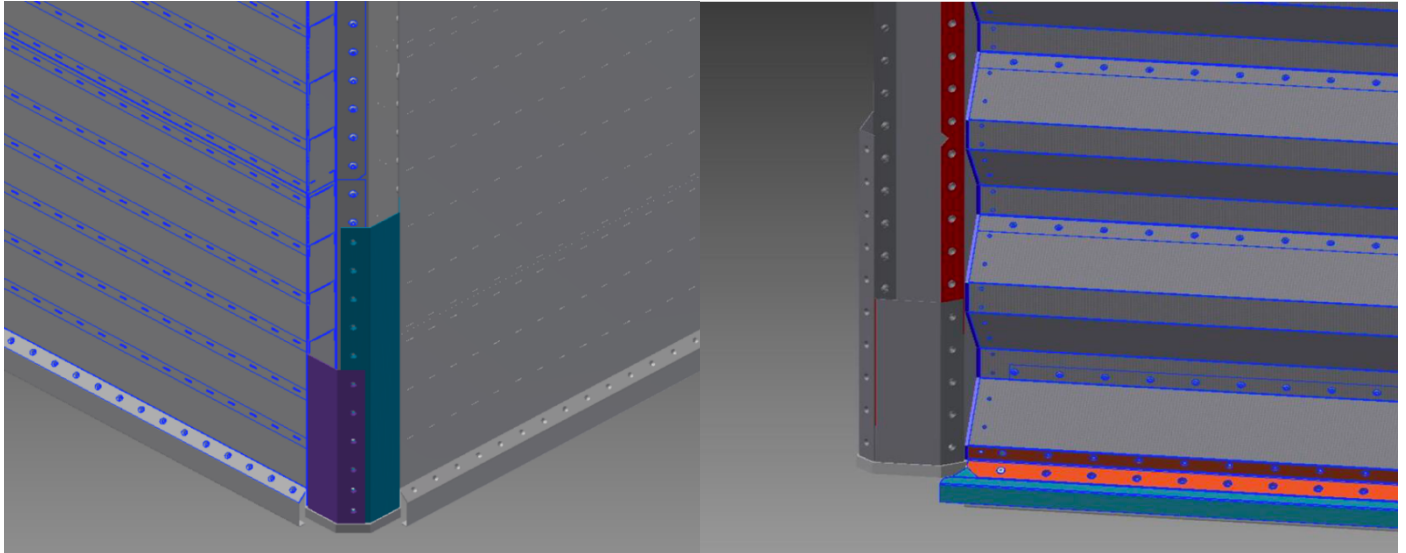
Rechthoekige silo's hebben de voorkeur boven een cilindervormige omdat de rechthoekige silo een zelfdragende structuur heeft, waardoor het flexibel is. Ook kunnen rechthoekige silo's 27% meer inhoud bevatten dan cilindervormige silo's.

Veel voorkomende afmetingen van profielwandsilo's die worden gebruikt zijn:

- een totale breedte van 12m;
- een hoogte van 4.5m voor de stalen onderconstructie;
- plaathogtes van 6m, 12m, 18m en 24m (dezekomen het vaakst voor).

In dit onderzoek is gewerkt met silo's die dezelfde afmetingen hebben als in het onderzoek van Kapteijn (2017?) om de resultaten te kunnen vergelijken.

Zoals eerder vermeld is de silo opgebouwd uit twee verschillende wandpanelen, namelijk gladwandpanelen en profielwandpanelen. Deze twee wandpanelen in een silo zijn afgebeeld in figuur 34.

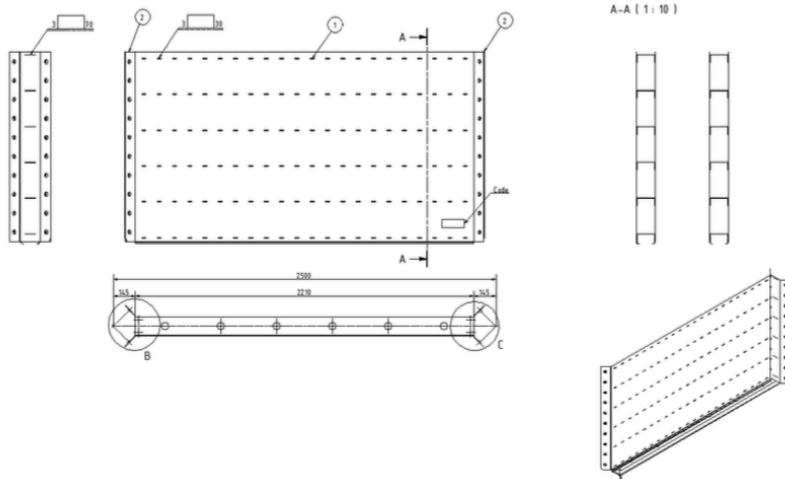


Figuur 34 - Links: structuur gladwandsilo; rechts: structuur profielwandsilo (Kapteijn, 2017)

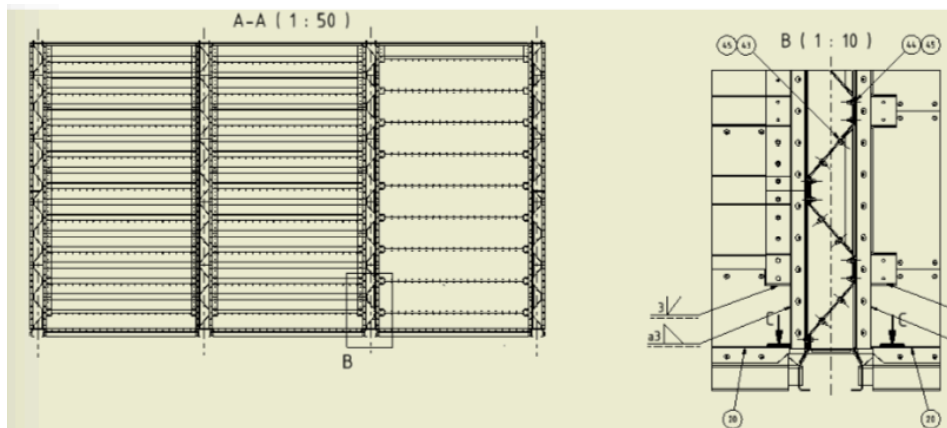
Gladwandpanelen zijn wandpanelen zonder profiel. Deze worden vaak koud op elkaar gestapeld tussen de kolommen in. Profielwandpanelen zijn wandpanelen met een profiel. Twee veel voorkomende profielwandpanelen zijn de sandwichpanelen en damwandpanelen.

Sandwichpanelen zijn op elkaar gestapeld en niet in verticale richting met elkaar verbonden. De panelen zijn wel 'in verband' gemonteerd, wat betekent dat de haaks op elkaar staande panelen verticaal een half paneel verschoven zijn ten opzichte van de andere. Dit type paneel wordt als meeste toegepast en berekend via 1993-1-3/5 (PETKUS, 2017). Het sandwichpaneel is hieronder afgebeeld in figuur 35.

Damwandpanelen worden op dezelfde wijze gemonteerd als de bovenstaande panelen; het enige verschil is dat deze panelen in de langsnaad door bouten met elkaar verbonden worden. Dit zorgt ervoor dat speling niet mogelijk is. De panelen worden vooralsnog via 1993-1-3/5 berekend (PETKUS, 2017). Een afbeelding van het damwandpaneel is afgebeeld in figuur 36.



Figuur 35 - Afbeelding van een sandwichpaneel verkregen via PETKUS (2017).



Figuur 36 - Afbeelding van een damwandpaneel verkregen via PETKUS (2017).

De profielwandsilo die is afgebeeld in figuur 37, wordt voornamelijk in gebruik genomen wanneer de silo gestationeerd is tussen andere constructies op de industrieterreinen.



Figuur 37 - Afbeelding van een silo

Bijlage B: Belastingen

De belastingen op de silo zijn dezelfde belastingen die berekend zijn door Kapteijn (2017, bijlage 2). Deze zijn nog een keer gecontroleerd.

Voor de belastingen op de constructie wordt een fictieve siloconstructie beschouwd die zich bevindt in Delfzijl (Groningen). De fictieve silo heeft een onderconstructie met een hoogte van 4,5 meter en een silowand van 18 meter hoog, de totale hoogte is 22,5 meter (Kapteijn, 2017). Voor de belastingen is gekeken naar een silo met een breedte van 12 meter en een diepte van 3 meter.

De invloed van de wandstijfheid, zonder de wand te vervangen door een diagonale staaf, op de verticale oplegreacties in de ten gevolge van een horizontale last is beschouwd in dit rapport.

Windbelasting

De berekening van de windbelasting op de silo is overgenomen van Kapteijn (2017) en is berekend aan de hand van NEN-EN 1991-1-4+A1+C2 waarbij de nationale voorschriften gegeven in NEN-EN-1991-1-4+A1+C2:2011/NB:2011 zijn gevolgd.

De extreme stuwdruk is lineair geïnterpoleerd tussen een referentiehoogte van respectievelijk 20 en 25 meter.

Voor de uitwendige drukcoëfficiënten is de $C_{pe,10}$ gebruikt. Dit is de coëfficiënt die wordt gebruikt om de hoofddraagconstructie van gebouwen te ontwerpen en berekenen. De uitwendige druk coëfficiënt voor winddruk is gelijk aan +0,8. Voor windzuiging geldt een coëfficiënt van -0,5. De verdeelde windbelasting wordt berekend aan de hand van

$$w_{e;stuw} = q_p \cdot C_{pe,10} = 0,935 \cdot 0,8 = 0,75 \text{ kN/m}^2$$

$$w_{e;zuijg} = q_p \cdot C_{pe,10} = 0,935 \cdot -0,5 = -0,48 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{stuw} = w_{e;stuw} \cdot b = 0,75 \cdot 3 = 2,25 \text{ kN/m}$$

$$q_{zuijg} = w_{e;zuijg} \cdot b = -0,48 \cdot 3 = -1,44 \text{ kN/m}$$

Horizontale belasting

Het elastische responspectrum van de siloconstructie is berekend volgens NEN-EN 1998 NPR9998:2015.

Voor Delfzijl volgt uit de norm, de referentiewaarde van 0,16g voor de piekgrondversnelling ($a_{g:ref}$) met een herhalingstijd van 475 jaar. Er is aangenomen dat de fictieve siloconstructie gebouwd is op een ondergrond met 'normale bodemcondities' volgens de NEN-EN 1998.

Aan de hand van de referentiewaarde voor de piekgrondversnelling zijn de spectrale versnellingen voor korte trillingsperioden (S_s) en lange trillingsperioden (S_1) berekend:

$$S_s = 2,2 * a_{g:ref} * k_{ag} = 2,2 * 0,16 * 1,1 = 0,39 \text{ g}$$

$$S_1 = 0,654 * a_{g:ref} * k_{ag} = 0,654 * 0,16 * 1,1 = 0,12 \text{ g}$$

Waarbij $k_{ag} = 1,1$ voor gebouwen niet bestemd voor het verblijf van mensen.

Vervolgens zijn de rekenwaarden van de coëfficiënten voor korte trillingsperiode (F_a) en voor lange trillingsperiode (F_v) berekend:

$$F_a = -0,50 * \ln(a_{g:ref} * k_{ag}) + 0,65 = -0,50 * \ln(0,16 * 1,1) + 0,65 = 1,51$$

$$F_v = -0,87 * \ln(a_{g:ref} * k_{ag}) + 2,44 = -0,87 * \ln(0,16 * 1,1) + 2,44 = 2,29$$

De rekenwaarden van de spectrale versnellingen voor korte en lange trillingsperiodes (S_{MS} en S_{m1}) volgen uit de volgende formules:

$$S_{MS} = F_a * S_s = 1,51 * 0,39 = 0,59 \text{ g}$$

$$S_{M1} = F_v * S_1 = 2,29 * 0,12 = 0,26 \text{ g}$$

De onder- en bovengrens van de trillingsperiodes (T_B en T_C) waarvoor de spectrale versnelling constant is en de trillingsperiode (T) van de siloconstructie is berekend aan de hand van de volgende formules:

$$T_C = \sqrt{\frac{S_{M1}}{S_{MS}}} = \sqrt{\frac{0,26}{0,59}} = 0,67 \text{ s}$$

$$T_B = 0,2 * T_C = 0,2 * 0,67 = 0,13 \text{ s}$$

$$T = c * h^{0,75} = 0,085 * 22,5^{0,75} = 0,88 \text{ s}$$

Waarbij c^3 een constante is met een waarde van 0,085.

Sinds $T_C \leq T$ geldt er voor het elastisch responspectrum:

$$S_e(T) = \frac{S_{M1}}{T^2} * \eta = \frac{0,26}{0,88^2} * 1,0 = 0,34 \text{ g}$$

Met η een dimensieloze dempingsfactor met een referentiewaarde van 1,0 voor 5% viskeuze demping.

Een waarde van 0,34 g voor het elastisch responspectrum is relatief hoog voor Delfzijl. Daarom is verder gerekend met een meer realistische waarde voor $S_e(T)$, namelijk 0,14 g.

Voor een spectrale versnelling van 0,14 g kan de traagheidskracht van het eigen gewicht en product worden berekend. Met behulp van de tweede wet van Newton, $F = m * a$ is de horizontale kracht ten gevolge van een aardbeving berekend.

³ Verstrekt door de opdrachtgever Ir. A. Schroten

Hiervoor is het nodig om de massa van de silo te berekenen. Uit de algemene gegevens, verkregen door PETKUS (2017), kan de massa van de silo worden opgemaakt. Deze verschilt wel in of de silo geheel gevuld is, half gevuld is of niet gevuld is. In dit onderzoek is aangenomen dat de silo, mocht deze gevuld zijn, gevuld is met bulkgoed met een soortelijk gewicht van 800 kg/m³.

De totale massa van de silo bestaat dus uit de eigen massa van de silo zelf plus de hoeveelheid bulkgoed dat opgeslagen is. Verder is besloten dat er bulkgoed met soortelijk gewicht van 800 kg/m³ zal worden gebruikt. De beschikbare m³ in de silo is gelijk aan:

$$I_{silo} = b * l * h = 3 * 12 * 18 = 648 \text{ m}^3$$

De massa van het bulkgoed, wanneer de hele silo gevuld, is dan gelijk aan:

$$m_{bulkgoed} = I_{silo} * 800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 518,4 \text{ ton}$$

Voor de eigen massa van de silo wordt aangenomen dat 20% van het gewicht⁴ aan bulkgoed bij een volledig gevulde silo. De eigen massa van de silo en de totale massa is gelijk aan:

$$m_{eigen} = 0,2 * 518,4 \text{ ton} = 103,7 \text{ ton}$$

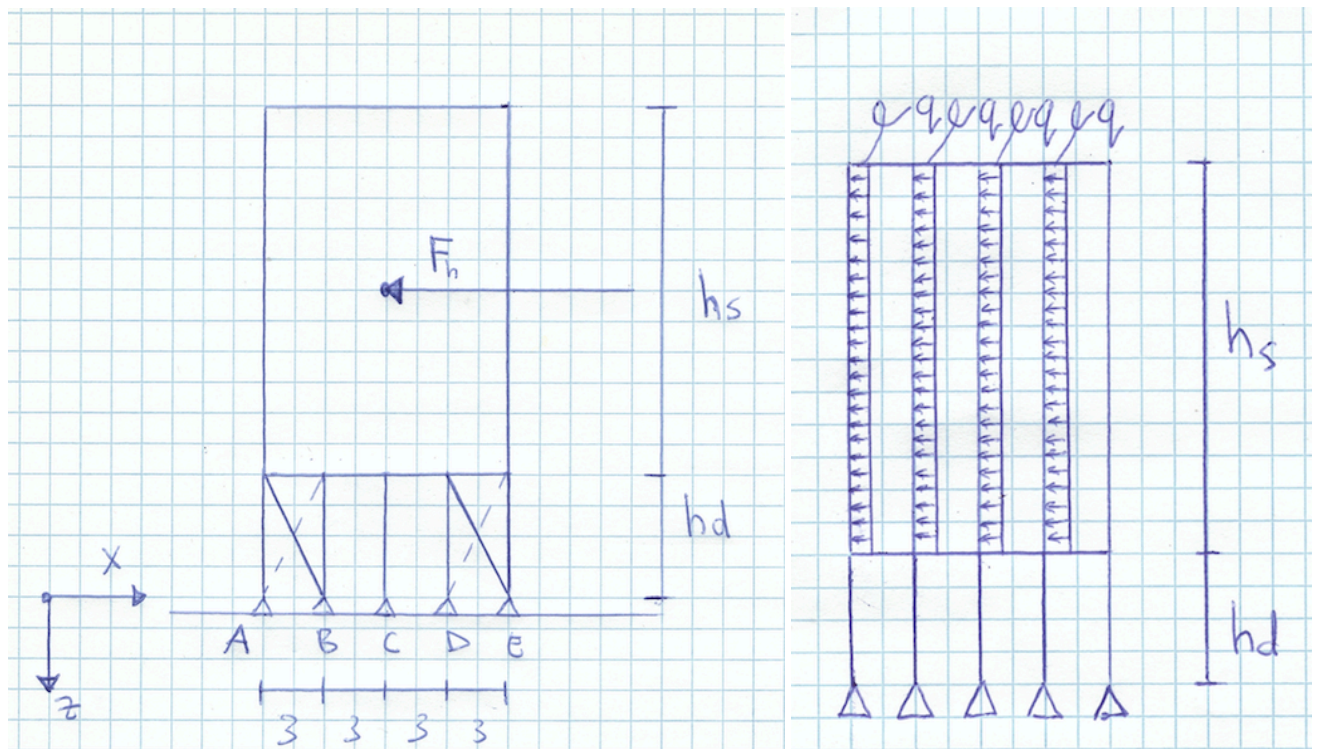
$$m_{tot} = m_{bulkgoed} + m_{eigen} = 518,4 \text{ ton} + 103,7 \text{ ton} = 622 \text{ ton}$$

Nu de spectrale versnelling en de massa van de siloconstructie bekend zijn, is de kracht op de silo berekend.

$$Fh = m_{tot} * S_e(T) = 622 * 10^3 * 0,14 * 9,81 = 854 \text{ kN}$$

Voor de handberekening en de controle van de handberekening in MatrixFrame is aangenomen dat de berekende horizontale kracht (Fh) aangrijpt in het massazwaartepunt van de boven constructie van de silo. Voor het model in paragraaf 4.4 is de puntlast omgerekend naar een zijdelingse verdeelde belasting zodat het model vergeleken kon worden met het uiteindelijke model uit het rapport van Kapteijn (2017). De mechanicamodellen met de puntlast en de zijdelingse verdeelde belasting zijn afgebeeld in figuur 37.

⁴ Realistische waarde gebruikt in de praktijk verstrekt door opdrachtgever Ir. A. Schroten.



Figuur 38 - Equivalente mechanica modellen met links een horizontale puntlast en rechts een zijdelingse verdeelde belasting

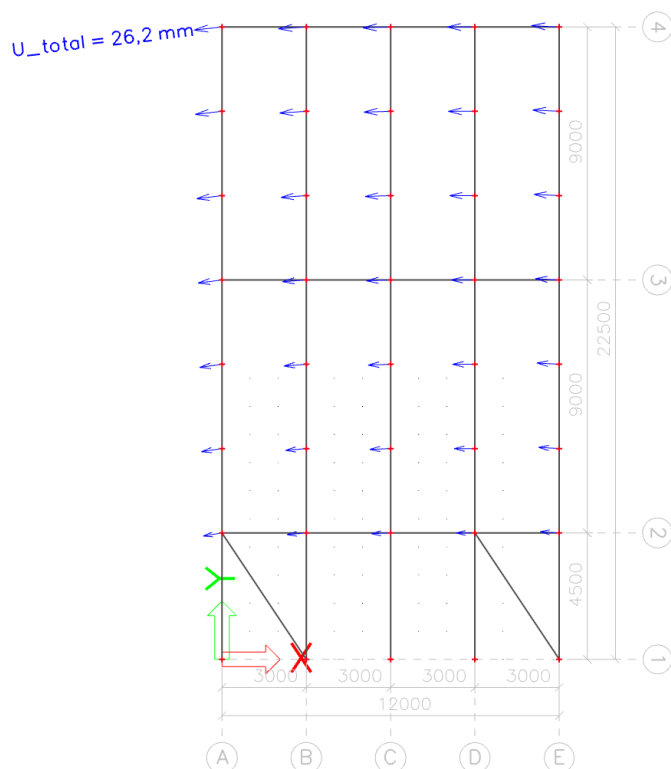
q is als volgt berekend:

$$q = \frac{Fh}{4 * h_s} = \frac{854kN}{4 * 18m} = 11,9 kN$$

Bijlage C: Resultaten 4 en 216 eindige elementen

In deze bijlage zijn de resultaten van de modellen met 4 en 216 eindige elementen weergegeven in figuren en de resultaten in tabellen vergeleken met de gevonden resultaten in paragraaf 3.3.

De figuren en tabel hieronder betreffen het model met **4 eindige elementen**.



Figuur 40 - Resultaat verplaatsing van het SCIA Engineermodel met wandelementen [4 eindige elementen] ten gevolge van een horizontale puntlast ter grootte van 854 kN.

Knoopreacties

Naam	BG	R _x [kN]	R _y [kN]	M _z [kNm]
Sn1/K1	BG2	1,99	872,68	0,00
Sn2/K3	BG2	363,42	-45,11	0,00
Sn3/K5	BG2	2,12	235,70	0,00
Sn4/K7	BG2	2,02	16,21	0,00
Sn5/K9	BG2	484,44	-1079,48	0,00

Figuur 39 - Resultaten oplegreacties van het SCIA Engineermodel met wandelementen [4 eindige elementen] met de positieve y- en x-richting afgebeeld in figuur 39.

Tabel 19 - Vergelijking resultaten van het model met diagonalen met het model met wandelementen (met 1 eindig element). Beide gemodelleerd in SCIA Engineer.

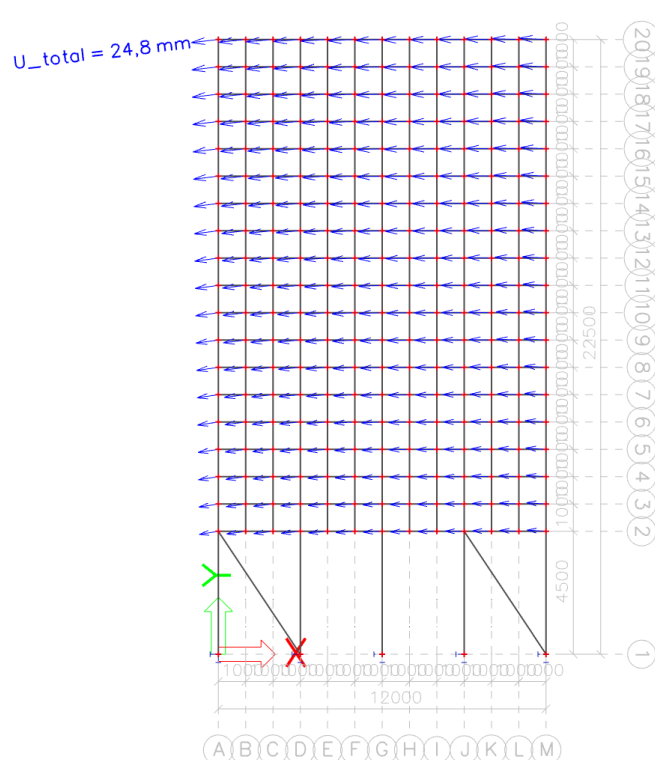
Oplegreacties	SCIA Engineer (Diagonaal) [kN]	SCIA Engineer (Wandelement) [kN]	Richting komt overeen?	Afwijking [kN]	Percentage [%]
Av	-843,8	-872,68	Ja	28,88	3,31
Bv	2,65	45,11	Ja	42,46	94,13
Cv	-254,82	-235,7	Ja	19,12	8,11
Dv	33,9	-16,21	Nee	50,11	309,13
Ev	1062,07	1079,48	Ja	17,41	1,61
Ah	0	1,99	-	1,99	100,00
Bh	366,58	363,42	Ja	3,16	0,87
Ch	0	2,12	-	2,12	100,00
Dh	0	2,02	-	2,02	100,00
Eh	487,42	484,44	Ja	2,98	0,62

* Waarde ligt relatief gezien erg dichtbij 0 of is gelijk aan 0, waardoor de percentuele afwijking er hoog is. Om die reden is deze niet meegenomen.

Tabel 20 - Vergelijking resultaten van het model met diagonalen met het model met wandelementen (met 1 eindig element). Beide gemodelleerd in SCIA-Engineer.

Verplaatsing SCIA Engineer (Diagonaal) [mm]	Verplaatsing SCIA Engineer (Wandelement) 4 eindige elementen [mm]	Vershil [mm]	Percentage [%]
23,6	26,2	2,6	9,924

De figuren en tabel hieronder betreffen het model met **216 eindige elementen**.



Figuur 42 - Resultaat verplaatsing van het SCIA-Engineer model met wandelementen [216 eindige elementen] ten gevolge van een horizontale puntlast ter grootte van 854 kN.

Knoopreacties

Naam	BG	R _x [kN]	R _y [kN]	M _z [kNm]
Sn1/K1	BG2	2,12	853,68	0,00
Sn2/K3	BG2	363,47	-13,56	0,00
Sn3/K5	BG2	2,16	245,74	0,00
Sn4/K7	BG2	2,15	-22,51	0,00
Sn5/K9	BG2	484,11	-1063,35	0,00

Figuur 41 - Resultaten oplegreacties van het SCIA-Engineer model met wandelementen [216 eindige elementen] met de positieve y- en x-richting afgebeeld in figuur 41.

Tabel 21 - Vergelijking resultaten van de oplegreacties van het model met diagonalen met het model met wandelementen (met 1 eindig element).

Oplegreacties	SCIA Engineer (Diagonaal) [kN]	SCIA Engineer (Wandelement) [kN]	Richting komt overeen?	Afwijking [kN]	Percentage [%]
Av	-843,8	-853,68	Ja	9,88	1,16
Bv	2,65	13,56	Ja	10,91	*
Cv	-254,82	-245,74	Ja	9,08	3,69
Dv	33,9	22,51	Ja	11,39	*
Ev	1062,07	1063,35	Ja	1,28	0,12
Ah	0	2,12	-	2,12	*
Bh	366,58	363,47	Ja	3,11	0,86
Ch	0	2,16	-	2,16	*
Dh	0	2,15	-	2,15	*
Eh	487,42	484,11	Ja	3,31	0,68

* Waarde ligt relatief gezien erg dichtbij 0 of is gelijk aan 0, waardoor de percentuele afwijking er hoog is. Om die reden is deze niet meegenomen.

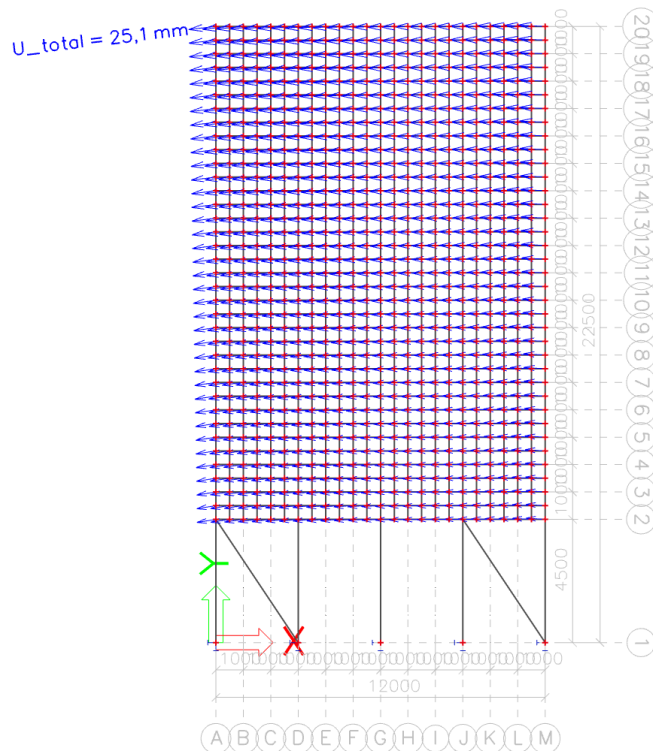
Tabel 22 - Vergelijking resultaten van de verplaatsing van het model met diagonalen met het model met wandelementen (met 216 eindige elementen) in SCIA-Engineer.

Verplaatsing SCIA-Engineer (Diagonaal) [mm]	Verplaatsing SCIA-Engineer (Wandelement) 216 eindige elementen[mm]	Vershil [mm]	Percentage [%]
23,6	24,8	1,2	4,839

Bijlage D: Resultaten test halve E-modulus

In deze bijlage zijn de resultaten van het model met gladwandelementen (864 eindige elementen) waarbij de wandelementen een halve E-modulus hebben dan normaal weergegeven in figuren en zijn de resultaten in tabellen vergeleken met de gevonden resultaten in paragraaf 4.1.3.

Knoopreacties



Figuur 44 - Resultaat verplaatsing van het SCIA Engineermodel met wandelementen waarbij de wandelementen een halve E-modulus hebben [864 eindige elementen] ten gevolge van een horizontale puntlast ter grootte van 854 kN.

Naam	BG	R _x [kN]	R _y [kN]	M _z [kNm]
Sn1/K1	BG2	2,12	855,40	0,00
Sn2/K3	BG2	363,48	-15,88	0,00
Sn3/K5	BG2	2,16	244,82	0,00
Sn4/K7	BG2	2,15	-20,58	0,00
Sn5/K9	BG2	484,09	-1063,75	0,00

Figuur 43 - Resultaten oplegreacties van het SCIA Engineermodel met wandelementen waarbij de wandelementen een halve E-modulus hebben [864 eindige elementen] met de positieve y- en x-richting afgebeeld in figuur 43.

Tabel 23 - Vergelijking resultaten van de oplegreacties tussen het model met wandelementen (met 846 eindige elementen) met een E-modulus van 2.1 GPA met het model met wandelementen (met 846 eindige elementen) met een E-modulus van 1,55 GPA.

Oplegreacties	SCIA Engineer (864 eindige elementen) E-modulus 2,1 GPA[kN]	SCIA Engineer (864 eindige elementen) E-modulus 1,55 GPA[kN]	Richting komt overeen ?	Afwijking [kN]	Percentage [%]
Av	-853,69	-855,4	Ja	1,71	0,20
Bv	13,58	15,88	Ja	2,3	16,94
Cv	-245,74	-244,82	Ja	0,92	0,37
Dv	22,49	20,58	Ja	1,91	8,49
Ev	1063,35	1063,75	Ja	0,4	0,04
Ah	2,12	2,12	Ja	0	0,00
Bh	363,47	363,48	Ja	0,01	0,00
Ch	2,17	2,16	Ja	0,01	0,46
Dh	2,15	2,15	Ja	0	0,00
Eh	484,11	484,09	Ja	0,02	0,00

Tabel 24 - Vergelijking resultaten voor de verplaatsing van het model met wandelementen met een normale E-modulus en het model waarbij de wandelementen een halve E-modulus bevatten.

Verplaatsing SCIA Engineer (Wandelement) normale E- modulus [mm]	Verplaatsing SCIA Engineer (Wandelement) halve E-modulus [mm]	Vershil [mm]	Percentage [%]
24,8	25,1	0,3	1,19

Uit Tabel 23 blijkt dat de oplegreacties erg dicht bij elkaar liggen. Het grootste verschil is gevonden in de verticale van oplegreactie B. Deze verschilt maar 2,3 kN. Ook liggen de resultaten voor de verplaatsing erg dicht bij elkaar. De verplaatsing van het model met de halve E-modulus is 0,3 mm groter. Dit is een percentuele verandering van 1,19 %.

Bijlage E: MATLAB SCRIPT

In deze bijlage is het script weergegeven dat geproduceerd is in MATLAB.

```
tf = 60;
dt = 0.005;
Nt = tf/dt;

filename = 'book1.xlsx';
sheet = 1;
xlRange = 'A3:A2214';
t = xlsread(filename,sheet,xlRange)

M= 662;
p= 40;
f= 2;
c= 3;
[j,k]= size(t)
x0 = 0;
u0 = 0;
Nt=j;
x = zeros(Nt,1);
u = x;
Nt=Nt-1;
x(1) = x0;
u(1) = u0;

for i = 1:Nt;
    F= c*sin(2*3.14*f*dt*(i+1));
    u(i+1) = u(i) + dt*(-(p/M)*x(i)+F);
    x(i+1) = x(i) + dt*u(i);

end
size(t)
size(x)
size(u)
plot(t,x,t,u,'k');
xlabel('time(seconds)');

legend('u'(t)', 'u(t)');

figure;

xlRange = 'B3:B2214';
F1=xlsread(filename,sheet,xlRange)

[j,k]= size(t)
x0 = 0;
u0 = 0;
Nt=j;
x = zeros(Nt,1);
u = x;
Nt=Nt-1;
x(1) = x0;
u(1) = u0;

for i = 1:Nt;

    u(i+1) = u(i) + dt*(-(p/M)*x(i)+F1(i));
```

```
    x(i+1) = x(i) + dt*u(i);  
  
end  
size(t)  
size(x)  
size(u)  
plot(t,x,t,u,'k');  
xlabel('time(seconds)');  
legend('u'(t)','u(t)');
```

Bijlage F: Het gebruik van SCIA-Engineer op MAC-OS

In dit onderzoek is gewerkt met de volgende programma's: MatrixFrame en SCIA Engineer.

Aangezien er in dit onderzoek het wandelement op zichzelf is onderzocht (dus zonder deze te vervangen door een diagonaal) en omdat het programma MatrixFrame deze functie niet aanbiedt, is er op advies van begeleider P.C.J. Hoogenboom gekozen voor het programma SCIA Engineer. Dit is een programma die in werkwijze en resultaten te vergelijken is met het programma MatrixFrame. Dit is belangrijk omdat de resultaten van dit onderzoek vergeleken worden met de resultaten van het onderzoek van Kapteijn (2017).

Voor het gebruik van het programma SCIA Engineer moest eerst een licentie aangevraagd worden om als student het programma te gebruiken. Hiervoor was het nodig een formulier in te vullen op de website van SCIA Engineer en een werkend studenten-mail in te vullen. Naar deze studentenmail werd vervolgens de licentie gestuurd.

Wel zijn er enkele problemen ondervonden met het gebruiken van het programma SCIA-Engineer. Dit omdat voor het schrijven van dit onderzoek een Macbook met OS X-besturingssysteem is gebruikt en zowel Matrixframe als SCIA-Engineer alleen op Windows-besturingssysteem te gebruiken is. Het programma MatrixFrame wordt aangeboden op de Faculteit CITG van TU DELFT maar het programma SCIA-Engineer niet. Op de website van SCIA-Engineer (Bastiaens, 2012) staat dat SCIA Engineer oorspronkelijk is geschreven voor Windows-besturingssystemen maar het toch mogelijk om SCIA Engineer-projecten te analyseren op Mac-computers.

Om de SCIA Engineer software op Mac OS X te draaien moet virtualisatie software worden gebruikt. Parallels Desktop 7 wordt hiervoor aanbevolen. Wanneer Parallels Desktop 7 wordt gebruikt, kan een Windows-besturingssysteem worden geïnstalleerd als een virtuele machine en Windowsapplicaties worden gebruikt naast Mac OS X-toepassingen. Op deze manier heeft de gebruiker tegelijkertijd 2 besturingssystemen. Wel moeten er licenties worden aangeschaft voor het programma Parallels en besturingssysteem Windows.

Voor dit onderzoek was de werkwijze met het gebruik van Parallels te zwaar om gedraaid te worden op de Macbook wat resulteerde dat het programma SCIA-Engineer steeds crashte en afsloot zonder wijzigingen op te slaan. Er moest dus een andere manier gevonden worden om SCIA Engineer te draaien op de Macbook.

Dit is gedaan door gebruik te maken van de bootcamp optie die aangeboden worden op de Macbook. Bootcamp geeft de mogelijkheid om de Windows-besturingssysteem te downloaden op de macbook. Door gebruik te maken van bootcamp draaien de Windows-besturingssysteem en OS X-besturingssysteem niet naast elkaar.

Met de bootcamp optie was er geen probleem in het modelleren in het xz vlak met vakwerken. Maar helaas werkte het modelleren in xz vlak met wandelementen niet naar behoren. Het programma sloot zichzelf steeds af. Dit zorgde ervoor dat er toch uiteindelijk is overgestapt naar een computer met een Windows besturingssysteem.