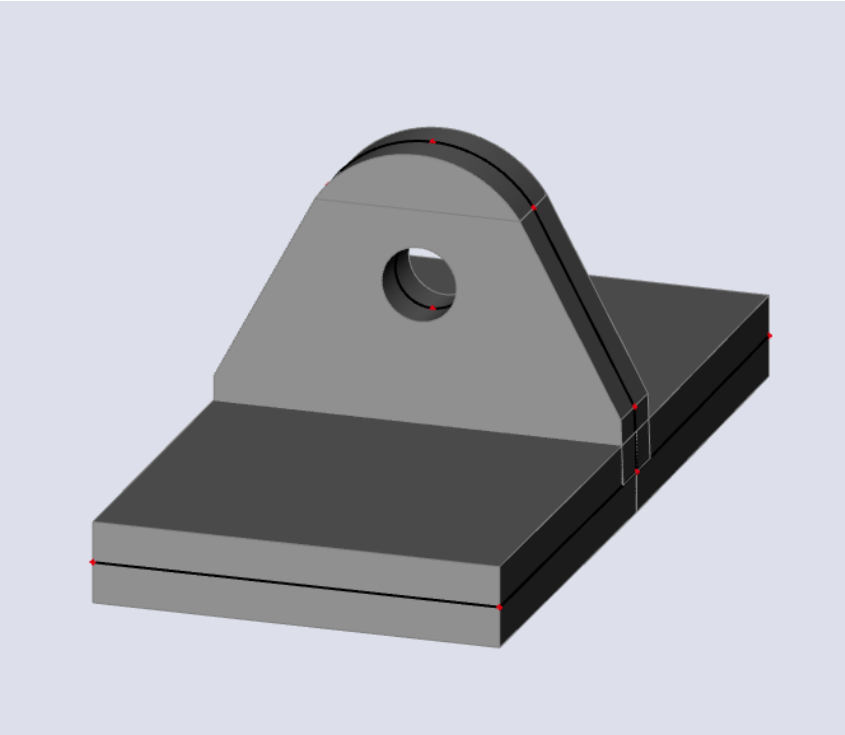
Lineaire en niet-lineaire analyses van een stalen oogplaat

Max Pelsma
5169720

26-10-2026

Civiele Techniek en Geowetenschappen
Engineering Structures



TU Delft

Lineaire en niet-lineaire analyses van een stalen oogplaat

Bachelor Eindproject

Door

Max Pelsma
5169720

Ter verkrijging van de graad Bachelor of Science
aan de Technische Universiteit Delft

Studentennummer: 5169720
Eerste begeleider: Dr.ir. Hoogenboom, TU Delft
Tweede begeleider: Dr.ir. Meijers, TU Delft

TU Delft

Voorwoord:

Afgelopen weken hebben in het teken gestaan van het schrijven van mijn bachelor eindwerk project. De tijd is voorbijgevlogen en ik heb aan het project werken als positief ervaren. Ik wil graag mijn begeleiders Pierre Hoogenboom en Peter Meijers bedanken voor het bijstaan in dit bachelor eindwerk project. Ik heb veel geleerd over oogplaten en het modelleren in het softwareprogramma SCIA-engineer. Ik hoop dat degene die dit verslag leest veel plezier ervaart.

Max Pelsma

Delft, oktober 2026

Samenvatting

Dit bachelor eindwerk schetst een onderzoek waarin er gekeken wordt of een lineaire berekening in SCIA-Engineer kan voorspellen of er breuk optreedt in de niet-lineaire berekening. Hierbij zijn eerst standaard dimensies van oogplaten bestudeerd en is er aan de hand van deze informatie een ontwerp gemaakt. Dit ontwerp is geplaatst in een situatie waarin het een functie vervult op de val van een ophaalbrug. Dit scenario is geschetst om te kijken naar zaken zoals: wat is een realistische kracht die op de oogplaat werkt, wat voor contactoppervlakte hoort hierbij en onder welke hoek werkt de opwaartse kracht op de oogplaat. Verder is gekeken naar hoe met handberekeningen een indicatie kan worden gemaakt of er breuk plaatsvindt in de oogplaat.

Vervolgens is er een eindige elementen berekening uitgevoerd in SCIA-Engineer en is van de oogplaat aanwezig op de val van de brug een model gemaakt. Voor dit model zijn lineaire en niet-lineaire berekeningen uitgevoerd. Hiernaast zijn er belasting gevallen opgesteld om de vloeigrens in de lineaire bereiking te overschrijden. Door de verdeelde belasting telkens te verhogen en een nieuw belasting geval te creëren, is er geïtereerd naar een belasting geval waarin er in de niet-lineaire berekening breuk van de oogplaat optreedt. Dit vond plaats in BG-10. Een ander belasting geval: BG-11 is gevonden om te kijken naar de verhouding tussen de lineaire en niet-lineaire resultaten vlak voordat er breuk optreedt.

De resultaten geven aan dat het ‘hypothetische vloeigebied’ in de lineaire berekening 10.1 mm^2 en 14.0mm^2zijn voor respectievelijk BG-11 en BG-10. Hieruit is op te maken dat er het mogelijk is om aan de hand van dit ‘hypothetische vloeigebied’ een voorspelling te maken over het optreden van breuk in een niet-lineaire berekening. Dit is tevens ook het antwoord op de hoofdvraag van mijn bachelor eindwerk.

De conclusies die zijn getrokken in dit bachelor eindwerk zijn dat bij het niet overschrijden van de vloeigrens in de lineaire berekening, het uitvoeren van een niet-lineaire berekening overbodig is. Ligt het ‘hypothetische vloeigebied’ tussen de 0 en 10.1 mm^2 dan is het verstandig een niet-lineaire berekening uit te voeren. Wanneer het ‘hypothetische vloeigebied’ zich tussen de 10.1 mm^2en 14 mm^2bevindt, dan is het noodzakelijk een niet-lineaire berekening uit te voeren.

Inhoudsopgave

Voorwoord i

Samenvatting ii

1. Inleiding 1

1.1 Probleemdefinitie 1

1.2 Doel 1

1.3 Aanpak 2

1.4 Werk van anderen 2

2. Ontwerp 3

2. 1 Trekkracht kabel 3

2.2 Minimale diameter bout 5

2.3 Oogplaat 6

2.3.1 Ontwerpeisen oogplaat 7

2.3.2 Bezwijkmechanismen oogplaat 9

3. Eindige elementen methode (EEM) in SCIA- Engineer 10

3.1 Controleren model uit brug scenario 11

3.2 Iteraties naar breukrek 12

4. Resultaten 13

4.1 BG-10 14

4.2 BG-11 18

5. Discussie 21

6. Conclusie 22

Bibliografie 24

Bijlage 25

1. Inleiding

1.1 Probleemdefinitie

Gebruikers van het softwareprogramma genaamd SCIA-Engineer gebruiken voornamelijk de lineaire analyse wanneer er spanningen en vervormingen in de constructie worden berekend. Ondanks dat de lineaire analyse snel en effectief is, is de analyse niet in alle gevallen volledig betrouwbaar. Een lineaire analyse is gebaseerd op het feit dat er een lineair verband aanwezig is tussen de spanning en de optredende rek. Normaliter wanneer de spanningen hoger worden dan de vloeigrens, wordt het gedrag van staal plastisch. Constructeurs kijken hoe ver de spanningen vanaf de vloeigrens zitten: zijn de spanningen lager dan de vloeigrens dan kan het model ontworpen worden. Het werkt ook de andere kant op, wanneer de vloeigrens wordt overschreden, wordt de constructie al snel als onvoldoende sterk gezien en hierdoor niet ontworpen. Het is daarom interessant om kennis te vergaren over de relatie tussen het hypothetische vloeigebied in een lineaire analyse en de scheurvorming in een niet-lineaire analyse. Omdat er geen vloei plaatsvindt in een lineaire berekening, maar er wel een gebied ontstaat waar de vergelijkingsspanning groter is dan de vloeigrens, wordt dit gebied het hypothetische vloeigebied genoemd.

1.2 Doel

Het doel van dit bachelor eindwerk is om te kijken naar de verschillen in lineaire en niet-lineaire berekeningen voor een oogplaat onder belasting. Deze verschillen ontstaan doordat de ene analyse alleen kijkt naar het elastische gedrag van staal en de andere analyse ook het plastische gedrag van staal meeneemt. De plastische berekening is de meest realistische benadering, maar veel SCIA-Engineer gebruikers voeren deze niet uit. De onderzoeksvraag van dit bachelor eindwerk project luidt daarom als volgt:

Kan je door middel van een lineaire analyse voorspellen of een oogplaat in een niet-lineaire analyse een kritieke toestand bereikt?

Met deelvragen:

- *Hoe wordt er met de hand gecontroleerd of een oogplaat een bepaalde trekkracht kan opnemen en wat zijn de eisen voor het ontwerpen van een oogplaat?*
- *Bij welke trekkracht treedt er breuk in de oogplaat op in de niet-lineaire berekening en wat is hierbij het gebied waarin de vloeigrens wordt overschreden in de lineaire berekening?*
- *Wat zegt de uitkomst van een lineaire berekening over het wel of niet uitvoeren van een niet-lineaire berekening?*
- *Wat zegt de uitkomst van een handberekening over de niet-lineaire berekening?*

1.3 Aanpak

Er wordt een scenario geschetst van een ophaalbrug waarin de oogplaat is verbonden aan de val van de brug. De oogplaat is door middel van een kabel onderworpen aan een trekkracht. Aan het uiteinde van de kabel zit een beugel met een bout die contact maakt met de oogplaat. Voor het kiezen van de afmetingen van een oogplaat zijn standaard dimensies gebruikt. Vervolgens zal de gekozen oogplaat getoetst worden op sterkte door het uitvoeren van handberekeningen, dit wordt voornamelijk gedaan om een inzicht te krijgen in wat er achter de berekeningen zit van het softwareprogramma. Het scenario, ontwerp en de handberekeningen worden in hoofdstuk 2 getoond. Wanneer de oogplaat onderworpen aan de belasting voldoet aan de eisen en als de berekende spanningen binnen de grenzen blijven, zal de oogplaat gemodelleerd worden in SCIA- Engineer. Hierna zal deze oogplaat gemodelleerd worden en dan zullen er lineaire berekeningen en niet-lineaire berekeningen worden uitgevoerd. Vervolgens zal er een breukrek bepaald worden waarbij er scheurvorming ontstaat voor de staalsoort van de oogplaat. Vanuit hier zullen er belasting gevallen gecreëerd worden om de belasting te vinden die een breuk in de niet-lineaire berekening initieert, dit allen is te vinden in hoofdstuk 3. Voor dit belasting geval zal vervolgens ook een lineaire berekening worden uitgevoerd en daarna zal er een hypothetisch vloeigebied worden vastgesteld, mede dit behoort tot de resultaten en is terug te vinden in hoofdstuk 4. Het rapport wordt afgesloten met een discussie in hoofdstuk 5 en een conclusie in hoofdstuk 6.

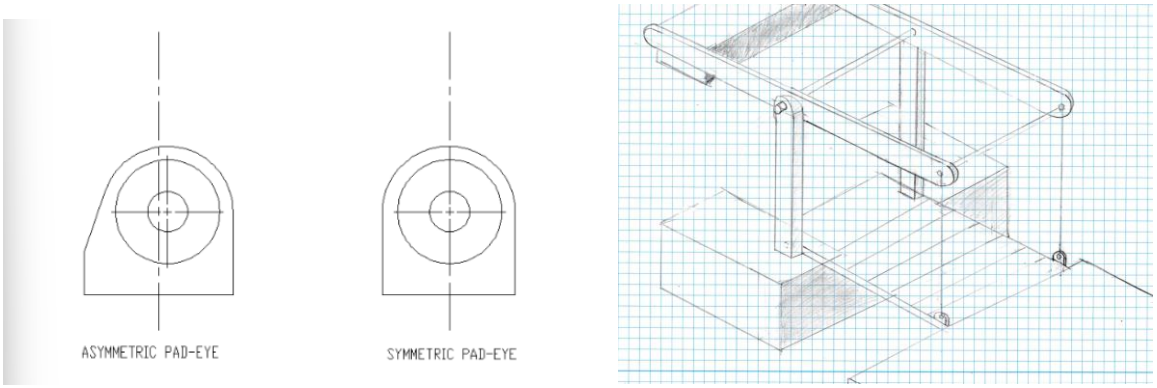
1.4 Werk van anderen

Eerder werk is verricht door medestudent David de Deugd, hij heeft gekeken naar de impact van het verwijderen van een stuk staal uit het lijf van een ligger. Hierbij had David twee modellen gemaakt: een model waarin alleen een blote ligger aanwezig was met een vierkant gat in het lijf en een ander model waarin er versterking is aangebracht bij deze ligger. Voor beide modellen werd gevarieerd in het type staalsoort en net verfijning. Door het aanbrengen van een trapezium belasting op de gemaakte modellen, kon er gekeken worden naar de optredende spanningen in de versterkte en niet-versterkte ligger. Voor het verkrijgen van de resultaten zijn er lineaire berekeningen uitgevoerd en is er een innovatieve methode toegepast om het vloeigebied te bepalen, dit vloeigebied is vervolgens uitgezet naast de plastische rekken berekend door de niet-lineaire analyse om de relatie tussen de verschillende soorten analyses nader te onderzoeken (Deugd, 2026).

2. Ontwerp

In dit hoofdstuk zal worden ingegaan op het ontwerp van de oogplaat. Zoals eerder vernoemd zijn hier standaard dimensies voor gekozen die gebruikelijk zijn voor oogplaten. Verder wordt in dit hoofdstuk de dikte van de kabel bepaald, vervolgens kan hieruit de dikte van de bout worden afgeleid. Waar tot slot naar wordt gekeken in dit hoofdstuk is, gezien het gegeven scenario, of de trekkrachten door de oogplaat kunnen worden opgenomen.

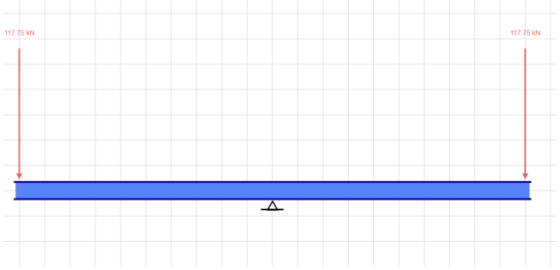
Het model betreft een oogplaat zoals deze gebruikt zou kunnen worden voor het ophalen van de val in een ophaalbrug. De val is het beweegbare gedeelte van een ophaalburg. In het beginstadium van het ophalen van de val werkt er een verticale kracht omhoog op de oogplaat, dit is ook het scenario dat bekeken zal worden. Een ophaalbrug die een functie vervult in het laten oversteken van voetgangers en fietsers wordt beschouwd.



Figuur 1 & 2: Symmetrische en asymmetrische oogplaat (TeamTheNavalArch, 2020) en schets scenario brug

2. 1 Trekkracht kabel

Wanneer het bovenste draaiende onderdeel van de brug wordt beschouwd in een 2D-vlak, dan kan het versimpeld worden naar een ligger met een scharnier in het midden waar aan het uiteinde links en het uiteinde rechts een kracht werkt in de negatieve z-richting. Deze krachten zijn even groot omdat de arm van de kracht even groot is, dat de krachten even groot zijn komt door het kijken naar momentenevenwicht vanuit het scharnier.



Figuur 3: Schema van bovenste horizontale brug ligger (Skyciv)

Hierdoor vindt men:

$$F_{z,contragewicht} = 2 * F_{tk} \quad (1)$$

Hierin is $F_{z,contragewicht}$ de zwaartekracht van het contragewicht en F_{tk} de trekkracht in een kabel die verbonden is aan de val van de brug. Aangenomen wordt dat het eigengewicht van de val groter is dan het contragewicht waardoor in het geval van ophalen van de brug een externe (rotatie) kracht geleverd zal moeten worden om de brug op te halen. Door deze aanname kom ik logischerwijs op het feit dat de kracht in de kabel constant blijft in opgehaalde en niet-opgehaalde toestand en daartussenin.

De afmetingen van het contragewicht voor lengte x breedte x hoogte zijn respectievelijk $3.0 \cdot 1.0 \cdot 0.5$ m. Hieruit kan de zwaartekracht van het contragewicht bepaald worden door

$$F_z = \frac{V_{cg} \ \rho_{steel}}{100} \quad (2)$$

V_{cg} = Volume van het contragewicht $1.5\ \mathrm{m}^3$

ρ_{steel} = Dichtheid staal $7850\ \mathrm{kg/m}^3$

Het invullen van (2) levert een $F_z = 117.75$ kN. Wanneer deze waarde dan vervolgens in wordt gevuld in vergelijking (1), kan de trekkracht worden bepaald. F_{trek} Bedraagt dan 58.875 kN.

Voor het bepalen van de diameter van de kabel geldt er:

$$\frac{F_{trek}}{A_{kabel}} < \frac{f_{Vloei}}{\gamma_f} \quad (3)$$

Hieruit is de minimale kabeldiameter te bepalen met:

$$D_{kabel} = \sqrt{\frac{4 \ F_{trek}\, \gamma_f}{\pi \ f_{vloei}}} \quad (4)$$

Met

$F_{trek} = 58.875$ kN

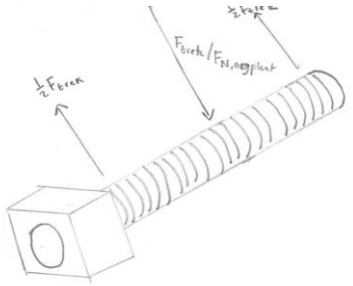
$\gamma_f = 1.2$

$f_{vloei} = 355\ \mathrm{N/mm}^2$

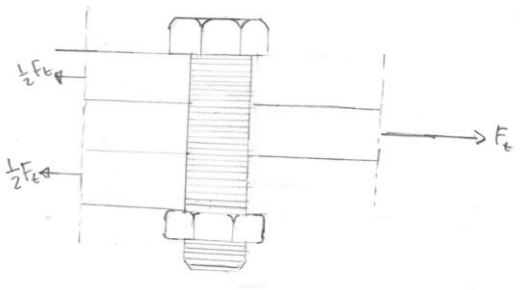
Invullen in (4) geeft dit een D_{kabel} van 14.531 mm.

2.2 Minimale diameter bout

De bout wordt onderworpen aan de krachten die weergegeven zijn in Figuur 4. Deze weergave van de bout is te schematiseren naar een bout met drie afschuifvlakken, dit is weergegeven in Figuur 5.



Figuur 4: Bout met belastingen



Figuur 5: Afschuifvlakken bout

Voor het bepalen van de afschuifsterkte van het boutmateriaal wordt gebruikt gemaakt van de formule van Von Mises, maar nu met betrekking tot breuk van het materiaal. Waarin $\sigma = 0\ \mathrm{N/mm^2}$ bij zuivere afschuifing. Dit leidt tot de volgende uitdrukking voor de afschuifweerstand van een bout (per afschuifvlak) (Abspoel, 2013).

$$F_v = \frac{\frac{1}{\sqrt{3}}\ f_{u,b}\ A}{\gamma_{M2}} \tag{5}$$

Hierin zijn:

$f_{u.b}$ = Treksterkte boutmateriaal $800\ \mathrm{N/mm^2}$

A = Oppervlakte van de bout in $\mathrm{mm^2}$

γ_{M2} = Een veiligheidsfactor van 1.25

(5) kan worden omgeschreven naar (6) voor het berekenen van de diameter van de bout.

$$D_{bout} = \sqrt{\frac{4\sqrt{3}\,\gamma_{M2}\ F_v}{\pi\ f_{u,b}}} \tag{6}$$

Het middelste afschuifvlak is de maatgevende met een kracht van $F_{trek} = F_v = 58.875\ \mathrm{kN}$. Deze waarde met bovenstaande gegevens wordt ingevuld in (6), komt de

minimale diameter van de bout te liggen op $14.243\ \mathrm{mm}$. Om te zorgen dat het contact oppervlakte van de pin en de oogplaat niet te klein wordt, wordt er gewerkt met een bout diameter van $20\ \mathrm{mm}$. Het contactoppervlak dat de bout maakt met de oogplaat is

$$A_{contact} = \frac{1}{8}\pi D_g t_{op} \tag{7}$$

D_g = Diameter van het gat in de oogplaat in mm
t_{op} = Dikte van de oogplaat in mm

Hier is een aanname gemaakt dat de bout met 1/8 deel van de omtrek van het gat in de oogplaat contact maakt. Bij het opstellen van het model zal de kracht die de bout op de oogplaat uitoefent een verdeelde lijnlast in een 2D vlak zijn. Hierdoor is alleen afstand relevant die 1/8 deel van de omtrek van het gat in de oogplaat dekt.

$$S_{contact} = \frac{1}{8}\pi D_g \tag{8}$$

2.3 Oogplaat

Oogplaten kunnen onder verschillende hoeken in de richting van de lange zijde krachten dragen, door een bevestigingsstuk toe te voegen tussen de kabel en de oogplaat kan deze rotatie plaatsvinden zonder te veel wrijving. Dit bevestigingselement is vaak een beugel met een bout er doorheen, een dergelijke oogplaat met beugel en bout is weergegeven in Figuur 6. De diameter van de bout is van belang voor het ontwerp van de oogplaat omdat deze contact maakt met de oogplaat. Het contact oppervlakte heeft vanuit daar weer invloed op de spanningsverdeling in de oogplaat.



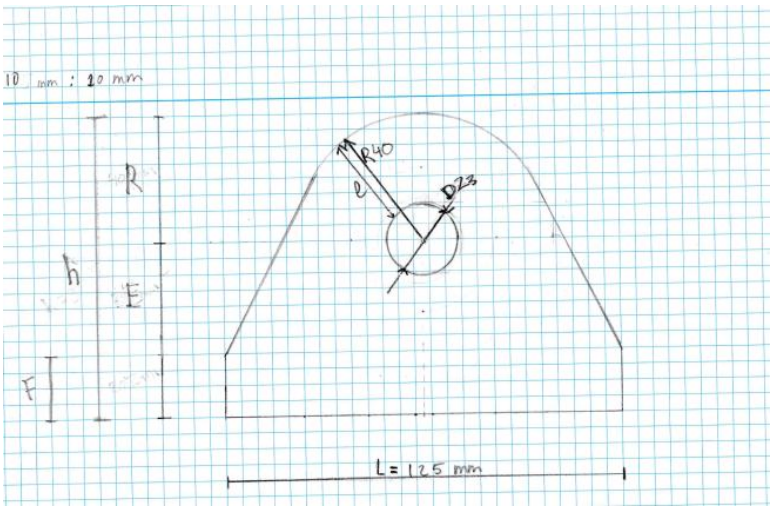
Figuur 6: Asymmetrische oogplaat met beugel en schroefbout (Esubsea, 2026)

Voor de dimensies van de oogplaat is een aantal standaardafmetingen gebruikt die verkregen zijn uit een document voor oogplaatontwerp (DNV, 2026). Dit ontwerp zal in dit hoofdstuk getest worden aan de hand van ontwerpeisen en sterkteberekeningen.

Parameter	Waarde
h	95 mm
D_g	23 mm
L	125 mm
R	40 mm
t_{op}	25 mm
e	28.5 mm
A_{boven}	655.50 mm^2
A_{naast}	762.26 mm^2

Tabel 1: Afmetingen oogplaat

h Is hier de hoogte van de oogplaat, D_g de diameter van het gat, L de lengte van de oogplaat, R is de straal die de bovenste boog van de oogplaat heeft met het midden van het gat, t_{op} is de dikte van de oogplaat en e is de afstand van de rand van de oogplaat tot het gat. De parameters zijn in figuur 7 weergegeven.



Figuur 7: Oogplaat met parameters (Bron: Eigen tekening)

2.3.1 Ontwerpeisen oogplaat

Allereerst dient de $D_{bout} < D_g$, dit volstaat. Naast deze eis is er een aantal andere eisen waaraan het ontwerp dient te voldoen. Het Amerikaanse Instituut voor Staal Constructies (1989) geeft twee eisen voor de afstanden naar de rand vanaf het oog in oogplaten (Russ, 1992).

De eerste eis geeft een limiet voor de toelaatbare diameter van het gat

$$e \leq 1.25 D_g \tag{9}$$

(9) invullen geeft:

$$28.5 \leq 1.25 \cdot 23$$

$$28.5 \leq 28.75$$

De tweede eis geeft een limiet voor de dikte van de plaat op de locatie van het gat

$$e \leq 4(t_{op} + t) \tag{10}$$

(10) invullen geeft:

$$28.5 \leq 4(25 + 0)$$

$$28.5 \leq 100$$

De derde eis waarnaar gekeken wordt is de verhouding tussen de oppervlakte boven het oog en de oppervlakte dat zich naast het oog bevindt, respectievelijk A_{boven} en A_{naast}.

$$A_{boven} \geq \frac{2}{3}(A_{naast}) \tag{11}$$

(10) invullen geeft

$$655.50 \geq \frac{2}{3} \cdot 762.26$$

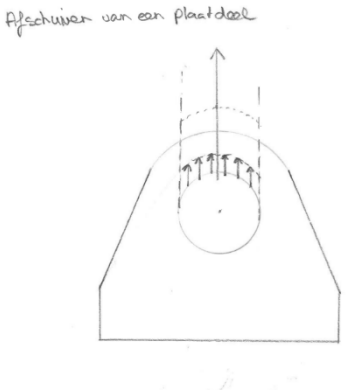
$$655.50 \geq 507.66$$

Omdat er gekozen is in het ontwerp voor het weglaten van de lasplaten aan beiden kanten van de oogplaat zal de t op nul worden gezet bij het controleren van de eisen en bij sterkteberekeningen.

De eerste eis voldoet want $28.5 \leq 28.75$, voor de tweede eis zit de oogplaat ook ruim binnen de norm want $28.5 \leq 100$. De laatste eis voldoet ook want er geldt $655.50 \geq 507.66$.

2.3.2 Bezwijkmechanismen oogplaat

Voor het kijken naar de sterkte van de oogplaat, zal gekeken worden naar een aantal bezwijkmechanismen. Het eerste bezwijkmechanisme waar het ontwerp op getoetst gaat worden is het afschuiven van het plaatgedeelte boven het oog van de oogplaat. Hiervoor is een Noors document geraadpleegd dat een aantal berekeningen voordoet waarin gekeken wordt of de spanningen die optreden in de oogplaten binnen de grenzen blijven. Het afschuiven van het bovenste gedeelte van de oogplaat ziet er als volgt uit



Figuur 8: Afschuiven van gedeelte oogplaat boven gat

Voor het materiaal boven het gat is het meestal voldoende om dit alleen te controleren op afschuiven (DNV GL, 2016). Dit gebeurt met de volgende vergelijking:

$$\sigma_e \geq \frac{2\ RSF}{(2\ R\ -\ D_g)\ t} \tag{12}$$

RSF is hier de ontwerpbelasting bestaande uit de trekkracht op de oogplaat vermenigvuldigt met de veiligheidsfactor. Om de handberekeningen later te vergelijken met de berekeningen uit SCIA, zal de veiligheidsfactor binnenin de variabele RSF op 1 worden gezet. De andere variabelen uit (12) zijn reeds gedefinieerd.

$$\frac{F_{trek}\ \gamma_f}{A_{netto}} \leq f_{vloei,oogplaat} \tag{13}$$

(13) geldt als er geen schuifspanningen aanwezig zijn. (12) is af te leiden uit (13) omdat A_{netto} geschreven kan worden als wat er in de noemer staat van (12). Een ander belangrijk concept waarnaar gekeken moet worden is of de oogplaat niet bezwijkt op draagkracht, dit wordt gedaan met (14) (DNV GL, 2016):

$$\sigma_e \geq 0.18 \sqrt{\frac{RSF\ (\frac{1}{D_{pin}} - \frac{1}{D_h})\ E}{t}} \quad (14)$$

Met

RSF = De werkende trekkracht in kN

D_{pin} = Diameter van de bout in mm

D_h = Diameter van het gat in de oogplaat in mm

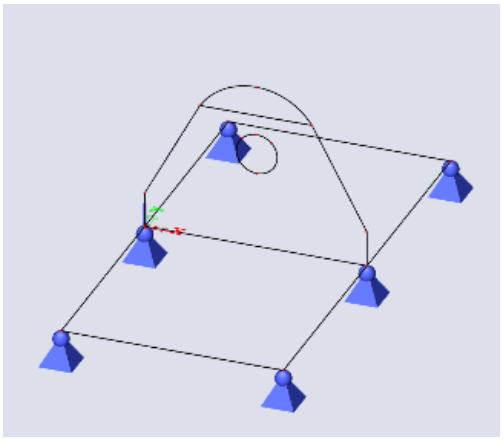
E = Elasticiteitsmodulus staal 200.000 $\mathrm{N/mm^2}$

t = dikte oogplaat in mm

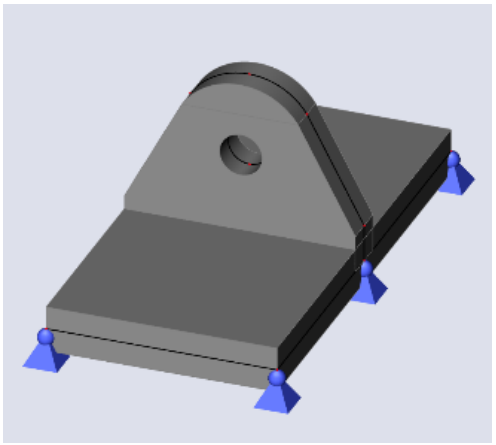
Met de bekende trekkracht van $58.875\ \mathrm{kN}$ en de gegevens uit tabel 1, wordt een spanning gevonden vele malen lager dan de vloeispanning, namelijk $315.47\ \mathrm{kN}$.

3. Eindige elementen methode (EEM) in SCIA- Engineer

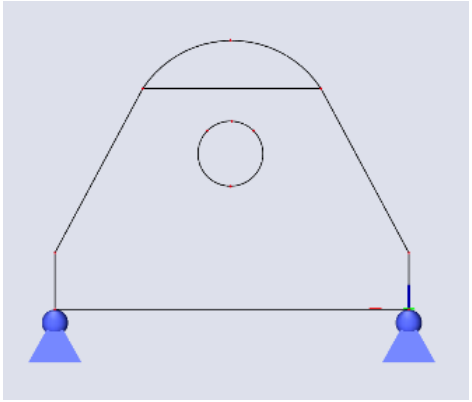
Voor het uitvoeren van de lineaire en niet-lineaire berekeningen is eerst een model gemaakt van een oogplaat in SCIA-engineer met de dimensies die terug te vinden zijn in Tabel 1.



Figuur 9: 3D-aanzicht van model (SCIA-Engineer)



Figuur 10: 3D-aanzicht van model met volumes (SCIA-Engineer)

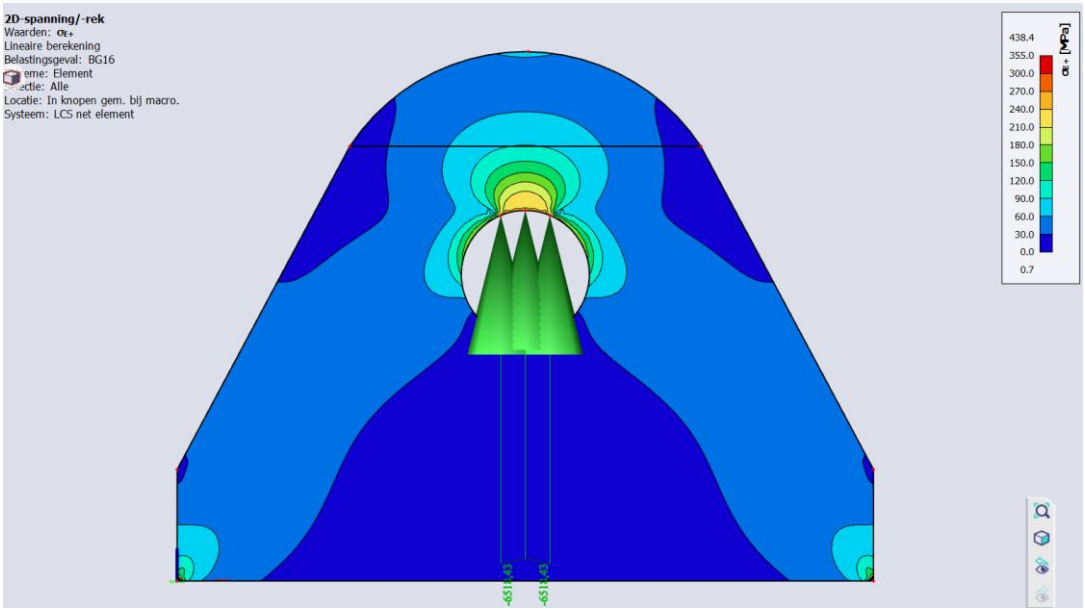


Figuur 11: Vooraanzicht model (SCIA-Engineer)

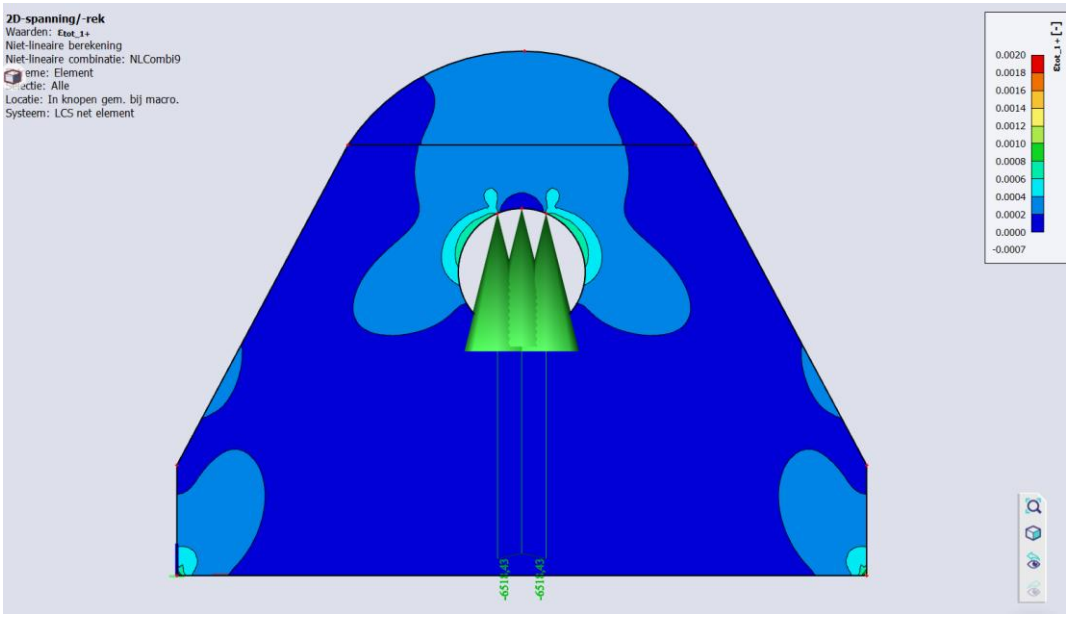
In de figuren 9,10 en 11 zijn het vooraanzicht en het 3D ontwerp van de oogplaat weergegeven. De horizontale plaat en de oogplaat zijn star met elkaar verbonden en de horizontale plaat heeft zes opleggingen. Voor de instellingen van het net is er gekozen voor een grootte van de 2D-netelementen van 0.001. Verder is het gemiddeld aantal 1D-netelementen op rechte 1D-elementen 1. De optie elementen/knopen verbinden is aangezet. Voor geavanceerde solver instellingen heb ik gekozen voor de buigtheorie voor plaat/schaal van Kirchhoff en voor de niet-lineaire berekeningen heb ik de Newton-Raphson methode gebruikt met incrementen, maximumaantal iteraties, solver nauwkeurigheid ratio, solver-robuustheidsverhouding van 10, 20 ,1 en 1 respectievelijk.

3.1 Controleren model uit brug scenario

Aan het model is eerst de eerder werkende belasting uit het brugscenario toegevoegd van 58.875 kN, gevonden is dat deze belasting niet leidt tot falen van de oogplaat.

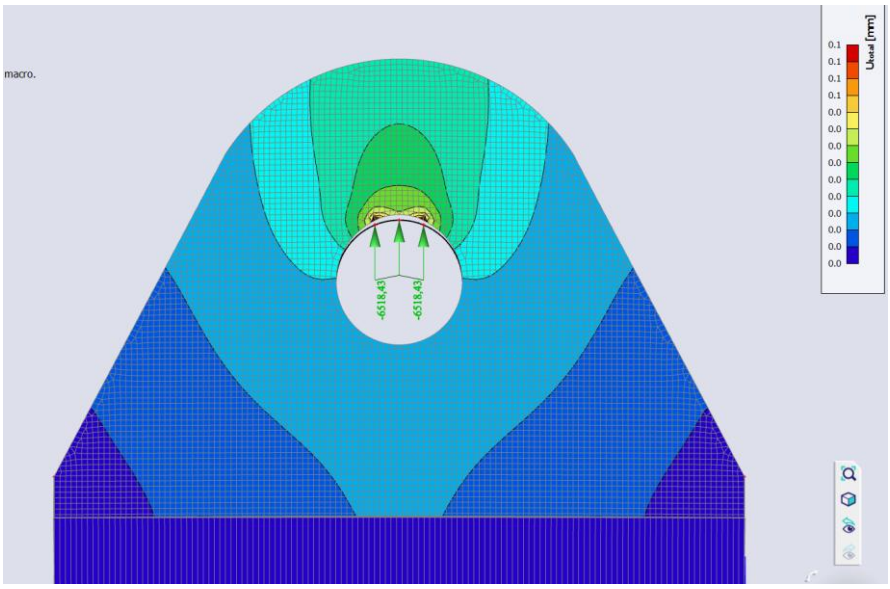


Figuur 12: 2D-Spanningen voor toegepaste belasting van 58,875 kN (SCIA-Engineer)



Figuur 13: Totale hoofdrek voor toegepaste belasting van 58,875 kN (SCIA-Engineer)

Te zien is dat zowel de spanningen onder de vloeigrens blijven in de lineaire berekening en dat de totale hoofdrek in de niet-lineaire berekening onder de vloeirek blijft. Met deze spanning- en rek verdeling wordt de belasting opgehoogd totdat de totale rek in de niet lineaire berekening hoger wordt dan de breuk rek (20 % volgens figuur 15).



Figuur 14: 3D- Vervormingen U_total (SCIA-Engineer)

3.2 Iteraties naar breukrek

Om de verdeelde belasting te vinden waar een scheur in de oogplaat ontstaat, is er een aantal iteraties gedaan. Deze stappen zijn terug te vinden in tabel 2. Hier is uitgegaan van een breukrek van 0.20 zoals in figuur 15 te zien. Dit figuur geeft de materiaaleigenschappen van staal S355J2 weer. Uit welke stappen dit iteratieproces heeft bestaan is weergegeven in de bijlage. Er is begonnen bij de situatie waarin de

oogplaat was onderworpen aan de trekkracht in de kabel uit het scenario met de brug. Zoals in voorgaand hoofdstuk is bewezen, treedt er in deze situatie geen breuk op. Vanaf dit scenario zijn er verschillende belasting gevallen gemaakt waarin de verdeelde belasting telkens is verhoogd, totdat er een totale hoofdrek aanwezig was in de niet-lineaire berekening met een waarde groter dan 0.2. Vanuit datzelfde belasting geval is er toen een lineaire berekening uitgevoerd die een gebied weergeeft waar de spanningen hoger zijn dan 355 $\mathrm{N/mm^2}$.

Eigenschap	S355J2	S355J2W+N
Vloeigrens	min. 355 MPa	min. 355 MPa
Treksterkte	470–630 MPa	470–630 MPa
Rek bij breuk	20–22%	20–22%
Kerfslagwaarde	≥27 J bij 20°C	≥40 J bij -20°C

Figuur 15: Materiaaleigenschappen staal (S355J2, 2026)

Iteratiestap	Belasting geval	Verdeelde belasting in $\mathrm{kN/m}$	Belasting geval in kN
1	BG1	6518.43	58.88
2	BG2 (eerste vloei)	9000	81.29
3	BG3	9100	82.19
4	BG4	9250	83.55
5	BG5	9500	85.81
6	BG6	9800	88.51
7	BG7	10000	90.32
8	BG8	12000	108.39
9	BG9	10200	92.13
10	BG10 (breuk)	10500	94.84
11	BG11 (nog net geen breuk)	10350	93.48

Tabel 2: Iteratieproces

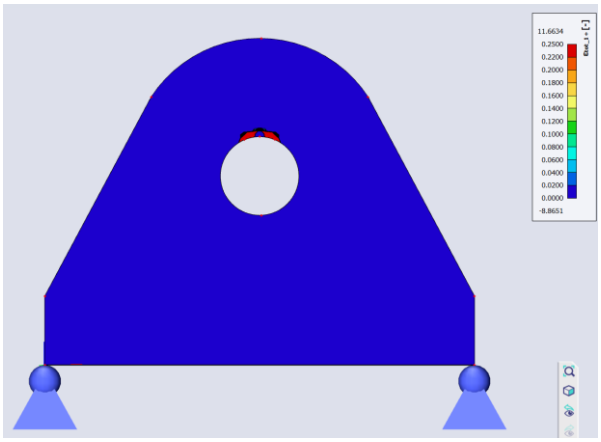
4. Resultaten

De resultaten betreffen de lineaire en niet-lineaire berekeningen voor belasting gevallen 10 en 11, het belasting geval waar de oogplaat faalt en het belasting geval waarbij de oogplaat nog net niet faalt. Voor deze belasting gevallen, BG-10 en BG-11, zullen de lineaire en niet-lineaire resultaten gepresenteerd worden. Voor de lineaire berekening van BG-11 is er ook een gebied gevonden waar de spanningen de vloeigrens overschrijden, het hypothetische vloeigebied. De oppervlakte van dit hypothetisch vloeigebied zal worden bepaald evenals de hoogte en de breedte van dit gebied.

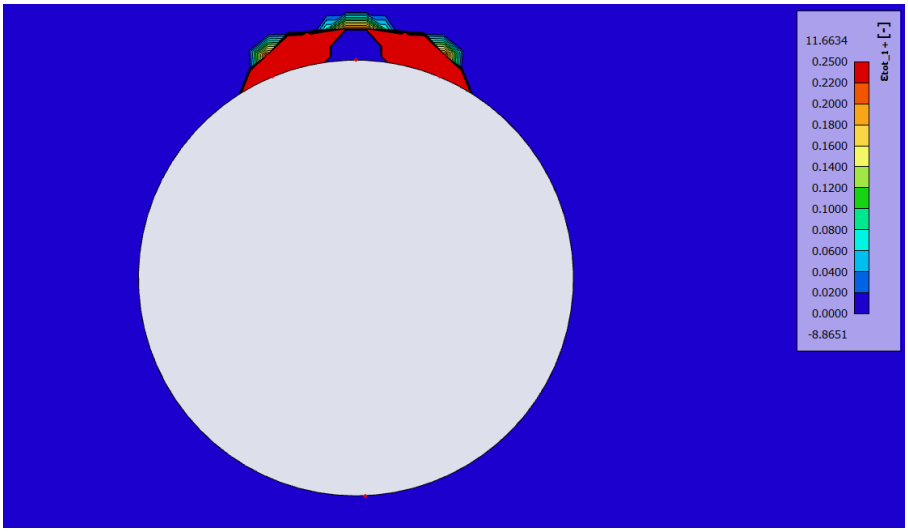
Daarnaast wordt met twee bekenden: de kracht uit BG- 2 en de kracht uit BG- 11, gekeken naar wat er uit vergelijking (14) van de handberekening komt.

4.1 BG-10

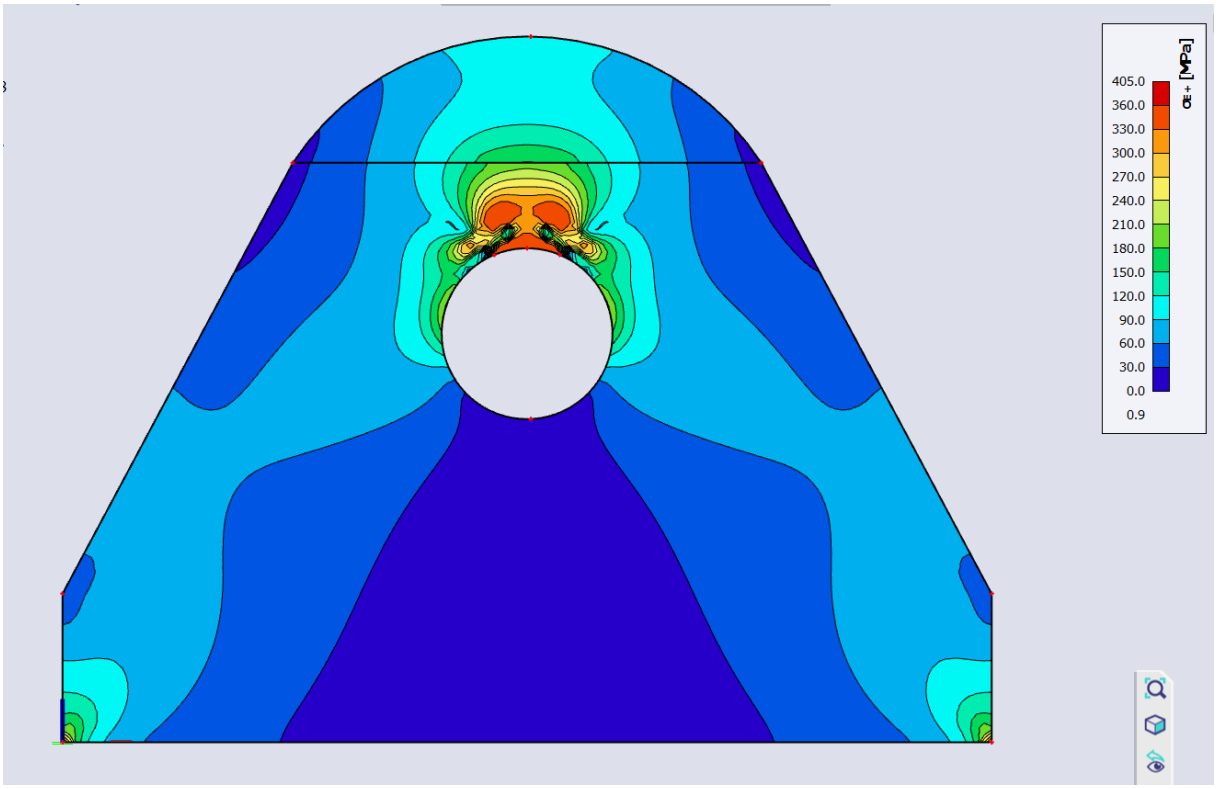
In deze paragraaf worden de resultaten van belasting geval 11 weergegeven, hier kan men vinden dat er inderdaad breuk optreedt omdat de totale hoofdrek de waarde van 0.2 passeert. Dit gebied indiceert rood in Figuur 16 en 17.



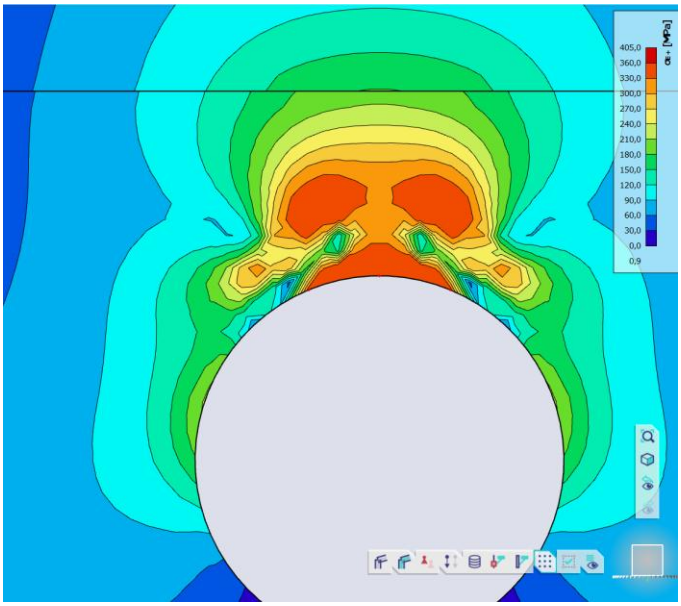
Figuur 12: Totale hoofdrek bij niet-lineaire berekening BG-10 (SCIA-Engineer)



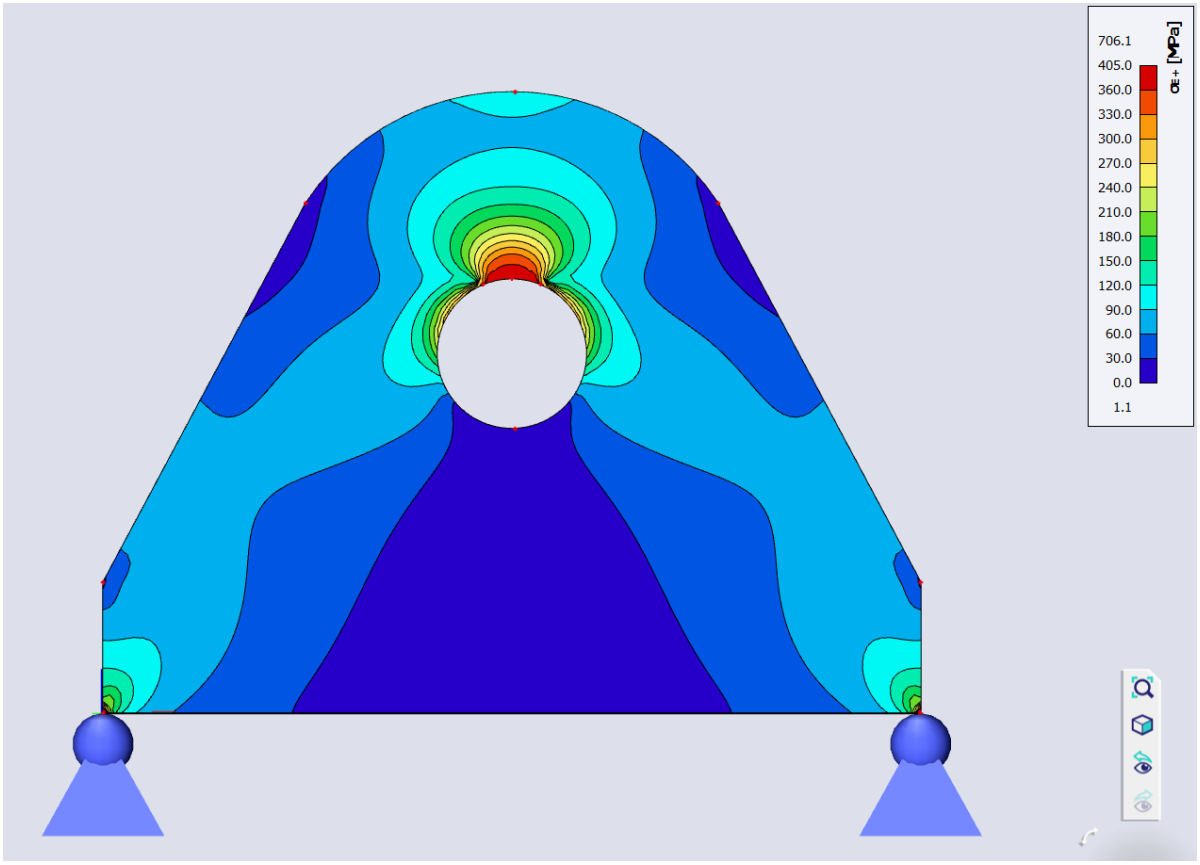
Figuur 13: Ingezoomde weergave van totale hoofdrek niet-lineaire berekening BG-10 (SCIA- Engineer)



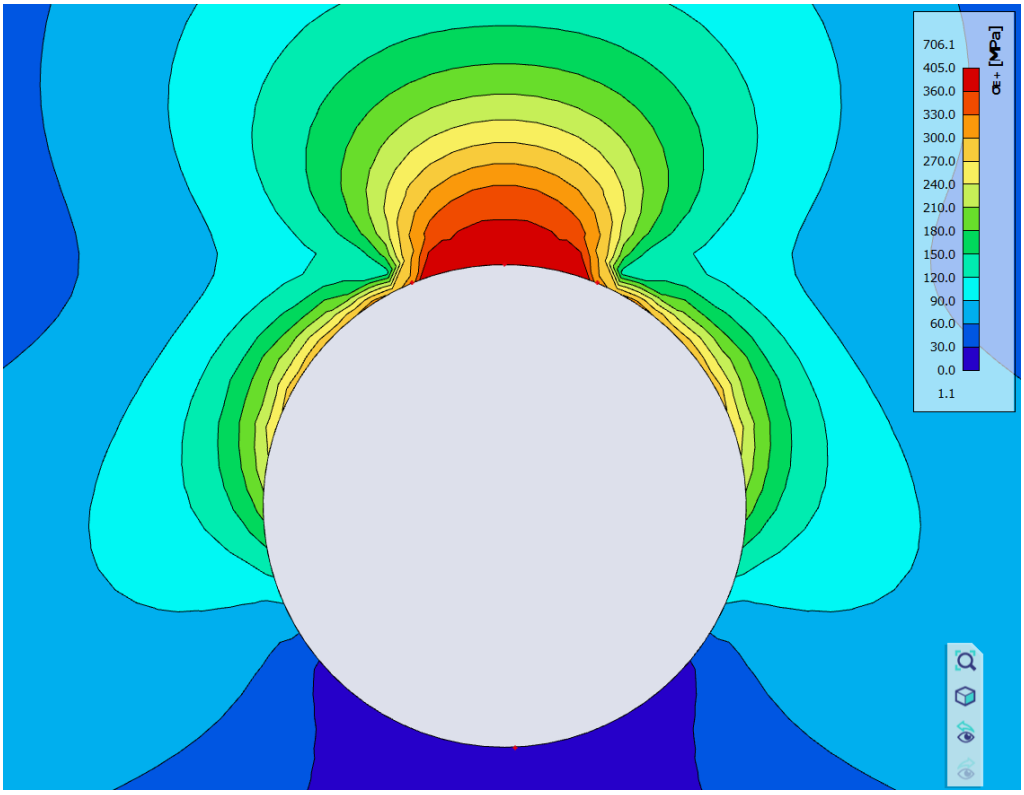
Figuur 18: Niet-lineaire spanningsverdeling BG-10 (SCIA- Engineer)



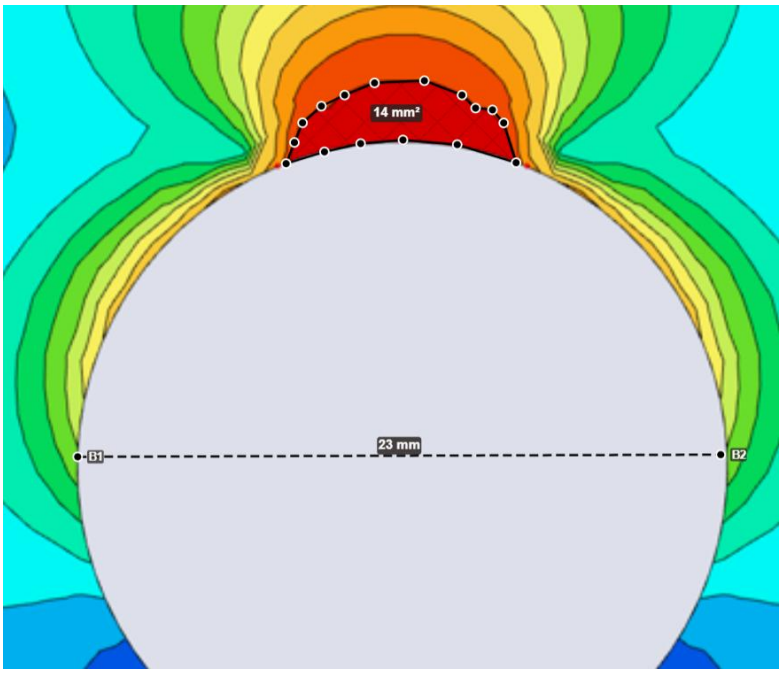
Figuur 14: Ingezoomde weergave van niet-lineaire spanningsverdeling BG-10 (SCIA-Engineer)



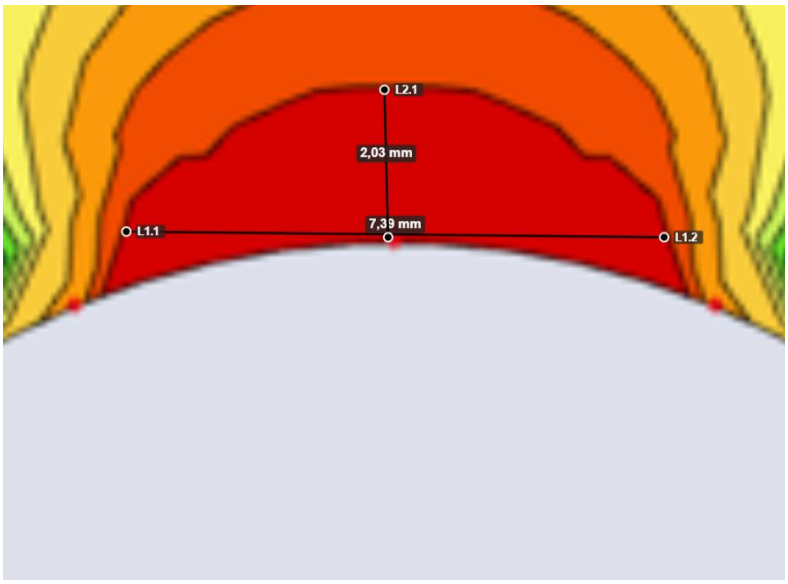
Figuur 5: Lineaire spanningsberekening BG-10 (SCIA- Engineer)



Figuur 21: Ingezoomde weergave lineaire spanningsberekening BG-10 (SCIA- Engineer)



Figuur 22: Bepalen oppervlakte dat de vloeigrens overschrijdt in lineaire berekening BG-10 (img meter , 2026)(SCIA-Engineer)



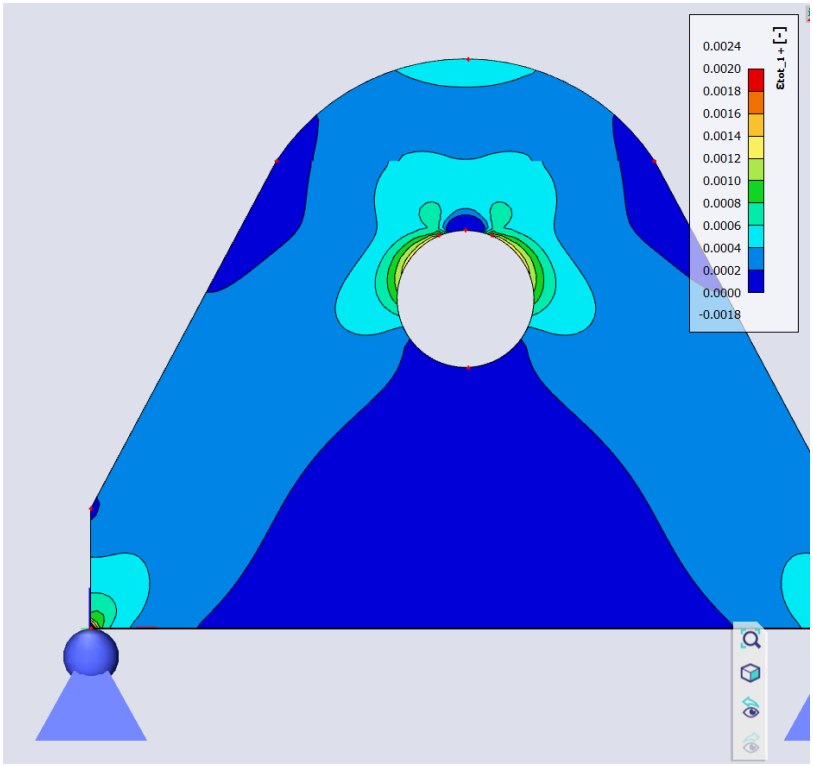
Figuur 23: Bepalen hoogte en breedte van gebied dat de vloeigrens overschrijdt in lineaire berekening BG-11 (img meter , 2026)(SCIA-Engineer)

Parameter	Waarde
Oppervlakte	14.0 mm^2
Breedte	7.39 mm
Hoogte	2.03 mm

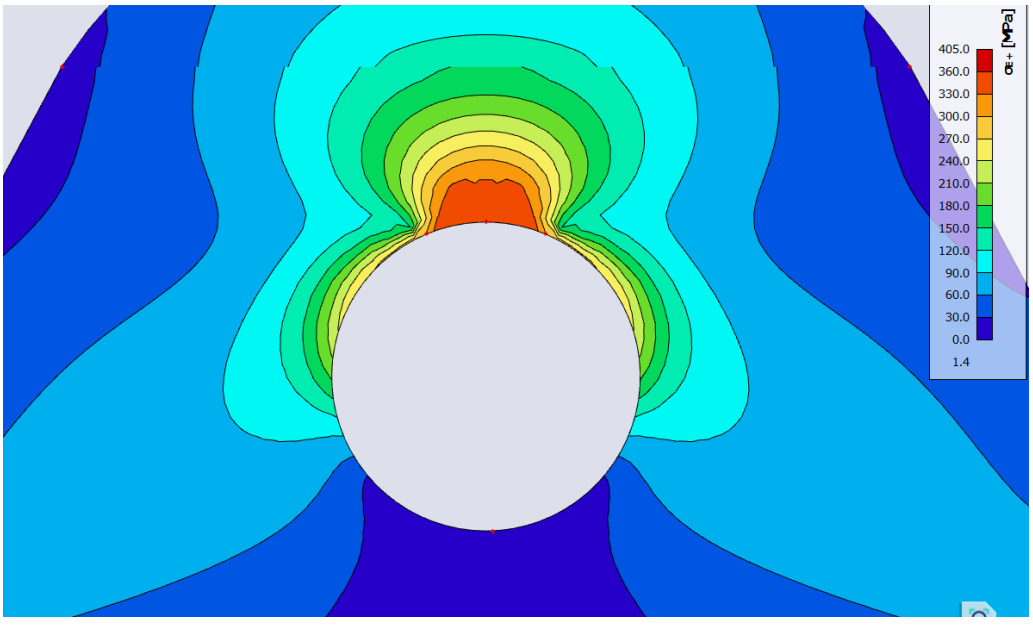
Tabel 3: Oppervlakte, lengte en breedte parameters van het gebied in de lineaire analyse met spanningen hoger dan de vloeispanning.

4.2 BG-11

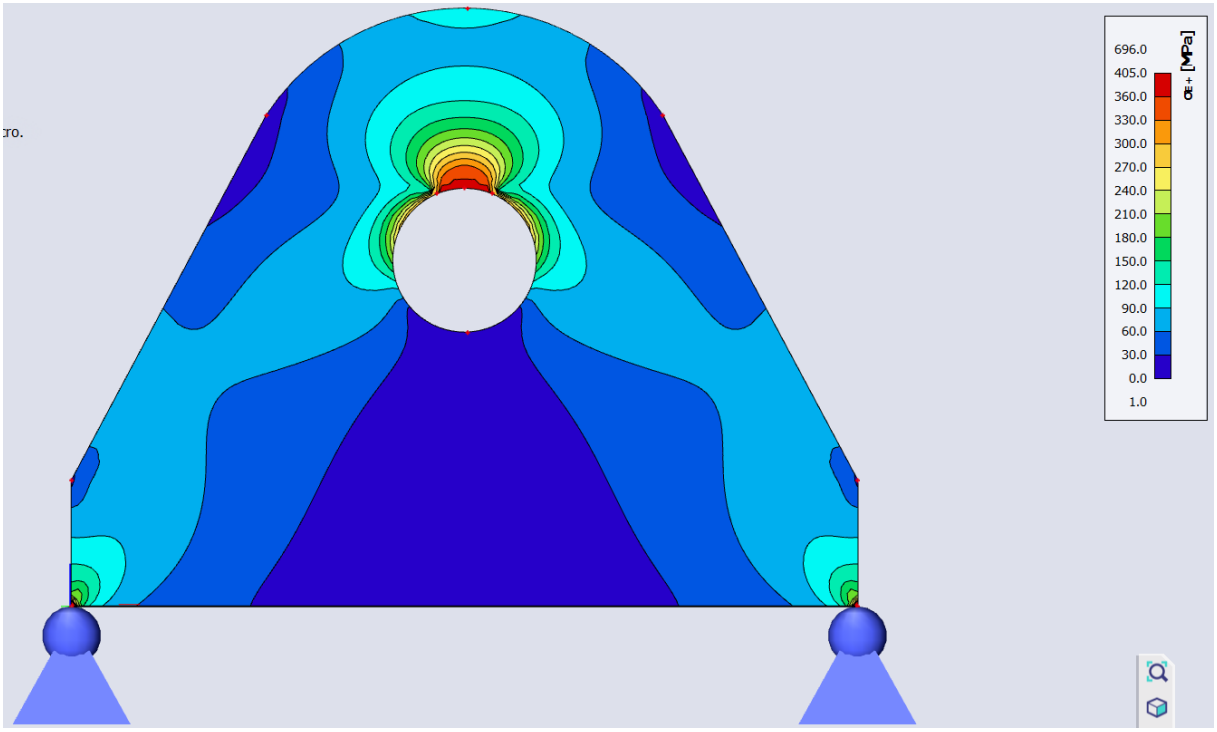
In deze paragraaf worden de resultaten van belasting geval 10 weergegeven evenals de grootte van het hypothetische vloeigebied.



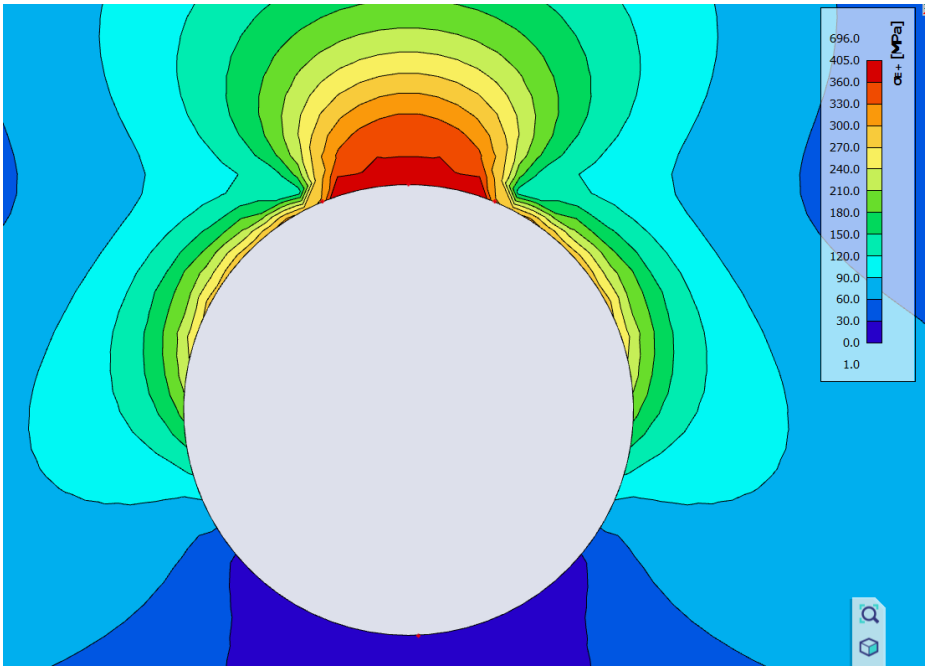
Figuur 24: Totale hoofdrek niet-lineaire berekening BG-11 (SCIA-Engineer)



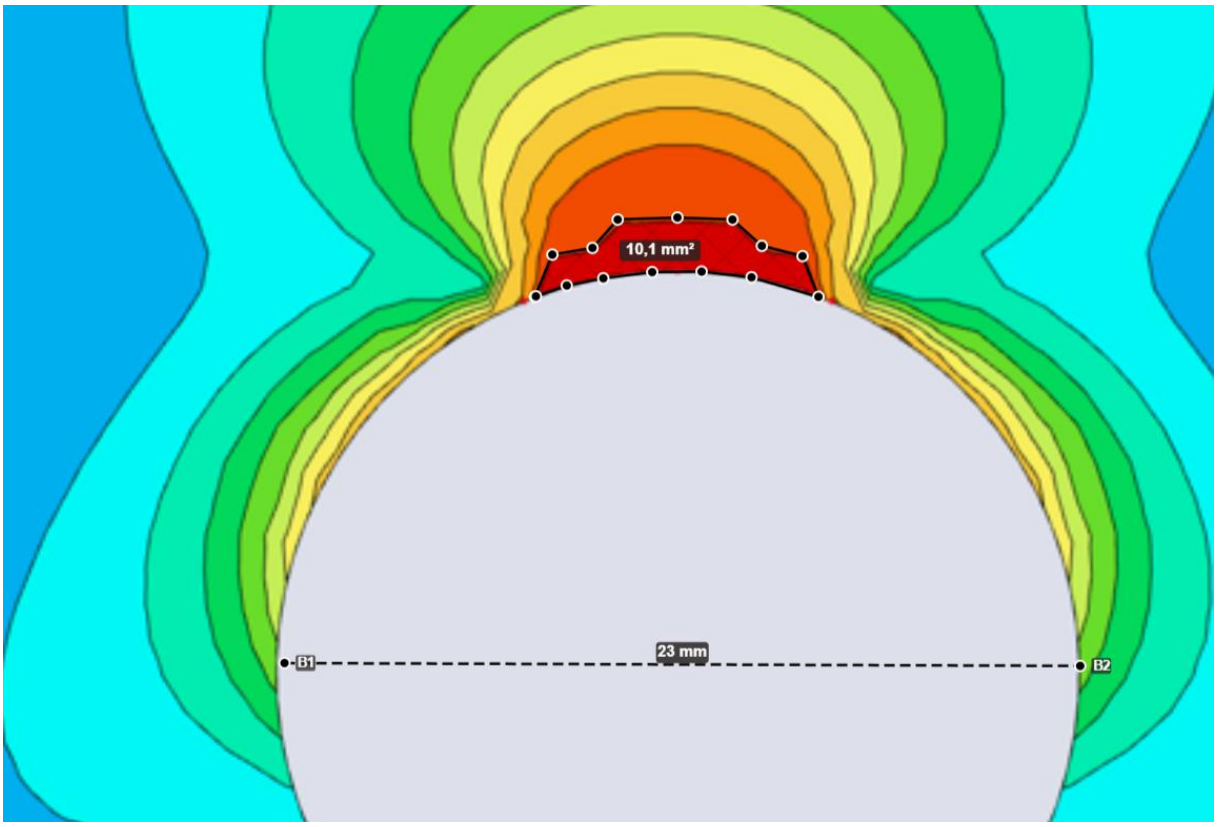
Figuur 25: Niet-lineaire spanningsberekening BG-11 (SCIA-Engineer)



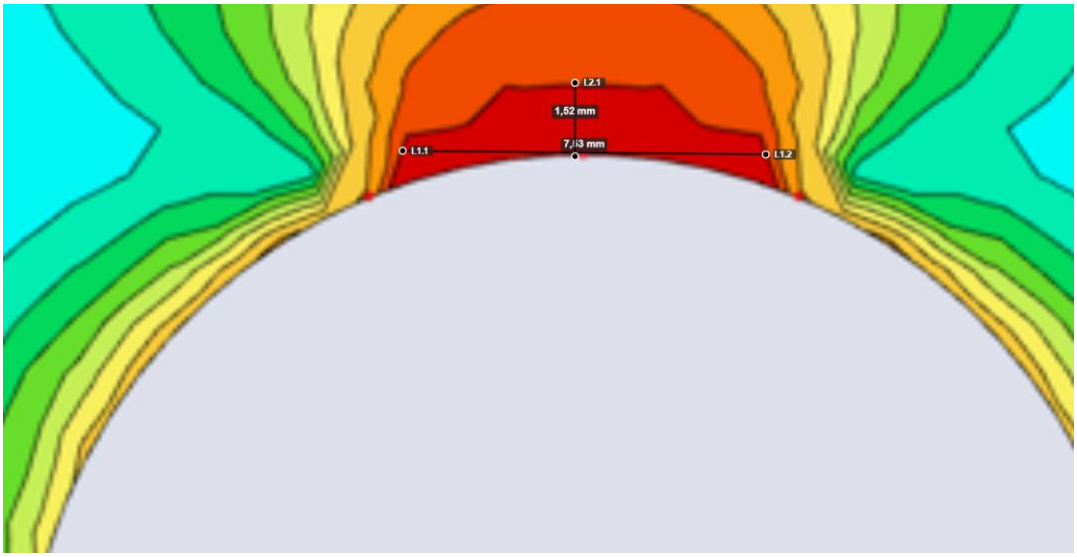
Figuur 26: Lineaire spanningsberekening BG-11(SCIA- Engineer)



Figuur 27: Ingezoomde weergave lineaire spanningsberekening BG-11 (SCIA- Engineer)



Figuur 28: Bepalen oppervlakte dat de vloeigrens overschrijdt in lineaire berekening BG-11 (img meter , 2026)(SCIA-Engineer)



Figuur 29: Bepalen hoogte en breedte van gebied dat de vloeigrens overschrijdt in lineaire berekening BG-11 (img meter , 2026)(SCIA-Engineer)

Parameter	Waarde
Oppervlakte	10.1 mm^2
Breedte	7.53 mm
Hoogte	1.52 mm

Tabel 1: Oppervlakte, lengte en breedte parameters van het gebied in de lineaire analyse met spanningen hoger dan de vloeispanning

(14) Wordt in drie gevallen bekeken: De situatie waarin er voor het eerst vloei optreedt, de situatie waarin breuk optreedt en de situatie waarbij er nog net geen breuk plaatsvindt. Hierbij horen de trekkrachten 81.29 kN , 94.84 kN en 93.48kN respectievelijk. Deze krachten worden voor RSF ingevuld in (14). Dit levert een spanning van 370 $\mathrm{N/mm^2}$ voor BG-2, een spanning van 400 $\mathrm{N/mm^2}$ voor BG-10 en een spanning van 397.52 $\mathrm{N/mm^2}$ voor BG-11. U.C leveren waardes van 1.06, 1.12 en 1.13 respectievelijk.

Dit is vermeld in de volgende tabel:

Belasting geval	Kracht in kN	Handberekening vergelijking (14) in $\mathrm{N/mm^2}$	Unity check -	Hypothetische vloeigebied in $\mathrm{mm^2}$	% van het Totale oppervlakte (= 8600 $\mathrm{mm^2}$)
BG-2	81.29	370.70	1.06	0 .1	0.0012 %
BG-10	94.84	400.40	1.13	14.0	0.16 %
BG-11	93.48	397.52	1.12	10.1	0.12 %

Tabel 2: Resultaten

5. Discussie

Allereerst is voor het contactoppervlakte regel (8) aangenomen. Deze vergelijking rust op het feit dat de bout met 1/8 deel van de omtrek van het gat in de oogplaat contact maakt. Dit is slechts een aanname en het is onzeker of de bout gegeven de krachten in BG-10 en BG-11 ook dit contactoppervlakte maakt. Bovendien varieert de contactoppervlakte met de belasting mee en daar is in dit bachelor eindwerk geen rekening mee gehouden.

Ten tweede heeft de keuze van het net ook invloed op de spanningsverdeling en daarmee ook op de verkregen resultaten. Bij een ander gekozen net-verfijning kunnen er wellicht andere waardes verkregen worden voor het hypothetische vloeigebied.

Ten derde zijn andere niet-lineaire verschijnselen buiten beschouwing gelaten. Niet-geometrische lineaire bijvoorbeeld. Oogplaat en bout vervormingen hebben invloed op de spanningsverdeling en kunnen hierin verandering te weeg brengen in het gevonden gebied in de lineaire analyse waarin de vloeigrens wordt overschreden.

6. Conclusie

Kan je door middel van een lineaire analyse voorspellen of een oogplaat in een niet-lineaire analyse een kritieke toestand bereikt?

Ja, je kunt door middel van een lineaire analyse voorspellen of een oogplaat in de niet-lineaire analyse bezwijkt. Uit de iteraties en resultaten blijkt dat er bij een hypothetisch vloeigebied van 10.1 mm^2 nog geen sprake is van breuk. Zodra het hypothetische vloeigebied verder groeit tot 14 mm^2, overschrijdt de totale hoofdrek de breukrek van 0.20 (20%). Dit duidt op scheurvorming en falen van de oogplaat. Wanneer er een hypothetisch vloeigebied groter dan 10,1 mm2 aanwezig is, is het noodzakelijk om een niet-lineaire berekening uit te voeren.

Hoe kan je met de hand controleren of een oogplaat een bepaalde trekkracht kan opnemen en wat zijn de eisen voor het ontwerpen van een oogplaat?

Met de hand kunnen ontwerpcriteria voor een oogplaat worden getest en kan er een snelle indicatie worden gemaakt of voor een bepaald bezwijkmechanisme de oogplaat faalt. Dit wordt gedaan door de oogplaat te controleren op afschuiven van het plaatmateriaal boven het gat en om de oogplaat te controleren of hij genoeg draagkracht kan leveren. Dit is gedemonstreerd met eerdere vergelijkingen in hoofdstuk 2.

Bij welke trekkracht treedt er breuk op in de niet-lineaire berekening en hoe groot is hierbij het gebied waarbij de vloeigrens wordt overschreden in de lineaire berekening?

Dit is gevonden in belasting geval 10(BG-10), de trekkracht had hier een grote van 94.8 kN en het hypothetische vloeigebied was 14 mm^2.

Wat zegt de uitkomst van een lineaire berekening over het wel of niet uitvoeren van een niet-lineaire berekening?

Wanneer er geen of nauwelijks een hypothetisch vloeigebied ontstaat in de lineaire berekening is het niet nodig een niet -lineaire berekening uit te voeren. Dit is logischerwijs te concluderen omdat geen hypothetisch vloeigebied betekent geen plastisch gedrag van staal en hierdoor zullen er weinig tot geen verschillen zijn tussen de lineaire en niet-lineaire berekening. Ontstaat er een hypothetisch vloeigebied tussen de 0 en de 10.1 mm^2 dan is het verstandig om plasticiteit mee te nemen in de berekening. Wanneer er een vloeigebied groter is dan 10.1 mm^2 dan is het noodzakelijk om plasticiteit mee te nemen in de berekening.

Wat zegt de uitkomst van een handberekening over de niet-lineaire berekening?

Wanneer de handberekeningen als indicatie worden gebruikt voor het detecteren van breuk dan kan worden gekeken naar de Unity Check. Als er sprake is van een Unity Check met een waarde groter dan 1.06 maar kleiner dan 1.12, dan betekent dit dat het verstandig is om een berekening te raadplegen waarin plasticiteit wordt meegenomen. Komt uit de U.C een waarde groter dan 1.12 dan is het noodzakelijk een plasticiteit berekening uit te voeren om veiligheid te waarborgen. Bovendien is hier te zien dat er een ingebouwde veiligheidsmarge zit in de handberekening.

Bibliografie

Abspoel, I. R. (2013). *Dictaat CTB2220 Beton- en Staalconstructies*. Delft: TU-delft.

De Jong Werktuigbouw. (2026, 9 24). *Lineaire of niet-lineaire sterkteberekening*. Opgehaald van Sterkteberekening: https://sterkteberekening.nl/lineaire-of-niet-lineaire-sterkteberekening/

Deugd, D. d. (2026). *Stress Concentrations: Impact Analysis on the Linear Elastic and Plastic Strain Relation When Adding Reinforcement to an Opening in a Steel Beam*. Delft: TU-Delft.

DNV. (2026, 22 09). Opgehaald van dnv: www.dnv.com

DNV GL. (2016, April). *2.7-3 Portable offshore units* . Opgehaald van Standard: https://rd-engineering.co/wp-content/uploads/2019/04/DNVGL-ST-E273APRIL2016.pdf

Engineering, S. (2016). *Standard Tata pad eyes*. Stemar Engineering.

Esubsea. (2026, 09 22). *Padeye and Lift Point Design*. Opgehaald van esubsea: https://www.esubsea.com/padeye-and-lift-point-design/

Femto Engineering. (2017, mei 22). *In FEA, what is linear and nonlinear analysis?* Opgehaald van femto: https://www.femto.eu/femto_story/linear-non-linear-analysis-explained/

img meter . (2026, 10 09). Opgehaald van app img meter : https://app.img-meter.com/?lang=nl

MeasureOnImage. (2026, 10 10). *MeasureOnImage*. Opgehaald van MeasureOnImage: https://measureonimage.com/nl/

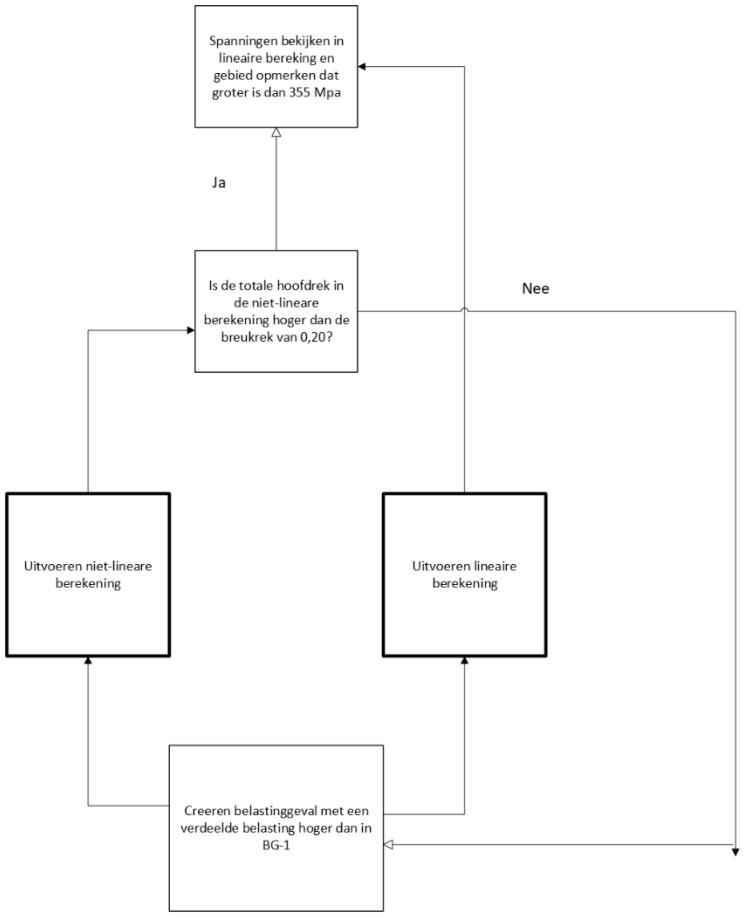
Russ, E. P. (1992). *PAD EYE DESIGN AND ANALYSIS* . New Orleans: University of New Orleans.

S355J2. (2026, 10 21). Opgehaald van mwasteel: https://mwasteel.nl/materialen/s355j2/

SCIA Engineer. (2026, 9 25). *Nonlineair calculation*. Opgehaald van SCIA Engineer: https://help.scia.net/20.0/en/kik/calculation/nonlinear_analysis/nonlinear_analysis.htm

TeamTheNavalArch. (2020, April 5). *Designing a pad-eye: little items with big intricacies*. Opgehaald van TheNavalArch: http://thenavalarch.com/designing-a-pad-eye-little-things-with-big-intricacies/

Bijlage



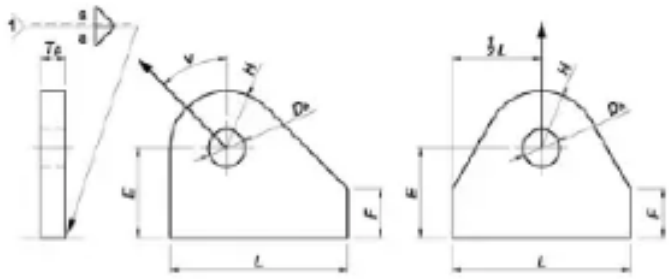
Bijlage 1: Iteratieproces (Visio)

Standard Tata Pad Eyes

In this sheet standard pad eye dimensions have been given for shackles for mounting or hoisting in an industrial environment. The dimensions have been verified in accordance with Tata standard ATVH: 2007 (Rötscher).

General design data

Codes :	ATVH 2007
Top angle slings :	45° and 30°
Shackle type :	Green-pin, polar
Material pad eyes :	S355J2
Load contingency :	+10%



Shackle and pad eye dimensions

Choose shackle size and applicable pad eye dimensions based on number of slings and Working Load Limit (WLL).

WLL	[mtons]			Shackle	Dh	H	F	E	L	Tp	aweld
4-slings		2-slings									
at 45°		at 45°									cat. 1
from	to	from	to	[mtons]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
-	1.4	-	0.7	**0.5**	9	15	10	25	50	8	4
1.4	2.1	0.7	1.0	**0.75**	11	20	10	30	65	8	4
2.1	2.8	1.0	1.4	**1**	12	25	10	35	80	10	4
2.8	4.2	1.4	2.1	**1.5**	14	25	10	35	80	12	4
4.2	5.6	2.1	2.8	**2**	17	30	15	45	100	15	4
5.6	9.1	2.8	4.5	**3.25**	20	35	15	50	110	20	4
9.1	13.4	4.5	6.7	**4.75**	23	40	20	55	125	25	5
13.4	18.3	6.7	9.1	**6.5**	26	45	20	60	130	30	6
18.3	24.0	9.1	12.0	**8.5**	29	52	20	68	160	30	6
24.0	26.8	12.0	13.4	**9.5**	33	60	20	75	180	30	6
26.8	33.9	13.4	16.9	**12**	36	60	30	80	190	40	8
33.9	38.1	16.9	19.0	**13.5**	39	65	30	85	200	40	8
38.1	48.0	19.0	24.0	**17**	43	75	30	95	230	45	8

* Note: These pad eyes are generally too thin for the applicable shackles with regard to the filling grade, but this is considered to be acceptable for non-repetitive hoisting.

Bijlage 2: Standaard dimensies oogplaat (Engineering, 2016)