DIANA FEA BV

CONSULTING

DIANA FEA
CONSULTING
Vlamoven 34
6826 TN Arnhem
T +31 88 3426224

Head office
DIANA FEA BV
Thijsseweg 11
2629 JA DELFT
Netherlands

www.dianafea.com

T +31 88 3426 200

DIANA FEA rapport
2022-DIANA-R225602_V3

Brug 2484 niet lineaire analyse ligger en klemconstructie

Datum	16 augustus 2022
Auteur(s)	5.1,2,e
Aantal Pagina's	58
Aantal bijlagen	1.
Opdrachtgever	Ingenieursbureau Amsterdam
Project naam	Brug 2484 niet lineaire analyse ligger en klemconstructie
Project nummer	2022-DIANA-R225602_V3

Tabel 0.1: Revisie

	naam	Rev0	Rev1	Rev2	Rev3
datum		2006 2022	2206 2022	0507 2022	1608 2022
opsteller	Ir. 5.1,2,e	drs	drs	drs	drs
verificatie	Ir. 5.1,2,e	aap	aap	aap	aap
autorisatie	5.1,2,e	bsa	bsa	bsa	bsa

All rights reserved.
No part of this publication may be reproduced and/or published by print, photoprint, microfilm or any other means without the previous written consent of DIANA FEA B.V.

In case this report was drafted on instructions, the rights and obligations of contracting parties are subject to either the General Terms and Conditions for Commissions given to DIANA FEA BV, or the relevant agreement concluded between the contracting parties. Submitting the report for inspection to parties who have a direct interest is permitted.

© DIANA FEA B.V.

INHOUD

DIANA FEA rapport **1**

1 Inleiding **3**

2 Uitgangspunten **5**
2.1 Opdrachtgever 5
2.2 Opbouw constructie 5

3 Toetsing **8**
3.1 Toetsing constructie 8

4 Eindige Elementen Berekeningen **10**
4.1 Algemene informatie 10
4.2 Modellering en modelvalidatie 10
4.3 Analyse informatie 23
4.4 Resultaat validatie 26
4.5 Controle en checks 30
4.6 Eindige Elementen analysis input checklist (Baguley en Hose 1994) 43
4.7 Eindige Elementen analysis outputchecklist (Baguley en Hose 1994) 44

5 Conclusies **45**

Appendix

1 Inleiding

In opdracht van Ingenieursbureau Amsterdam heeft DIANA deze rapportage opgesteld. Brug 2484 is een bestaande betonnen brug met 1 overspanning bestaande uit 2 betonnen voorgespannen langsliggers met een tussenliggend betonnen rijdek t.b.v. busverkeer en aan weerszijden een fiets- resp. voetpad. Het westelijke landhoofd is een uitkragende betonconstructie; de voorgespannen randbalken van de uitkraging zijn op de einden voorzien van oplegnokken t.b.v. het ingehangen trogliggerdek.
Bij een recente inspectie van brug 2484, bouwjaar ca. 2005, is forse scheurvorming waargenomen in de zone van de oplegnokken op de uiteinden van de voorgespannen randbalken van het uitkragende westelijke landhoofd, onderdeel van de primaire draagconstructie.
Bij nadere beschouwing bleek de aanwezige verticale wapening ter plaatse onvoldoende om de gecombineerde krachtwerking tgv. langsvoorspanning en oplegkracht op de nokken met voldoende marge te kunnen opnemen en is besloten om de brug af te sluiten voor verkeer. Als herstelmaatregel is, na afweging van enkele opties, gekozen voor toepassing van een stalen klemconstructie aan de buitenzijde van beide langsliggers in de zone van de kritische oplegnokken, waarmee de randbalken ter plaatse van de einden verticaal worden voorgespannen en de nokken worden ondersteund. Voor deze klemconstructie is een DO-ontwerp opgesteld; er zijn inmiddels twee klemmen gebouwd.
Vanwege twijfel over de capaciteit van de bestaande constructie om de secundaire krachtwerking tgv. de klemkracht veilig te kunnen opnemen heeft OG besloten om een aanvullend onderzoek te laten uitvoeren op basis van een NL-EEM berekening van de eindzone van de randligger inclusief nokken.
Doel van de berekening is het aantonen van de constructieve veiligheid van de bestaande constructie inclusief de stalen klemmen conform de Eurocode, NEN8700 de Modelcode 2010 en de eisen gesteld door de Opdrachtgever onder de aanwezige belastingen: langsvoorspanning, klemkracht en oplegkracht op de nok. Daarbij heeft het onderzoek zich toegespitst op bezwijken (splijten of afscheuren) en minder op scheurwijdte en duurzaamheid. OG heeft reeds aangegeven dat scheuren (deels) geïnjecteerd zijn en dat nadere acties lopen.

Alle berekeningen voldoen aan state of the art normen en aanbevelingen voor de FEA (finite element analyses). Daarmee is veel interne toetsing van de modelkeuzen technisch afgedekt.

- COBc: “uitwerking indieningsvereisten EEM-berekeningen” d.d. april 2011.
- RWS: RTD1016-1:V2.2-2020 “RWS-Guidelines for nonlinear finite element analyses of concrete structures” jaar 2020 http://homepage.tudelft.nl/v5p05/.
- DIANA FEA : manual jaar 2022. Technische benchmark elementen en materiaal parameters https://dianafea.com/DIANA-manuals.
- NEN 8700-serie

De belangrijkste uitgangspunten die technisch daaruit zijn afgeleid zijn:

- Voldoende fijne mesh en altijd hogere orde bij voorkeur rechthoekige en/of brick-elementen.
- Sterkte en energie van de materialen (EC 2 en ter aanvulling de MC 2010).
- De berekening is in zijn geheel opgezet met grafische uitvoer om de toetsing en het overzicht van de belangrijkste uitkomsten eenduidiger en overzichtelijker te maken.
- Pons en dwarskrachtcontroles worden impliciet mee gecontroleerd in de modellen. Uitgangspunt is een niet lineaire berekening volgens artikel 5.7 (EC2).



Figuur 1-1

2 Uitgangspunten

2.1 Opdrachtgever

Tabel 2.1: Beschikbare gegevens		
Doc. Code	**omschrijving**	**datum**
K127 (waptek-BRU2484_SN00156224_00001_1639991050.jpg)	Brug over 't Twiske Detailtekening Busbaan Wapening trog as 1/2 (aanzicht en details)	29-09-2003
K124 (waptek-BRU2484_TEK-SN00156241_00001_1639991133.jpg)	Brug over 't Twiske Detailtekening Busbaan Wapening landhoofd as 1 (doorsneden en details)	30-09-2003
BRU2484_SN00156233_00001_1639991130 K123 wap.jpg [1]	Detailtekening wapening	30-09-2003
Brug 2484 – Versterking door klemconstructie – Bijlage beton pagina 33	Oplegreacties vanuit trogliggerdek op nok LH West	08-06-2022
5.1,2,e 2484	Bijlage beton bij ontwerp klemconstructie	23-05-2022
cracks1.png	Schadebeeld	01-06-2022
cracks2.png	Schadebeeld	01-06-2022
[1] Deze is te laat aangeleverd om volledig mee te nemen (met name de wapening bovenzijde balk aan de zijde van de inklemming)		

2.2 Opbouw constructie

Tabel 2.2: Voorspanning	
Aspect	**omschrijving**
Langsvoorspanning	2 × BBR Cona Multi SP, 22 × 150 mm^2
	$\sigma_{p;t=0}$ = 1250 N/mm^2 en $\sigma_{p;t=\infty}$ = 1144 N/mm^2
	Ankerplaat 370 × 370 mm
	Afstanden ankers tot bovenvlak: 310 resp. 710 mm
	Afstand hart ankers tot zijvlak buiten: 350 mm
	Spiraalwapening 8; afmetingen trompet Ø 190 × 600 mm; staafdiameter 20mm
	Retentie lengte 5mm voor linker zijde – Rechter zijde blinde anker geen slip
Dwarsvoorspanning	3 × BBR Cona Multi, 7 × 150 mm^2
	Ankerplaat 175 × 175 mm
	Naspanwaarde 3 × 945 kN

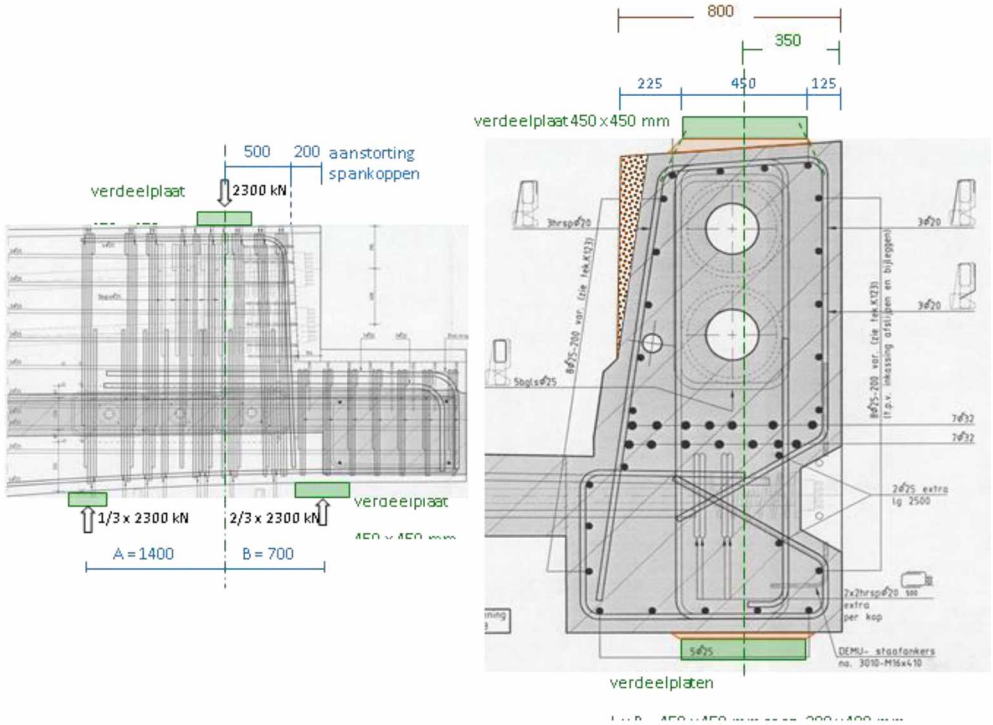
Tabel 2.3: Belastingoppervlakken	
Constructieonderdeel	**omschrijving**
Oplegblok	400 × 350 mm
Bovenzijde	450 × 450 mm
Onderzijde langsligger t.p.v. nok	450 × 450 mm
Onderzijde langsligger	400 × 280 mm

Tabel 2.4: Belastingen en factoren	
Constructieonderdeel	**omschrijving**
R_{EG+RB}	1219 kN; Belasting factor 1.1 (afkeur)
Klem-a	*Aanbrengen klemconstructie na deze fase 0.9*
Klem-b	*Aanbrengen klemconstructie na deze fase 1.2*
$R_{d:1858-a}$	1858 kN; Belasting factor 1.2 (verbouw)
$R_{d:1858-b}$	1858 kN; Belasting factor 1.2 (verbouw)

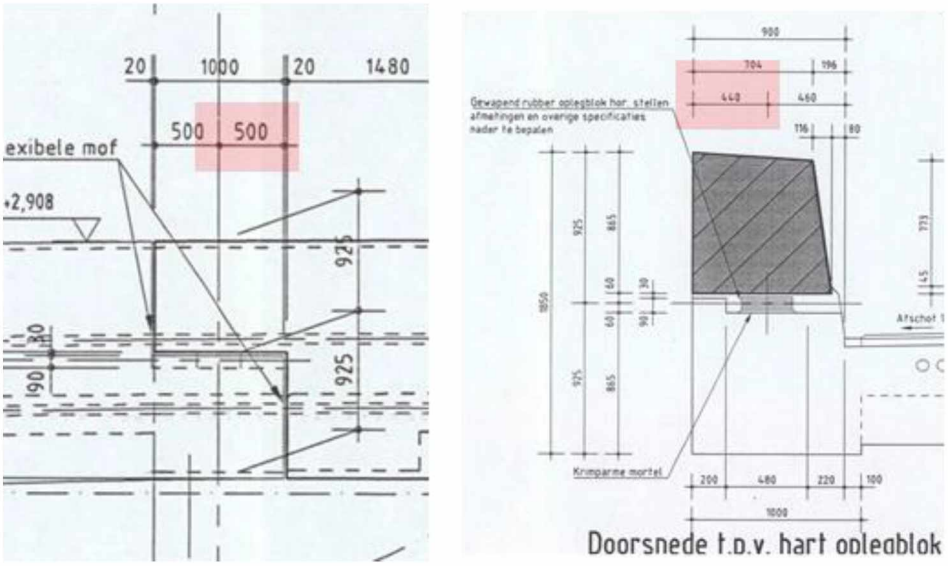
R_{EG+RB}) brug volledig afgesloten voor gebruik, alleen tbv. vrijgeven onderliggende watergang voor passeren pleziervaart:
SLS permanent => Rz = 1108 kN
ULS 6.10a – Afkeur: permanent => Rz; = 1219 kN

$R_{d:1858-a}$) gebruik als bus-/fiets-/voetgangersbrug (≡ huidige situatie met lastbeperking 20 ton op busbaan):
Voorspanning belastingfactor 1.2
SLS permanent => Rz = 1108 kN
Klemconstructie belastingfactor **0.9** * 2300 kN
SLS Kar: permanent + bus/fiets-/voetpad belasting => Rz = 1543 kN
ULS 6.10a – Verbouw: permanent + bus/fiets-/voetpad => Rz; = 1858 kN

$R_{d:1858-b}$) gebruik als bus-/fiets-/voetgangersbrug (≡ huidige situatie met lastbeperking 20 ton op busbaan):
Voorspanning belastingfactor 1.2
SLS permanent => Rz = 1108 kN
Klemconstructie belastingfactor **1.2** * 2300 kN
SLS Kar: permanent + bus/fiets-/voetpad belasting => Rz = 1543 kN
ULS 6.10a – Verbouw: permanent + bus/fiets-/voetpad => Rz; = 1858 kN



Figuur 2-1 Positie klembelasting



Figuur 2-2 Positie nokbelasting

3 Toetsing

3.1 Toetsing constructie

In dit hoofdstuk wordt de samenvatting van de toetsing reeds beschreven. Dit geeft meteen een indruk van de belangrijke aspecten om bij het lezen van het rapport in gedachten te houden.

Voor de toetsing is het volgende belastingscenario aangenomen.

- Eigen gewicht, dwars- en langsvoorspanning tegelijk aangebracht
- De oplegdruk tot ULS eigengewicht en rustende belasting (1219 kN)
- Aanbrengen klemkracht (a: γ_{klem} = 0.9 en b: γ_{klem} = 1.2)
- Oplegdruk verhogen tot ULS waarde inclusief Busbelasting (1858 kN met a: γ_{klem} = 0.9 en b: γ_{klem} = 1.2)

Tabel 3.1: Resultaten toets tabel

		Alle toetsingswaarden betreft ULS							
Nr	**Belasting**	**U_{xyz}** [mm]	**Ecw1** [mm]	**σ_{wap}** [MPa]	**εxx-wap** [‰]	**σ_{fp}** [MPa]	**εxx-f_p** [‰]	**S3[0] (geen f_p)** [MPa]	**E3** [‰]
1	1219kN	14.5	2.81	389	Nvt	1490	-	-30.8	Nvt
2	Klem-a	12.9	1.79	154	Nvt	1489	-	-28.1	Nvt
3	Klem-b	12.3	1.49	113	Nvt	1489	-	-27.5	Nvt
4	Rd;1858-a	25.6	3.00	276	Nvt	1500	7.6	-30.7	Nvt
5	Rd;1858-b	24.9	2.59	206	Nvt	1500	7.6	-29.4	Nvt
	Toetswaarde	-[1]	-[2]	457[3]	25	1500	20	-36.7[4]	-3.5[5]

[0] Het gedeelte waar de voorspanning wordt aangebracht wordt niet meegenomen in deze controle

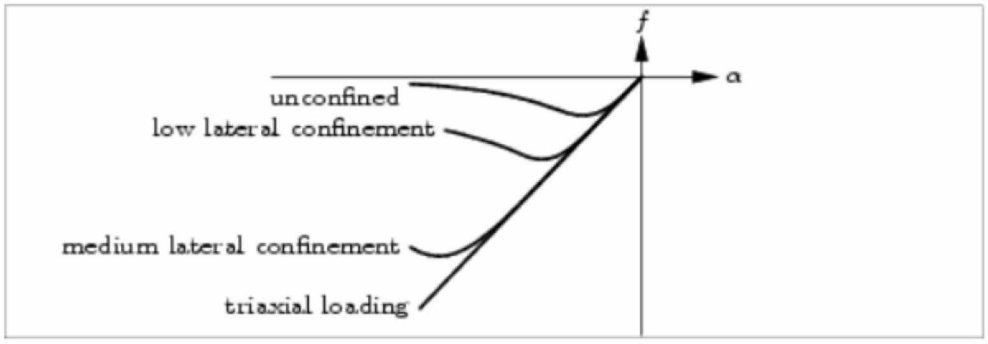
[1] absolute vervorming. Voor doorbuiging zie de appendix.

[2] scheurwijdte wordt hier niet getoetst, enkel ter extra informatie

[3] De wapening wordt eerst in het lineaire traject op spanning getoetst. Als in de berekening de waarde 435 MPa wordt gehaald gaat de wapening vloeien en volgt het 5% verstevigingstraject tot een maximale waarde van 457 MPa. De controle wordt vervolgens uitgevoerd op de maximale rek εxx-wap (<2.5% / <25‰).

[4] Voor de beton op druk geldt hetzelfde als bij de wapening. De maximale drukspanning (S3) in de hoofdrichting is maatgevend. Als deze hoofdspanning de 36.7 MPa overschrijdt treedt crushing op en zal de rek gecontroleerd moeten worden. De spanningen reduceren in DIANA automatisch met de toenemende rek.

[5] Confinement model



Figuur 3-1 Schematische weergave van het positieve effect op de drukcapaciteit van een meerassige spanningstoestand.

Voor een verdere uitvoercontrole verwijzen wij naar hoofdstuk 4 en de separate appendices:

- 220805_toetsing_Brug248[5.1,2,e]m_2.0.xlsx
- 220810_toetsing_Brug248[5.1,2,e]m_2.0.xlsx
- 220816_drs_R225602_V3_NL_Brug2484_Adam.docx
- 220816_drs_R225602_V3_NL_Brug2484_[5.1,2,e]m.pdf
- 20220802_DIANA_drs225602_Brug2484_ULS_app1_Input.pdf
- 20220802_DIANA_drs225602_Brug2484_ULS-app2_1219kN.pdf
- 20220802_DIANA_drs225602_Brug2484_ULS-app3_Klem-a.pdf
- 20220802_DIANA_drs225602_Brug2484_ULS-app4_Klem-b.pdf
- 20220802_DIANA_drs225602_Brug2484_ULS-app5_Rd1858-a.pdf
- 20220802_DIANA_drs225602_Brug2484_ULS-app6_Rd1858-b.pdf
- V3_modellen.zip

4 Eindige Elementen Berekeningen

4.1 Algemene informatie

4.1.1 Doelen van de Eindige Elementen berekeningen

Het doel van de eindige elementen berekening is:

- Het laten zien van de bestaande schade en situatie
- Het aantonen van de veiligheid tegen bezwijken onder de belastingen conform Tabel 2.4: Belastingen en factoren

Van de schade zijn slechts 2 foto's ontvangen. Er zijn geen verdere rapportages ontvangen.

4.1.2 Eindige Elementen berekeningen type

Met behulp van DIANA is een niet lineaire statische berekening uitgevoerd. Waarbij een volledig belastingscenario is geanalyseerd.

4.1.3 Eindige Elementen berekeningen software

Er is gebruik gemaakt van DIANA 10.5. Binnen de programmatuur wordt dagelijks een toets gedraaid van internationaal geaccepteerde benchmarks (www.dianafea.com). DIANA is zeer geschikt voor het uitvoeren van zeer complexe niet-lineaire analyses. DIANA is onder andere in staat alle materialen te beschrijven, geometrisch niet-lineariteiten mee te nemen, statisch/dynamisch te rekenen en/of zowel grond en constructie te combineren in één berekening.

4.2 Modellering en modelvalidatie

4.2.1 Eenheden

De gebruikte eenheden in de appendix betreffen het SI stelsel (N,m) voor de input van het model en de materialen. Uitvoer wordt gegeven in N en mm.
De belasting op het model wordt aangegeven in kN.

4.2.2 Materiaalmodellen en parameters

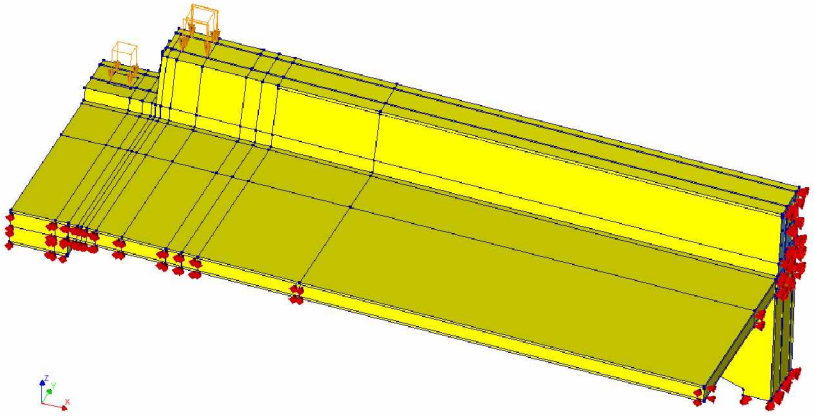
Voor het beton is een drukklasse opgegeven C55/67. Dit is door OG aangetoond met proeven op boormonsters). Deze is in eerste instantie als gemiddelde waarde aangenomen tot het model volledig goed was opgezet. Vervolgens is getracht met karakteristieke waarde de constructie door te rekenen. Uiteindelijk is ook gecontroleerd of de constructie voldoet met rekenwaarden.
Uiteindelijk bleek de betondruksterkte van groot belang voor de veiligheid van de constructie. De verdediging van een bepaalde betondruksterkte aanname zou verder onderzocht kunnen worden aan de hand van betonkernen.

Voor het staal is een rekenwaarde van de staalmaterialen aangenomen.

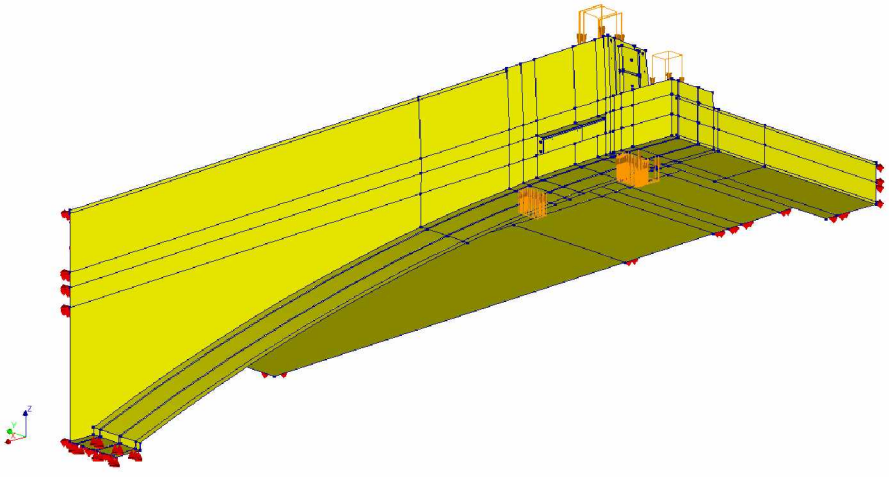
De materiaalmodellen en parameters zijn verder beschreven in de appendices.

4.2.3 Geometriebeschrijving, simplificaties en randvoorwaarden

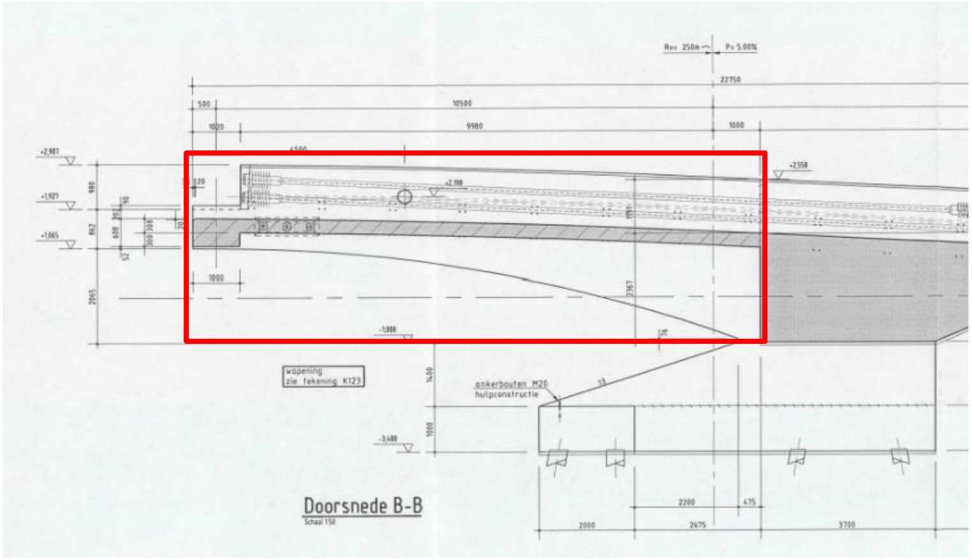
Het model bestaat uit een met volume elementen gemodelleerde brugligger. Bij de modellering is gebruik gemaakt van symmetrie voorwaarden. Dit is uiteraard niet de fysische realiteit maar is de meest economische manier om het model te beëindigen. De tandconstructie is ver genoeg gelegen om geen invloed daarvan te ondervinden. Met name de buigende momenten aan de bovenzijde van de balkconstructie zijn daardoor groter (conservatief) en de voorspankabels missen de blinde verankering. Dit laatste zal geen invloed hebben op het gedrag van de kabels nabij de tand.
De wapening is met bondslip beams (interface-veer) gemodelleerd en de voorspanplaten als werkelijke staalplaten. De laatste met een interface-veer verbonden met de beton.
De inkassing van de dwarsvoorspanning is als rechthoekig meegenomen in plaats van trapeziumvormig. Dit is om de (extruded) mesh van DIANA te verbeteren.
De locatie van de belastingsvlakken zijn overgenomen van Figuur 2-1 en Figuur 2-2.



Figuur 4-1 Overzicht beton geometrie en belasting locatie 1 (alles C55)

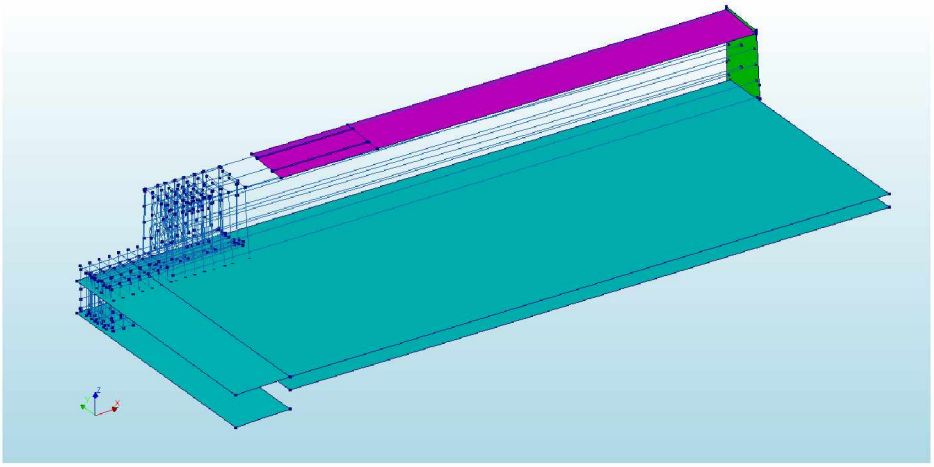


Figuur 4-2 Overzicht beton geometrie en belasting locatie 2 (alles C55)



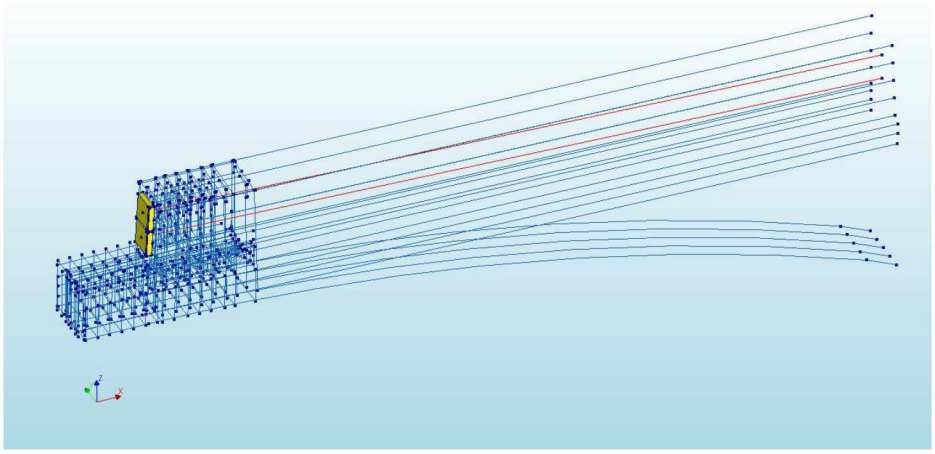
Figuur 4-3 Relatie DIANA model met aangeleverde tekening.

Input model met halve dekbreedte in -Y richting. Rechts van de rode rechthoek is een symmetrievoorwaarde aangebracht ter beëindiging van het model.

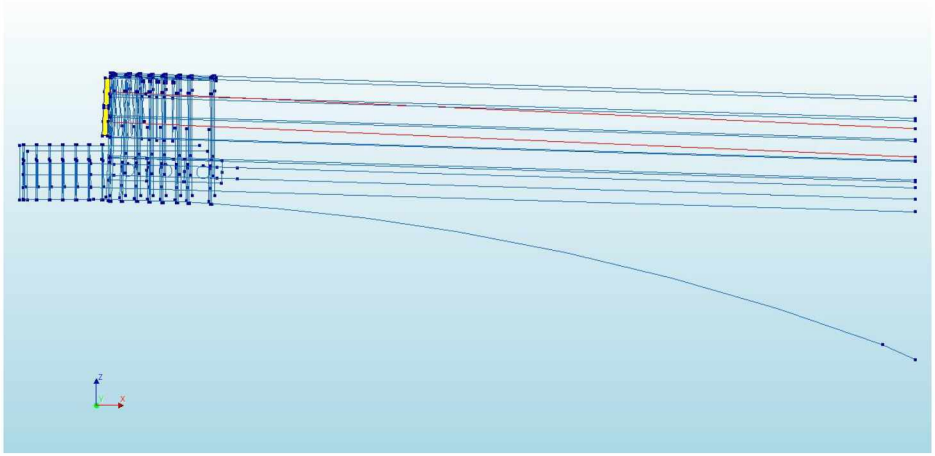


Figuur 4-4 Alle wapening

Gridwapening
Cyaan: wapening dek → X: Ø20-100 en Y: Ø25-100
Magenta: wapening bovenkant balk → X: 2xØ40-140 en Y: Ø20-200
Green: wapening einde balk → Ø25-200 (beide richtingen)

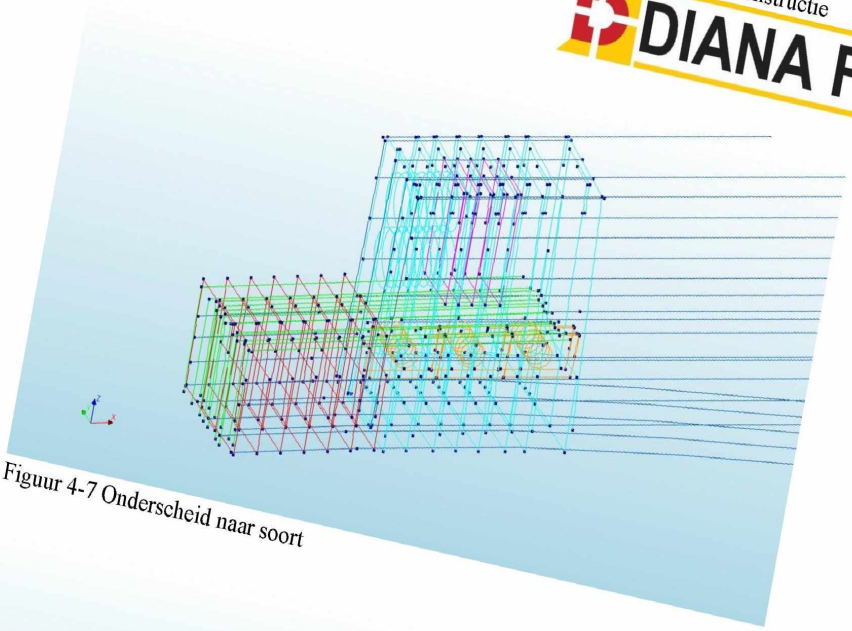


Figuur 4-5 Zonder de grids

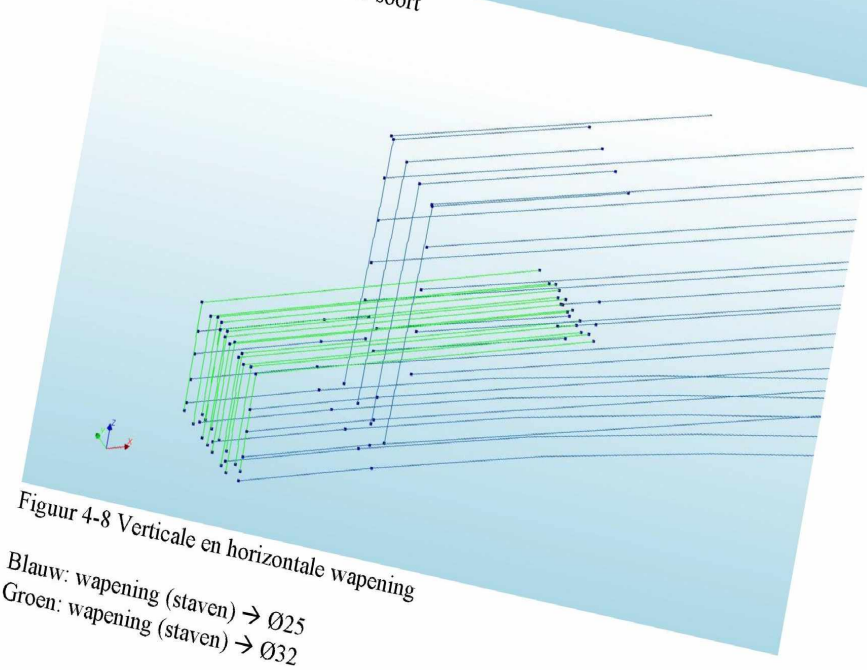


Figuur 4-6 View van de zijkant

Rood: voorspankabels (langsrichting) → A_{sl} = 3300 mm^2 (per kabel).
NB. Voorspankabels in de dwarsrichting zijn niet expliciet gemodelleerd. Drukkracht (945x3 kN) ter plaatse van ankerkop geplaatst.

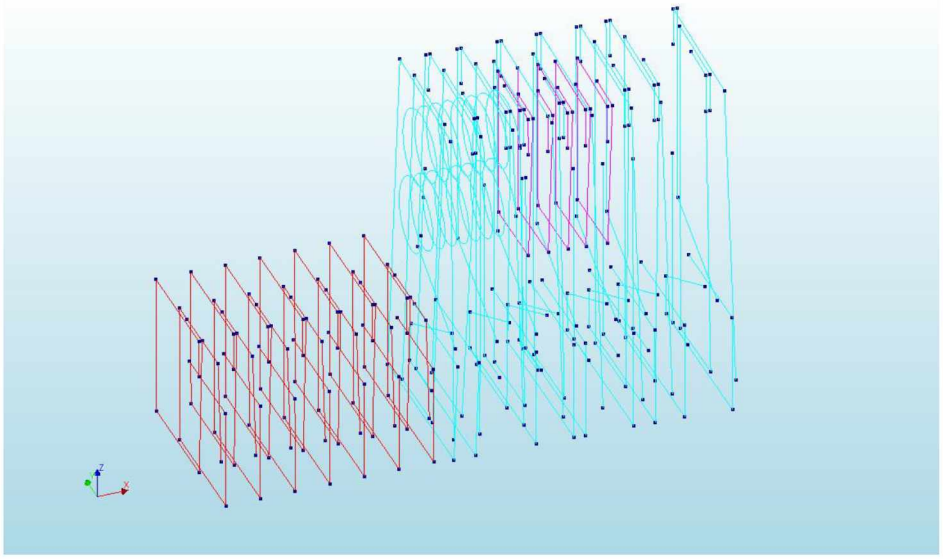


Figuur 4-7 Onderscheid naar soort



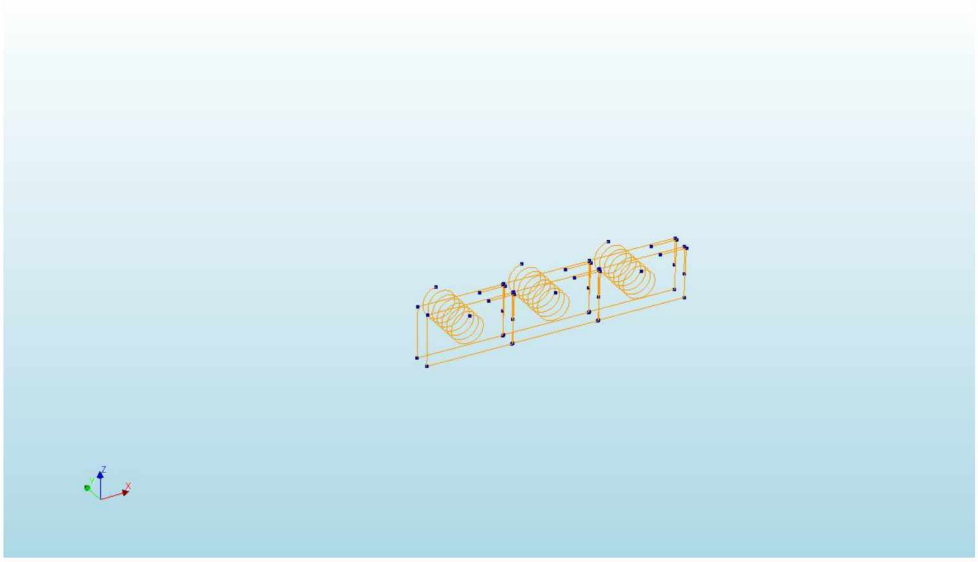
Figuur 4-8 Verticale en horizontale wapening

Blauw: wapening (staven) → Ø25
Groen: wapening (staven) → Ø32



Figuur 4-9 Beugels + spiraalwapening (langs)

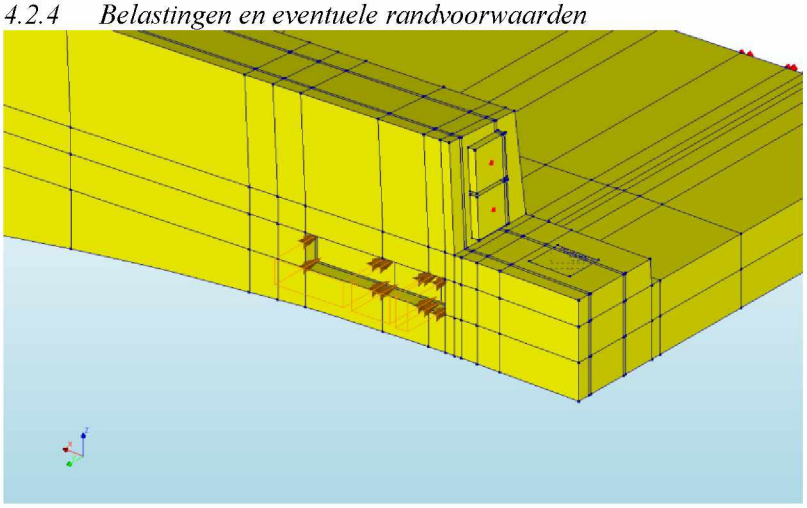
Rood: beugelwapening → Ø16
Cyaan: beugelwapening + spiraalwapening → Ø20
Magenta: beugelwapening → Ø25



Figuur 4-10 Beugels+spiraalwapening (dwars)

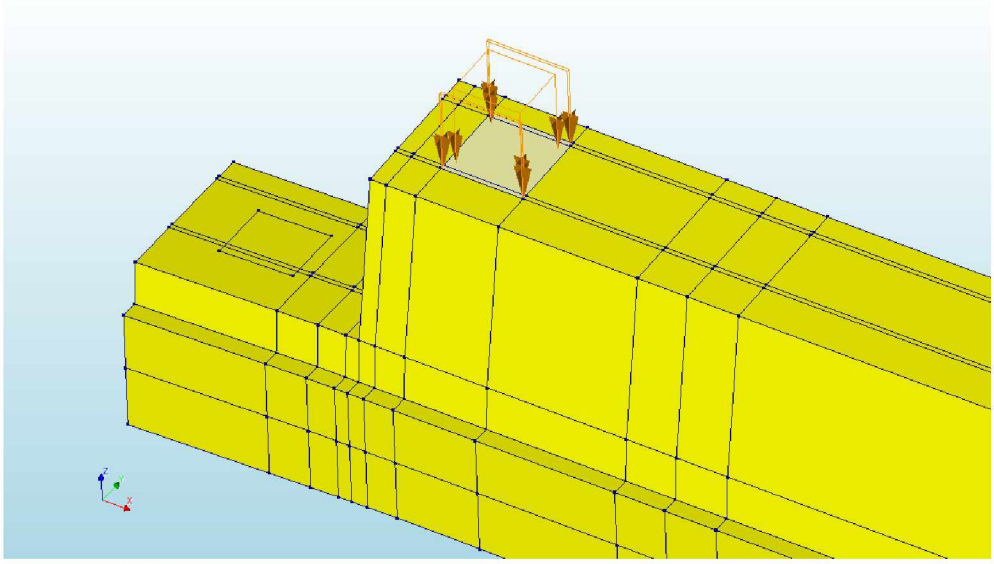
Rood: wapening → Ø12

4.2.4 Belastingen en eventuele randvoorwaarden



Figuur 4-11 Posities van de voorspanning

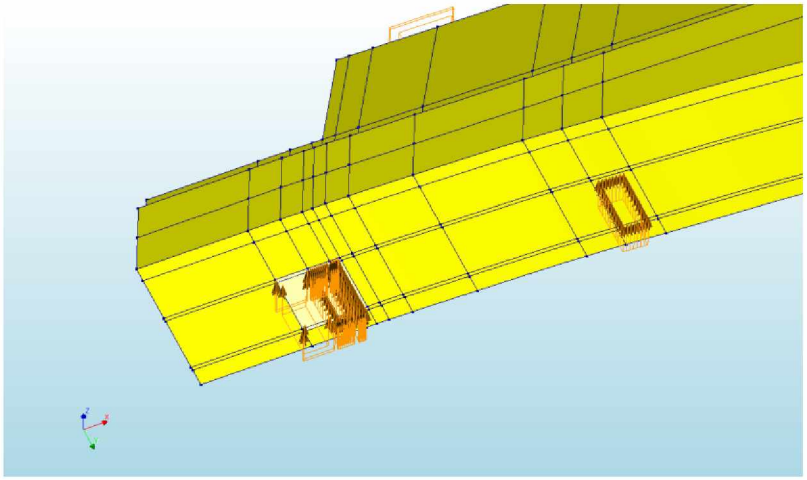
In Figuur 4-6 is de positie weergegeven van de langsvoorspanning. De langsvoorspanning wordt voorgespannen aan de kant van de voorplaten.
Voorspankracht = 4125 kN per kabel
Retentie lengte = 5 mm levert uiteindelijk een nominale Fp van 3800kN
Voorspankabels in de dwarsrichting zijn niet expliciet gemodelleerd. Drukkracht (945x3 kN) ter plaatse van ankerkoppen zijn als oppervlakte belasting gemodelleerd.
Oppervlakte = 0.3x1.375 m^2
Oppervlakte belasting = -6699.1 kN/m^2
Totale belasting = 2835 kN



Figuur 4-12 Posities van de klemkracht (bovenzijde).

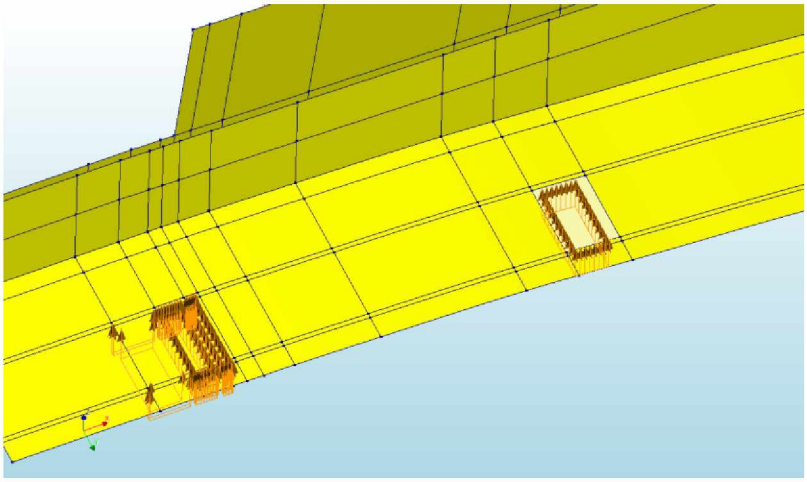
Oppervlakte = 0.45x0.45m^2
Oppervlakte belasting = 12345.7 kN/m^2
Totale belasting = 2500kN

*Klemkracht is 2300kN, echter t.g.v. temperatuurswisseling +/- 200kN (zie 5.1,2,e 2484)



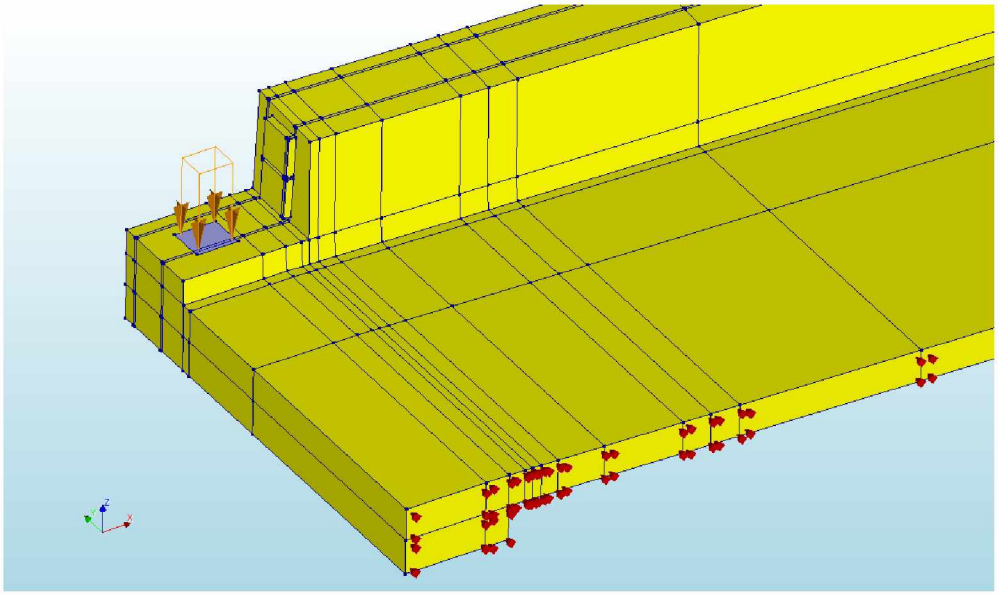
Figuur 4-13 Posities van de oplegbelasting (onderzijde).

Oppervlakte = 0.45x0.45m^2
Oppervlakte belasting = 8231.1 kN/m^2
Totale belasting = 1667 kN*
*2/3x2500kN



Figuur 4-14 Posities van de oplegbelasting (onderzijde)

Oppervlakte = 0.4x0.28m^2
Oppervlakte belasting = 7440 kN/m^2
Totale belasting = 833 kN*
*1/3x2500kN

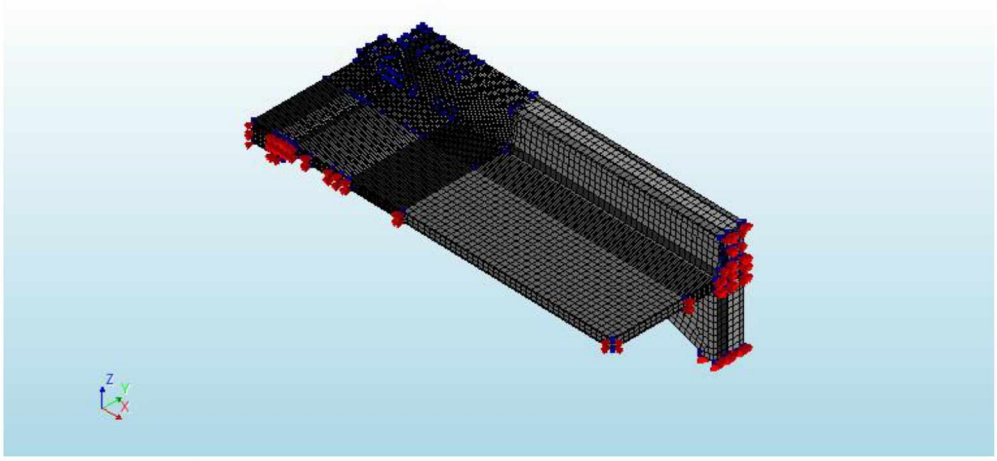


Figuur 4-15 Brugbelasting

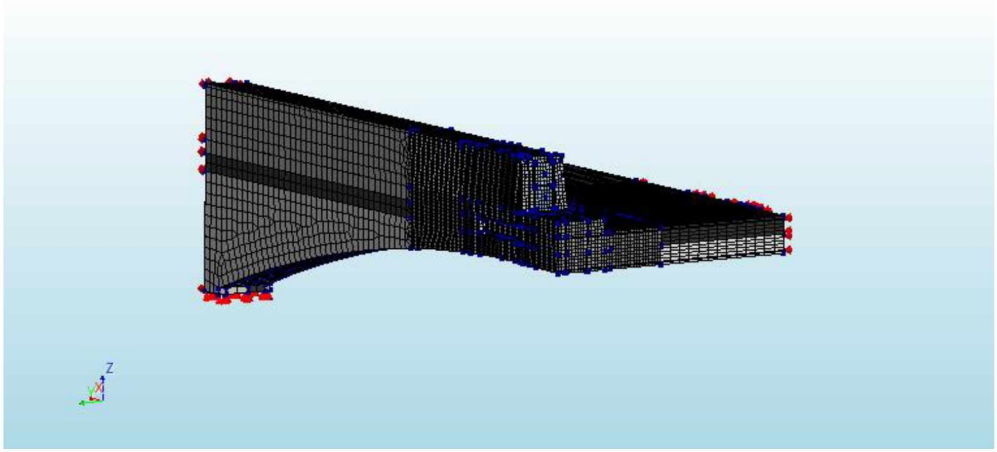
Belastingoppervlakte = 0.40x0.35 m2
Totale belasting = 1 kN*
*Dit is een unit belasting, in de analyse wordt een veelvoud van deze belasting aangebracht, resp. 1219 en 1858

4.2.5 Elementbeschrijving en integratieschema's

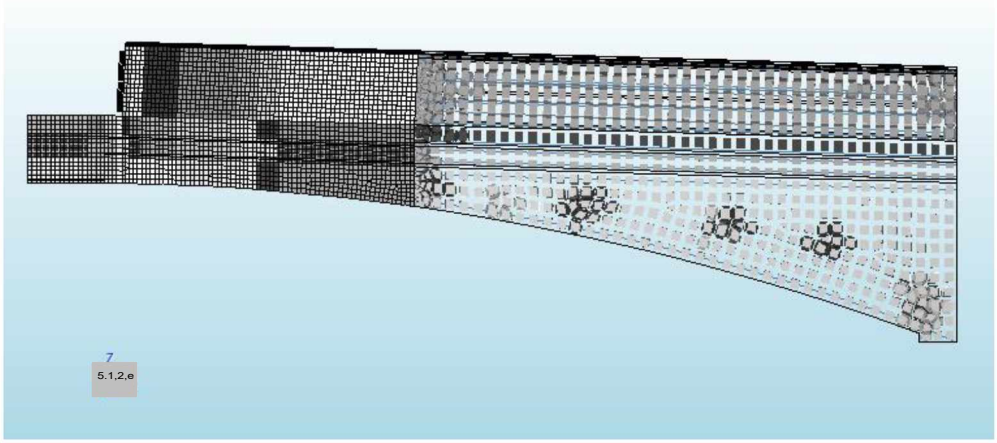
Er is gebruik gemaakt van hogere orde (quadratische) volume elementen. Bij voorkeur met CHX60 elementen (20 knoops-60 vrijheidsgraden). Deze hebben een 3*3*3 schema. Plaatselijk zijn afwijkende elementen gebruikt om de geometrie goed te kunnen volgen in de discretisatie.
Alle interfaces zijn compatibel met de aansluitende moeder elementen. Er is gebruik gemaakt van vlakinterfaces (ankerplaten) en lijninterfaces voor de wapeningstaven.



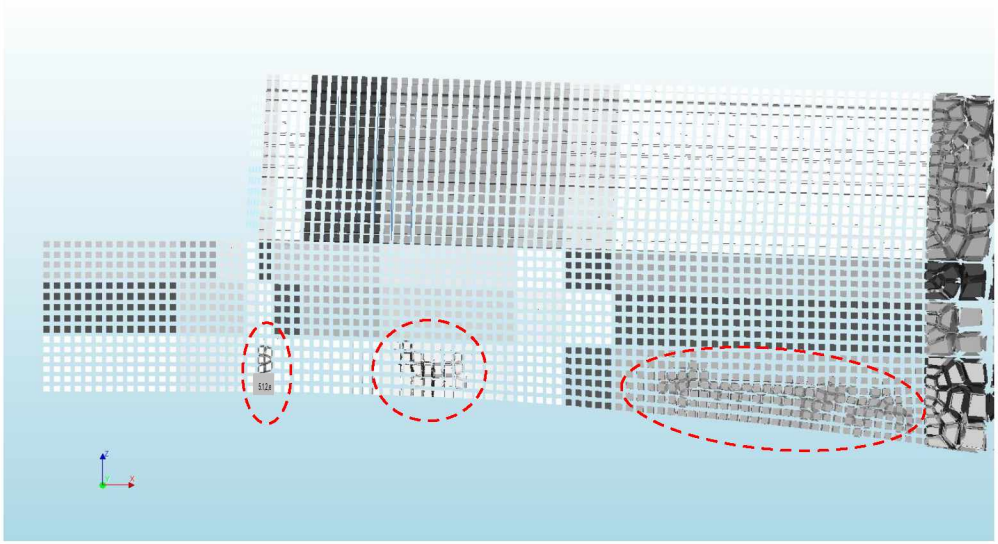
Figuur 4-16 Mesh1



Figuur 4-17 Mesh2



Figuur 4-18 Mesh3



Figuur 4-19 Mesh4

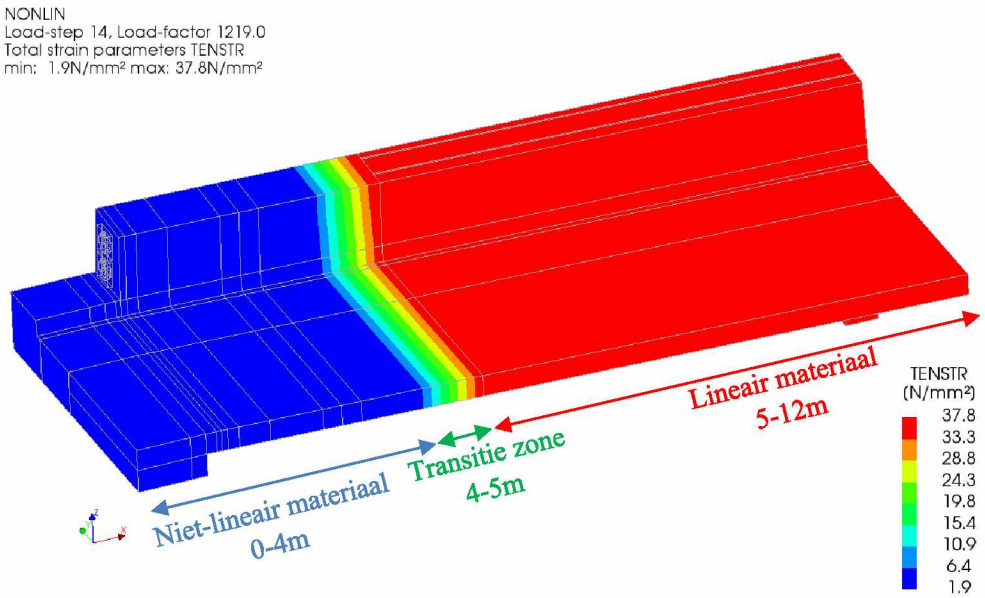
Veel aandacht is besteed aan het 'extruded' houden van de mesh nabij de focuslocatie van de tand. In deze focuslocatie zitten enkel bricks en prisma's. In Figuur 4-19 is duidelijk te zien dat enkel in de onderzijde van het fijn gemeshte gedeelte er ook een aantal piramides zitten (aangegeven met de rode gestippelde lijnen). Dit zijn er maar enkele en deze zitten bovendien niet in een trekzone (hier worden geen scheuren verwacht). Verder zitten deze niet ter plaatse van de klemkracht aan de onderzijde.
In het grover gemeshte deel zijn piramide vormen zichtbaar die prima zijn om het stijfheidsgedrag correct te beschrijven maar minder geschikt om de scheurvorming goed te beschrijven.
In onderstaande tabel is een overzicht gegeven van het aantal type elementen. Overigens bevindt ongeveer 80% van de piramides zich in het grof gemeshte gedeelte (537 piramides in de fijne mesh tegen 1814 piramides in de grove mesh).

Type	Vorm	Aantal	Knopen	Orde
CTE30	Tetrahedron	1452	10	2nd
CPY39	Piramide	2351	13	2nd
CTP45	Wedge	687	15	2nd
CHX60	Brick	63466	20	2nd

4.2.6 Aanvullende informatie

Lineair/niet-lineair materiaal

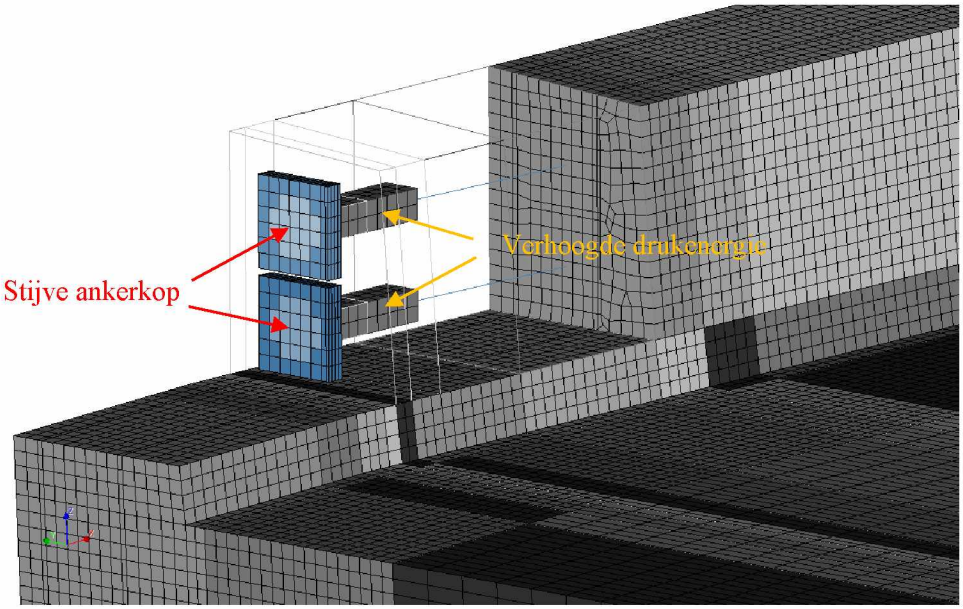
Om de convergentie te verbeteren is er voor gekozen het grof gemeshte gedeelte (Figuur 4-18) te modelleren met "lineair elastisch" materiaal. Dit gedeelte bevat veel slecht gevormde elementen, wat in combinatie met niet-lineair materiaal tot convergentie problemen zou kunnen leiden. Bovendien is dit gedeelte niet interessant voor de tandoplegging en de klemconstructie.
In bovenstaande paragraaf staat lineair elastisch tussen quotes, omdat in het model één niet-lineair materiaal is toegepast waaraan een functie gekoppeld zit, die de materiaaleigenschappen drastisch verhoogt wanneer het ver genoeg van de tandoplegging zit. Dit betekent dat wanneer de X-coordinaat groter is dan 4m de materiaaleigenschappen (treksterkte, druksterkte, breukenergie) worden verhoogd, waardoor het in feite lineair elastisch materiaal is.
De overgang is ver genoeg van de tand af gelegd (4 m) omdat de maatgevende scheur (vlak tussen ligger en plaat) daar al gestopt is (Figuur 4-35 tot Figuur 4-37).



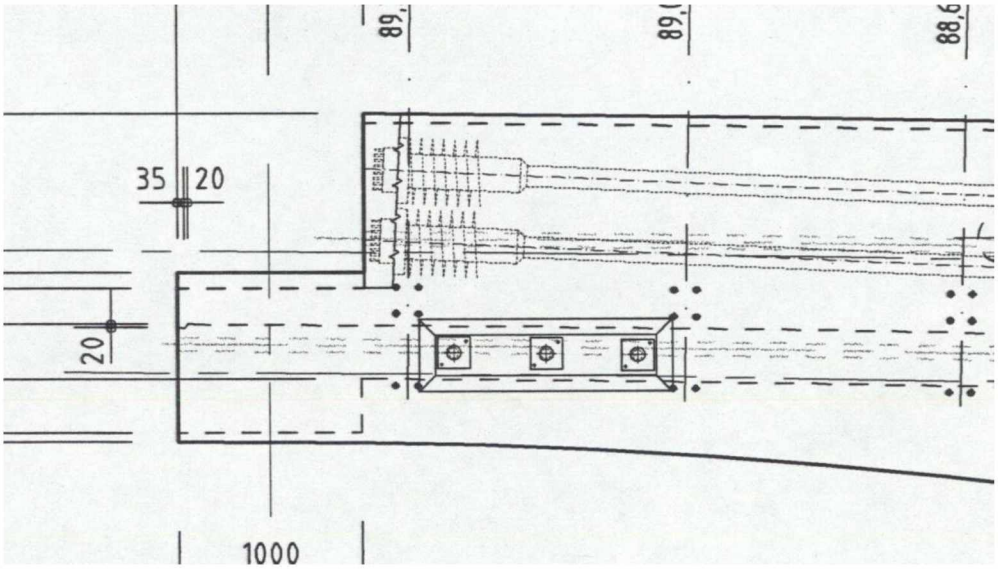
Figuur 4-20 Overgang niet lineair naar lineair gedrag

Langsvoorspanning

Om problemen te voorkomen met de hoge langsvoorspanning, is er nu voor gekozen om het middelste gedeelte (lichtblauwe elementen) van de voorspanplaten, volledig stijf te modelleren, omdat hier normaal een ankerkop op zit (zie Figuur 4-21 en Figuur 4-22). Hiervoor is ongeveer dezelfde oppervlakte als de ankerkop aangehouden. Hierdoor zal de "stijvere" ankerplaat zijn drukspanning beter kunnen verdelen over het beton.
Het gedeelte van het voorspananker wat door de spiraalwapening loopt, kan in feite ook niet bezwijken. Om dit mee te nemen, is dit gedeelte van het beton met een verhoogde breukenergie (in druk) gerekend.

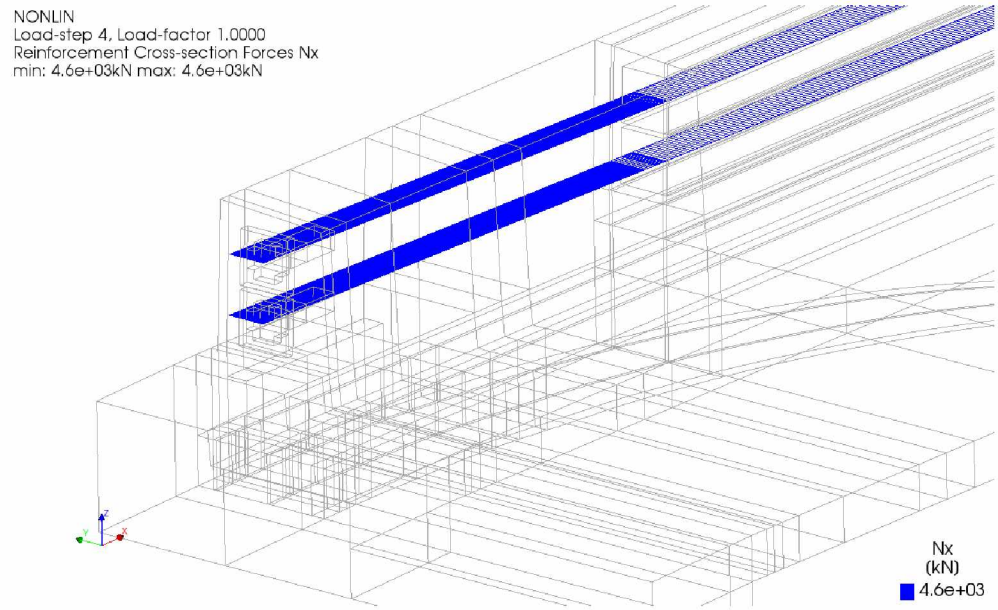


Figuur 4-21 Modellering voorspanning



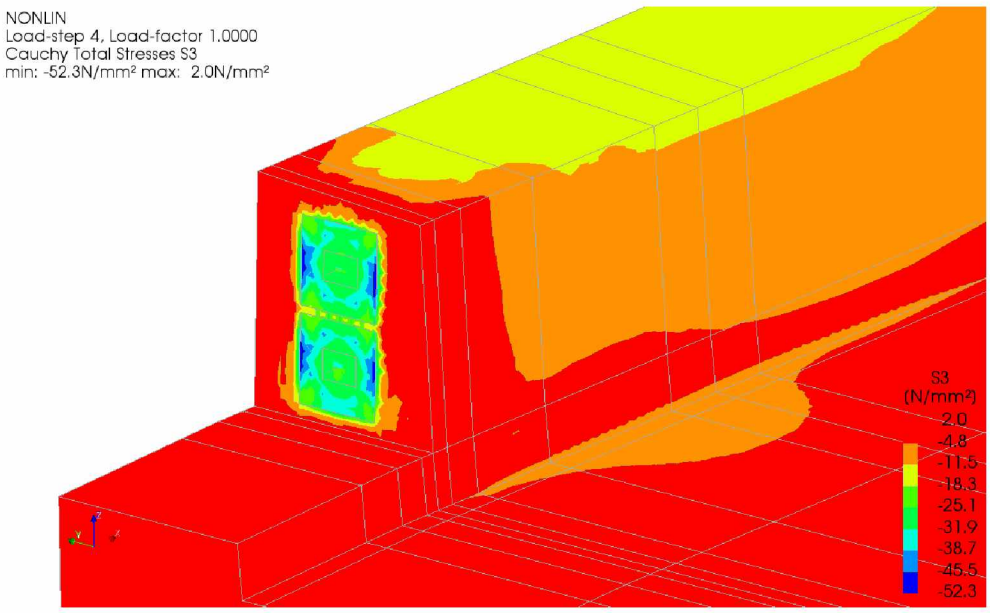
Figuur 4-22 Tekening voorspanning

Figuur 4-23 laat de aangebrachte voorspankracht zien in de kabel (1.2x3800=4600kN) constant verloop en Figuur 4-24 laat de drukverdeling over het beton zien ten gevolge van de voorspankracht.



Figuur 4-23 Toegepaste voorspanning (ongegrout)

Aangezien de wobblefactor en de wrijvingsfactor allebei 0 zijn (nagenoeg rechte kabel) zal er ongegrout een constante waarde zijn. Er komt daarin dan ook geen verschil na het grouten. Pas bij verdere toename van de belasting zal de kabel zich hechtend gedragen.



Figuur 4-24 Drukverdeling op beton vanuit de voorspanning

4.2.7 Beschrijving en resultaten modelvalidatie

Voor de modelvalidatie wordt verwezen Appendix A.
Verder wordt verwezen naar de website van DIANA en de genoemde RWS guideline. Er is geen invoerberekening van de hoofdconstructeur verkregen om het model te valideren.
De aanpak van de modellering is gevalideerd in :

- https://manuals.dianafea.com/d105/Verify/Verify.html (chapter III)
- Quantification of the resistance modeling uncertainty of 19 alternative 2D nonlinear finite element approaches benchmarked against 101 experiments on reinforced concrete beams

4.2.8 Beschrijving en resultaten materiaalvalidatie (1-elementstesten)

Voor de modelvalidatie wordt verwezen naar de website van DIANA en de genoemde RWS guideline.

4.3 Analyse informatie

Hier valt onder andere de volgende informatie onder.

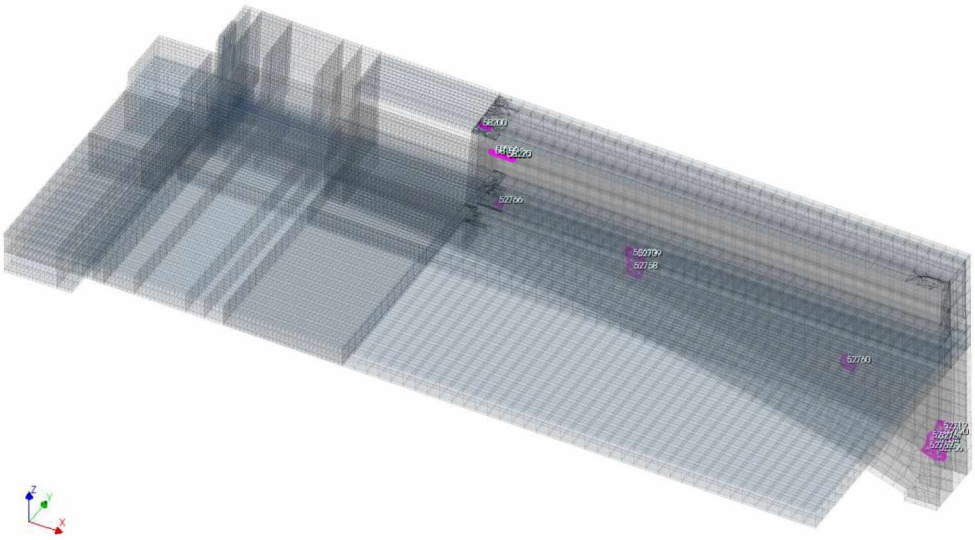
- Modelinformatie (type, aantal vrijheidsgraden)
- Belastingschema en fasering
- Rekentijd (indien relevant)
- Systeem matrix condities (grootste en kleinste diagonaalwaarden)
- Waarschuwingen en foutmeldingen (toelichting invloed)
- Convergentiegedrag
- Status informatie over scheuren, plasticiteit, etc.

DIANA geeft veel informatie weer in een .out ascii file. Hierbij globale uitleg. Op aanvraag kunnen verschillende .out files aangeleverd worden.

Outputfile written by 5.1,2,e 10.5 (Latest update: 2022-07-05)
/DIANA/AP/NL41 12:01:05 0.00-CPU 0.06-IO 14-FA BEGIN
SEVERITY : WARNING

ERROR CODE: /DIANA/LB/EL30/0094
ERRORMSG. 5.1.2.e *One of the angles between edges at node 243817 of element 46981 is less than 10 degrees or larger than 170 degrees.*
Bovenstaande waarschuwing betreft de piramide elementen die per definitie een scherpe 5.1.2.e hebben in de punt. Deze elementen liggen buiten het aandachtsgebied conform het st Venant principe (vrij vertaald: op een bepaalde afstand is de invloed van een afwijking niet meer merkbaar).

ELEMENT: 52650 POINT: 13
SEVERITY : WARNING
ERROR CODE: /DIANA/LB/DS30/1023
ERRORMSG.W: Bad shaped element: delta-volume=1100.0 minimum delta-volume=1337.4
Bovenstaande waarschuwing geeft aan dat er slecht gevormde elementen aanwezig zijn. De locaties van deze elementen zijn in onderstaande afbeelding inzichtelijk gemaakt. Deze elementen liggen niet in het interesse gebied.



Figuur 4-25 Bad shaped elements

REINFORCEMENT 1 REPLACED BY NEW ELEMENTS 68053 TO 68180.
DIANA intern maakt wapening

ELEM. STIFFNESS STORED.
REINFO.STIFFNESS ADDED AND STORED
RHS-VECTORS INITIALIZED: ML= 9 ND= 913938 SF.RHSIDE
EXTER. LOAD INITIALIZED: ML= 9 ND= 913938 SF.EXTLOD
CONST.DISP. INITIALIZED: ML= 9 ND= 913938 SF.DISCON
INC. INITIAL STRAIN/STRESS LOAD ADDED TO RHS-VECT: NV= 9 SF.RHSIDE
ELEMENTLOAD TO RHS-VECT: NV= 9 SF.RHSIDE
ELEMENTLOAD TO EXT.LOAD: NV= 9 SF.EXTLOD
TOTAL MASS OF FE-MODEL FOR LOAD-CASE(1): 0.98039D+05
WEIGHT LOAD R.H.S. : NV= 9 SF.RHSIDE

WEIGHT LOAD EXTERNAL : NV= 9 SF.EXTLOD

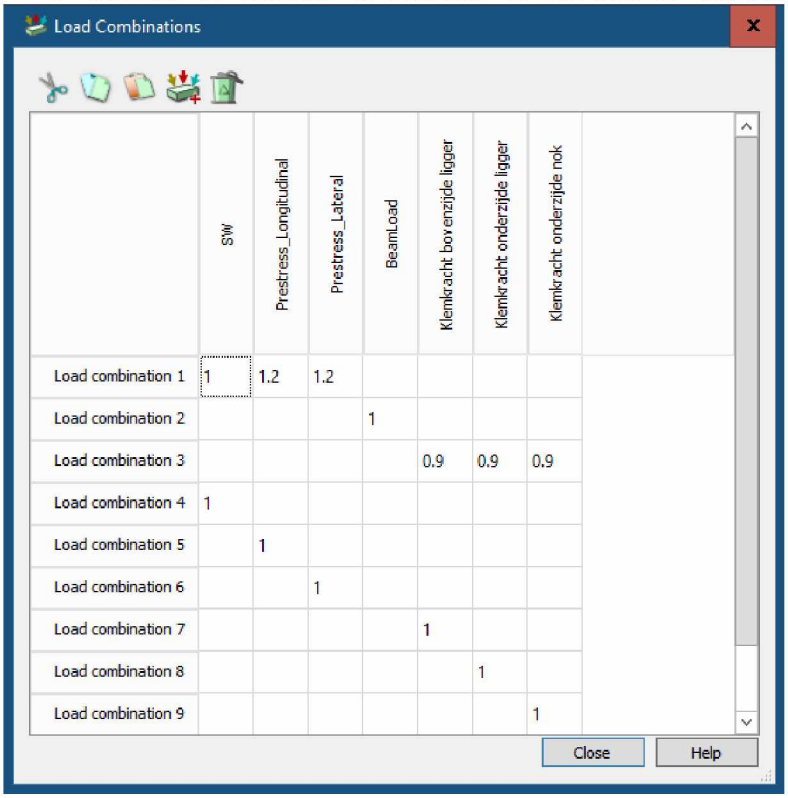
SUM OF EXT.LOAD TO CALC: ML= 9 ND= 913938 SF.EXTLOD

De vrijheidsgraden in het model

SUM OF EXTERNAL LOADS:

==========

LOADSET	POSITION	TR X	TR Y	TR Z	RO X	RO Y	RO Z
1	0.1166E-14	-0.3402E+07	-0.9618E+06	0.1756E+10	0.6214E+10	-0.6804E+10	
2	0.0000E+00	0.0000E+00	-0.1000E+04	-0.5589E+06	0.5007E+06	0.0000E+00	
3	0.0000E+00	0.0000E+00	0.1947E-02	-0.1347E+04	0.9802E+08	0.0000E+00	
4	0.1166E-14	-0.7039E-15	-0.9618E+06	0.2371E+09	0.6214E+10	-0.2485E-11	
5	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	
6	0.0000E+00	-0.2835E+07	0.0000E+00	0.1265E+10	0.0000E+00	-0.5670E+10	
7	0.0000E+00	0.0000E+00	-0.2300E+07	-0.1495E+10	0.4019E+10	0.0000E+00	
8	0.0000E+00	0.0000E+00	0.7667E+06	0.4983E+09	-0.2377E+10	0.0000E+00	
9	0.0000E+00	0.0000E+00	0.1533E+07	0.9967E+09	-0.1533E+10	0.0000E+00	



Dit betreffen de totale belastingen op het model

ANALYSIS INCLUDES:

PHYSICALLY NONLINEAR BEHAVIOR:

PLASTICITY FIRST NS= 25 TY= 1.000E-04

INTERFACE

NO REINFORCEMENT BONDING

TOTAL STRAIN-BASED CRACK MODEL

Gebruikte onderdelen

STEP 1 INITIATED:

*LOAD INCREMENT: LOADING(1) * 1.000E+00*

SPARSE: DIM=910892 NNZ(MAT)=73947635
SOLVE: REDUCTION RES= 0.62E-10 (INIT. RES= 0.15E+07) NI= 1

Matrix afmetingen

STEP 1 : ENERGY NORM = 3.481E+01 TOLERANCE = 1.000E-04
STEP 1 : FORCE NORM = 1.183E+06 TOLERANCE = 1.000E-02

Toegepaste convergentie criterium en norm (aanbeveling RTD)

STEP 24 TERMINATED, NO CONVERGENCE AFTER 100 ITERATIONS
EXECUTION STOPPED ON TOTAL LOAD CRITERION
CONTINUED ANALYSIS POSSIBLE.
*TOTAL LOAD FACTOR: LOADING(2) * 1.858E+03*

Het belastingscenario wordt in belastingstappen aangebracht. De kracht is hier weergegeven in kN (1858 kN).

PLASTICITY LOGGING SUMMARY

GROUP NAME,	*PLAST,*	*PRV. PL,*	*CRITIC,*	*PLAST NEW,*	*PRV.PL NEW,*	*CRITIC NEW*
allReinfo	*97*	*0*	*0*	*4*	*0*	*0*
allConcrete	*1096*	*1571*	*0*	*360*	*2*	*0*
TOTAL MODEL	*1193*	*1571*	*0*	*364*	*2*	*0*

Dit is de plasticiteitstabel, meeste plasticiteit zit in het beton (crushing) en een klein deel in de wapening (voorspankabels).

CRACKING LOGGING SUMMARY

GROUP NAME,	*CRACK,*	*OPEN,*	*CLOSED,*	*ACTIVE,*	*INACTI,*	*ARISES,*	*RE-OPENS,*	*CLOSES*
allConcrete	5.1,2,e	*844*	*119951*	*150267*	*7635*	*7*	*3*	
TOTAL MODEL	5.1,2,e	*844*	*119951*	*150267*	*7635*	*7*	*3*	

En de scheuren in het beton.

CUMULATIVE REACTION:	*FORCE X*	*FORCE Y*	*FORCE Z*
	0.21173E-07	*-0.34020E+07*	*-0.28198E+07*

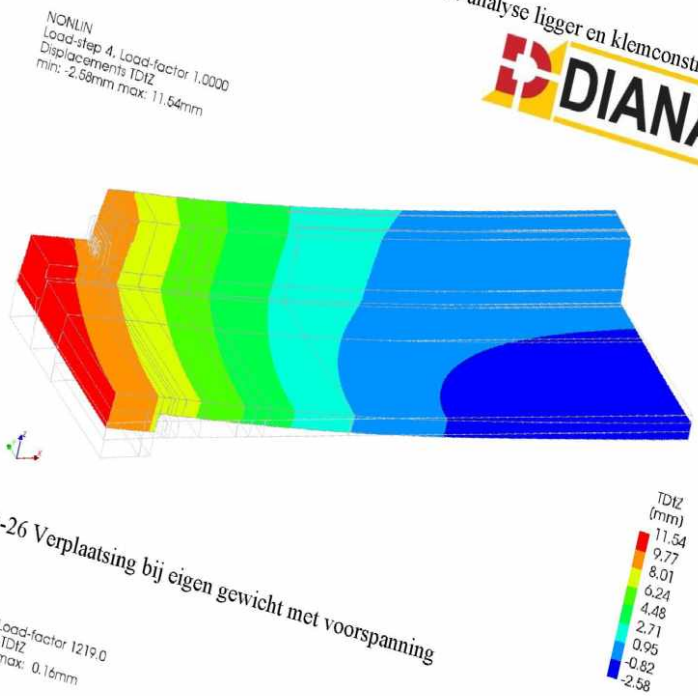
Ook worden de totale reactie krachten aangegeven

4.4 Resultaat validatie

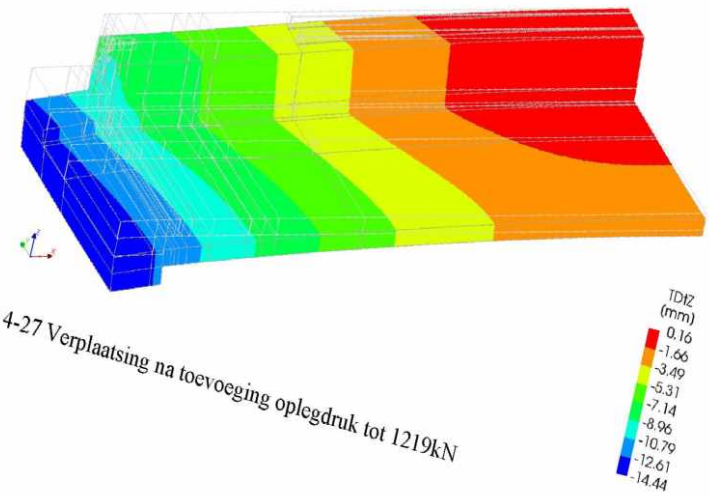
4.4.1 Verplaatsingsvelden voor de relevante belastingstappen

Hieronder is het vervormingsgedrag weergegeven na de relevante belastingstappen van de uitgevoerde niet-lineaire analyse (variant a):

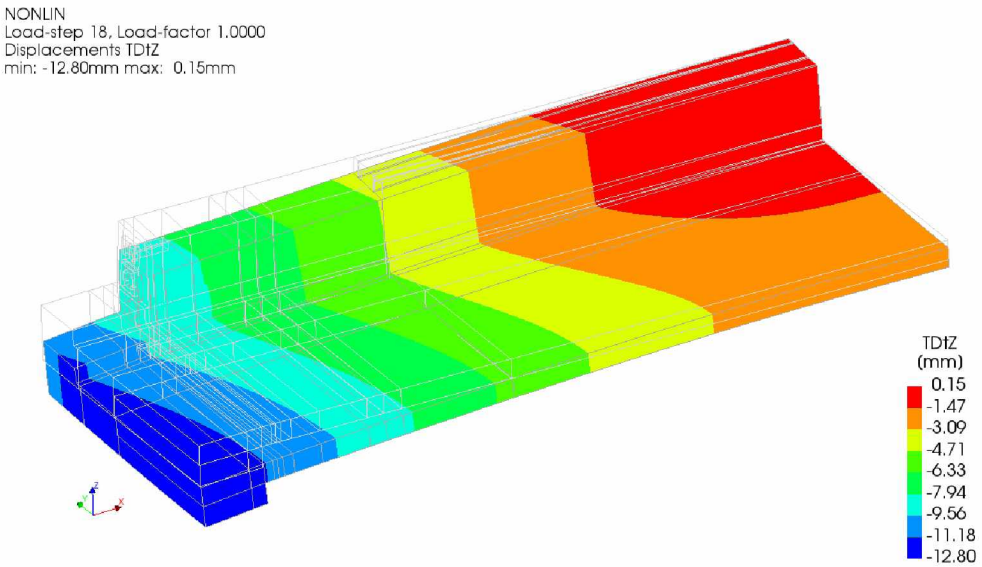
- Na voorspanning met eigen gewicht
- De oplegdruk tot ULS eigengewicht en rustende belasting (1219 kN)
- Klemkracht (variant a)
- Oplegdruk verhogen tot ULS waarde inclusief Busbelasting (1858 kN)



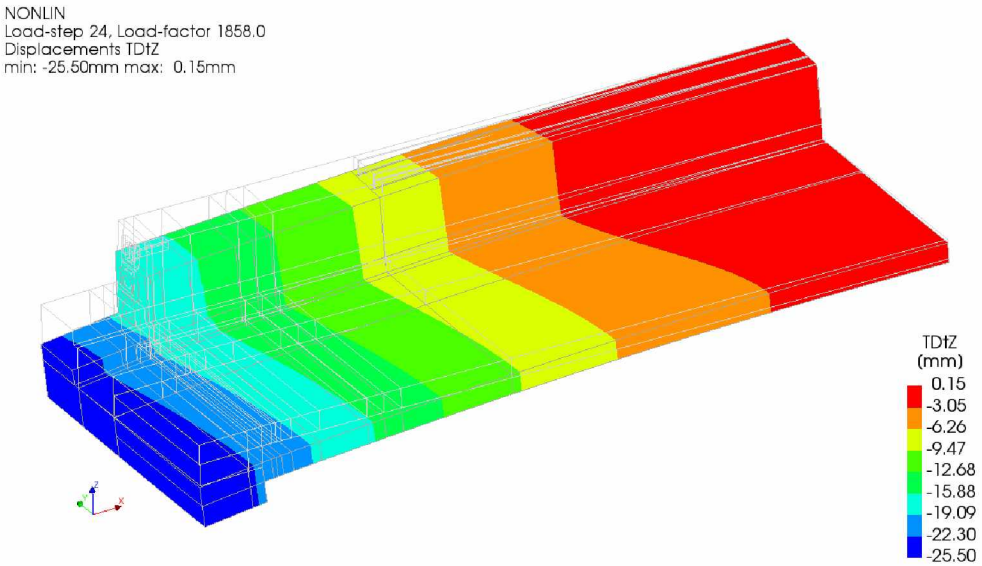
Figuur 4-26 Verplaatsing bij eigen gewicht met voorspanning



Figuur 4-27 Verplaatsing na toevoeging oplegdruk tot 1219kN



Figuur 4-28 Verplaatsing na aanbrengen klemkracht



Figuur 4-29 Verplaatsing na verhogen oplegdruk tot 1858kN

4.4.2 Spanningsresultaten voor significante punten (incl. geschiedenis/tijdverloop)

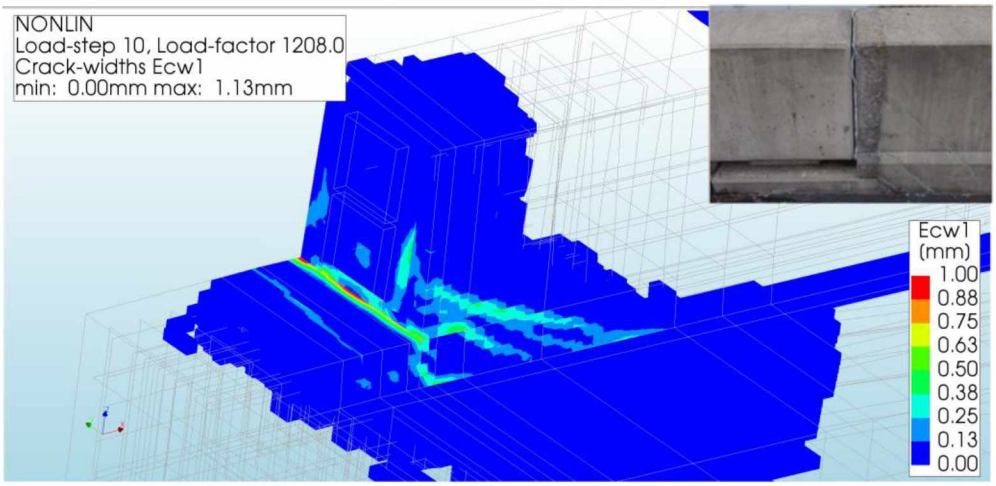
Zie de appendices

4.4.3 Vergelijking met voorspelde en/of verwachte resultaten

Er is geen onderliggende berekening aangereikt om de resultaten te vergelijken of te valideren. Reeds bij de opdracht is aangenomen dat IV-Infra een versimpeld model maakt.

Wel is aangetoond dat de scheurvorming zoals die in de praktijk optreedt ook vanaf de eerste versies van het model zeer nauwgezet overeen kwam met de praktijk. Dit gold zowel voor het patroon als de wijdte (scheuren in de praktijk zijn gevonden tussen 0.5-1.0mm).

Figuur 4-35 laat dit beeld zien met rekenwaarden voor de materialen. Daarbij is het patroon gelijk. Eerder is een vergelijk gemaakt met karakteristieke waarden, waarbij ook de wijdte overeen kwam. Dit is technisch een betere validatie dan een analytische berekening.



Figuur 4-30 Scheurwijdte en patroon met karakteristieke materialen

4.4.4 Resultaatbespreking (zowel kwalitatief als kwantitatief)

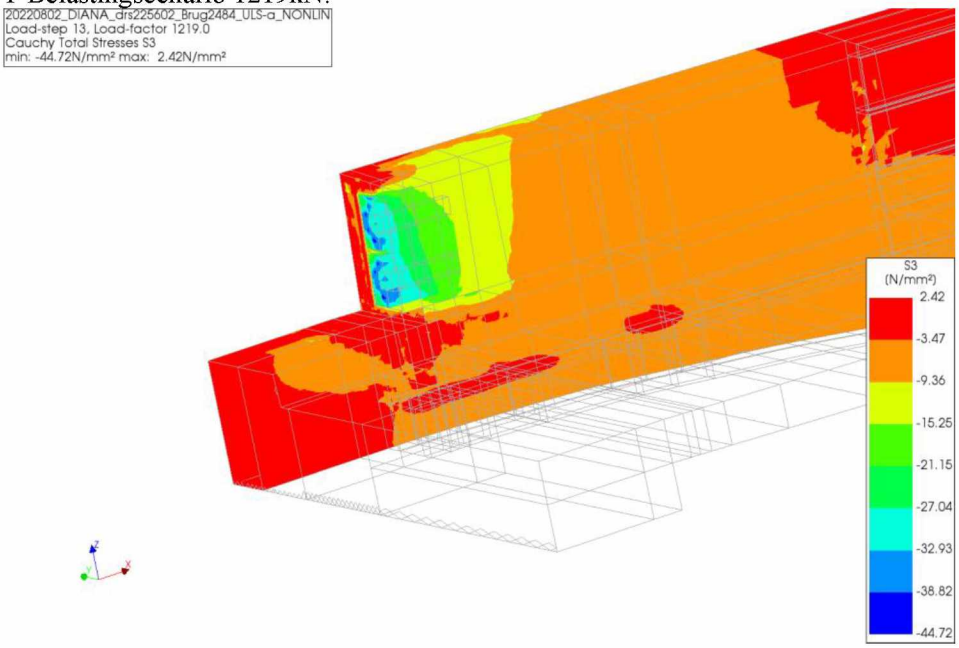
Er zijn verschillende berekeningen uitgevoerd om te komen tot de gerapporteerde berekeningen. In eerste instantie bleek de inklemming onrealistisch grote scheurvorming te laten zien. Het nadeel daarvan is dat de convergentie altijd op het gehele model wordt toegepast. Dus de convergentie laat dan geen duidelijk beeld zien van de betrouwbaarheid van het significante deel nabij de tandoplegging.
Toen is er gerekend met gemiddelde en later met karakteristieke druksterktes, om het model door de belastingstappen te krijgen. Dit is niet gerapporteerd omdat later verbeteringen aan het model zijn toegepast hetgeen relevanter is om te rapporteren.
Uiteindelijk is onderstaande variant geheel doorgerekend.
-ULS : Deze variant heeft ook voor de betondruksterkte een rekenwaarden (55/1.5MPa). Deze variant wordt gerapporteerd.

4.5 Controle en checks

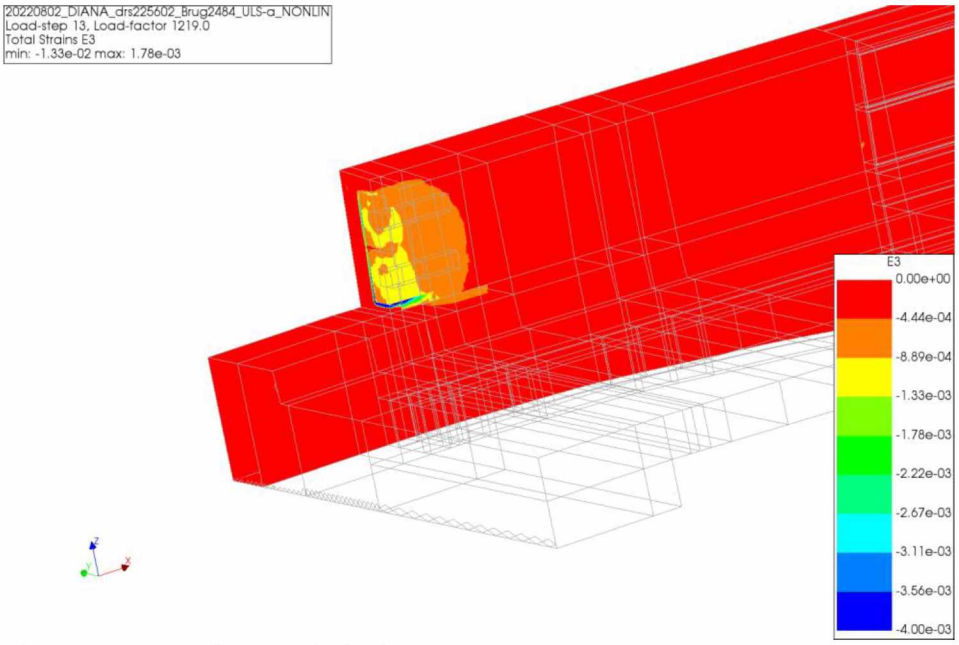
4.5.1 Zones in beton met minimale rekken kleiner dan -3.5 ‰

In het eerste belastingscenario, ter plaatse van de voorspankabels wordt de drukrek overschreden vanaf het eerste belastingscenario. Dit is enkel bij de introductie van de voorspankrachten, en wordt hierom geaccepteerd.
In het laatste belastingscenario (1858-b; γ_{klem} = 1.2) is wel een duidelijke verhoging van de drukspanning te zien ter plaatse van de oplegpunten van de klemconstructie maar de bijbehorende drukrekken blijven zeer beperkt.

1-Belastingscenario 1219kN:

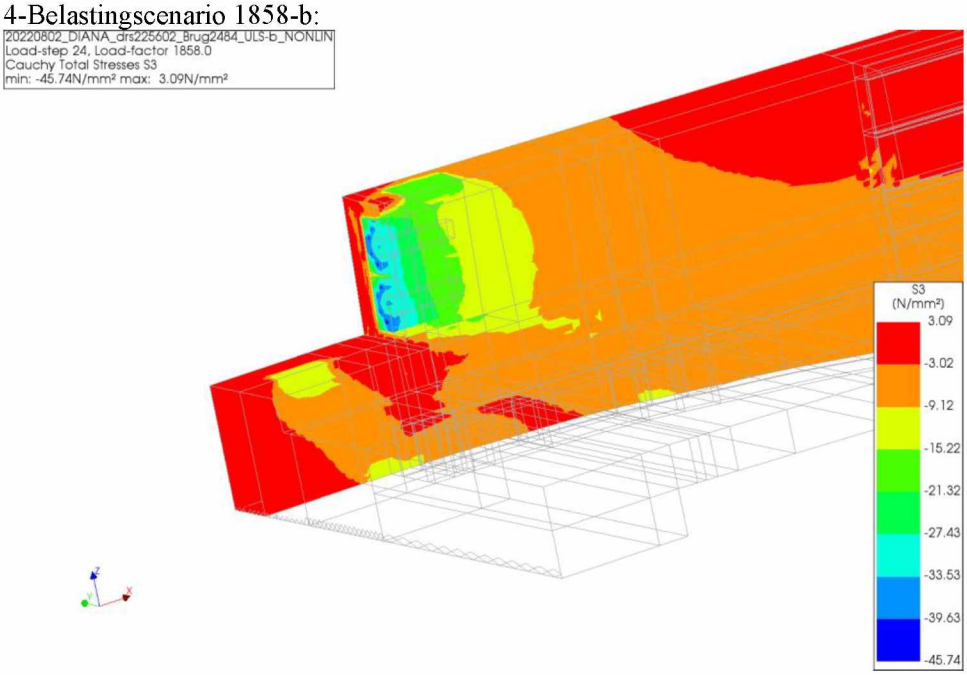


Figuur 4-31 S3 – Grootste drukspanning

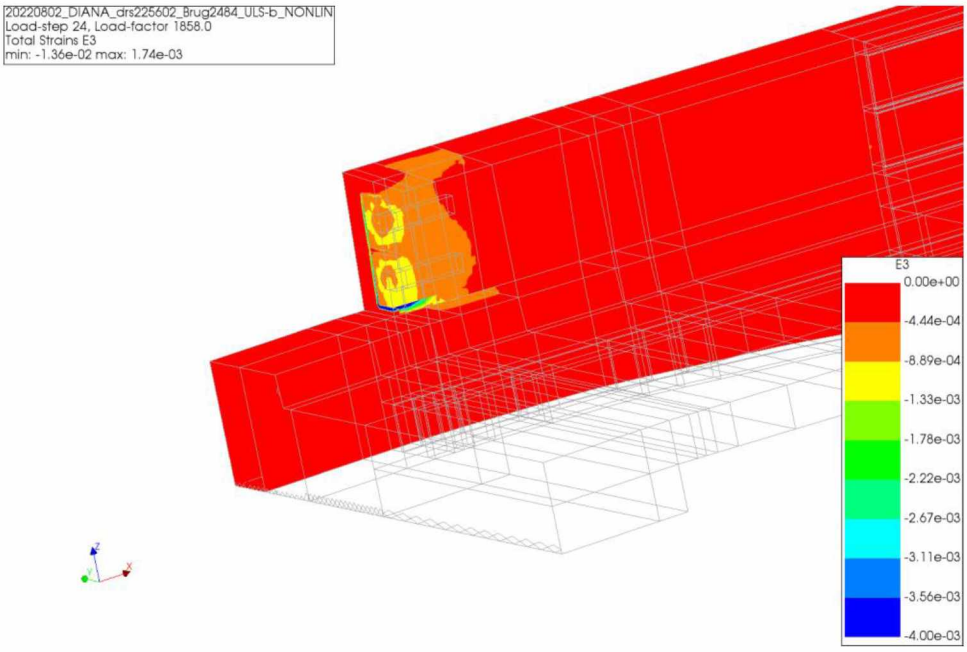


Figuur 4-32 E3 – Grootste drukrek

4-Belastingscenario 1858-b:



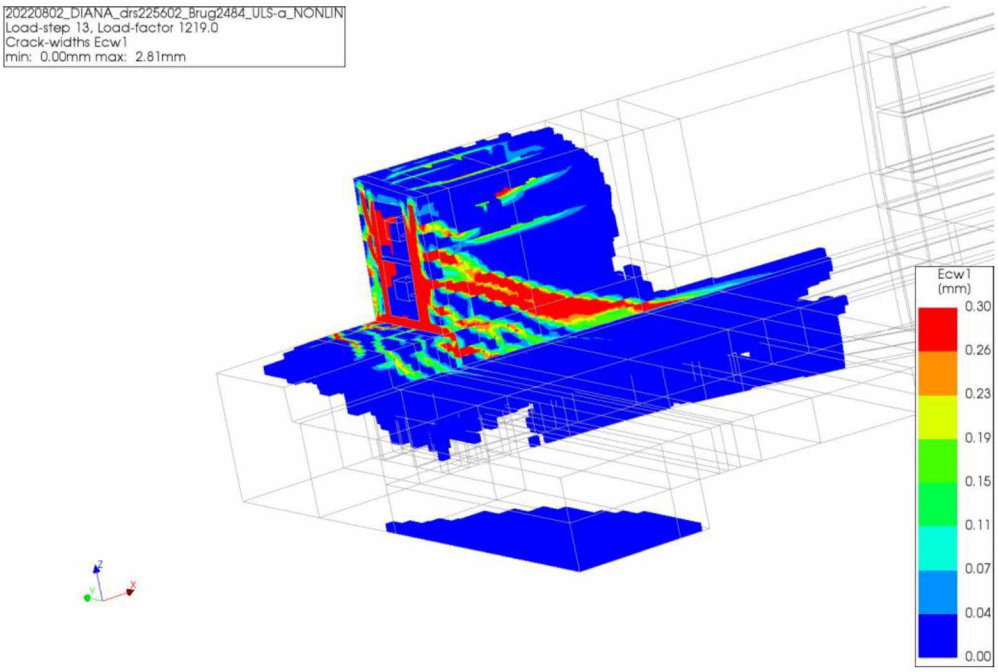
Figuur 4-33 S3 –Grootste drukspanning



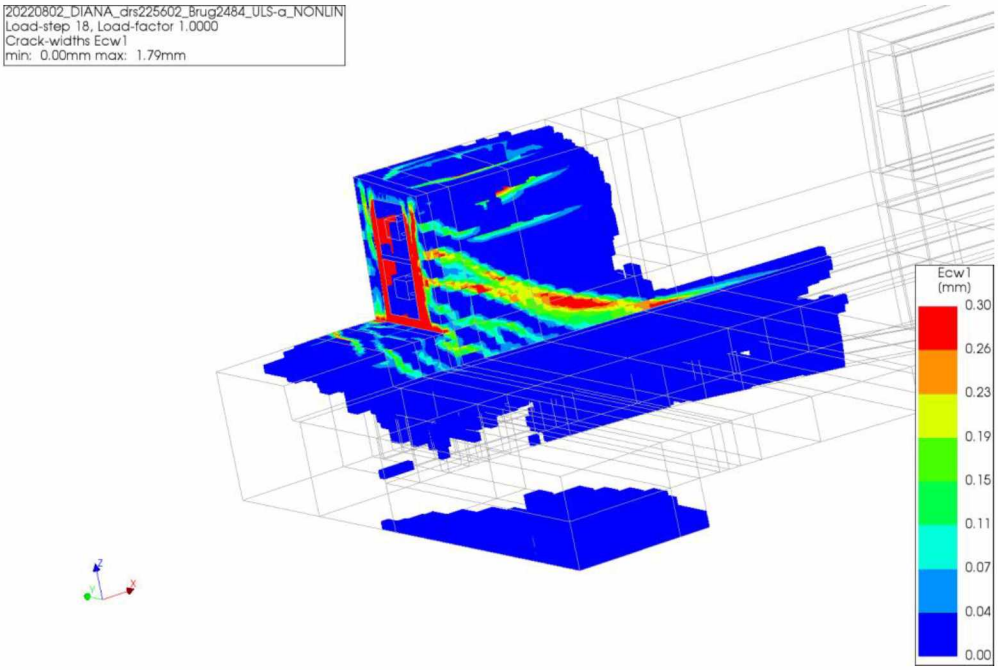
Figuur 4-34 E3 – Grootste drukrek

4.5.2 Zones met volledig geopende scheuren

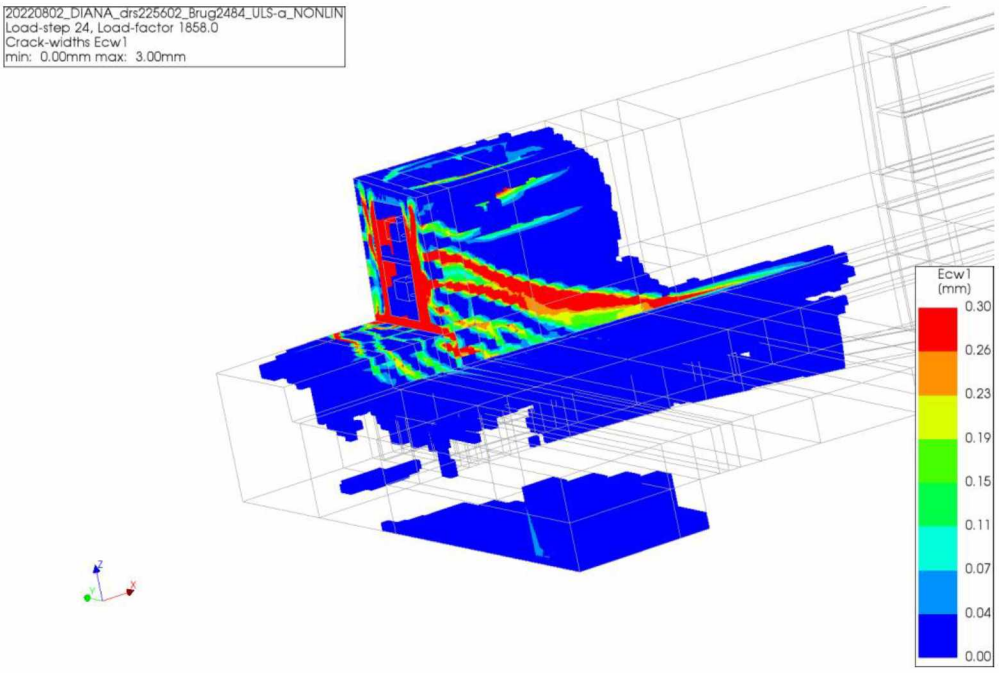
In onderstaande 3 afbeeldingen is de ontwikkeling van de scheurvorming gedurende de verschillende belastingscenario's (alle met γ_{klem} = 0.9) te zien. De invloed van de klemconstructie op de scheurvorming wordt hier duidelijk zichtbaar.



Figuur 4-35 1-Belastingscenario 1219kN



Figuur 4-36 2-Belastingscenario klem-a



Figuur 4-37 4-Belastingscenario 1858-a:

4.5.3 Afschatting van scheurgrootte via scheurrek en equivalente lengte

N.v.t. (er wordt niet getoetst op scheurwijdte)

4.5.4 Bezwijken op afschuiving (speciaal bij balk- en schaalelementen)

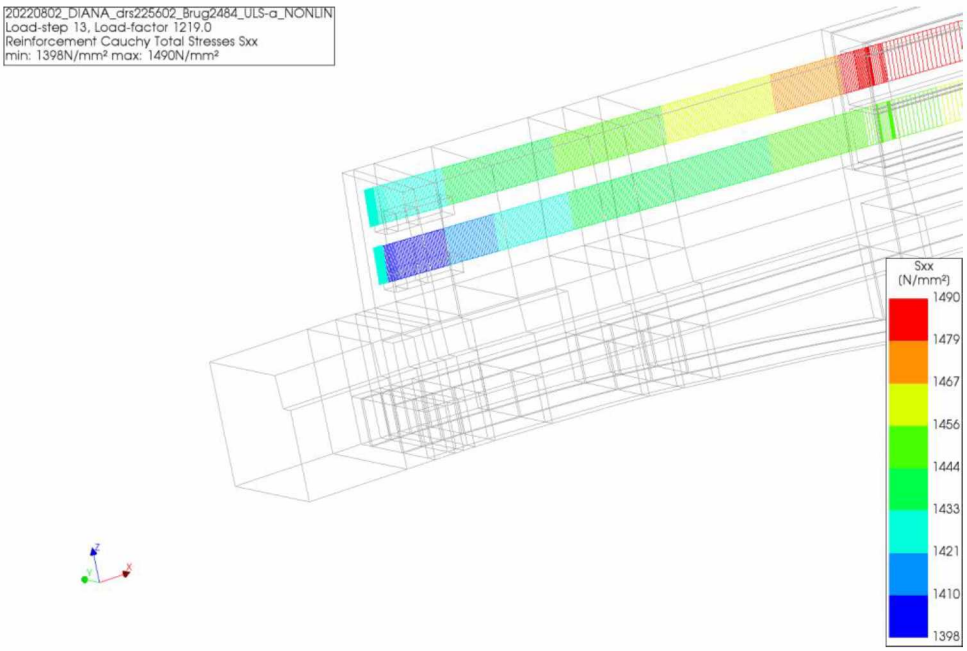
N.v.t. (er wordt geen gebruik gemaakt van balk- of schaalelementen)

4.5.5 Plasticiteit in wapening (spanningen en rekken in wapening)

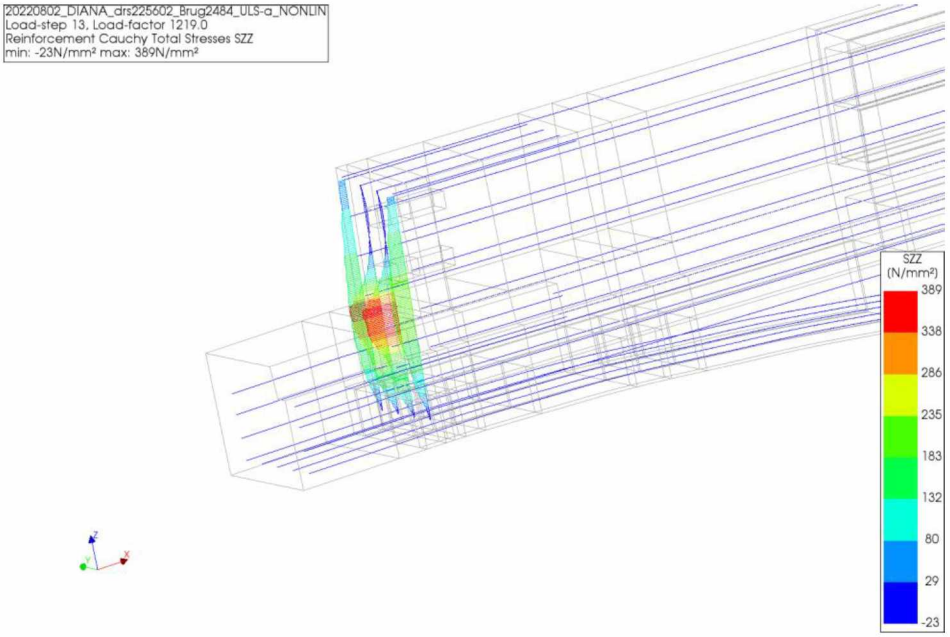
In belastingscenario 1219kN bereikt de verticale wapening ter plaatse van de aansluiting van de tandoplegging een wapeningsspanning van 389MPa. Alle wapening blijft onder de vloeigrens.

Na het aanbrengen van de klemconstructie lopen de wapeningsspanningen terug. De wapeningsspanning in de verticale wapening loopt terug naar 154Mpa.

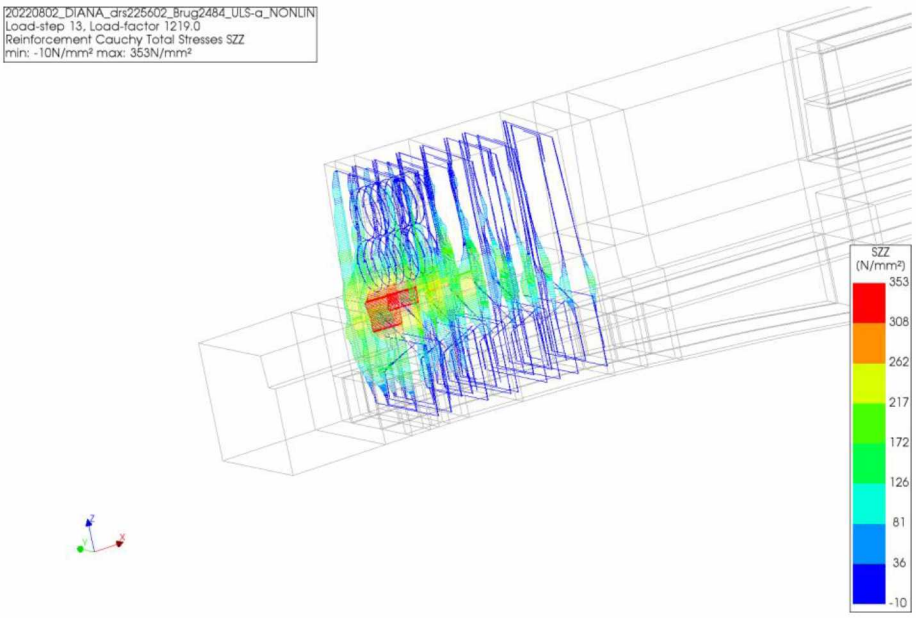
Wanneer alle belasting er uiteindelijk opstaat, loopt de wapeningsspanning op tot maximaal 276MPa. De voorspankabels halen uiteindelijk de vloeigrens van f_{pd} = 1500MPa. De maximale totale rek die gevonden wordt is 7.6‰ < 20‰, voldoet (elastische rek = 7.5‰ en plastische rek = 0.1‰).



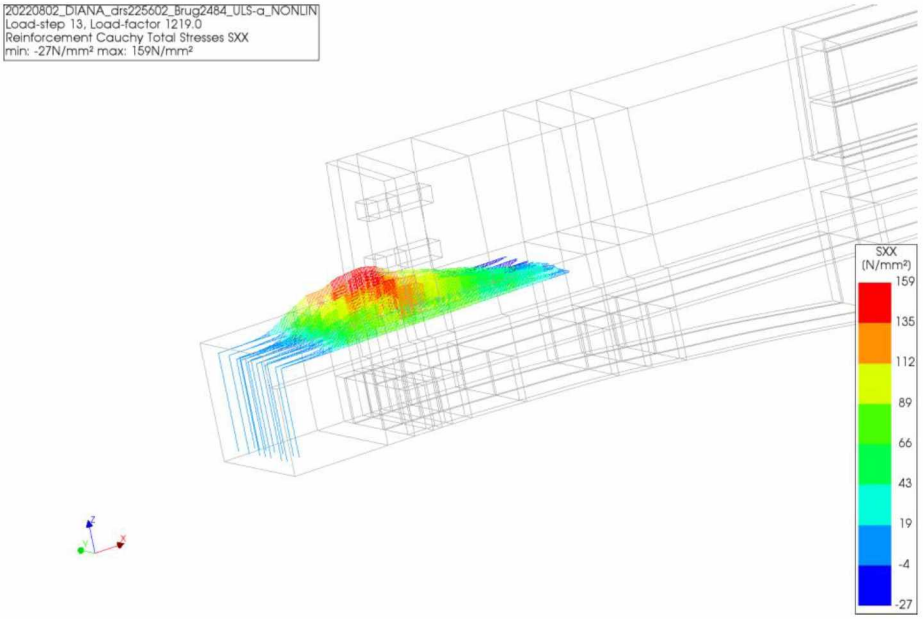
Figuur 4-38 Spanning in voorspankabels (gegrout) bij Belastingscenario 1219kN



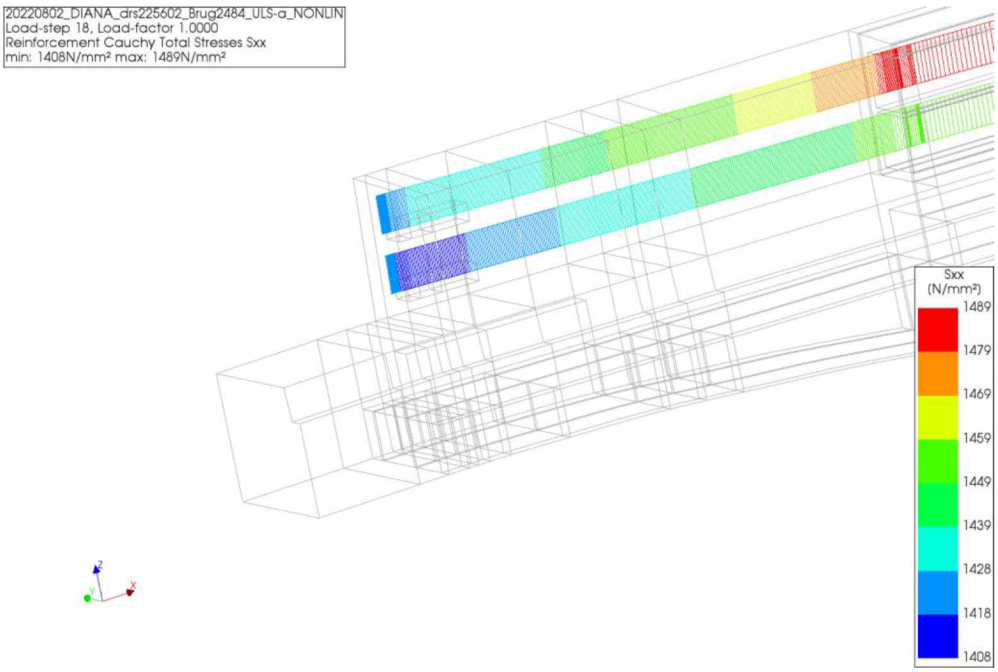
Figuur 4-39 1-Belastingscenario 1219kN wapeningspanning



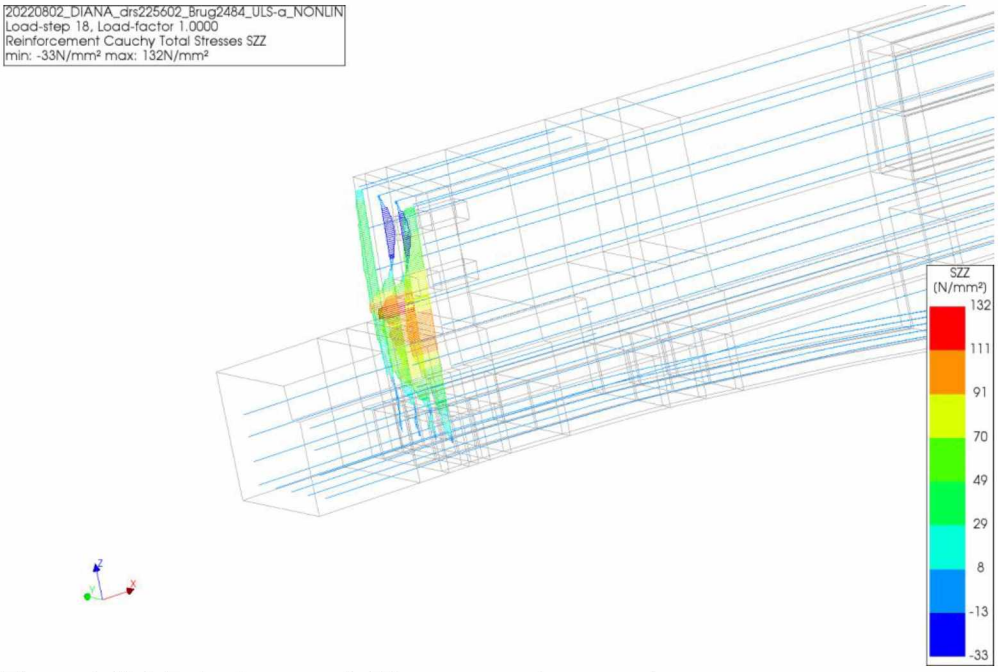
Figuur 4-40 1-Belastingscenario 1219kN wapeningspanning



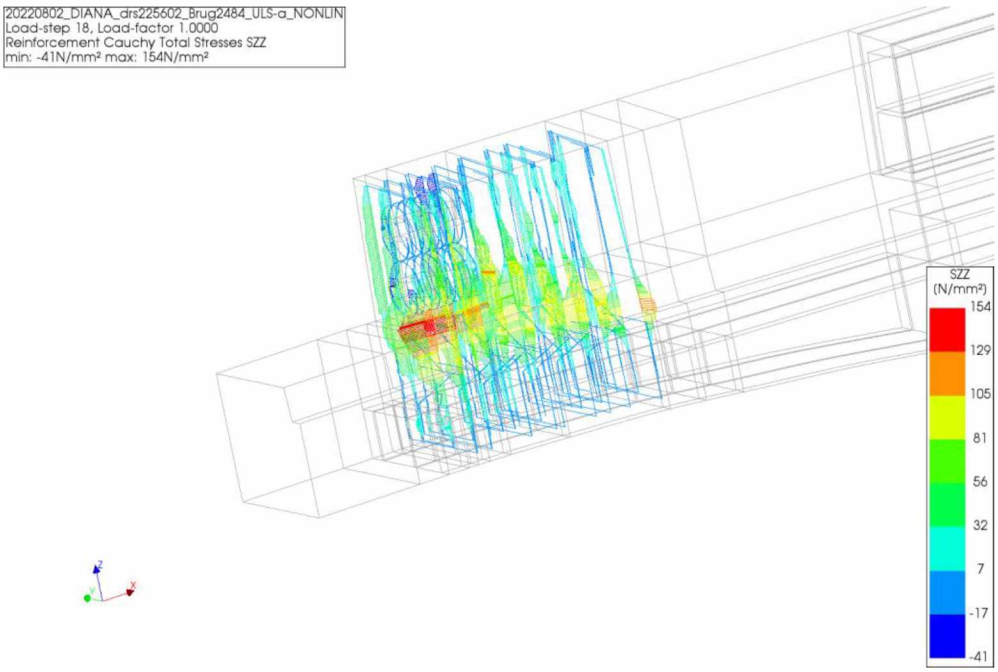
Figuur 4-41 1-Belastingscenario 1219kN wapeningspanning



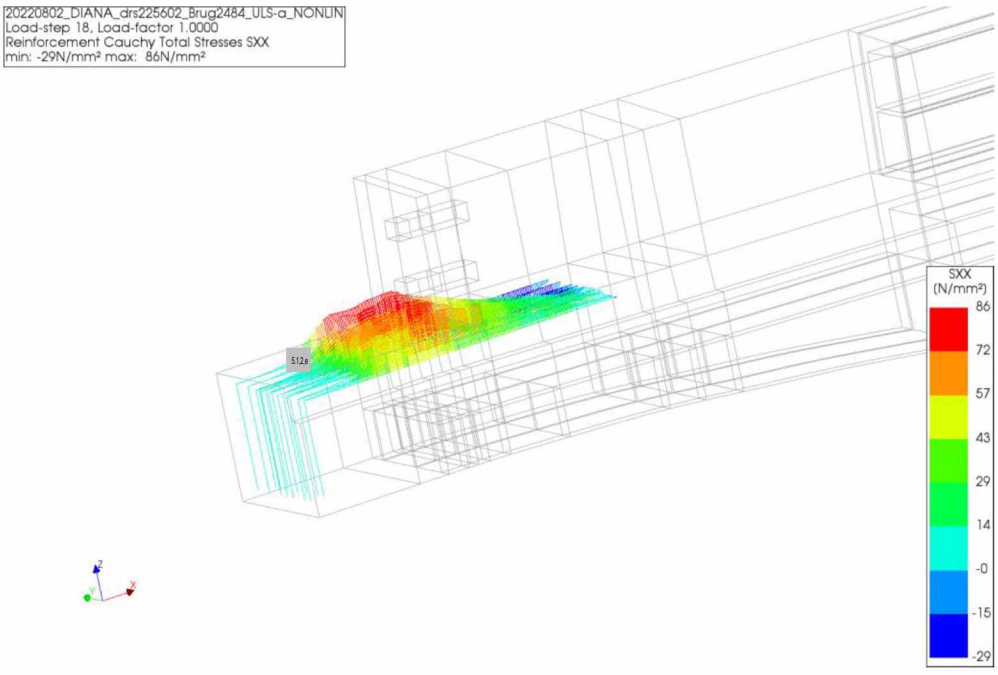
Figuur 4-42 Spanning in voorspankabels (gegrout) bij Belastingscenario Klem-a



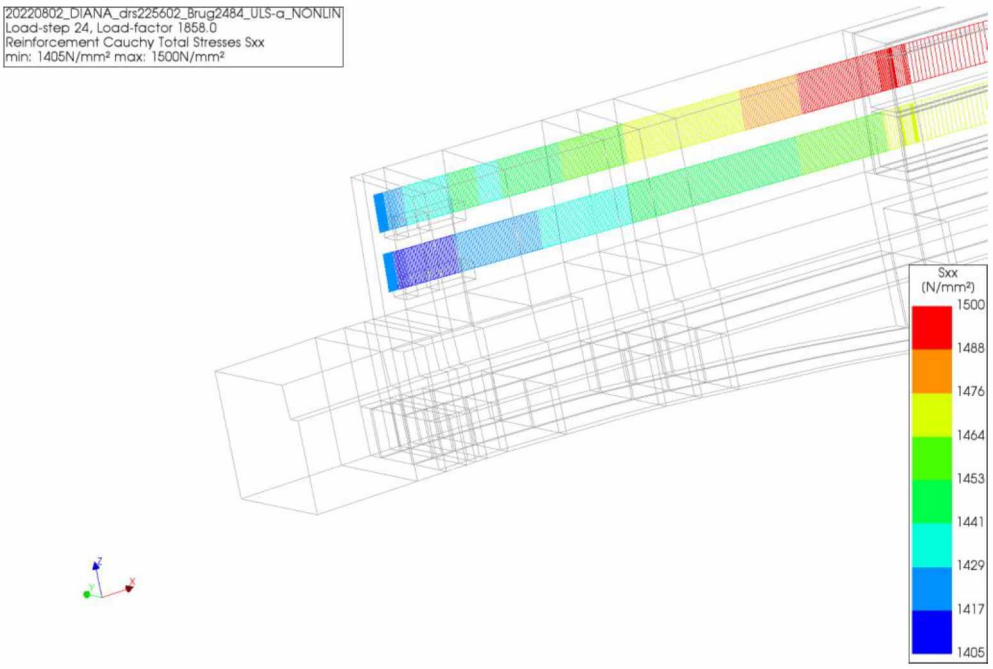
Figuur 4-43 2-Belastingscenario Klem-a wapeningsspanning



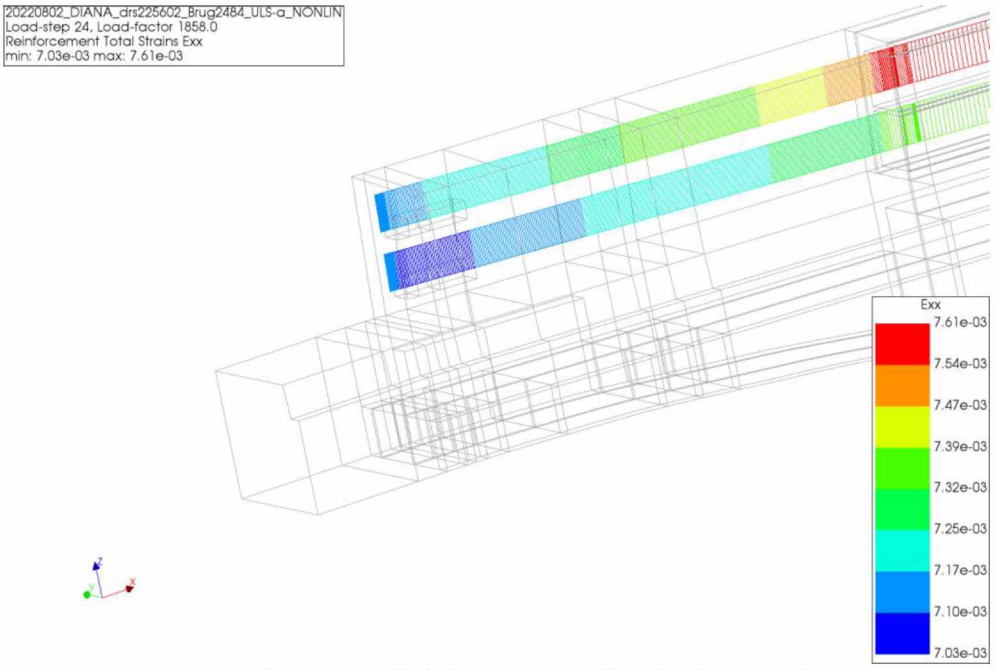
Figuur 4-44 2- Belastingscenario Klem-a wapeningsspanning



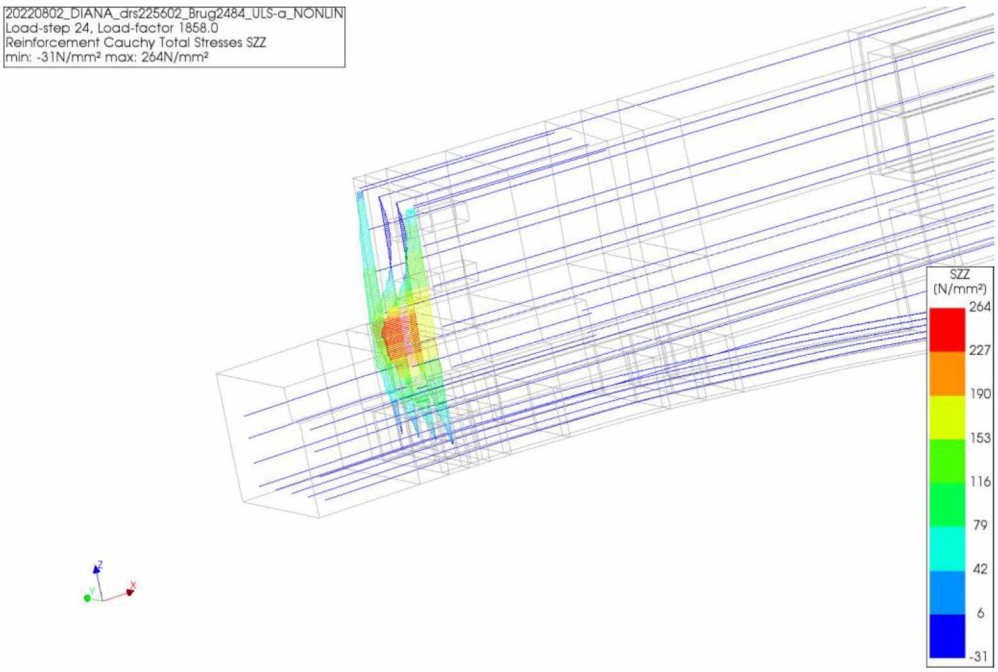
Figuur 4-45 2-Belastingscenario Klem-a wapeningsspanning



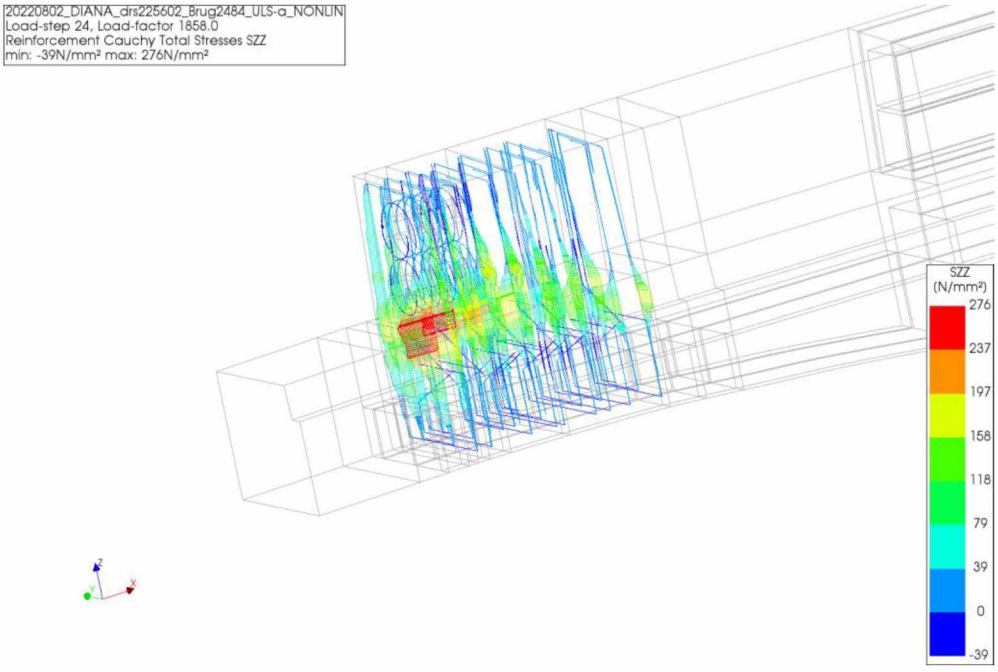
Figuur 4-46 Spanning in voorspankabels (gegrout) bij Belastingscenario 1858-a



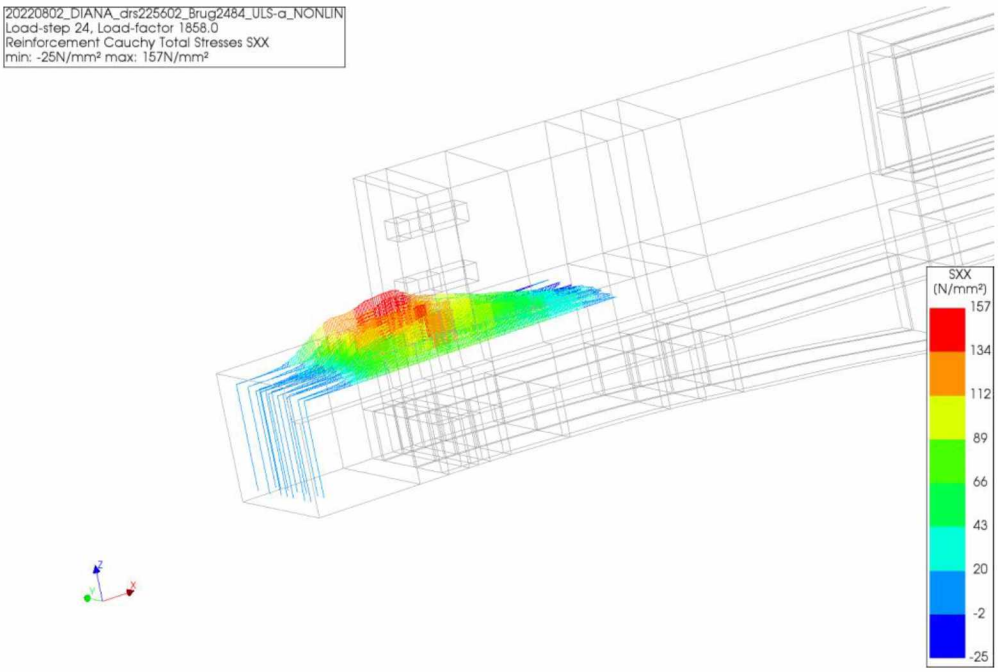
Figuur 4-47 Totale rek in voorspankabels (gegrout) bij Belastingscenario 1858-a



Figuur 4-48 4-Belastingscenario 1858-a wapeningspanning



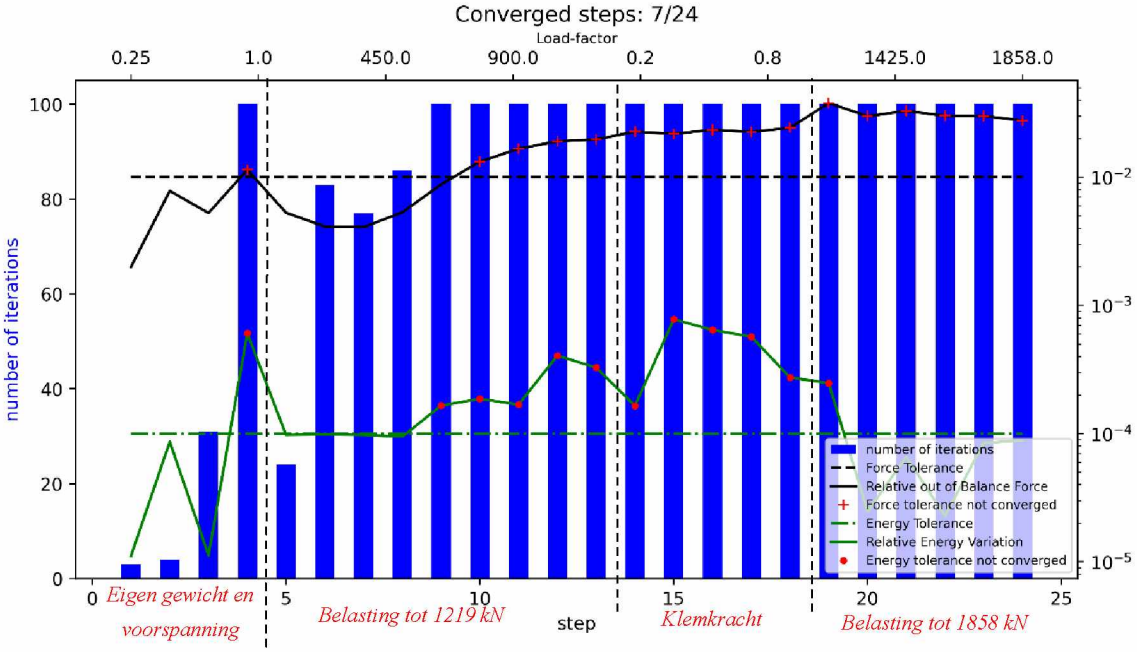
Figuur 4-49 4-Belastingscenario 1858-a wapeningspanning



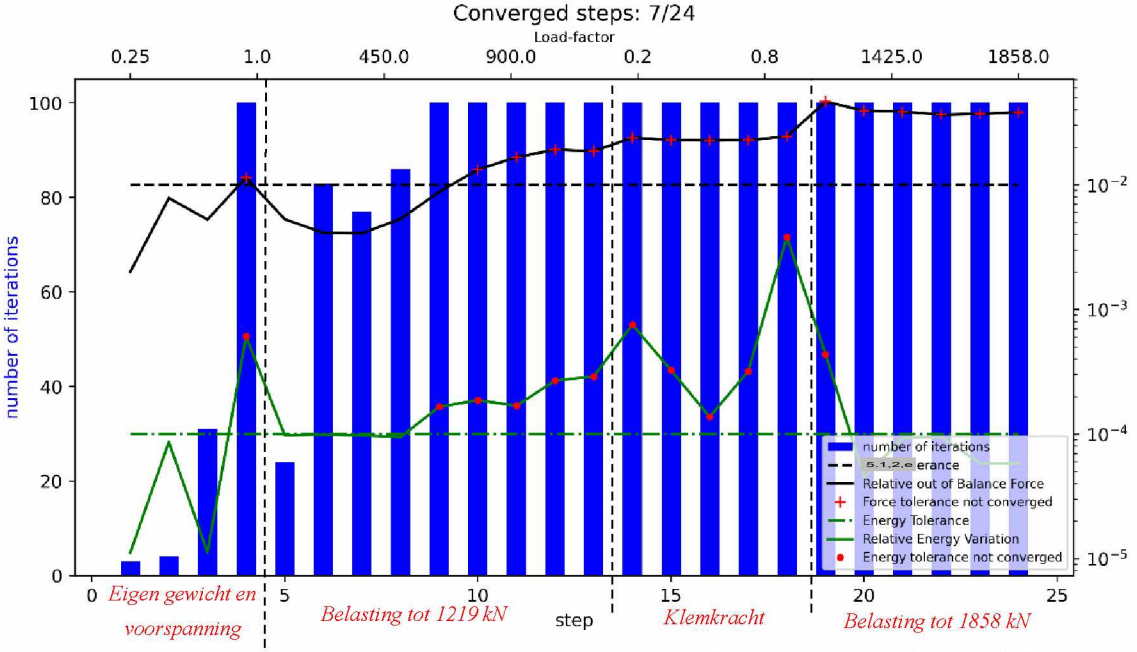
Figuur 4-50 4-Belastingscenario 1858-a wapeningspanning

4.5.6 Convergentie

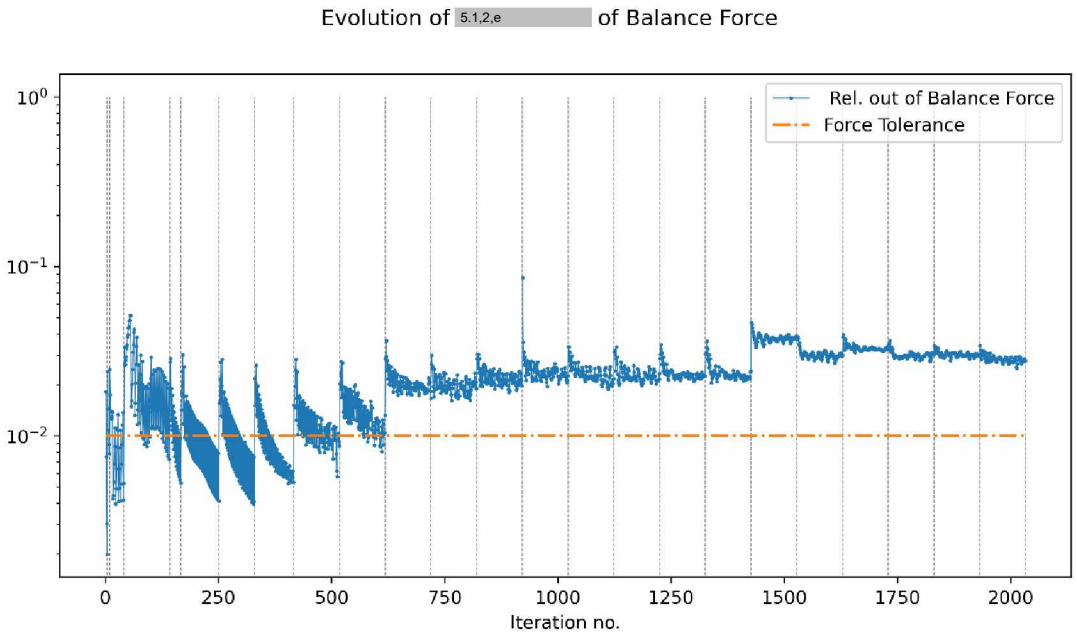
De convergentie wordt gecontroleerd op kracht (tolerantie = 1^{e}-2) en energie (tolerantie = 1^{e}-4) met een maximum van 100 iteraties. Beide kracht en energie dienen te voldoen aan de gestelde tolerantie. In onderstaande grafieken zijn eerst alle stappen weergegeven met het aantal iteraties en de uiteindelijk behaalde afwijking van de norm. Daarna is per iteratie voor beide kracht en energie het convergentiegedrag inzichtelijk gemaakt.
In het algemeen wordt niet voldaan aan de gestelde convergentiecriteria (convergentie in 7/24 stappen). Dit heeft er met name mee te maken, dat het moeilijk is op force te convergeren vanaf het moment dat de klemkracht wordt aangebracht. Overigens zijn de afwijkingen relatief klein. Zo zit energie altijd onder de afwijking van 1^{e}-3 en komt kracht niet boven een afwijking van 5^{e}-2 uit.



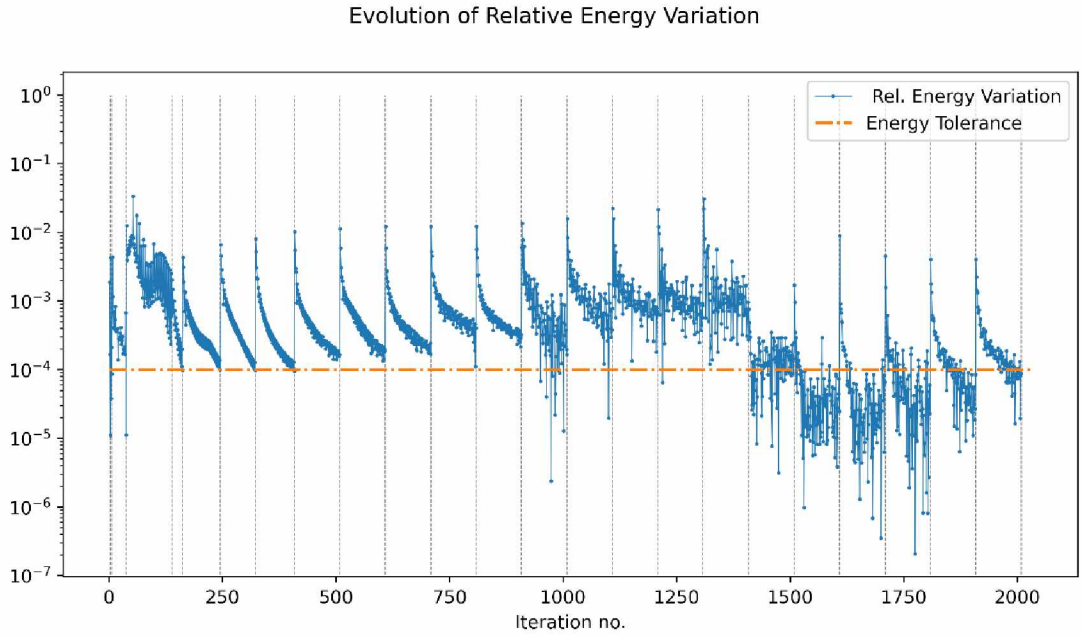
Figuur 4-51 Convergentiediagram voor berekening situatie a (γ_{klem} = 0.9)



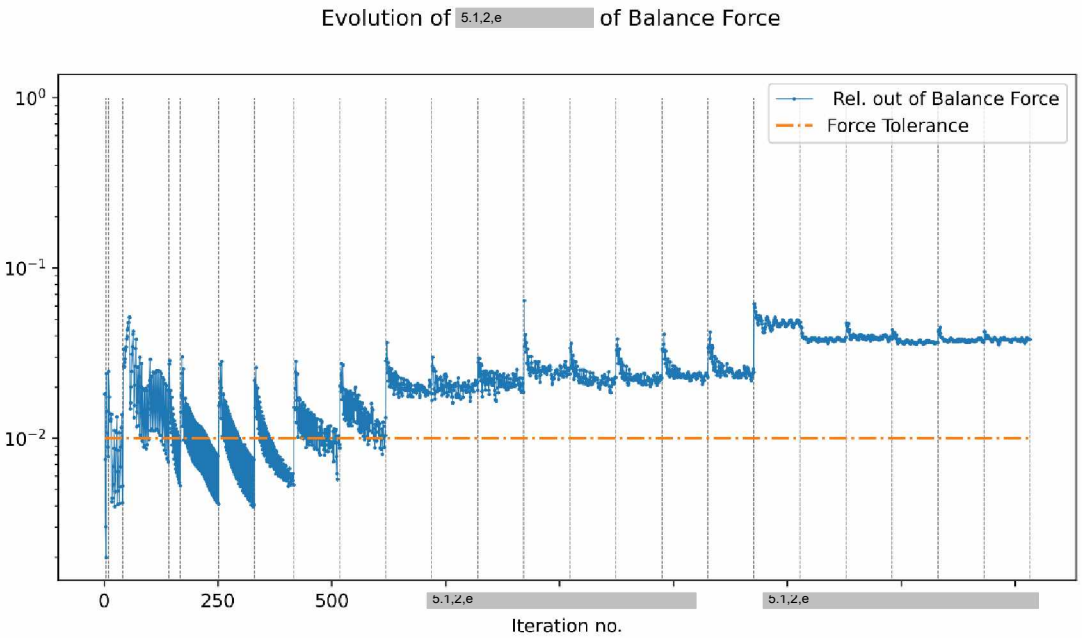
Figuur 4-52 Convergentiediagram voor berekening situatie b (γ_{klem} = 1.2)



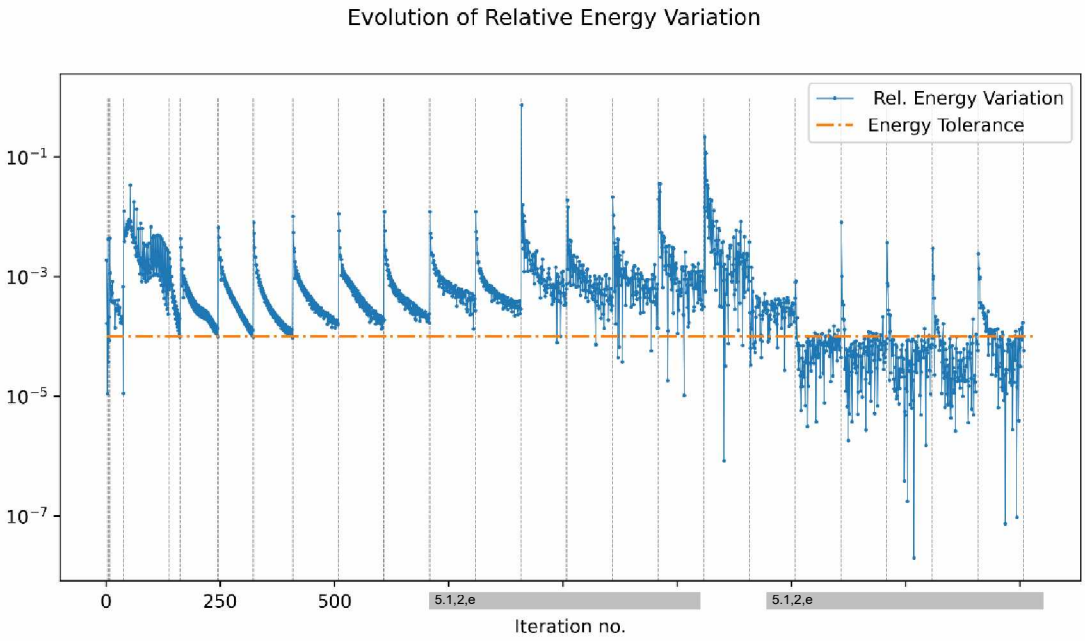
Figuur 4-53 Convergentiegrafiek per iteratie voor 'Force' (situatie a)



Figuur 4-54 Convergentiegrafiek per iteratie voor 'Energy' (situatie a)



Figuur 4-55 Convergentiegrafiek per iteratie voor 'Force' (situatie b)



Figuur 4-56 Convergentiegrafiek per iteratie voor 'Energy' (situatie b)

4.6 Eindige Elementen analysis input checklist (Baguley en Hose 1994)

Tabel 4.6.1: Input checklist	
Aspect	**Omschrijving en toelichting**
Analyse type	Niet-lineaire structurele analyse
Eenheden	Divers
Constanten	Zwaartekrachtversnelling 9.81 m/s^2
Modelgrootte	Circa 12 m

Coordinatensysteem	XYZ
Buitenafmetingen	Nvt
Materiaalmodellen	Zie appendices
Elementtypes	Zie uitleg model
Integratieschema's	Zie uitleg model
Meshinformatie	Zie uitleg model
Meshkwaliteit	Zie uitleg model
Ontbrekende elementen	Nvt
Interne randen	Nvt
Opleggingen	Zie uitleg model
Beperkingen	Symmetrie rechterzijde model ingevoerd. Zonder werkelijk voorspankabelverloop.
Symmetrievlakken	Zie uitleg model
Belastingen	Zie uitleg model

4.7 Eindige Elementen analysis outputchecklist (Baguley en Hose 1994)

Tabel 4.7.1: Output checklist	
Aspect	**Omschrijving en toelichting**
Waarschuwingen/fout meldingen	Zie uitleg model
Convergentiegedrag	Zie uitleg resultaten
Verplaatsingsvelden	Zie uitleg resultaten
Scheurverloop	Zie uitleg resultaten
Crushingverloop	Zie uitleg resultaten
Vloeigedrag	Zie uitleg resultaten
Reactiekrachten	Zie uitleg resultaten
Vervormingen	Zie uitleg resultaten
Vervormingafbeelding	Zie uitleg resultaten
Spanningen	Zie uitleg resultaten
Spanningsverloop	Zie uitleg resultaten
Resultaatbespreking	Zie uitleg resultaten
Controle/checks	Zie uitleg resultaten

5 Conclusies

In opdracht van het ingenieursbureau Amsterdam heeft DIANA FEA bv een niet lineaire analyse uitgevoerd naar de tand oplegging van een voorgespannen brugdeel. De constructie is beschreven in de inleiding.
Het primaire doel was het aantonen dat de constructie inclusief het aanbrengen van een beschreven klemkracht niet tot splijten van het beton leidt. Daarnaast is met DIANA beoordeeld of er een ander soort bezwijken op kan treden.

Alle uitgangspunten en ontvangen informatie zijn beschreven in hoofdstuk 2.

Vervolgens is in hoofdstuk 3 reeds een korte samenvatting gegeven van de belangrijkste toetsingsparameters.
Dit betreffen de betonscheuren (splijt-, buiging- of dwarskracht scheuren) en de stuik van het beton nabij de spankoppen en tussen de klemplaten.
Ook bleek de staalspanning en rek een belangrijke toets te zijn nabij de keel van de tandoplegging.

In hoofdstuk 4 is een opsomming van de eindige elementen berekening gegeven. Zowel van het model, de invoer, uitvoer als mede de markante aandachtspunten.

Een meer uitgebreid visueel overzicht is gegeven in de bijlagen die als separate pdf bestanden bij dit rapport worden meegeleverd.

Conform de 8700 serie is een ‘partial safety method’ berekening gemaakt. Dat houdt in (in tegenstelling tot een ‘global safety approach’) dat alle materialen in het model als rekenwaarde worden ingevoerd. Op de belasting zijde wordt dan een beperkte (doch reële) belasting factor toegepast.

De validatie van het model is primair uitgevoerd met de vergelijking tussen het scheurpatroon en de wijdte in praktijk en het DIANA model met karakteristieke materialen.

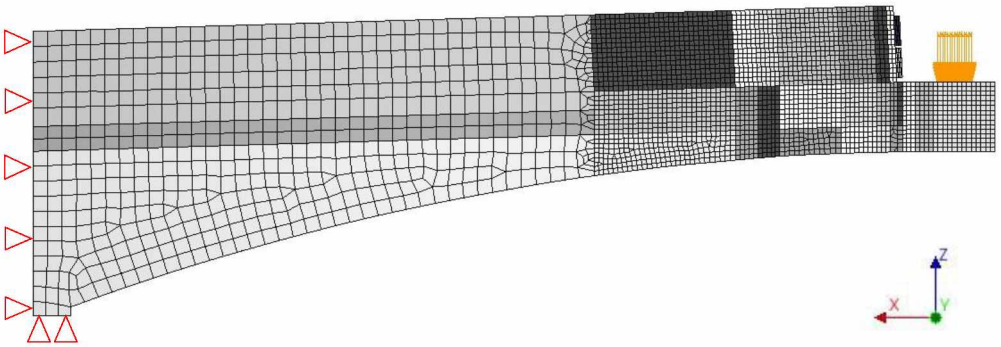
Uit hoofdstuk 3 en 4 blijkt dat de constructie na het aanbrengen van de klemkracht niet zal splijten nog bezwijken bij het gebruik van de brug.
Uit de resultaten blijkt dat de klemkracht het risico op splijten niet zichtbaar verhoogd. Wel verkleint het overduidelijk de aanwezige scheuren onder 45 graden en ondersteund het effectief de tand. Daarbij ontlast de klemkracht de verticale wapening langs de keel en reduceert de spanning met circa 60%.

APPENDIX

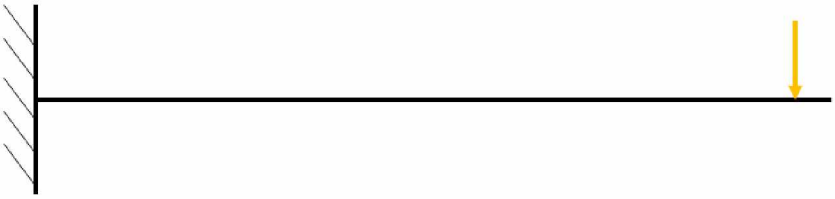
A Modelvalidatie

A.1 Introductie

Voor de modelvalidatie, worden alle 7 belastinggevallen afzonderlijk bekeken.
Wanneer men kijkt naar de randvoorwaarden kan men het XZ-vlak schematiseren als een inklemming. Ter extra controle is hierom nog een composed lijn toegevoegd aan het model om de dwarskracht en het moment uit te lezen.

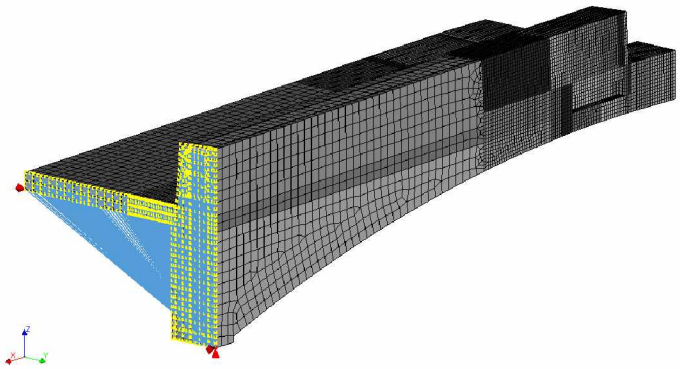


Figuur A-1 Randvoorwaarden model vanuit XZ-vlak

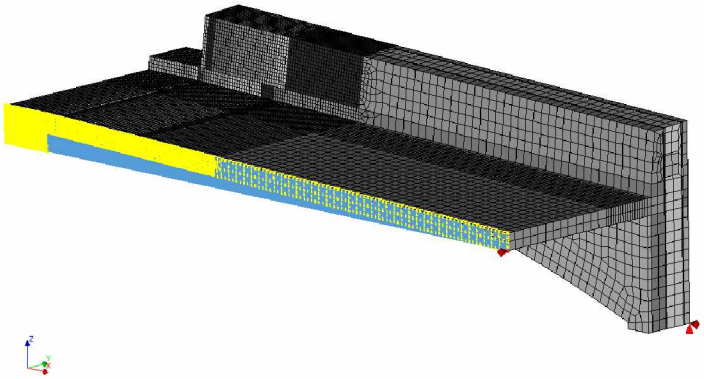


Figuur A-2 Vereenvoudigd mechanica model voor XZ-vlak

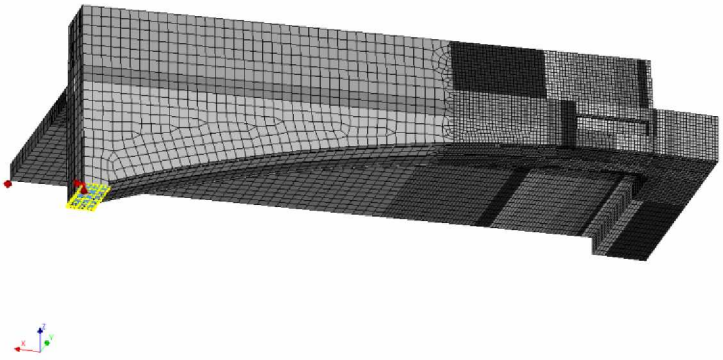
De belastingen worden gecontroleerd aan de som van de reactiekrachten. Om de som van de reactiekrachten per richting uit te lezen wordt gebruik gemaakt van tyings. Met een tying koppelt men de aangegeven vrijheidsgraden van de master en de slave knopen aan elkaar. Door enkel de master node te ondersteunen, kan men in de master node de som van de reactiekrachten uitlezen. Voor de drie hoofdrichtingen zijn tyings aangemaakt.



Figuur A-3 Tying X-richting



Figuur A-4 Tying Y-richting



Figuur A-5 Tying Z-richting

A.1.1 *Belastinggeval 1: Eigen gewicht (SW)*

Input belastinggeval:

Totale massa = 98.04 T (uitgelezen uit *.out-file)

Totale kracht = m·g = 98.04·9.81
= 961.8 kN

Resultaten overzicht:

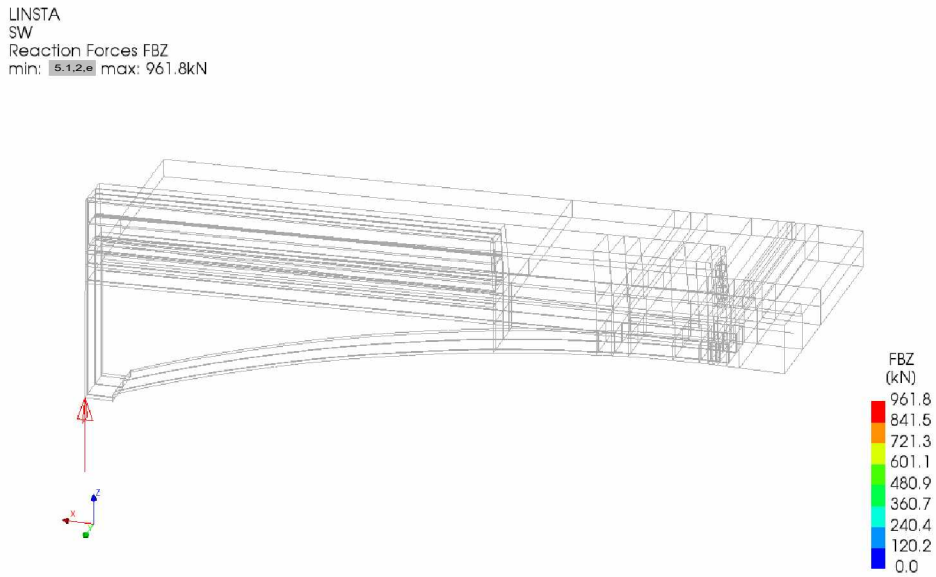
Som van de reactiekrachten:

X = 0.0 kN

Y = 0.0 kN

Z = 961.8 kN

Voldoet.



Figuur A-6 Som reactiekracht Z-richting

A.1.2 *Belastinggeval 2: Longitudinale voorspanning*

Input belastinggeval:

Voorspankracht (P) = 4125 kN per kabel

Retentie lengte (Δx) = 5 mm

Oppervlakte kabel (A) = 3217 mm^2 per kabel

Lengte per kabel (l) = 10.825m

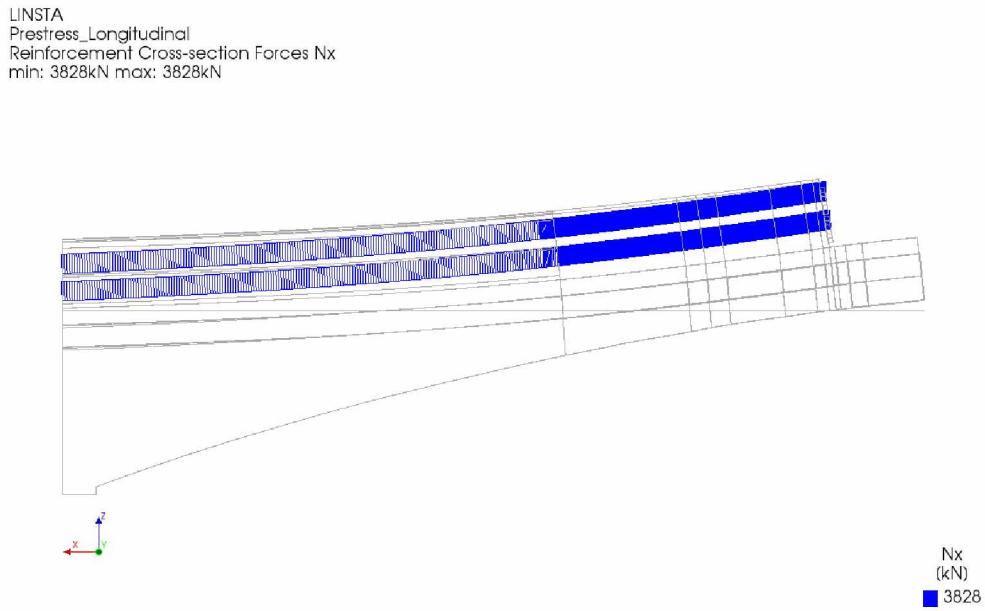
Bepaal voorspanlengte (Δl):

Δl = Pl / EA
= 4125e3·10.8e3 / 2e5·3217
= 69.4 mm

Verlies van de kabel door slip (retentie) geeft voorspanning P*:

P* = P · (1- Δx/Δl)
= 4125 · (1- 5/69.4)
= 3828 kN

Resultaten overzicht:
Som van de reactiekrachten:
X = 0.0 kN
Y = 0.0 kN
Z = 0.0 kN
Voldoet, som reactiekrachten zijn allen 0.0.



Figuur A-7 Kracht in voorspankabel

Kracht in voorspankabel, voldoet.

A.1.3 *Belastinggeval 3: Laterale voorspanning*

Input belastinggeval:

Oppervlakte = 0.308x1.374 m^2

Oppervlakte belasting = 6699.1 kN/m^2

Richting belasting = -Y

Totale belasting = 2835 kN

Resultaten overzicht:

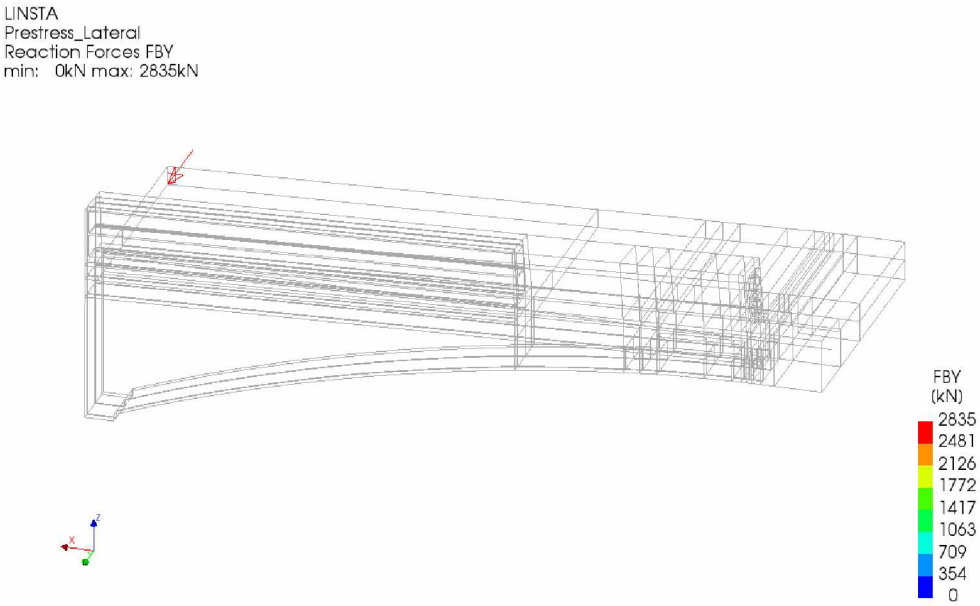
Som van de reactiekrachten:

X = 0.0 kN

Y = 2835 kN

Z = 0.0 kN

Voldoet, input gelijk aan som van de reactiekrachten



Figuur A-8 Som reactiekracht Y-richting

A.1.4 *Belastinggeval 4: Brugbelasting (BeamLoad)*

Input belastinggeval:

Belasting = 1.0 kN

Richting belasting = -Z

Resultaten overzicht:

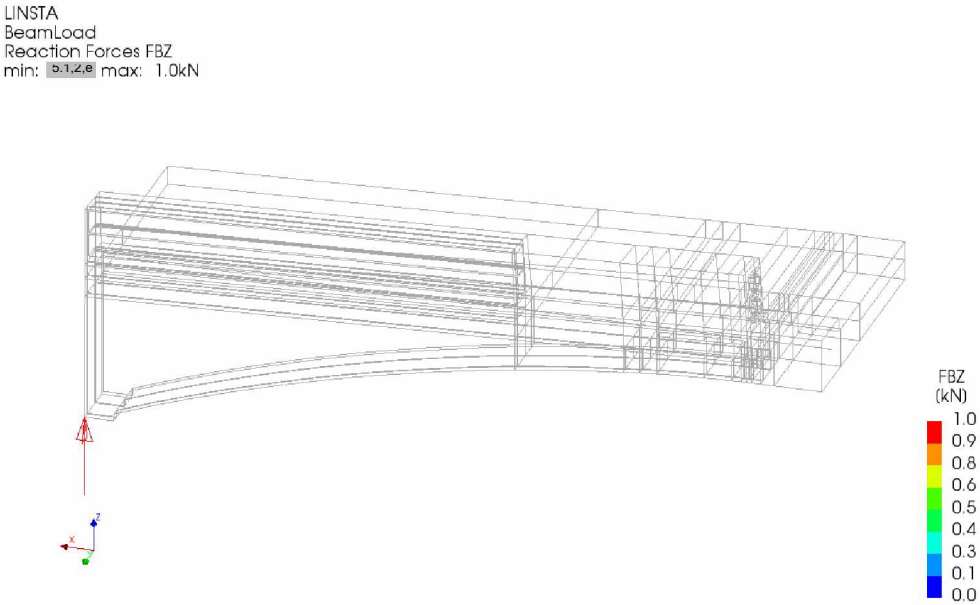
Som van de reactiekrachten:

X = 0.0 kN

Y = 0.0 kN

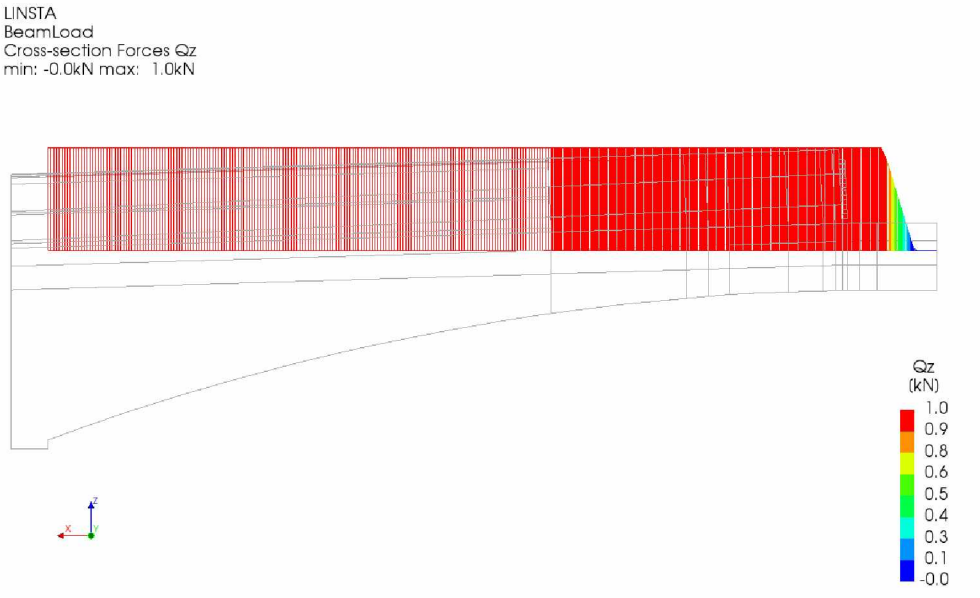
Z = 1.0 kN

Voldoet, input gelijk aan som van de reactiekrachten



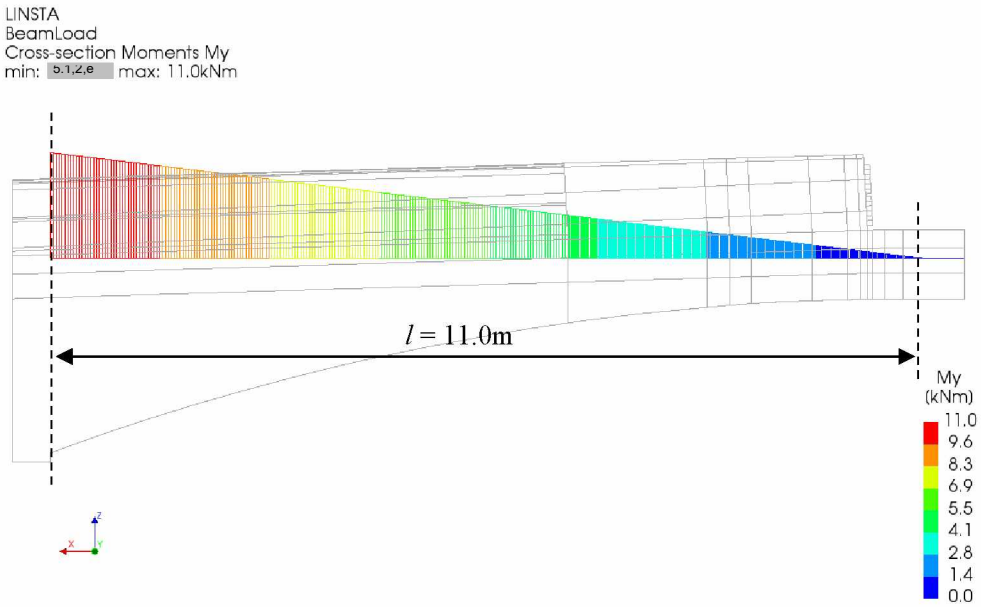
Figuur A-9 Som reactiekracht Z-richting

Toets snedekrachten:



Figuur A-10 Dwarskracht

Dwarskracht = 1.0 kN, correct



Figuur A-11 Moment

Moment = 11.0 kNm, correct

A.1.5 *Belastinggeval 5: klemkracht bovenzijde ligger*

Input belastinggeval:

Oppervlakte = 0.4508x0.4502 m^2

Oppervlakte belasting = 11333.45 kN/m^2

Richting belasting = -Z

Totale belasting = 2300 kN

Resultaten overzicht:

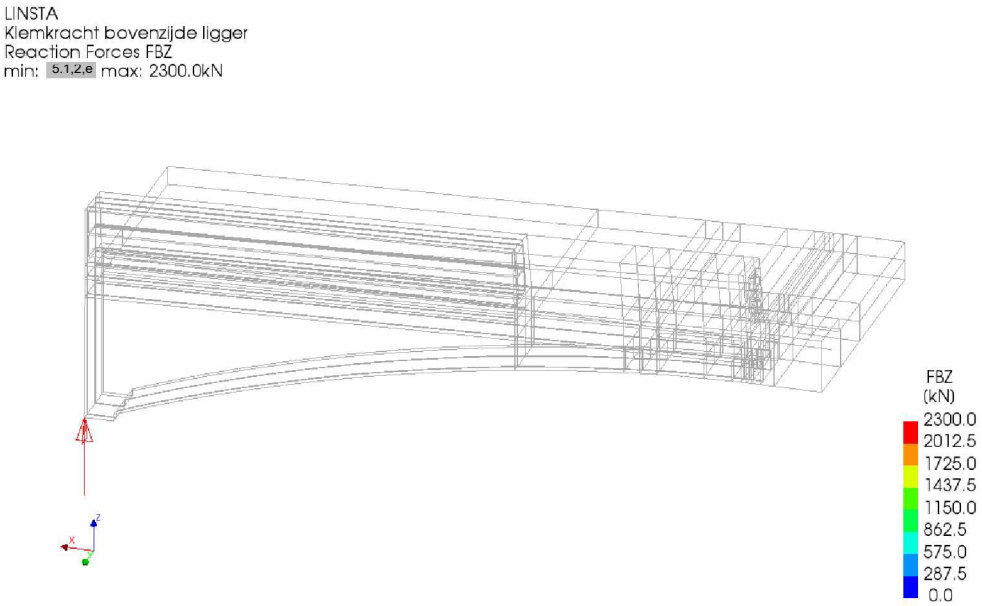
Som van de reactiekrachten:

X = 0.0 kN

Y = 0.0 kN

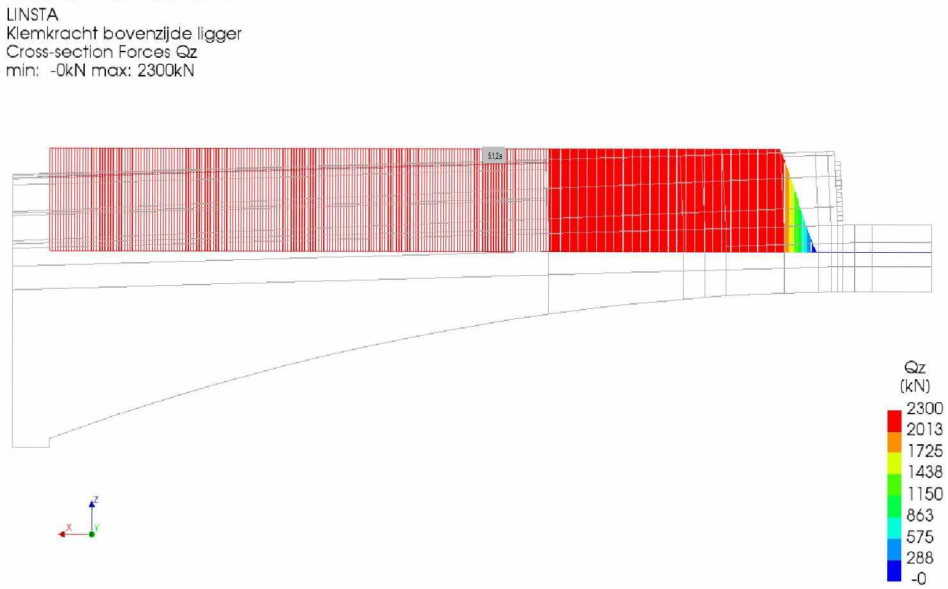
Z = 2300.0 kN

Voldoet, input gelijk aan som van de reactiekrachten



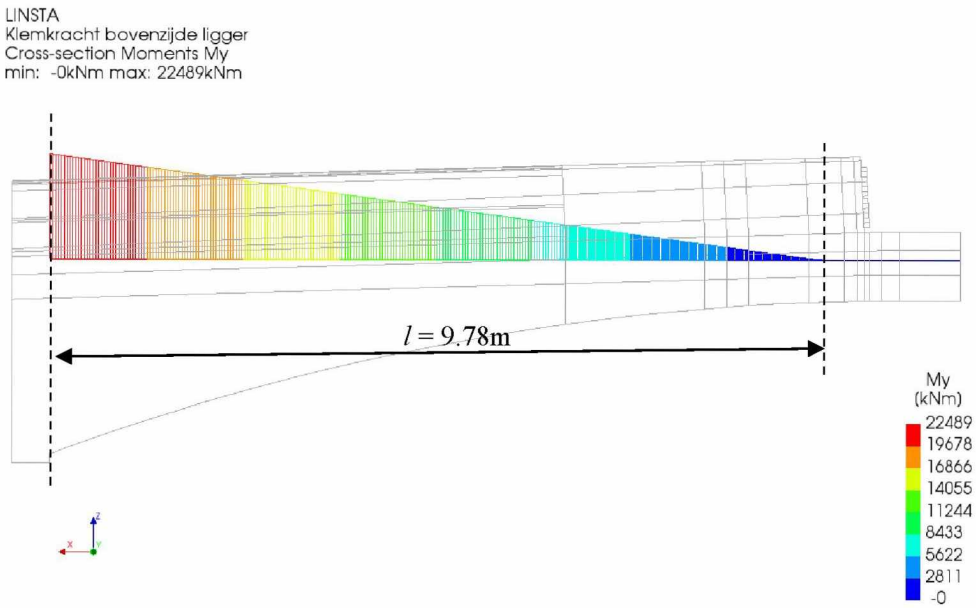
Figuur A- 12 Som reactiekracht Z-richting

Toets snedekrachten:



Figuur A-13 Dwarskracht

Dwarskracht = 2300 kN, correct



Figuur A-14 Moment

Moment = 2300·9.777 = 22487 kNm, correct (afwijking <0.1%)

A.1.6 *Belastinggeval 6: klemkracht onderzijde ligger*

Input belastinggeval:

Oppervlakte = 0.40x0.28125 m^2

Oppervlakte belasting = 6814.84 kN/m^2

Richting belasting = Z

Totale belasting = 766.7 kN

Resultaten overzicht:

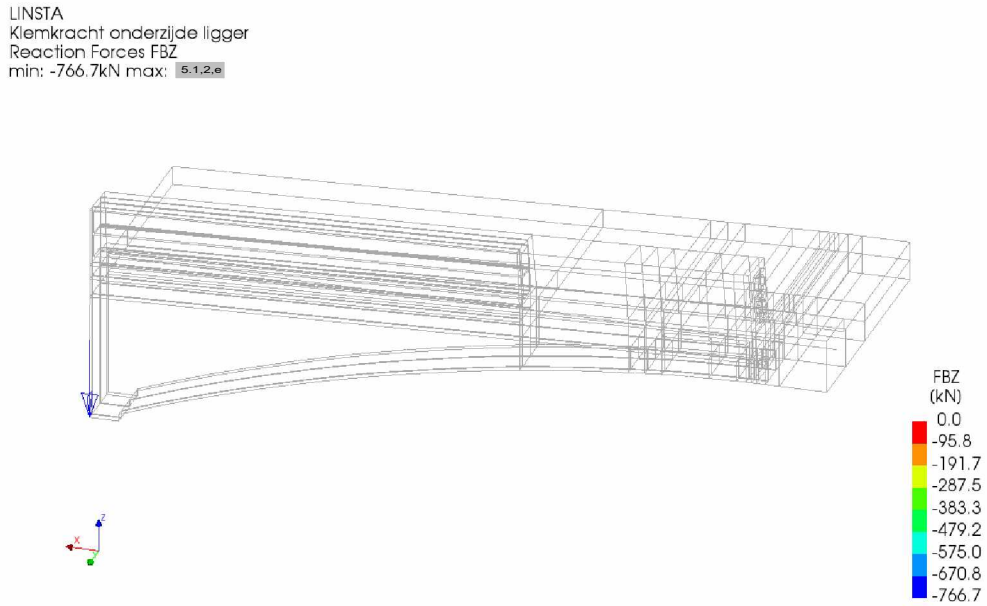
Som van de reactiekrachten:

X = 0.0 kN

Y = 0.0 kN

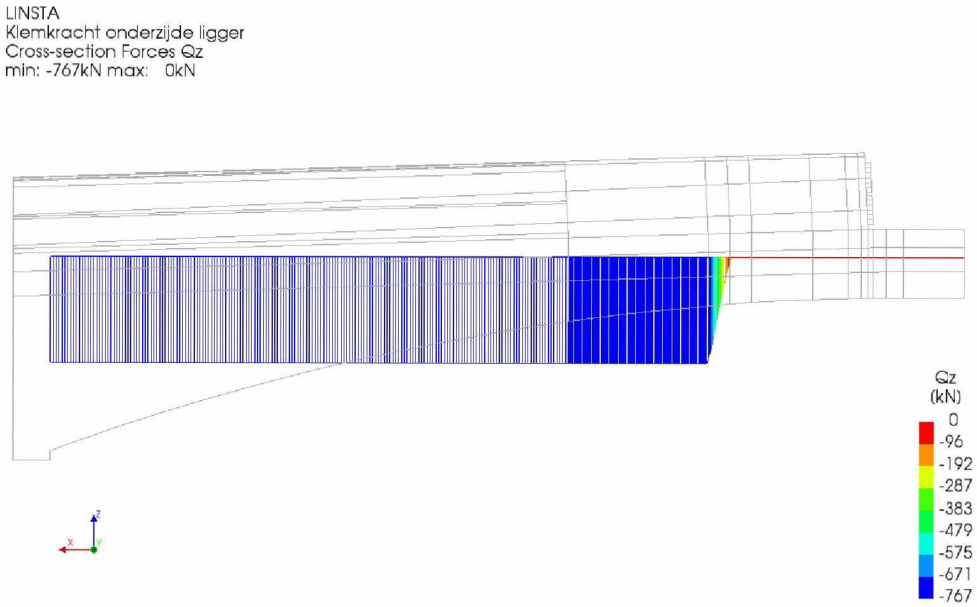
Z = 766.7 kN

Voldoet, input gelijk aan som van de reactiekrachten



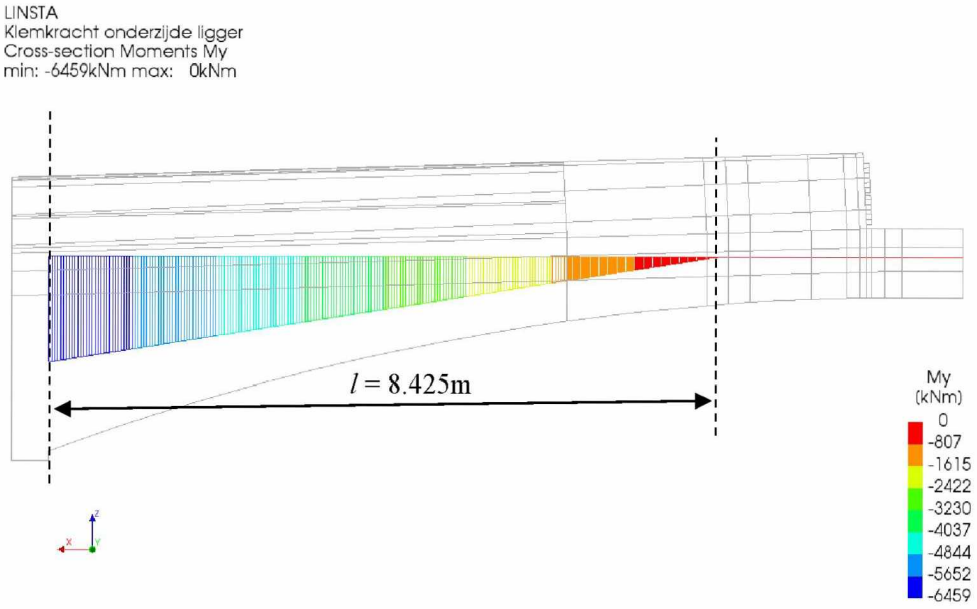
Figuur A-15 Som reactiekracht Z-richting

Toets snedekrachten:



Figuur A-16 Dwarskracht

Dwarskracht = 767 kN, correct



Figuur A-17 Moment

Moment = 767·8.425 = 6459 kNm, correct

A.1.7 *Belastinggeval 7: klemkracht onderzijde nok*

Input belastinggeval:

Oppervlakte = 0.45x0.45 m^2

Oppervlakte belasting = 7571.93 kN/m^2

Richting belasting = Z

Totale belasting = 1533.3 kN

Resultaten overzicht:

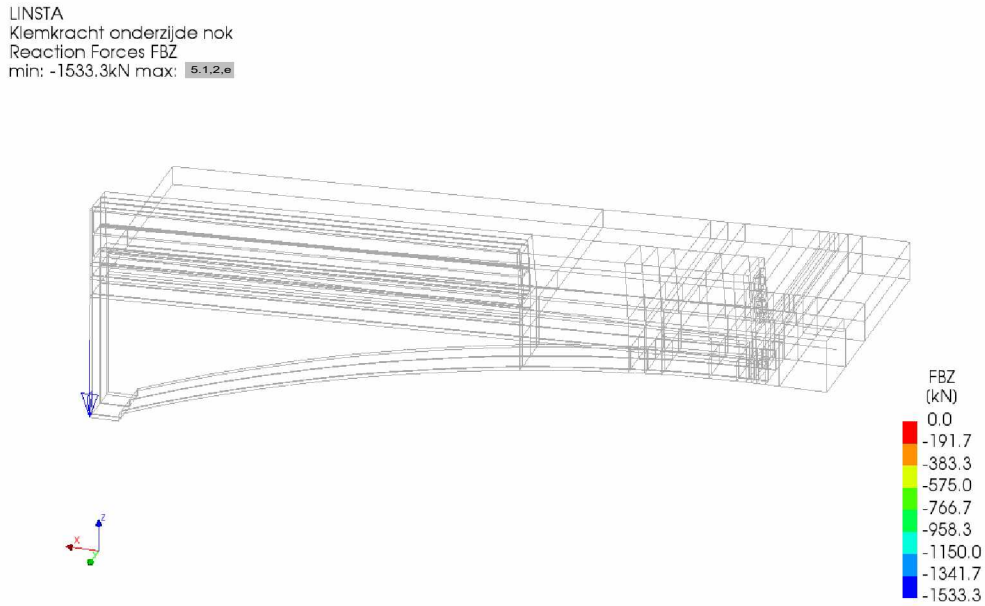
Som van de reactiekrachten:

X = 0.0 kN

Y = 0.0 kN

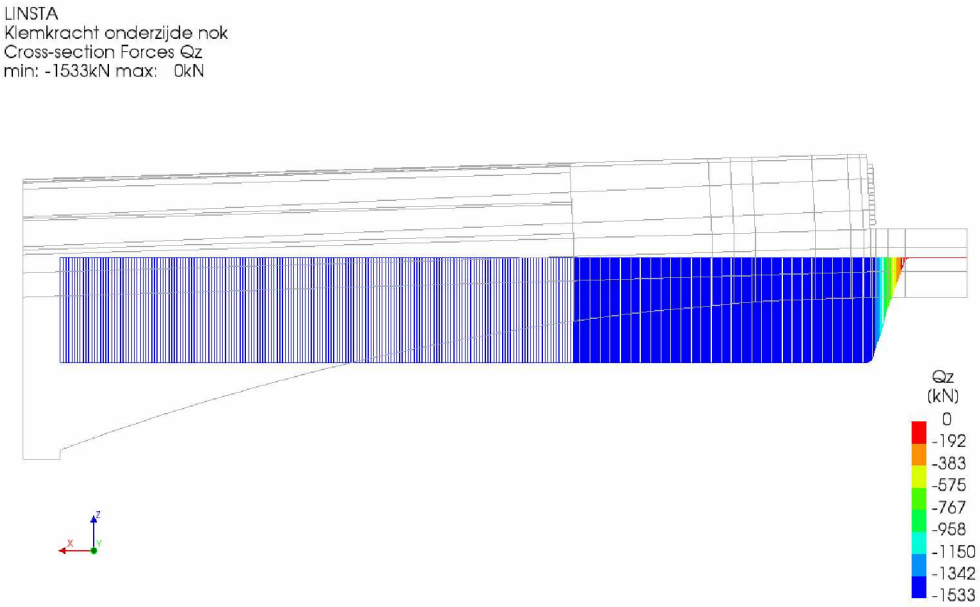
Z = 1533.3 kN

Voldoet, input gelijk aan som van de reactiekrachten



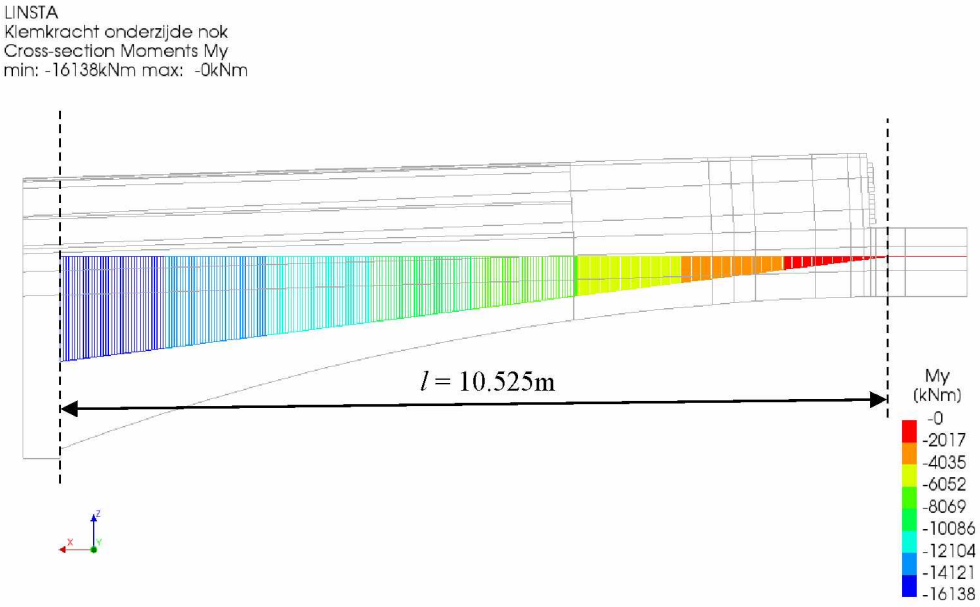
Figuur A-18 Som reactiekracht Z-richting

Toets snedekrachten:



Figuur A-19 Dwarskracht

Dwarskracht = 1533 kN, correct



Figuur A-20 Moment

Moment = 1533·10.525 = 16135 kNm, correct (afwijking <0.1%)