

Bijlage I: Engineeringsmodel 4-punt lift

Doel

Volgens de DNV-norm heeft rigging equipment een tolerantie van 0.25%, wat dit inhoud is dat de sling/grommet 0,25% korter mag zijn of 0,25% langer mag zijn dan de originele lengte. Dit heeft op alle soorten lifts invloed, want de lading kan scheef komen te hangen. Maar bij een vierpunts lift kan dit invloed hebben op de krachtverdeling van de slings. Volgens de DNV norm, is de factor voor elke sling gelijk aan 1.25, in werkelijkheid hangt deze factor van verschillende waardes af. Zoals de in gebruik lengte van de slings, de elasticiteit modulus, de diameter en de coördinaten van zowel de liftpunten als de haak. Daarom is het noodzakelijk om te kijken wat voor een invloed de verschillende lengtes hebben op de krachten in de slings.

Systeemgrens

Er wordt in dit document alleen gekeken naar 4 slings die zijn verbonden met de haak. Er wordt alleen gekeken wanneer het object nog op de grond staat

Relevante verschijnselen

Commented [BL1]: Uitleggen dat krachten in x en y richting gelijk zijn aan nul

Aannames

De aannames die gedaan zijn tijdens deze berekeningen:

- Als een kabel korter is dan de andere betekend dat de kabel slapt en 0% kracht op zich neemt ondanks de kracht in catenary vorm
- Het gewicht van de kabels wordt aangenomen dat het gelijk is aan nul.
- Er wordt aangenomen dat de haak een punt is.
- De krachten in x en y richting zijn gelijk aan nul.
- Er wordt aangenomen dat het een linear probleem is.
- Oppervlakte van kabels blijft constant, ondanks kleiner wordt door rek

Algemene vergelijkingen

Vergelijking voor bepalen afstand tussen twee punten in 3d.

$$Distance = \sqrt{(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2 + (z_a - z_b)^2} \quad 1$$

De hoeken van een 3d lijn kunnen met behulp van de volgende vergelijkingen worden bepaald:

$$\cos(a) = \frac{x_a - x_b}{Distance} \quad 2$$

$$\cos(\beta) = \frac{y_a - y_b}{Distance} \quad 3$$

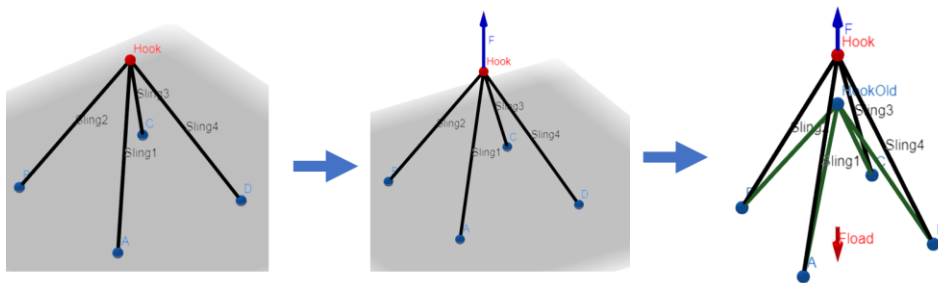
$$\cos(\gamma) = \frac{z_a - z_b}{Distance} \quad 4$$

$$\cos(\gamma) = \sqrt{1 - \cos^2(a) - \cos^2(\beta)} \quad 5$$

$$c = \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \times \cos(\gamma)} \quad 6$$

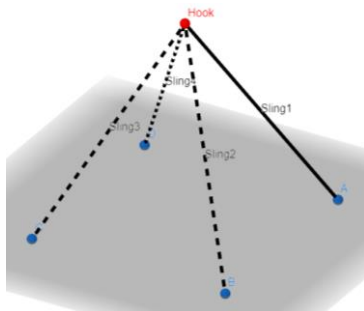
Flowchart

In dit hoofdstuk wordt met behulp van een simpel voorbeeld en een flowchart uitgelegd hoe de code werkt en welke formules ervoor gebruikt zijn.



Figuur 1: Ideale situatie

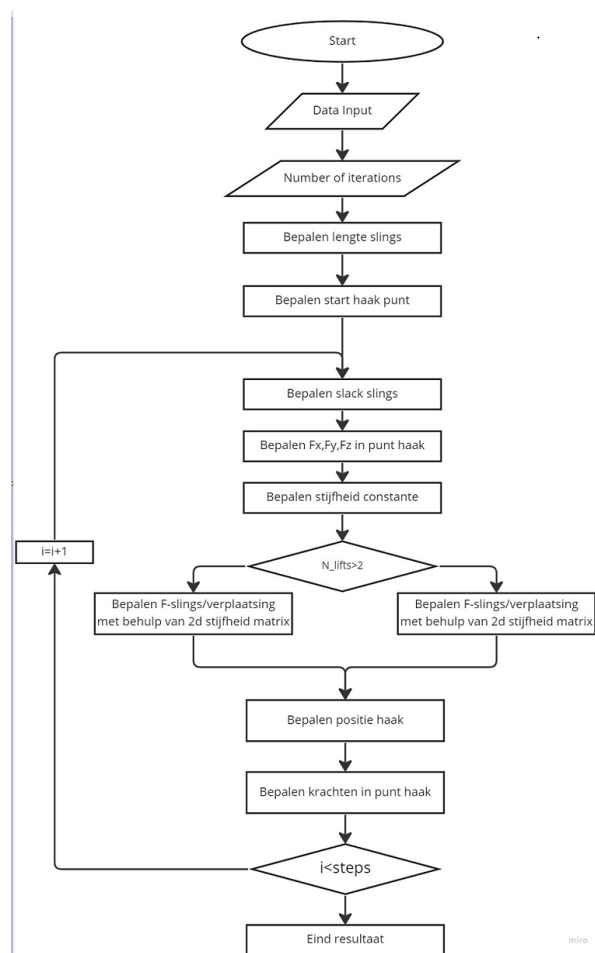
In figuur 1 is de ideale situatie te zien, hierbij zijn alle vier de slings de SWL lengte. Er wordt met kracht F aan de haak in de z-richting getrokken, hierdoor rekken de slings uit, waardoor de positie van de haak verandert, hoeveel en in welke richting hangt af van de positie van de liftpunten en de stijfheidsconstante. Uiteindelijk is de kracht in de z-richting even groot als de zwaartekracht van het liftobject en komt het object van de grond af.



Figuur 2: Sling A hangt strak

Maar wat gebeurt er als sling1 0,25% korter is dan de SWL en slings 2,3(gestippeld) en 4 0,25% langer zijn dan de SWL-lengte of andere waarde(zie DNV..). Dit zorgt ervoor dat slings 2,3 en 4 slap komen te

hangen. Met behulp van de flowchart wordt er uitgewerkt hoe de krachten in de slings worden bepaald. Zie hieronder afbeelding van flowchart:



Figuur 3: Flowchart skew-load berekening

Allereerst moet de data van de lift worden geïmporteerd, de data die hieronder vallen zijn hieronder weergegeven:

Tabel 1: Inputparameters skew load

Wat	Symbool	Eenheid
Elasticiteit modulus	E_{slings}	[N/mm ²]
(x,y,z) Coördinaten hijs punten	$Lift_{points}$	[mm]
(x,y,z) Coördinaten haak punt	$Haak_{point}$	[mm]
Totale zwaartekracht lift object	F_{totaal}	[N]
Welke sling kort en lang zijn	[-]	[-]
Aantal iteraties berekening moet doorlopen	Steps	[-]

Bepalen lengte slings

De lengte van de slings kan worden bepaald aan de hand van de SWL van de slings, de SWL van de slings kan worden bepaald met behulp van vergelijking 1. Waarbij kant a gelijk is aan de liftpunten en kant b gelijk is aan de punt van de haak.

De lengte van de slings kan bepaald worden met behulp van de volgende vergelijking:

$$L_{sling} = SWL_{slings} \pm \Delta slings$$

Waarbij:

$\Delta slings$ = Tolerantie slings[mm]

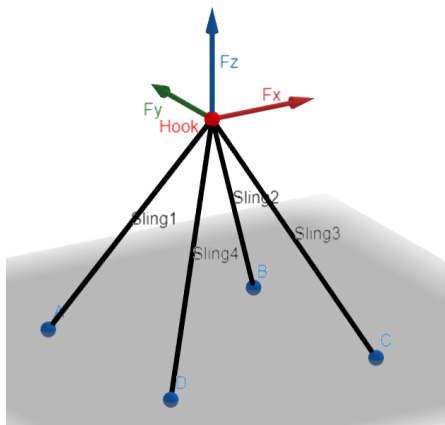
SWL_{slings} = SWL slings[mm]

De tolerantie van de slings is gelijk aan 0.2

De tolerantie van de slings is gelijk aan 0,25% van de SWL lengte, bij slings 2,3 en 4 is deze positief omdat de kabel langer is dan de swl en bij sling 1 is deze tolerantie negatief omdat die korter is dan de SWL.

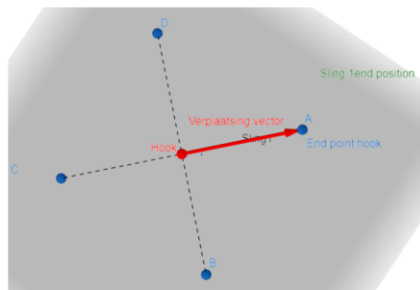
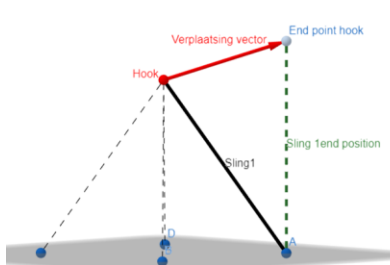
Commented [BL2]: Hier een duidelijk tabel met verhaal voor wat alle tolerantie waardens zijn

Bepalen start haak punt



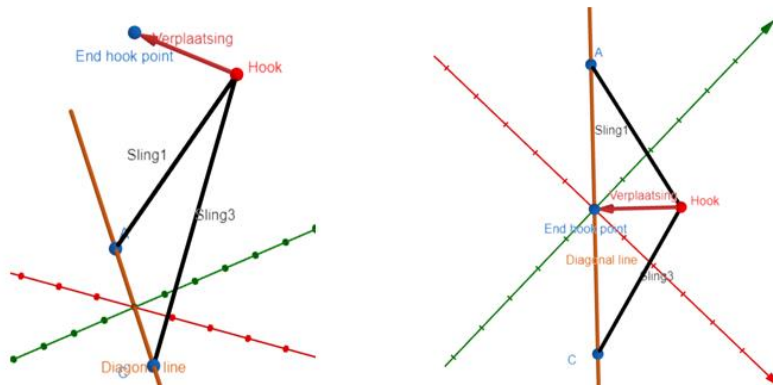
Figuur 4: Krachten punt haak

In Figuur 4 zijn alle krachten in punt haak te zien, voordat de kabels kunnen gaan rekken (krachten opnemen) moet de kracht in punt haak gelijk zijn aan nul. Bij een lift met vier slings zijn dat twee gevallen waar dit voorkomt. Zie hieronder:



Figuur 5: 4 punts lift (een kabel strak)

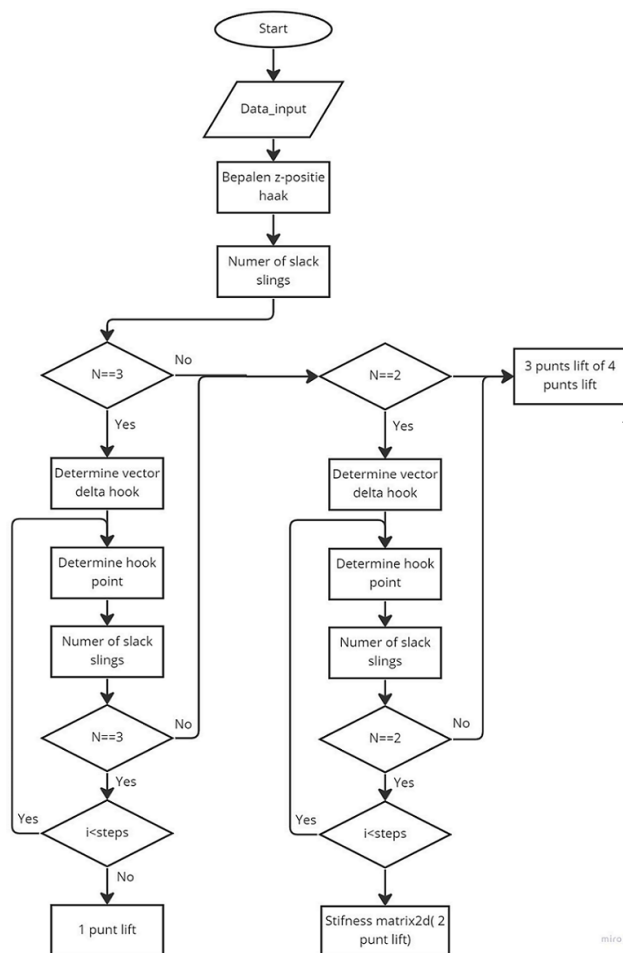
Er hangt een kabel strak en de rest hangt slap (**Error! Reference source not found.** zie Figuur 5 voor voorbeeld), wanneer dit het geval is zal de haak zich verplaatsen in richting van de rode pijl totdat de haak recht boven punt A hang, als dit het geval is zal het systeem in evenwicht zijn. De lengte van de sling moet constant blijven, omdat de kabel geen krachten kan opvangen.



Figuur 6: 4 punts lift (twee kabels strak)

Wanneer er twee kabels strak zijn is het systeem niet in evenwicht, hierdoor zal de haak verplaatsen in de richting van de rode pijl, totdat de haak op de diagonal lijn van de twee punten ligt. Wanneer dit het geval is zal het systeem in evenwicht zijn. De lengtes van de lijnen moet constant blijven.

Op de start positie van de haak te bepalen is er een flowchart gemaakt, die hieronder is weergegeven:

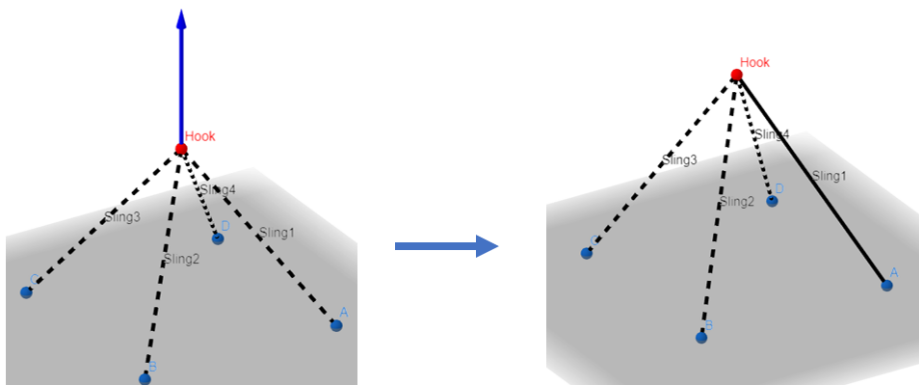


Figuur 7: Flowchart positie haak

Als eerste is er een data input, hieronder is in een tabel weergegeven welke data er nodig zijn om de start positie van de haak te bepalen:

Wat	Symbol	Eenheid
(x,y,z) Coördinaten hijs punten	Lift _{points}	[mm]
(x,y,z) Coördinaten haak punt	Haak _{point}	[mm]
Welke sling kort en lang zijn	[-]	[-]
Aantal iteraties berekening moet doorlopen	Steps	[-]
Lengtes van de slings	Lslings	mm

Commented [BL3]: Bij slings slack N==2 Determine vector delta hook(zeggen bepalen radius lijn)



Figuur 8: Lift haak

Allereerst moet de z-coördinaat van de haak bepaald worden. Dit is te zien in Figuur 8, in de linker afbeelding is te zien dat alle vier de slings nog slab hangen. Doordat de kraan aan het hijsen is zal de haak in de richting van de blauwe pijl bewegen (naar boven). Totdat er een kabel wordt strakgetrokken, in het voorbeeld zal dit sling 1 zijn, omdat deze het kortste is. De x en y coördinaten van het start punt van de haak zijn gelijk aan de coördinaten van de haakpunt. De z-coördinaat verschilt omdat de lengtes van de slings ook verschillen. De kan worden berekend met behulp vergelijking 1:

$$z_b = \sqrt{L_{sling}^2 - (x_a - x_b)^2 - (y_a - y_b)^2} + z_a$$

Waarbij:

L_{sling} = Lengte sling [mm] (Vorige hoofdstuk)

a = Coördinaten punt liftpunten [mm]

b = Coördinaten punt haak [mm]

In de code wordt dit voor alle vier de slings bepaald en wordt de laagste z-coördinaat bepaald.

Daarna wordt er in de flowchart het aantal slappe slings bepaald, er wordt met behulp van een code bepaald wat de afstand is tussen de haak en de liftpunten met behulp van vergelijking 1 en daarna wordt er gekeken of dat die afstand korter is dan de lengte van de sling.

Optie 1: Er hangen drie kabels slab

De volgende stap in de flowchart is het bepalen van de verplaatsing vector (rode pijl in Figuur 5). Deze vector geeft aan waar de haak uiteindelijk naar toe zal gaan. De oorsprong van de vector is het punt van de haak. De vector wordt in de volgende vorm geschreven:

$$Verp_{vector} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad 7$$

De x, en y componenten van de vector, kunnen met de volgende vergelijkingen worden bepaald:

$$\begin{aligned} x &= x_{liftpunt} - x_{haak} \\ y &= y_{liftpunt} - y_{haak} \end{aligned}$$

De volgende stap in de flowchart, is het bepalen van delta hook, dit houdt in hoeveel de haak in de richting van de rode pijl zal bewegen bij elke iteratie. Dit hangt af van hoeveel stappen de berekeningen moet doen, wat is aangegeven in **Error! Reference source not found.** Delta hook is net zoals de verplaatsing vector een 1x2 matrix en wordt met behulp van de volgende vergelijking uitgerekend:

$$DeltaHook = Verp_{vector} \times \frac{1}{steps} \quad 8$$

Waarbij:

$steps$ = Aantal stappen die de code moet doorlopen[-]

De volgende stap is het bepalen van de nieuwe haak positie in de iteratie, dit kan worden gedaan met behulp van de volgende vergelijking:

$$\begin{aligned} x_i &= DeltaHook + x_{i-1} \\ y_i &= y_{i-1} \end{aligned} \quad 9$$

Waarbij:

x_i = X-coördinaat haak iteratie[mm]

x_{i-1} = X-coördinaat haak vorige iteratie (als i gelijk is aan nul is het de begin positie)[mm]

Enzo.

Omdat de sling niet van lengte mag veranderen moet ook de z-positie van de haak veranderen, dit kan worden gedaan met behulp van de volgende vergelijking:

$$z_i = \sqrt{Lsling^2 - (x_i - x_{lift})^2 - (y_i - y_i)^2}$$

Waarbij:

$Lsling$ = Lengte van de sling[mm]

x_i = X-coördinaat haak iteratie[mm]

x_{lift} = X-coördinaat lift punt[mm]

Enzo

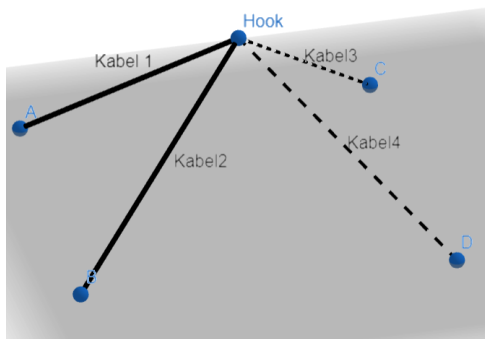
De volgende stap is het bepalen van het aantal slappe slings, als het aantal slappe slings nog steeds hetzelfde is en het aantal iteraties dat de berekening heeft gedaan niet groter is dan het aantal iteraties wat de berekening moet doen, zal opnieuw de positie van de haak worden bepaald.

Als aantal slappe slings niet meer gelijk is aan drie, betekent dat door het bewegen van de haak in de richting van de rode vector er een andere kabel strak komt te hangen.

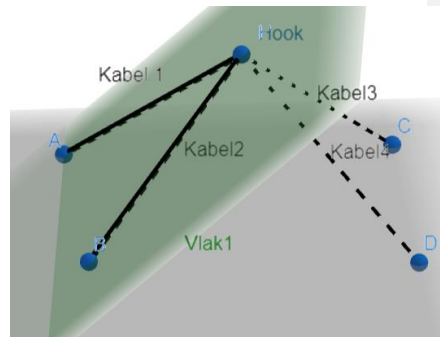
De andere optie is dat de berekening alle iteraties heeft doorlopen, dit houdt in dat de haak recht boven punt A hangt. In werkelijkheid zal dit nooit gebeuren, omdat er eerst een andere kabel strak wordt getrokken.

Optie 2: Er hangen twee kabels slab

De eerstvolgende stap in de flowchart is het bepalen van de radius lijn. Om deze radius lijn zal het punt haak bewegen, zodat allebei de kabels strak blijven hangen. De radius lijn zal met behulp van een stappenplan worden uitgelegd en het voorbeeld wat hieronder is weergegeven:

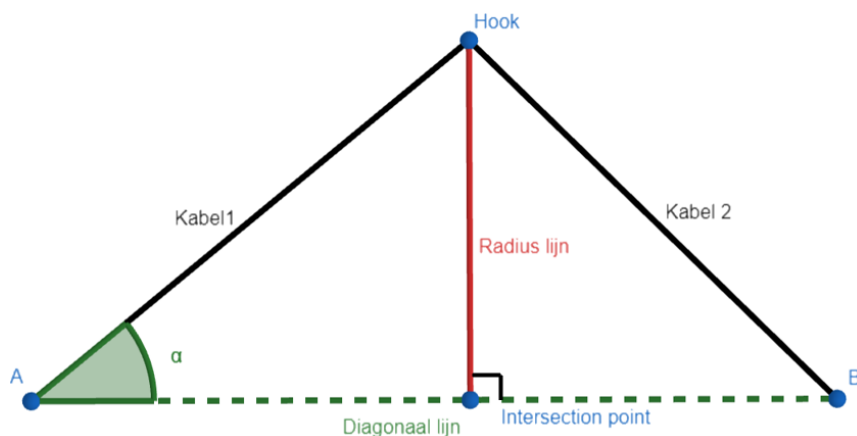


Figuur 10: Voorbeeld twee kabels strak



Figuur 9: voorbeeld vlak 1

In Figuur 10 is er een voorbeeld te zien waarbij kabels 1 en 2 strak staan en 3 en 4 niet slap. De eerste stap is een vlak te creëren die door punten A B en punt haak gaat, dit vlak wordt (zie figuur 9).



Figuur 11: Vlak 1 vooraanzicht

In Figuur 11 het vlak vanuit het vooraanzicht te zien. In dit vlak de radius lijn te zien, de lengte moet hiervan bepaald worden en het intersectie punt in vlak 1 moet worden bepaald.

Stap 1:

Bepalen van de lengtes van alles zijdens van de driehoek, alle punten zijn bekend en dit kan worden gedaan met behulp van vergelijking 1.

Stap 2:

Bepalen van hoek α , omdat alle zijdens van de driehoek bekend zijn kan dit worden gedaan met behulp van de cosinus regel (zie vergelijking 6).

Stap 3:

Bepalen van de lengte van de radius lijn, dit kan worden gedaan met behulp van de volgende vergelijking:

$$Length_{radius\ lijn} = \sin \alpha \times Kabel_1$$

Stap 4:

Bepalen van het intersectie punt met de diagonaal lijn in 3d, allereerst moet de afstand van punt A tot intersectie punt in vlak 1 bepaald worden dit kan worden gedaan met behulp van de volgende vergelijking:

$$L_{vlak1} = \cos \alpha \times Kabel_1$$

Waarbij:

L_{vlak1} = Lengte van punt A tot intersectie punt in vlak 1 [mm]

De hoeken van de diagonaal lijn kunnen worden bepaald met behulp van vergelijkingen 2,3 en 4. De coördinaten van de intersectie punt kunnen worden bepaald met behulp van de volgende vergelijking:

$$\begin{bmatrix} x_{intersectie} \\ y_{intersectie} \\ z_{intersectie} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) \times L_{vlak1} \\ \cos(\beta) \times L_{vlak1} \\ \cos(\gamma) \times L_{vlak1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ z_a \end{bmatrix}$$

Stap 5

Bepalen wat de minimale hoek van radius lijn is met de z-as. Dit kan worden bepaald met behulp van de volgende vergelijking:

$$\gamma_{\min_dia} = |90 - \gamma_{dia}|$$

Waarbij:

γ_{\min_dia} = Minimale hoek met de z-as van de radius lijn [deg]

γ_{dia} = Hoek z-as van de diagonaal lijn[deg]

De radius lijn, intersectie punt en γ_{\min_dia} is bekend. De punt haak ligt op de diagonaal lijn als de hoek met de z-as gelijk is aan γ_{\min_dia} . Met behulp van de volgende vergelijking wordt de stapgrootte van de hoeken bepaald:

$$\gamma_{step} = \frac{\gamma_{start} - \gamma_{\min_dia}}{steps}$$

γ_{step} = Stapgrootte hoek[deg]

De volgende stap is itereren totdat er een kabel strak wordt getrokken of de haak op de diagonaal lijn ligt.

Allereerst moet de hoek van de radius lijn met de z-as op iteratie i bepaald worden, dit kan worden gedaan met behulp van de volgende vergelijking:

$$\gamma_i = \gamma_{start} - \gamma_{step} \times i$$

De z-positie van punt haak kan met behulp van de volgende vergelijking bepaald worden:

$$z_{haaki} = \cos \gamma_i \times Length_{radius\ lijn} + z_{intersectie}$$

De

Commented [BL4]: Uitleggen dat dit wordt opgelost met een automatische solver, en hierboven nog beter uitleggen

Optie 3: Geen of een kabel hangt strak

Wanneer dit het geval is zal het probleem worden opgelost met behulp van een 3d matrix.

Bepalen krachten in haak

In dit hoofdstuk wordt bepaald wat de krachten in punt haak zijn. Totale krachten in x-richting en y-richting zijn gelijk aan nul (zie Aannames). De totale kracht in de z-richting wordt bepaald met behulp van de volgende vergelijking:

$$F_z = F_{\text{totaal}} \times \frac{i}{\text{steps}} - F_{i-1} \quad 10$$

Waarbij:

F_{totaal} = Totale zwaarte kracht object[N] (zie Tabel 1)

i = Welke iteratie de berekening zit [-]

steps = Aantal iteraties voor berekening (zie Tabel 1)

F_{i-1} = Totale kracht in de z-richting bij vorige iteratie

Stijfheid constante

De stijfheid van de kabel kan worden berekend met behulp van de volgende vergelijking:

$$k_i = \frac{EA}{L_i} \quad 11$$

Waarbij:

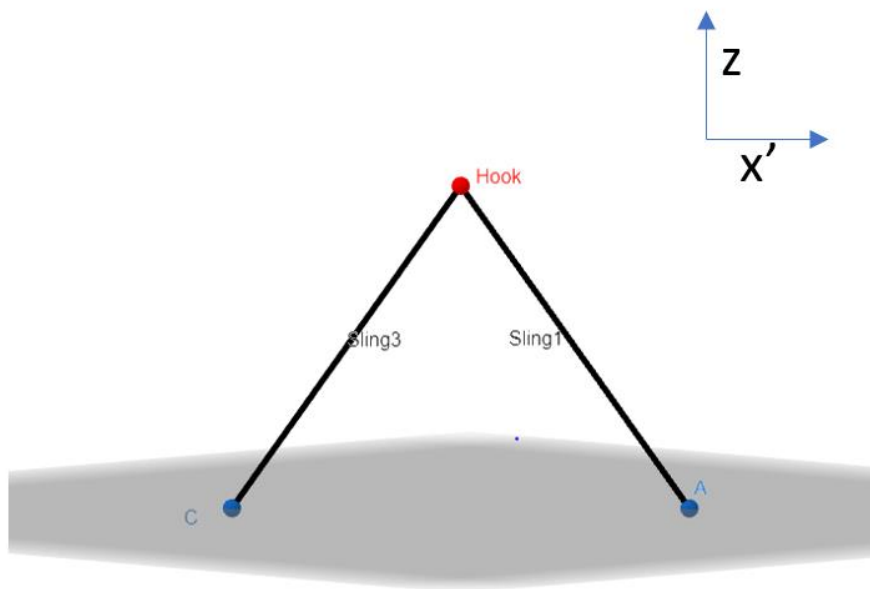
E = Elasticiteitsmodulus [N/mm²]

A = Oppervlakte kabel [mm²]

L_i = Lengte kabel bij iteratie [mm]

De stijfheidsconstante verandert bij elke iteratie, dit komt omdat de lengte van de kabels veranderen, omdat de positie van de haak verandert. De lengte van de kabel kan worden bepaald met behulp van vergelijking 1.

2d stijfheidsmatrix uitrekenen



Figuur 12: Vlak 2

Zie hoofdstuk: Bepalen start haak punt, voor wanneer het een 2d probleem is. De stijfheidsmatrix wordt bepaald. Aan de hand van vlak 2 (zie Figuur 12: Vlak 2, de as die verticaal is gelijk aan de z-as en de as die horizontaal loopt is gelijk aan projectie van de diagonaal lijn in x en y vlak).

De lokale stijfheidsmatrix van een kabel kan met behulp van de volgende vergelijking uitgerekend worden:

$$K = k_i \begin{bmatrix} \cos^2 \emptyset & \cos \emptyset \sin \emptyset & -\cos^2 \emptyset & -\cos \emptyset \sin \emptyset \\ \cos \emptyset \sin \emptyset & \sin^2 \emptyset & -\cos \emptyset \sin \emptyset & -\sin^2 \emptyset \\ -\cos^2 \emptyset & -\cos \emptyset \sin \emptyset & \cos^2 \emptyset & \cos \emptyset \sin \emptyset \\ -\cos \emptyset \sin \emptyset & -\sin^2 \emptyset & \cos \emptyset \sin \emptyset & \sin^2 \emptyset \end{bmatrix}$$

Waarbij:

\emptyset = Hoek kabel [deg]

k_i = Stijfheidsconstante bij iteratie i (zie vergelijking 11) [N/mm]

De hoek die de kabel maakt kan met behulp van de volgende vergelijking uitgerend worden:

$$\emptyset = 90 - \gamma$$

Waarbij:

γ = Hoek kabel met z-as (zie vergelijking 4)

De verplaatsing van punt haak kunnen met behulp van de volgende vergelijking worden uitgerekend:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = k^{-1} \begin{bmatrix} F_{x'} \\ F_{zi} \end{bmatrix} \quad 12$$

Waarbij:

k^{-1} = Globale stijfheidsmatrix bij punt haak

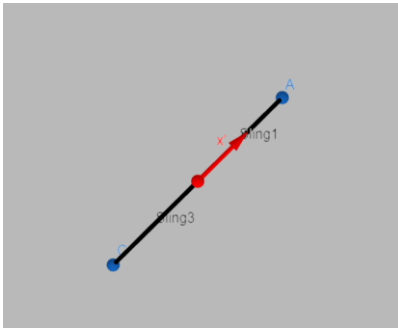
$F_{x'}$ = Kracht in x' richting

F_{zi} = Kracht in z-richting bij iteratie i

u = Verplaatsing in x' richting

v = Verplaatsing in z-richting

De kracht in x' richting is gelijk aan nul, omdat er is aangenomen dat de krachten in x en y richting gelijk is aan nul.



Figuur 13: Boven aanzicht vlak2

De verplaatsing x' moet nog ontbonden worden in x en y, dit kan worden gedaan met behulp van de hoek die de hoekverdraaiing maakt:

$$\Delta x_{hook} = x' \times \cos(a)$$

$$\Delta y_{hook} = x' \times \sin(a)$$

$$\Delta z_{hook} = z$$

Waarbij:

x' = Verplaatsing in x' richting

a = Hoek van de diagonaal lijn

De kracht in de lokale punten kan worden bepaald met behulp van de volgende vergelijking:

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\emptyset & -\sin\emptyset & 0 & 0 \\ \sin\emptyset & \cos\emptyset & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos\emptyset & -\sin\emptyset \\ 0 & 0 & \sin\emptyset & \cos\emptyset \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \end{bmatrix}$$

Waarbij:

F_1 = Kracht in x' richting bij punt A

F_2 = Kracht in z- richting bij punt A

F_3 = Kracht in x' richting bij punt B

F_4 = Kracht in z richting bij punt B

\emptyset = Hoek kabel[deg]

Q_1 = Verplaatsing in x' richting bij punt A

Q_2 = Verplaatsing in z- richting bij punt A

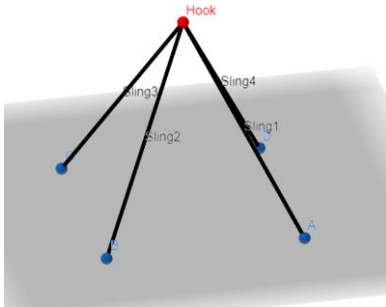
Q_3 = Verplaatsing in x' richting bij punt B

Q_4 = Verplaatsing in z richting bij punt B

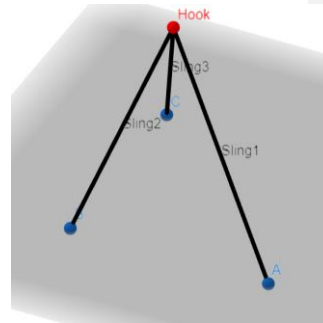
De verplaatsingen Q_1 en Q_2 zijn gelijk aan nul, omdat dit een constraint is. De verplaatsingen Q_3 en Q_4 zijn bepaald met behulp van vergelijking 12. De kracht in de sling kan worden bepaald met behulp van de volgende vergelijking:

$$F_{sling} = \sqrt{F_1^2 + F_2^2} = \sqrt{F_3^2 + F_4^2}$$

3d Stijfheidsmatrix uitrekenen



Figuur 15: 4 punts lift



Figuur 14: 3 punts lift

Zie hoofdstuk: Bepalen start haak punt voor wanneer het een 3d probleem is.

De lokale stijfheidsmatrix van de kabel bij een 3d kan worden bepaald met behulp van de volgende matrix:

$$K = k_i \begin{bmatrix} \cos^2 \phi_x & \cos \phi_x \cos \phi_y & \cos \phi_x \cos \phi_z & -\cos^2 \phi_x & -\cos \phi_x \cos \phi_y & -\cos \phi_x \cos \phi_z \\ \cos \phi_x \cos \phi_y & \cos^2 \phi_y & \cos \phi_y \cos \phi_z & -\cos \phi_x \cos \phi_y & -\cos^2 \phi_y & -\cos \phi_y \cos \phi_z \\ \cos \phi_x \cos \phi_z & \cos \phi_y \cos \phi_z & \cos^2 \phi_z & -\cos \phi_x \cos \phi_z & -\cos \phi_y \cos \phi_z & -\cos^2 \phi_z \\ -\cos^2 \phi_x & -\cos \phi_x \cos \phi_y & -\cos \phi_x \cos \phi_z & \cos^2 \phi_x & \cos \phi_x \cos \phi_y & \cos \phi_x \cos \phi_z \\ -\cos \phi_x \cos \phi_y & -\cos^2 \phi_y & -\cos \phi_y \cos \phi_z & \cos \phi_x \cos \phi_y & \cos^2 \phi_y & \cos \phi_y \cos \phi_z \\ -\cos \phi_x \cos \phi_z & -\cos \phi_y \cos \phi_z & -\cos^2 \phi_z & \cos \phi_x \cos \phi_z & \cos \phi_y \cos \phi_z & \cos^2 \phi_z \end{bmatrix}$$

Waarbij:

Waarbij:

$\cos \phi_x$ = Hoek kabel x-as[-] (zie vergelijking 2)

$\cos \phi_y$ = Hoek kabel y-as[-] (zie vergelijking 3)

$\cos \phi_z$ = Hoek kabel z-as[-] (zie vergelijking 4)

k_i = Stijfheidsconstante bij iteratie i (zie vergelijking 11) [N/mm]

De verplaatsing van punt haak kunnen met behulp van de volgende vergelijking worden uitgerekend:

$$\begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{bmatrix} = k^{-1} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix}$$

Waarbij:

d_1 = Verplaatsing haak in x-richting[mm]

d_2 = Verplaatsing haak in y-richting[mm]

d_3 = Verplaatsing haak in z-richting[mm]

k^{-1} =Globale stijfheidsmatrix bij punt haak

F_x = Kracht in x-richting punt haak[N]

F_y =Kracht in y-richting punt haak[N]

F_z = Kracht in z-richting punt haak[N]

De globale stijfheidsmatrix bij punt haak hangt ook af van hoeveel kabels er strak staan, omdat als er een kabel niet strak staat alle waarden van de lokale stijfheidsmatrix van deze kabel gelijk is aan nul.

Met behulp van de translatie matrix kan de rek van slings bepaald worden met behulp van de volgende vergelijking:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ Rek_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos\phi_x & \cos\phi_y & \cos\phi_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos\phi_x & \cos\phi_y & \cos\phi_z \end{bmatrix}$$

Waarbij:

Rek_i = Rek sling bij iteratie i

$\cos\phi_x$ = Hoek kabel x-as[-](zie vergelijking 2)

$\cos\phi_y$ = Hoek kabel x-as[-](zie vergelijking 3)

$\cos\phi_z$ = Hoek kabel x-as[-](zie vergelijking 4)

De kracht van de sling kan worden berekend met behulp van de volgende vergelijking:

$$\begin{bmatrix} -Fsling_i \\ Fsling_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_i & -k_i \\ -k_i & k_i \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ Rek_i \end{bmatrix}$$

Waarbij:

$Fsling_i$ = Kracht sling bij iteratie i

k_i = Stijfheidsconstante bij iteratie i(zie vergelijking 11)[N/mm]

Bepalen positie haak

In dit hoofdstuk wordt behandeld hoe de positie van de haak bepaald wordt. De verplaatsingen van de haak zijn in vorige hoofdstukken uitgelegd. De nieuwe positie x,y en z posities van de haak kunnen met behulp van de volgende vergelijking worden uitgerekend:

$$x_i = x_{i-1} + \Delta x$$

$$y_i = y_{i-1} + \Delta y$$

$$z_i = z_{i-1} + \Delta z$$

Waarbij:

x_i = x-coördinaat haak(bij iteratie i)[mm]

y_{i-1} = x-coördinaat haak(bij iteratie vorige iteratie)[mm]

Δx = Verplaatsingen haak[mm]

Bepalen krachten in haak

In dit hoofdstuk wordt behandeld hoe de krachten in de haak worden bepaald. Als eerst moeten de hoeken van de kabels worden berekend dit wordt gedaan met behulp van vergelijkingen 2,3 en 4. De positie van de haak in deze vergelijkingen is de nieuwe positie van de haak. Zie hieronder de vergelijkingen:

$$F_{totalx} = F_1 \times \cos(a_1) + F_2 \times \cos(a_2) + F_3 \times \cos(a_3) + F_4 \times \cos(a_4)$$

$$F_{totaly} = F_1 \times \cos(\beta_1) + F_2 \times \cos(\beta_2) + F_3 \times \cos(\beta_3) + F_4 \times \cos(\beta_4)$$

$$F_{totalz} = F_1 \times \cos(\gamma_1) + F_2 \times \cos(\gamma_2) + F_3 \times \cos(\gamma_3) + F_4 \times \cos(\gamma_4)$$

Waarbij:

F_1 = Kracht sling 1[N]

$\cos(a_1)$ = Hoek sling 1 met x-as[-]

$\cos(\beta_1)$ = Hoek sling 1 met y-as[-]

$\cos(\gamma_1)$ = Hoek sling 1 met z-as[-]

etc.

De krachten in de slings worden per iteratie uitgerekend, om de totale kracht in de slings te bepalen kan worden gedaan met behulp van de volgende vergelijking:

$$F_i = F_{i-1} + F_{sling}$$

Waarbij:

F_i = Totale kracht in sling bij iteratie

F_{i-1} = Totale kracht in sling bij vorige iteratie

F_{sling} = Berekende kracht in sling bij iteratie

Voorbeeldberekening

In dit hoofdstuk worden de berekeningen geverifieerd, die in het vorige hoofdstuk gedaan zijn. Zie hieronder de input parameters weergegeven in tabellen. Sling 1 gaat van punt A naar punt haak, sling 2 van B naar punt haak etc. De voorbeeldberekening zal worden geverifieerd aan de hand, van FEMAP.

Het gewicht van het object is gelijk aan 100 ton

Punt	X coördinaat [m]	Y coördinaat [m]	Z coördinaat [m]
Lift punt A	-5.2	4.8	0
Lift punt B	4.6	5.3	0
Lift punt C	5.2	-4.9	0
Lift punt D	-5.1	-4.9	0
Haak	0	0	10

Tabel 2: Lift punt coördinaten

Sling	E [N/mm]	D [mm]	Klein/groot [-]
Sling 1	210000	20	Klein
Sling 2	210000	25	Groot
Sling 3	210000	30	Groot
Sling 4	210000	35	Groot

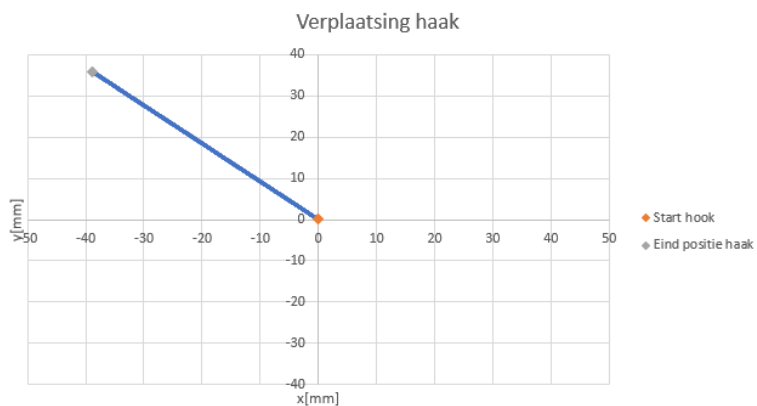
Tabel 3: Sling gegevens

De eerste stap van de flowchart is het bepalen van de lengte van de slings, op basis of de sling groot of klein is en de tolerantie kunnen de lengte van de slings bepaald worden. Zie resultaat tabel hieronder:

Wat	Waarde	Eenheid
Lengte sling 1	12220.1	mm
Lengte sling 2	12247.3	Mm
Lengte sling 3	12321	Mm
Lengte sling 4	12278.9	mm

Tabel 4: Lengte slings

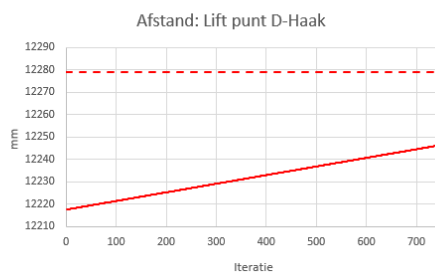
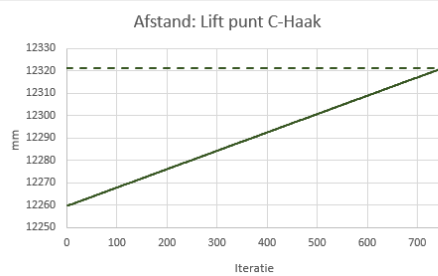
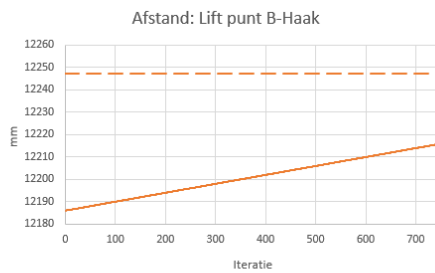
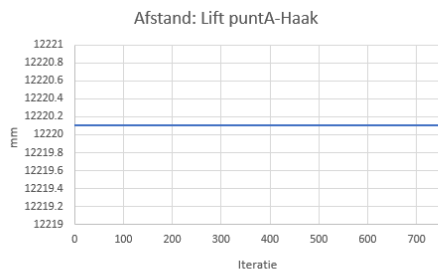
Allereerst wordt de startpunt van de haak bepaald, omdat er een sling kleiner is dan de rest. Zal er een sling kort staan. Zie hieronder de verplaatsing van de haak:



Figuur 16: Verplaatsing haak een sling strak

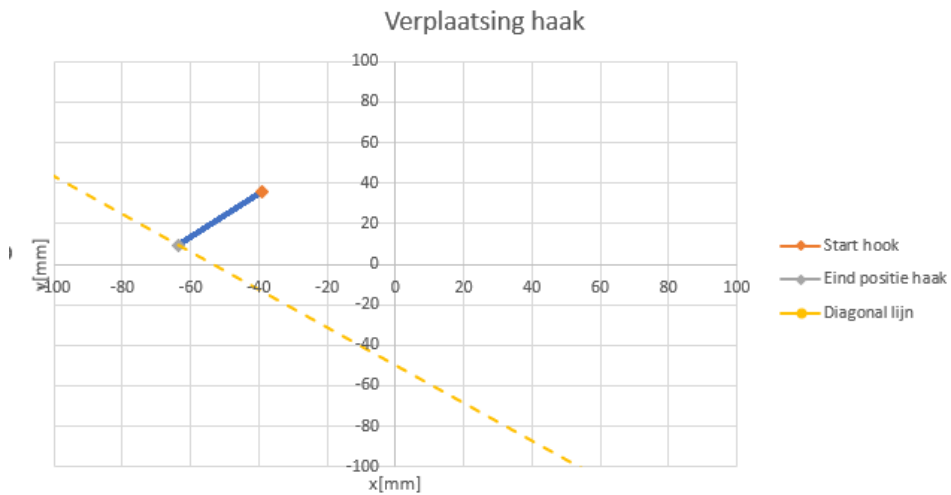
De haak verplaatst zich naar punt A toe, de positie van de haak wanneer er andere kabel strak wordt getrokken is in de tabel hieronder weergegeven:

Punt	X coördinaat [mm]	Y coördinaat [mm]	Z coördinaat [mm]
Haak	-38.948	35.952	10000



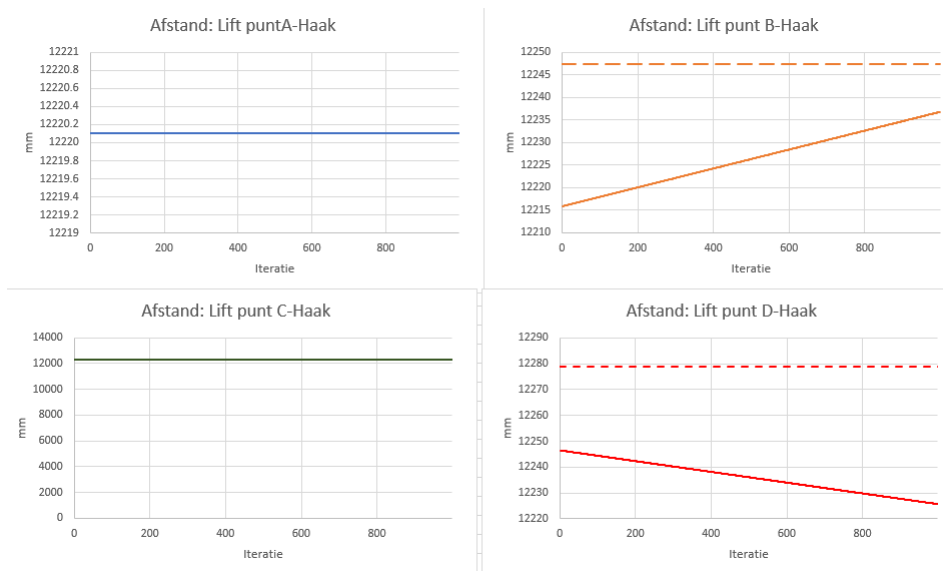
In de figuur hierboven is de afstand van de liftpunten te zien tot de afstand van de haak, de gestippelde lijn is de gebruik lengte van de kabels. Zoals te zien is blijft de afstand van punt A tot de haak constant, omdat deze kabel al strak staat. De iteratie berekening stopt, wanneer de afstand van lift punt C tot haak gelijk is aan de lengte van sling 3, zowel sling 2 als 4 zijn nog slap.

Hieronder is de haak verplaatsing te zien van wanneer er twee kabels strak staan:



Zoals te zien is verplaats de haak zich naar de diagonaal lijn(gestippelde lijn). De haak komt op de diagonaal lijn, wat inhoudt dat er met twee slings gelift kan worden. De positie van de haak, wanneer de haak zich op de diagonaal lijn bevind is in de tabel hieronder weergegeven:

Punt	X coördinaat [mm]	Y coördinaat [mm]	Z coördinaat [mm]
Haak	-63.67	9.44	10000



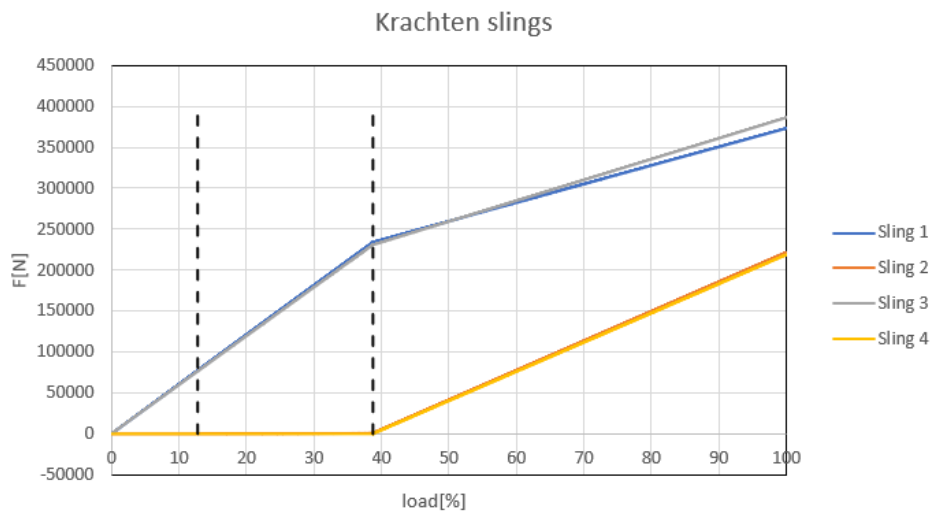
In de figuur hierboven is de afstand van de liftpunten te zien tot de afstand van de haak, de gestippelde lijn is de gebruik lengte van de kabels. Zoals te zien is blijven de afstanden van punt A tot de haak en punt C tot de haak constant, omdat deze kabels al strak staat. De iteratie berekening stopt, wanneer de haak op de diagonaal lijn ligt. Zowel slings 2 en 4, hangen nog steeds slap, ook is te zien dat de afstand van punt D tot de haak steeds korter wordt dit is logisch omdat de haak zich naar punt D toe beweegt.

Zie hieronder de eindresultaat van skew load berekening:

Welke scenario	Iteratie[-]	Perc [%]	F load total	Fsling 1[N]	Fsling 2[N]	Fsling 3[N]	Fsling 4[N]	Hook x[mm]	Hook y[mm]	Hook z[mm]
2 slings staan strak	1	0.01	98	61	0	60	0	-63.7236891	9.484262564	10000.0219
3 slings staan strak	1277	12.77	125274	77424	0	76222	0	-59	5	10013
4 slings staan strak	3874	38.74	380040	234068	852	230757	36	-23.3736968	22.30729626	10038.4322
Fz haak = F object	10000	100	981000.125	373124	221686.367	386249.431	218830.07	-23.0083675	6.41254236	10062.2827

Tabel 5: Eind resultaat

Zie hieronder de figuur van de krachten van de slings ten opzichte van de load percentage. De load percentage houdt in wat de z-kracht is in punt haak ten opzichte van de totale zwaartekracht van het liftobject.

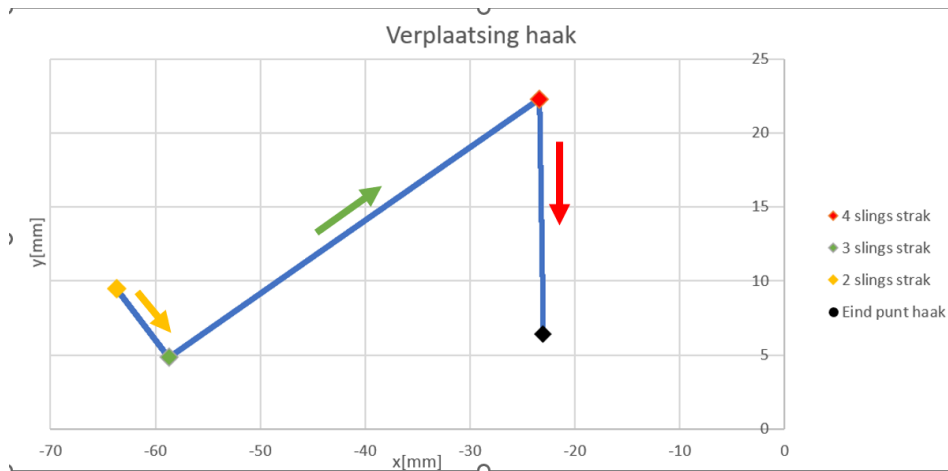


Figuur 17: Krachten slings

De zwarte gestippelde lijnen houden in dat er een kabel strak is komen te hangen. Doordat de slings steeds meer uitrekken zullen er andere slings strak worden getrokken. Bij de eerste gestippelde lijn zal sling 2 strak komen te hangen(bij iteratie 1277), bij de tweede gestippelde lijn zal sling 4 strak komen te hangen(bij iteratie 3874), zie tabel

In de figuur is te zien dat, wanneer er 3 slings strak staan(na eerste gestippelde lijn). Er eigenlijk nog als nog maar twee slings alle krachten op zich nemen. Dit komt omdat deze slings een diagonaal van elkaar zijn, de derde sling zal de haak naar zich toe trekken(zie Figuur 18), waardoor de laatste sling ook wordt aangetrokken (na tweede gestippelde lijn). Wanneer dit het geval is, zullen alle vier de slings uitrekken en krachten op zich nemen.

Na de twee gestippelde lijn is te zien dat de lijn minder snel toenemen, dit komt omdat er twee diagonalen zijn, wat ervoor zorgt dat alle vier de slings krachten op zich kunnen nemen, inplaats van twee.



Figuur 18: Verplaatsing haak

Zie de figuur hierboven voor de verplaatsing van de haak gedurende het proces.

2 slings strak

Wanneer sling 1 en sling 3 strak staan, zal de haak naar punt C toewegen (gele pijl). Dit is logisch, omdat de diameter van sling 3 groter is dan die van sling 1, waardoor die ook een hogere stijfheidsconstante heeft, wat ervoor zorgt dat die minder makkelijk uitrekt.

3 Slings strak

Als sling 1, sling 2 en sling 3 strak staan, zal de haak naar punt B verplaatsen (groene pijl). Dit komt omdat sling 1 (punt A) en sling 3 (Punt C) een diagonaal van elkaar zijn.

4 slings Strak

Als alle vier de slings strak staan zal de haak naar beneden bewegen (rode pijl), dit komt omdat slings 3 en 4 een hogere stijfheidsconstante hebben. Wat ervoor zorgt dat deze minder makkelijk uitre

In de tabel hieronder zijn de eindresultaten van de slings te vinden:

Welke sling	Kracht sling[N]	Load distributie[%]
Sling 1	373308.38	31.16
Sling 2	221505.51	18.51
Sling 3	386427.68	32.09
Sling 4	218650.51	18.25

In de tabel hieronder zijn krachten en de verplaatsingen van de haak weergegeven:

	x-richting	y-richting	z-richting
Start coördinaten haak	-63.676	9.44	9999.962
Eind coördinaten haak	-22.938	6.359	10062.263
Totale verplaatsing haak	40.738	-3.08	62.301

In de tabel hieronder zijn de krachten in de haak weergegeven:

Wat	Symbol	Waarde	Eenheid
Krachten haak in x-richting	Fx	756	N
Krachten haak in y-richting	Fy	-396	N
Krachten haak in z-richting	Fz	981000	N

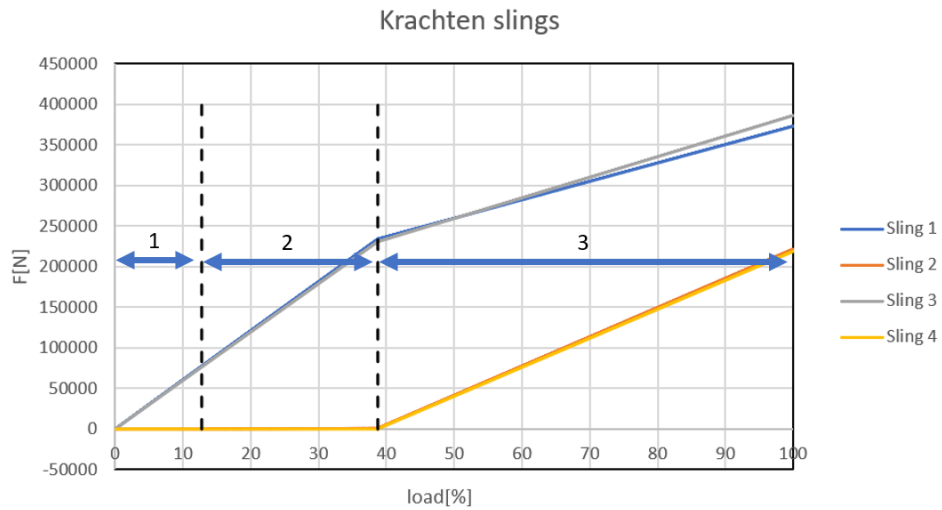
Tabel 6: Krachten in punt haak

Conclusie

Met behulp van de code kan er worden bepaald wat de posities van de haak is en wat de krachten zijn in de slings dit is ook geverifieerd met een voorbeeld van femap zie bijlage I. In Tabel 6 zijn de krachten in punt haak te zien, hier is te zien dat de krachten in x en y-richting niet gelijk is aan nul. Zoals te zien zijn deze waarden in vergelijken met de totale kracht in het systeem heel erg klein, deze krachten in x en y-richting zullen daarom ook voor geen verplaatsingen in de haak zorgen, of voor grote verschillen in krachten met de slings zorgen.

Bijlage I: Femap verifiëren met code

In dit verslag wordt het python script geverifieerd, aan de hand van femap berekeningen. In dit verslag wordt de input van femap weergegeven en de resultaten behandeld.



Figuur 19: Secties berekeningen

In Figuur 19 is te zien dat de iteratie berekeningen in drie gedeeltes zijn opgedeeld, namelijk eerste gedeelte twee slings strak, tweede gedeelte 3 slings strak en het derde gedeelte vier slings strak. Er worden ook drie femap modellen gemaakt. De materiaal en de properties, zullen voor alle vier de modellen hetzelfde zijn, en zijn in het hoofdstuk hieronder weergegeven:

Materiaal en profielen

Voor de gehele berekening wordt aangenomen dat er materiaal S235j gebruikt. De gegevens van staal zijn te vinden in de tabel hieronder. De dichtheid van staal is gelijk aan nul, dit is aangenomen zie Aannames.


Wat	Symbool	Waarde	Eenheid
Young modules	E	210000	Mpa
Poisson's Ratio	nu	0,3	[-]
Dichtheid staal	ρ	0	Kg/mm ³

Define Material - ISOTROPIC ✕

ID

Title

Material Type...

Color 

Layer

General

Function References

Nonlinear

Ply/Bond Failure

Creep

Electrical/Optical

Phase

Stiffness

Youngs Modulus, E

Shear Modulus, G

Poisson's Ratio, nu

Limit Stress

Tension

Compression

Shear

Thermal

Expansion Coeff, a

Conductivity, k

Specific Heat, Cp

Heat Generation Factor

Mass Density

Damping, 2C/Co

Reference Temp

Figuur 20: Input Femap steel

De profielen van de slings zijn gebaseerd op de diameters die gegeven zijn in Tabel 3: Zie de figuren hieronder voor de geometrie van de slings:

Define Property - ROD Element Type

ID 1 Title Cable sling 1 Material 1..Steel

Color 110 Layer 1

Elem/Property Type...

Property Values

Area, A 314.16

Torsional Constant, J 0.

Perimeter 0.

Coeff. for Torsional Stress 0.

Nonstructural mass/length 0.

Additional Options

☐ Cable ☐ Compression Only Gap

Initial Tension

Initial Slack

Allowable Tensile Stress

Area Moment of Inertia

Load... Save... Copy... OK Cancel

Figuur 21: Eigenschappen sling 1

Define Property - ROD Element Type

ID 2 Title Cable sling2 Material 1..Steel

Color 110 Layer 1

Elem/Property Type...

Property Values

Area, A 490.87

Torsional Constant, J 0.

Perimeter 0.

Coeff. for Torsional Stress 0.

Nonstructural mass/length 0.

Additional Options

☐ Cable ☐ Compression Only Gap

Initial Tension

Initial Slack

Allowable Tensile Stress

Area Moment of Inertia

Load... Save... Copy... OK Cancel

Figuur 22: Eigenschappen sling 2

Define Property - ROD Element Type

ID
3

Title
Cable sling3

Material
1..Steel

Color
110

Layer
1

Elem/Property Type...

Property Values

Area, A706.86

Torsional Constant, J0.

Perimeter0.

Coeff. for Torsional Stress0.

Nonstructural mass/length0.

Additional Options

☐ Cable
☐ Compression Only Gap

Initial Tension

Initial Slack

Allowable Tensile Stress

Area Moment of Inertia

Load...

Save...

Copy...

OK

Cancel

Figuur 23: Eigendommen sling 3

Define Property - ROD Element Type

ID
4

Title
Cable sling4

Material
1..Steel

Color
110

Layer
1

Elem/Property Type...

Property Values

Area, A962.11

Torsional Constant, J0.

Perimeter0.

Coeff. for Torsional Stress0.

Nonstructural mass/length0.

Additional Options

☐ Cable
☐ Compression Only Gap

Initial Tension

Initial Slack

Allowable Tensile Stress

Area Moment of Inertia

Load...

Save...

Copy...

OK

Cancel

Figuur 24: Eigendommen sling 4

Verificatie 2 sling strak

What	2 sling staan strak	3 sling staan strak	Vershil
F-load total	0	125274	125274
Fsling 1	0	77424	77424
Fsling 3	0	76222	76222
Hook x	-63.724	-58.706	5.018
Hook y	9.484	4.824	-4.660
Hook z	10000.022	10012.734	12.712

Figuur 25: Resultaat python berekening

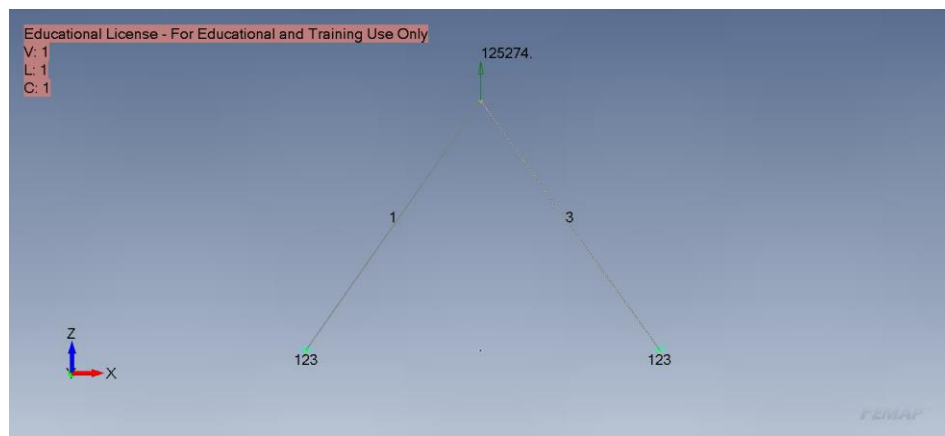
Omdat er maar twee sling strak staan is het een 2d probleem, dus moeten de 3d coördinaten om worden gezet naar 2d coördinaten. Er wordt aangenomen dat de x' coördinaat van de haak gelijk is aan nul, x' coördinaten van punt A en C is het verschil tussen punt haak in het xy vlak. Zie hieronder voor de coördinaten

Punt	x' coördinaat	z coördinaat
A	$\sqrt{(-5200 + 63.723)^2 + (4800 - 9.484)^2} = -7023.61$	0
C	$\sqrt{(5200 + 63.723)^2 + (-4900 - 9.484)^2} = 7197,86$	0
Haak	0	10000

Zie hieronder de verticale kracht van de haak, gehaald uit Figuur 25

Wat	Symbol	Waarde	Unit
Verticale kracht punt haak	Fz	125274	N

Zie hieronder opbouw femap model, in de figuur is de verticale kracht omhoog te zien, de element nummers en de constraints.



Zie hieronder het resultaat van de verplaatsing van alle knooppunten, zoals te zien verplaatsen knooppunten A en C zich niet. Knooppunt haak verplaatst zich wel.

Point	ID	CSys ID	X	Y	Z	1..Simcenter NASTRAN Case 1, 2..T1 Translation	1..Simcenter NASTRAN Case 1, 3..T2 Translation	1..Simcenter NASTRAN Case 1, 4..T3 Translation
A	1	0	-7023.61	0	0	0	0	0
Haak	2	0	0	0	10000	6.850071	0	12.72657
C	3	0	7197.86	0	0	0	0	0

Zie hieronder tabel van de krachten van de slings

Sling	ID	1..Simcenter NASTRAN Case 1, 3036..Rod Axial Force	1..Simcenter NASTRAN Case 1, 3038..Rod Torque
Sling 1	1	77480.96094	0
Sling 3	3	76229.99219	0

Zie de tabel van de verificatie, omdat in FEMAP het wordt gezien als een 2d probleem, dus moeten de verplaatsingen eerst omgezet worden naar 3d. De hoek van de diagonaal is gelijk aan:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{-4900 - 4800}{5200 + 5200} \right) = -43.00 \text{ deg}$$

$$\Delta y = \sin(-43) \times 6.850 = -4.672$$

$$\Delta x = \cos(-43) \times 6.850 = 5$$

Wat	Python script	Femap	Vershil
Verplaatsing x	5.018	$\cos(-43) \times 6.850 = 5.01$	0.16%
Verplaatsing y	-4.660	$\sin(-43) \times 6.850 = -4.672$	0.25%
Verplaatsing z	12.712	12.73	0.07%
F sling 1	77424	77480.96	0.07%
F sling 3	76222	76229.99	0.011%

Tabel 7: Procentuele afwijking 2 slings strak

Verificatie 3 slings strak

What	3 slings strak	4 slings strak	Vershil
F-load total	125274	380040	254766
Fsling 1	77424	234068	156644
Fsling 2	0	852	852
Fsling 3	76221.533	230756.510	154535
Hook x	-58.706	-23.374	35.332
Hook y	4.824	22.307	17.483
Hook z	10012.734	10038.432	25.699

Figuur 26: Resultaten python berekening

In dit hoofdstuk wordt er gekeken naar het gedeelte van de iteratie berekening, waar neer er drie kabels strak staan. Zie figuur hierboven voor de resultaten van de python script.

Zie tabel hieronder de input van de coördinaten van de punten. Punten A,B,C zijn uit Tabel 2 gehaald. Het punt haak is gelijk aan de coördinaten van de haak wanneer er 3 slings strak komen te staan. Zie Figuur 26: Resultaten python berekening Figuur 26 voor resultaat.

Punt	x coördinaat [mm]	y coördinaat [mm]	z coördinaat [mm]
A	-5200	4800	0
B	4600	5300	0
C	5200	-4900	0
Haak	-58.706	4.824	10012.734

Zie hieronder de verticale kracht van de haak, de kracht in punt haak is gelijk aan gehaald uit Figuur 26. De kracht is gelijk aan het verschil tussen het moment dat er drie kabels strak komen te hangen en het moment dat er vier kabels strak komen te hangen.

Wat	Symbol	Waarde	Unit
Verticale kracht punt haak	Fz	380040-125274=254766	N

hieronder opbouw femap model, in de figuur is de verticale kracht omhoog te zien, de element nummers en de constraints.



Figuur 27: Opbouw femap

Zie hieronder het resultaat van de verplaatsing van alle knooppunten, zoals te zien verplaatsen knooppunten A,B en C zich niet. Knooppunt haak verplaatst zich wel.

Point	ID	CSys ID	X	Y	Z	T1 Translation	T2 Translation	T3 Translation
A	1	0	-5200	4800	0	0	0	0
Haak	2	0	-58.706	4.824	10012.73	35.53993607	17.65311241	25.87203789
C	3	0	5200	-4900	0	0	0	0
B	5	0	4600	5300	0	0	0	0

Zie hieronder tabel van de krachten van de slings:

Sling	ID	1..Simcenter NASTRAN Case 1, 3036..Rod Axial Force	1..Simcenter NASTRAN Case 1, 3038..Rod Torque
Sling 1	1	157404.8281	0
Sling 2	2	2.24222374	0
Sling 3	3	155058.4375	0

Zie hieronder de tabel, waar te zien is wat de procentuele afwijking is met femap:

Wat	Python script	Femap	Vershil
Verplaatsing x	35.332	35.540	0.587%
Verplaatsing y	17.483	17.653	0.971%
Verplaatsing z	25.699	25.872	0.07%
F sling 1	156644	157404	0.486%
F sling 2	852	2	99.7%
F sling 3	154535	155058	0.339%

Tabel 8: Procentuale afwijking 3 slings strak

Verificatie 4 slings strak

What	4 slings strak	Fz totaal = F object	Verschil
F-load total	380040	981000	600961
Fsling 1	234068	373124	139056
Fsling 2	852	221686	220834
Fsling 3	230756.510	386249.431	155493
Fsling 4	35.683	218830.070	218794
Hook x	-23.374	-23.008	0.365
Hook y	22.307	6.413	-15.895
Hook z	10038.432	10062.283	23.851

Figuur 28: Resultaten python berekening

In dit hoofdstuk wordt er gekeken naar het gedeelte van de iteratie berekening, wanneer er vier kabels strak staan. Zie figuur hierboven voor de resultaten van de python script.

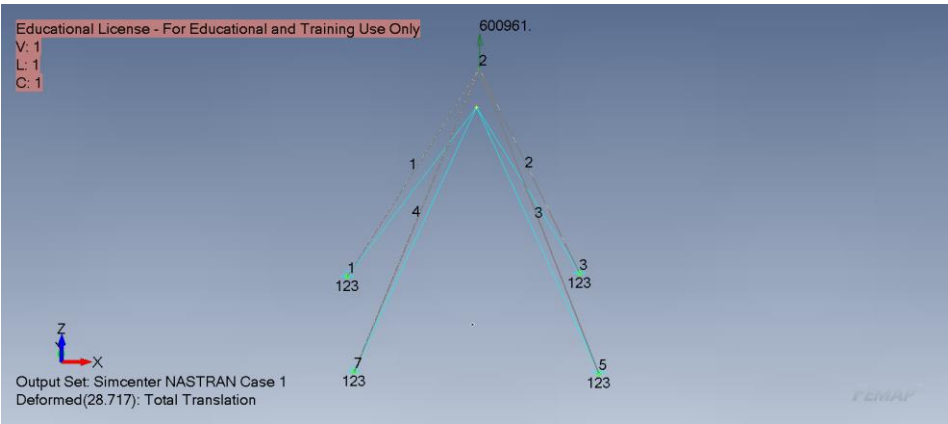
Zie tabel hieronder de input van de coördinaten van de punten. Punten A,B,C en D zijn uit Tabel 2 gehaald. Het punt haak is gelijk aan de coördinaten van de haak wanneer er vier kabels strak komen te staan. Zie Figuur 26: Resultaten python berekening Figuur 28 voor resultaat.

Punt	x coördinaat [mm]	y coördinaat [mm]	z coördinaat [mm]
A	-5200	4800	0
B	4600	5300	0
C	5200	-4900	0
D	-5100	-4900	0
Haak	-23.374	22.307	10038.432

De kracht is gelijk aan het verschil tussen het moment dat er vier kabels strak komen te hangen en het moment dat de door de krachten in de kabels het object wordt gelift. Het gewicht van het liftobject was gelijk aan 100 ton, dus het object wordt gelift wanneer de kracht in de z-richting gelijk is aan 981000 N.

Wat	Symbol	Waarde	Unit
Verticale kracht punt haak	Fz	981000-380040=600961	N

Hieronder opbouw femap model, in de figuur is de verticale kracht omhoog te zien, de element nummers en de constraints.



Figuur 29: Opbouw femap vier slings

Zie hieronder het resultaat van de verplaatsing van alle knooppunten, zoals te zien verplaatsen knooppunten A,B en C zich niet. Knooppunt haak verplaatst zich wel.

Point	ID	CSys ID	X	Y	Z	T1 Translation	T2 Translation	T3 Translation
A	1	0	-5200	4800	0	0	0	0
Haak	2	0	-23.374	22.307	10038.43	0.378306001	-15.93064022	23.89050484
B	3	0	4600	5300	0	0	0	0
C	5	0	5200	-4900	0	0	0	0
D	7	0	-5100	-4900	0	0	0	0

Figuur 30: Resultaten knooppunten vier slings

Zie hieronder tabel van de krachten van de slings:

Sling	ID	1..Simcenter NASTRAN Case 1, 3036..Rod Axial Force	1..Simcenter NASTRAN Case 1, 3038..Rod Torque
Sling 1	1	139450.8906	0
Sling 2	2	221388.5	0
Sling 3	3	155409.0313	0
Sling 4	4	218870.0938	0

Figuur 31: Resultaten krachten vier slings

Zie hieronder de tabel, waar te zien is wat de procentuele afwijking is met femap:

Wat	Python script	Femap	Vershil
Verplaatsing x	0.365	0.378	3.430%
Verplaatsing y	-15.895	-15.931	0.225%
Verplaatsing z	23.851	23.891	0.167%
F sling 1	139056	139451	0.283%
F sling 2	220834	221389	0.251%
F sling 3	155493	155409	0.054%
F sling 4	218794	218870	0.035%

Tabel 9: Procentuele afwijking 4 slings strak

Eind resultaat

Scenario	Krachten in slings [N]				Verplaatsingen haak [mm]		
	Sling 1	Sling 2	Sling 3	Sling 4	X	Y	z
2 slings strak	0	0	0	0	0	0	0
3 slings strak	77481	0	76230	0	5.01	-4.672	12.73
4 slings strak	157404	2	155058	0	35.540	17.653	25.872
Fz haak = Fz object	139451	221389	155409	218870	0.378	-15.931	23.891
Som	374336	221391	386697	218870	40.928	-2.95	62.493

Verskil met code

Wat	Femap	Code	Code
F sling 1[N]	374336	373124.3	0.32%
F sling 2[N]	221391	221686.37	0.13%
F sling 3[N]	386697	386249.43	0.12%
F sling 4[N]	218870	218830.07	0.02%
Verplaatsing haak x	40.928	40.719	0.5%
Verplaatsing haak y	-2.95	-3.075	4.23%
Verplaatsing haak z	62.493	62.271	0.36%

Tabel 10: Procentuele afwijking totaal

Conclusie

Het doel van dit hoofdstuk was om het python script te verifiëren aan de hand van verschillende FEMAP-analyses. De procentuele afwijkingen van het python script en de FEMAP-modellen, zitten bijna allemaal onder een 0.5 %, op een paar uitschieters na. Deze uitschieters worden hier beneden behandeld:

Verplaatsing haak in y-richting in tabel 9: Het daadwerkelijke verschil is maar 0.6 mm, dit is alsnog erg weinig.

Kracht in sling 2 in Tabel 8: Er is hier een procentuele afwijking van 97%, het daadwerkelijke verschil is echter maar 850 N, in vergelijking met wat de totale krachten in de constructie zijn is dit nihil. Zo is te zien dat dit ook geen invloed heeft op de totale procentuele afwijking van sling 2(zie Tabel 10), dit is namelijk maar 0.13% en dat is acceptabel.

Verificatie stijfheids 2d(input femap)(stap 1)

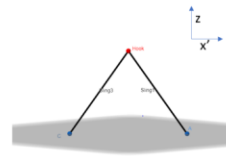
Output code:

Kabels strak	Load[%]	F	X-haak[mm]	Y-haak[mm]	Z-haak[mm]
A,C	0	0	-63.713	9.425	10000.112
A,C,B	12,9	126549.0	-58.592	4.844	10012.863
A,C,B,D	38,9	381609.0	-23.34	22.238	10038.576
A,C,B,D	100	981000.0	-22.976	6.41	10062.326

Input femap:

Punt	X'coördinaat	Z-coördinaat
A	$\sqrt{(-5200 + 63.713)^2 + (4800 - 9.425)^2} = -7023.61$	0
B	$\sqrt{(5200 + 63.713)^2 + (-4900 - 9.425)^2} = 7197.86$	0
Haak	0	10000.112

Wat	Symbol	Waarde	Eenheid
Verticale kracht op punt haak	F	126549	N



Verificatie stijfheids 2d(output femap)(stap 1)

Verificatie code:

Wat	Verplaatsing x'	Verplaatsing y	Verplaatsing z
Femap	6.919	0	12.856
Code	$x' = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} = 6.87$	0	12.751
Vershil	0,7%	0%	0,8%

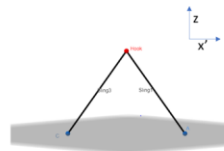
Output:

Kabels strak	Load[%]	F	X-haak[mm]	Y-haak[mm]	Z-haak[mm]
A,C	0	0	-63.713	9.425	10000.112
A,C,B	12,9	126549.0	-58.592	4.844	10012.863
A,C,B,D	38,9	381609.0	-23.34	22.238	10038.576
A,C,B,D	100	981000.0	-22.976	6.41	10062.326

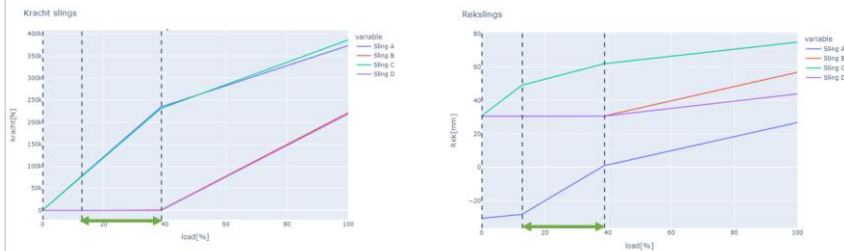
$$\Delta x = (-63.713 + 58.592) = 5.12$$

$$\Delta y = (9.425 - 4.844) = 4.592$$

$$\Delta z = (10012.863 - 10000.112) = 12.751$$



Resultaat stap 2



Kabels strak	Load[%]	F	X-haak[mm]	Y-haak[mm]	Z-haak[mm]
A,C	0	0	-63.713	9.425	10000.112
A,C,B	12,9	126549.0	-58.592	4.844	10012.863
A,C,B,D	38,9	381609.0	-23.34	22.238	10038.576
A,C,B,D	100	981000.0	-22.976	6.41	10062.326

Verificatie stijfheids 3d(input femap)

Output code:

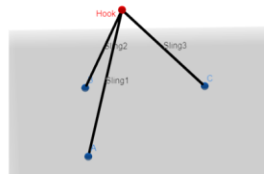
Kabels strak	Load[%]	F	X-haak[mm]	Y-haak[mm]	Z-haak[mm]
A,C	0	0	-63.713	9.425	10000.112
A,C,B	12,9	126549.0	-58.592	4.844	10012.863
A,C,B,D	38,9	381609.0	-23.34	22.238	10038.576
A,C,B,D	100	981000.0	-22.976	6.41	10062.326

Input coordinates femap:

Punt	X	Y	Z
Lift punt A	-5200	4800	0
Lift punt B	4600	5300	0
Lift punt C	5200	-4900	0
Haak	-58.592	4.844	10012.863

Input kracht:

Wat	Symbol	Waarde	Eenheid
Verticale kracht op punt haak	F	(381609-126549)=255060	N



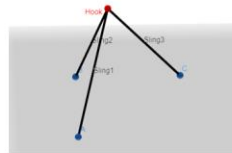
Verificatie stijfheids 3d(output femap)

Verificatie code:

Wat	Verplaatsing x'	Verplaatsing y	Verplaatsing z
Femap	35.58	17.67	25.90
Code	35.252	17.42	25.675
Verskil	0,92%	1.4%	0,87%

Output code:

Kabels strak	Load[%]	F	X-haak[mm]	Y-haak[mm]	Z-haak[mm]
A,C	0	0	-63.713	9.425	10000.112
A,C,B	12,9	126549.0	-58.592	4.844	10012.863
A,C,B,D	38,9	381609.0	-23.34	22.238	10038.576
A,C,B,D	100	981000.0	-22.976	6.41	10062.326

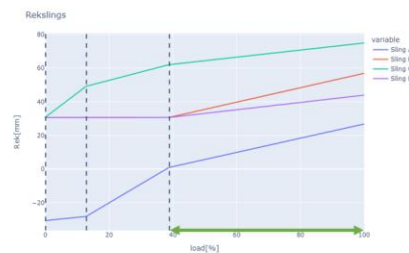
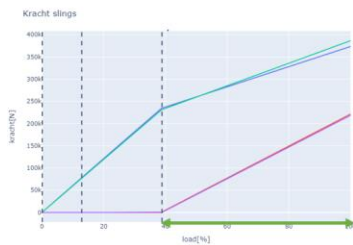


$$\Delta x = (-23.34 + 58.592) = 35.252$$

$$\Delta y = (22.264 - 4.844) = 17.42$$

$$\Delta z = (10038.538 - 10012.863) = 25.675$$

Resultaat



Kabels strak	Load[%]	F	X-haak[mm]	Y-haak[mm]	Z-haak[mm]
A,C	0	0	-63.713	9.425	10000.112
A,C,B	12,9	126549.0	-58.592	4.844	10012.863
A,C,B,D	38,9	381609.0	-23.34	22.238	10038.576
A,C,B,D	100	981000.0	-22.976	6.41	10062.326

Verificatie stijfheids 3d(input femap)

Output code:

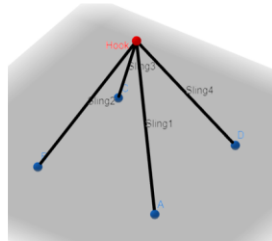
Kabels strak	Load[%]	F	X-haak[mm]	Y-haak[mm]	Z-haak[mm]
A,C	0	0	-63.713	9.425	10000.112
A,C,B	12,9	126549.0	-58.592	4.844	10012.863
A,C,B,D	38,9	381609.0	-23.34	22.238	10038.576
A,C,B,D	100	981000.0	-22.976	6.41	10062.326

Input coordinates femap:

Punt	X	Y	Z
Lift punt A	-5200	4800	0
Lift punt B	4600	5300	0
Lift punt C	5200	-4900	0
Lift punt D	-5100	-4900	0
Haak	-23.34	22.23	10038.576

Input kracht:

Wat	Symbol	Waarde	Eenheid
Verticale kracht op punt haak	F	(981000-381609)=599391	N



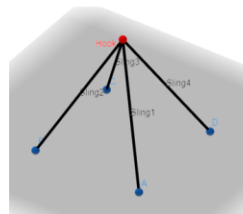
Verificatie stijfheids 3d(output femap)

Verificatie code:

Wat	Verplaatsing x'	Verplaatsing y	Verplaatsing z
Femap	0.377	-15.889	23.827
Code	0.364	-15.854	23.788
Verschil	3.57%	0.22%	0.16%

Output code:

Kabels strak	Load[%]	F	X-haak[mm]	Y-haak[mm]	Z-haak[mm]
A,C	0	0	-63.713	9.425	10000.112
A,C,B	12,9	126549.0	-58.592	4.844	10012.863
A,C,B,D	38,9	381609.0	-23.34	22.238	10038.576
A,C,B,D	100	981000.0	-22.976	6.41	10062.326



$$\Delta x = (-22.976 + 23.34) = 0.364$$

$$\Delta y = (6.41 - 22.264) = -15.854$$

$$\Delta z = (10062.326 - 10038.53) = 23.788$$

Eind resultaat code

```

CHECKS
F-load-total: 981000.00N

Start haak      x[mm]      y[mm]      z[mm]
                -63.752     9.461     10000.012
Coördinaten haak -22.976     6.41      10062.326
Verplaatsingen haak 40.776    -3.051     62.314

Totale kracht haak(x-richting):758.982N
Totale kracht haak(y-richting):-393.621N
Totale kracht haak(z-richting):981001.252N

TABLE SLINGS
Sling  F sling[N]  A sling[mm^2]  E slings[N/mm^2]  load dis[%]
Sling1 373390.36   314.16         210000            31.16
Sling2 221431.7    490.87         210000            18.51
Sling3 386492.32   706.86         210000            32.09
Sling4 210570.38   962.11         210000            18.24

```

