



## Side letter bij versterkingsoplossing met CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer)

### Inleiding

De Technische Werkgroep Breedplaatvloeren van VNconstructeurs wil bijdragen aan de verspreiding van kennis van de behandeling en oplossing van de breedplaat problematiek. Een van de middelen om dat doel te bereiken is het bestuderen en beoordelen van versterkingsoplossingen die partijen hebben uitgewerkt en uitgevoerd en deze kennis te delen met vakgenoten. De werkgroep heeft een brede samenstelling, met medewerkers van diverse ingenieurs- en onderzoeksbureaus en overheden. Uitspraken die worden gedaan in de werkgroep en in deze side letter zijn op persoonlijke titel en staan niet per definitie voor standpunten van de bedrijven en organisaties waarvoor de leden in het dagelijks leven werkzaam zijn.

Het versterken van breedplaatvloeren staat nog in de kinderschoenen. De werkgroep is zeer dankbaar dat ABT bereid is technische gegevens te delen van de versterkingsoplossing die met een FEM berekening is onderzocht. In deze side letter worden vragen en opmerkingen geplaatst bij de gedeelde technische gegevens. De werkgroep realiseert zich terdege dat de partijen die de eerste versterkingsoplossingen uitwerken, hiermee hun nek uitsteken. Deze vragen en opmerkingen zijn dan ook bedoeld als opbouwende kritiek, om te onderzoeken of de versterkingsoplossingen verder verbeterd kunnen worden.

### Beoordeling technische documenten

- Het beton voor de druklaag heeft in de berekeningen een gemiddelde kubusdruksterkte van  $36,6 \text{ N/mm}^2$ . In het rapport van Hageman is dit echter  $36,3 \text{ N/mm}^2$ . Is dit een schrijffout?
- Bij de eigenschappen van de niet-lineaire interface elementen is uitgegaan van een maximale normaaltrekspanning van  $0,5 \text{ N/mm}^2$ . Hoewel dit een ondergrens lijkt voor de hechting van twee lagen beton, geven de proeven van Hageman een ander beeld. Zonder tralieliggers kon zelfs het eigen gewicht van de breedplaat niet door aanhechting overgebracht worden naar de druklaag. De maximaal opneembare normaaltrekspanning is dus vrijwel nul. De tralieliggers spelen een essentiële rol in het overdragen van krachten/spanningen tussen de breedplaat en de druklaag.
- In de resultaten van het basismodel zijn trekspanningen in de interface te zien die niet opgenomen kunnen worden.
- In de DIANA 4-puntsbuigproef exclusief tralie zijn aan de linkerkant trekspanningen in de interface berekend, die niet opgenomen kunnen worden. Er is een afwijkend verplaatsings- en spanningsbeeld aan weerszijden van de voeg. Is dit veroorzaakt door het afwijkende bollenpatroon? De linkerkant lijkt nu af te steunen op de rechterzijde.
- De resultaten voor de DIANA 3-punts buigproef zijn nu afgeschermd. Evenals de resultaten voor de DIANA 4-punts buigproef met stripversterking. Dat is jammer, omdat zowel in paragraaf 7.8.8 als in de conclusies wel naar deze resultaten wordt verwezen. Is het opnemen van een conclusie in hoofdstuk 5 en hoofdstuk 6 een oplossing?
- Door het ontbreken van de resultaten in hoofdstuk 7 voor de krachten beschreven in paragraaf 7.8.8 is de omschrijving van de optredende onthechtingen en scheuren niet duidelijk. Het toevoegen van bijbehorende "plaatjes" zou helpen.
- Het rapport geeft nog niet de praktische randvoorwaarden weer voor het aanbrengen van een CFRP-oplossing
- De brandwerendheid is nog een nader te onderzoeken aspect.
- Het testen van deze oplossing in het laboratorium verdient aanbeveling
- De proeven van Hageman zijn uitgevoerd voor een situatie met maximaal moment ter plaatse van de voeg. Wanneer dat niet het geval is speelt de overdracht van schuifspanning tussen de breedplaat en de druklaag een grotere rol.

#### Reactie ABT

Druksterkte is  $36,6 \text{ N/mm}^2$  in het DIANA model en wijkt daarmee inderdaad iets af van de rapportage van Hageman.

Uit de resultaten blijkt dat met een hechtsterkte van  $0,5 \text{ N/mm}^2$  er al bij een geringe belasting onthechting optreedt nabij de naad. Dit is het gevolg van de hoge piekspanning aan de tip van de naad. Indien de spanning nabij de naad de  $0,5 \text{ N/mm}^2$  bereikt treedt onthechting op die zich zeer snel, als een ritssluiting, propageert in horizontale richting. Na onthechting valt de spanning terug naar nul. De tralieliggers nemen vervolgens het grootste deel van de schuifspanning op en zijn daarmee inderdaad erg belangrijk voor de capaciteit.

Lokaal kunnen iets hogere spanningen in de uitvoer voorkomen als gevolg van extrapolatie van node uitvoer naar elementuitvoer en/of als gevolg van minder goed geconvergeerde resultaten.

Het model zonder tralies heeft aan de linkerkant geen interface en kan daar niet onthechten. Aan de rechterzijde wel. Dit is initieel gedaan om het maximale verticale verplaatsingsverschil tussen linkerkant en rechterzijde te laten optreden. Dit verschil in verticale verplaatsing kan echter als gevolg van de excentrische plaatsing van de CFRP niet optreden.

De resultaten zijn om bedrijfseconomische redenen afgeschermd.

Het rapport is bedoeld als 'Proof of concept' voor lijmwapening. Lijmwapening is een oplossing die vooral de afgelopen 15 jaar veelvuldig is toegepast in Nederland. De praktische randvoorwaarden zijn daarmee niet nieuw en worden bij een 'project specifiek' model apart aangegeven. Dit houdt in dat er per project een aanvullende berekening wordt uitgevoerd.

Lijmwapening is niet brandwerend! Indien de te versterken vloer in de categorie 'Rood' valt en er direct versterking noodzakelijk is zal brandwerende bescherming van de lijmwapening nodig zijn. Indien de betreffende vloer in de categorie 'Oranje' valt is het aannemelijk dat de vloer de bijzondere belastingcombinatie brand ook zonder lijmwapening kan weerstaan. Brandwerende bescherming van de lijmwapening is dan niet nodig.

De oplossing wordt zeer waarschijnlijk in het laboratorium getest.

"Proof of concept" o.b.v. proeven Eindhoven  
FEM berekening CFRP-oplossing (publieke/openbare versie)



## Projectgegevens

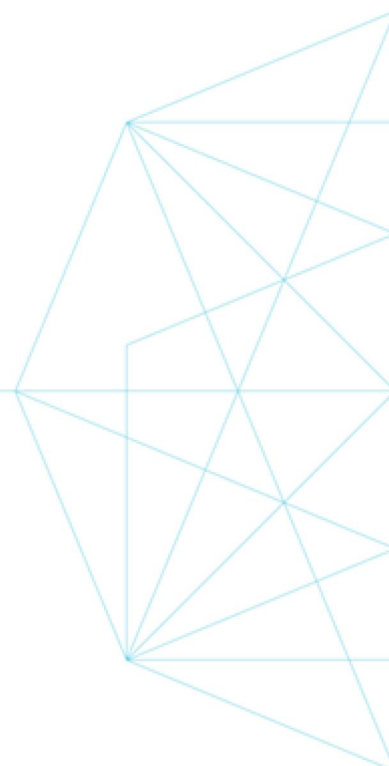
Project **"Proof of concept" o.b.v. proeven Eindhoven**

Onderdeel **FEM berekening**

Code **15654**

Datum **26 april 2018**

Eindverantwoording ABT bv  
Arnhemsestraatweg 358, 6881 NK, Velp (bezoekadres)  
Postbus 82, 6800 AB, Arnhem (postadres)





## Inhoudsopgave

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>8</b>
1.1	Beschrijving van de proefopstellingen	8
1.2	Versterkingsmethode	9
<b>2</b>	<b>Uitgangspunten</b>	<b>11</b>
2.1	Relevante documenten	11
2.2	Normen en richtlijnen	11
2.3	Materiaalgegevens	11
2.4	Gebruikte software	11
<b>3</b>	<b>DIANA 4-puntsbuigproef 3D-basismodel (VL34a)</b>	<b>12</b>
3.1	Geometrie en mesh	12
3.2	Toegepaste elementen	14
3.3	Toegepaste materiaal eigenschappen	15
3.3.1	Beton	15
3.3.2	Wapeningsstaal	16
3.4	Toegepaste interface eigenschappen	17
3.4.1	Eigenschappen lineaire interface elementen	17
3.4.2	Eigenschappen niet-lineaire interface elementen	17
3.5	Toegepaste randvoorwaarden	18
3.6	Toegepaste belastingen	19
3.6.1	BG1 - eigen gewicht	19
3.6.2	BG2 - puntlasten	19
3.7	Analyse instellingen	20
3.7.1	Belastingschema	20
3.7.2	Iteratiemethode en convergentiecriteria	20
3.8	Resultaten basismodel	21
3.8.1	Verplaatsingen	21
3.8.2	Normaalspanningen interface	22
3.8.3	Relatieve verplaatsingen normaal richting interface	24
3.8.4	Schuifspanningen interface	26
3.8.5	Staalspanningen wapening	29
3.8.6	Staalrekken wapening	30
3.8.7	Scheurvorming	31
3.8.8	Last-zakkingsdiagram en beoordeling van de resultaten	33
<b>4</b>	<b>DIANA 4-puntsbuigproef 3D-basismodel excl. tralie</b>	<b>34</b>
4.1	Geometrie en mesh	34
4.2	Resultaten basismodel excl. tralie	35
4.2.1	Verplaatsingen	35
4.2.2	Normaalspanningen interface	35
4.2.3	Relatieve verplaatsingen normaal richting interface	36
4.2.4	Schuifspanningen interface	36
4.2.5	Staalspanningen wapening	37
4.2.6	Scheurvorming	37
4.2.7	Last-zakkingsdiagram en beoordeling van de resultaten	38
<b>5</b>	<b>DIANA 3-puntsbuigproef 3D-model (LAM34)</b>	<b>39</b>
5.1	Geometrie en mesh	39
5.2	Toegepaste elementen	40
5.3	Toegepaste materiaal eigenschappen	41
5.4	Toegepaste interface eigenschappen	42
5.5	Toegepaste randvoorwaarden	42

5.6	Toegepaste belastingen	43
5.6.1	BG1 - eigen gewicht	43
5.6.2	BG2 - verplaatsing bovenkant midden proefstuk	43
5.7	Analyse instellingen	44
5.7.1	Belastingschema	44
5.7.2	Iteratiemethode en convergentiecriteria	44
5.8	Resultaten 3-puntsbuigproef model	45
5.8.1	Verplaatsingen	45
5.8.2	Normaalspanningen interface	47
5.8.3	Relatieve verplaatsingen normaal richting interface	49
5.8.4	Schuifspanningen interface	51
5.8.5	Staalspanning breedplaat wapening	53
5.8.6	Staalspanning tralie liggers	55
5.8.7	Scheurvorming	57
5.8.8	Last-zakkingsdiagram en beoordeling van de resultaten	59
<b>6</b>	<b>DIANA 4-puntsbuigproef 3D-model met CFRP strips versterking</b>	<b>60</b>
6.1	Geometrie en mesh	60
6.2	Toegepaste elementen	60
6.3	Toegepaste materiaal eigenschappen	60
6.4	Toegepaste interface eigenschappen	61
6.5	Toegepaste randvoorwaarden	61
6.6	Toegepaste belastingen	61
6.7	Analyse instellingen	61
6.7.1	Belastingschema	61
6.7.2	Iteratiemethode en convergentiecriteria	61
6.8	Resultaten 4-puntsbuigproef model met CFRP strips versterking	62
6.8.1	Verplaatsingen	62
6.8.2	Normaalspanningen interface	63
6.8.3	Relatieve verplaatsingen normaal richting interface	64
6.8.4	Schuifspanningen interface	65
6.8.5	Staalspanningen wapening	66
6.8.6	Scheurvorming	67
6.8.7	Kracht in de CFRP strips	68
6.8.8	Last-zakkingsdiagram en beoordeling van de resultaten	69
<b>7</b>	<b>DIANA 4-puntsbuigproef 3D-model met CFRP lamel versterking</b>	<b>70</b>
7.1	Geometrie en mesh	70
7.2	Toegepaste elementen	71
7.3	Toegepaste materiaal eigenschappen	71
7.4	Toegepaste interface eigenschappen	71
7.4.1	Eigenschappen lineaire interface elementen voor de lijm	71
7.4.2	Eigenschappen niet-lineaire interface elementen voor de lijm	71
7.5	Toegepaste randvoorwaarden	71
7.6	Toegepaste belastingen	71
7.7	Analyse instellingen	72
7.7.1	Belastingschema	72
7.7.2	Iteratiemethode en convergentiecriteria	72
7.8	Resultaten 4-puntsbuigproef model met CFRP lamel versterking	73
7.8.1	Verplaatsingen	73
7.8.2	Normaalspanningen interface	74
7.8.3	Relatieve verplaatsingen normaal richting interface	75
7.8.4	Schuifspanningen interface	76
7.8.5	Staalspanningen wapening	77
7.8.6	Scheurvorming	78
7.8.7	Kracht in de CFRP	79
7.8.8	Last-zakkingsdiagram en beoordeling van de resultaten	80



---

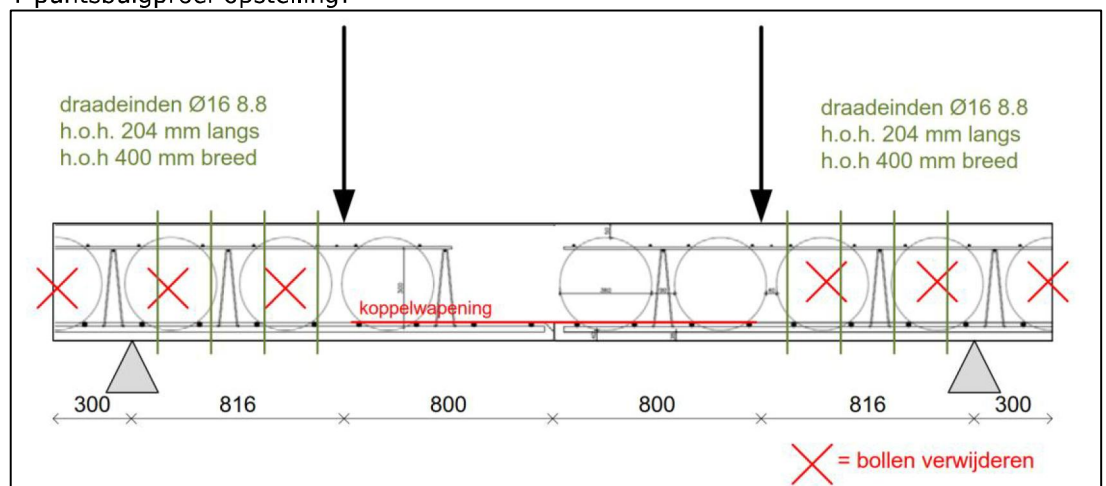
<b>8</b>	<b>DIANA 4-puntsbuigproef 2D model met CFRP versterking</b>	<b>82</b>
8.1	Beschrijving van het 2D model	82
8.2	Resultaten 4-puntsbuigproef 2D model met CFRP versterking	83
<b>9</b>	<b>Conclusies</b>	<b>84</b>
<b>Bijlage 1</b>	<b>Toelichting Shima bondslip functie</b>	<b>85</b>

**1 Inleiding**

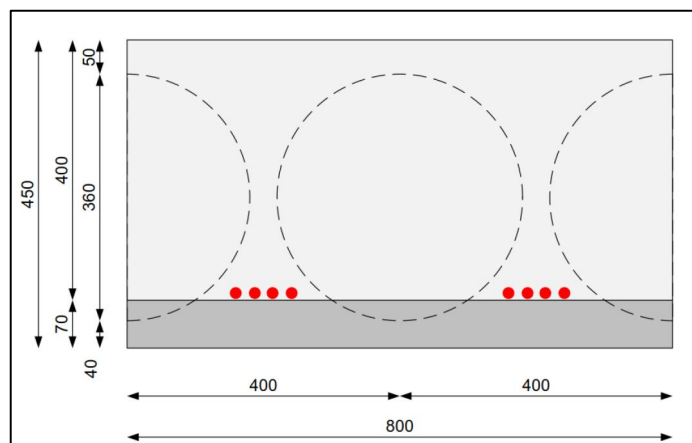
Naar aanleiding van de ingestorte / bezweken parkeergarage op Eindhoven Airport zijn door adviesbureau Hageman en TNO onderzoeken uitgevoerd naar de oorzaak van de instorting. De resultaten van het onderzoek zijn gepubliceerd in [Ref. 01], [Ref. 02] en [Ref. 03]. Onderdeel van het onderzoek zijn testen op proefstukken uitgevoerd aan de TU Eindhoven. De proeven betreffen 4-puntsbuigproeven en 3-puntsbuigproeven. Specifieke beschrijvingen van de proeven zijn gepubliceerd in [Ref. 02]. Hieronder worden de meest relevante figuren van de proefopstellingen weergegeven.

**1.1 Beschrijving van de proefopstellingen**

4-puntsbuigproef opstelling:

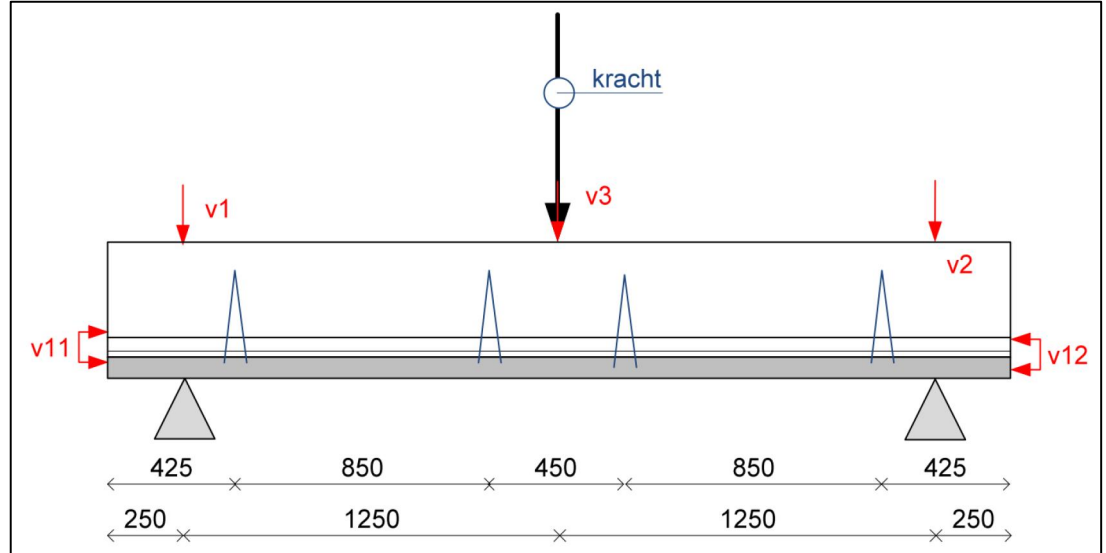


Figuur 1: Opstelling 4-puntsbuigproef proefstuk

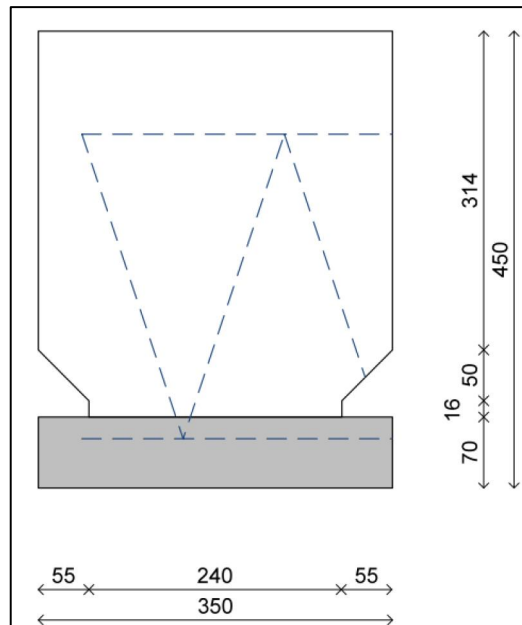


Figuur 2: Doorsnede 4-puntsbuigproef proefstuk

3-puntsbuigproef opstelling:



Figuur 3: Opstelling 3-puntsbuigproef



Figuur 4: Doorsnede 3-puntsbuigproef proefstuk

1.2

Versterkingsmethode

Door ABT is een versterkingsmethode ontwikkeld voor vloerconstructies met overeenkomstige naad details. Deze methode bestaat uit het doorkoppelen van de hoofdwapening in de prefab schil door middel van CFRP (*carbon fiber reinforced polymer*) lamellen. Voordeel is dat het gladde hechtvlak, nodig om de originele koppelwapening te mobiliseren, vermeden wordt. Om een goede onderbouwing te verkrijgen van de versterkingsmethode zijn een aantal DIANA berekeningen uitgevoerd. Hierbij zijn de testen van de TU Eindhoven als basis gebruikt voor de DIANA modellen. Specifiek is gekozen voor proefstuk VL34a (4-puntsbuigproef) en voor proefstuk LAM34 (3-puntsbuigproef) om de DIANA modellen te valideren.

De uiteindelijk doorgerekende varianten zijn als volgt:

- 4-puntsbuigproef 3D-basismodel (VL34a)
- 4-puntsbuigproef 3D-basismodel excl. tralie
- 3-puntsbuigproef 3D-model (LAM34)
- 4-puntsbuigproef 3D-model met CFRP strips versterking
- 4-puntsbuigproef 3D-model met CFRP lamel versterking
- 4-puntsbuigproef 2D-model met CFRP lamel versterking

Deze DIANA modellen zijn apart doorgerekend en hebben geleid tot een goed begrip van het bezwijkmechanisme bij zowel de onversterkte als de versterkte variëte. In deze notitie worden de resultaten toegelicht en wordt het versterkingsprincipe onderbouwd. Dit betreft een algemene onderbouwing en kan gezien worden als "*proof of concept*". Voor specifieke projecten zijn aanvullende project specifieke berekeningen noodzakelijk.

- Voorliggend rapport betreft een, vanuit commerciële overwegingen, uitgekilde versie van de oorspronkelijke uitgave.
- De volledige versie is op aanvraag bij ABT B.V. beschikbaar.
- Aan deze uitgave kunnen geen rechten worden ontleend.
- Deze uitgave blijft het intellectuele eigendom van ABT B.V.

## 2 Uitgangspunten

### 2.1 Relevante documenten

Ref. nr.	document	datum
[Ref. 01]	Rapport 9663-1-0 - Bezwijken parkeergarage Eindhoven Airport: Analyse naar de oorzaak - Adviesbureau Hageman B.V.	25-09-2017
[Ref. 02]	Bijlagen bij Rapport 9663-1-0	25-09-2017
[Ref. 03]	Rapport 2017 R11127 - Onderzoek naar de technische oorzaak van de gedeeltelijke instorting van de in aanbouw zijnde parkeergarage P1 Eindhoven Airport - TNO	22-09-2017

### 2.2 Normen en richtlijnen

- Eurocode 2: betonconstructies NEN-EN 1992-1-1
- CEB-FIB Modelcode 2010
- Guidelines for Non Linear Finite Element Analysis of Concrete Structures 2.1 RTD:1016-1:2017

### 2.3 Materiaalgegevens

Materialen bij 4-puntsbuigproef (VL34a)

- Beton druklaag:  $f_{cm;cube} = 36,6 \text{ N/mm}^2$
- Beton prefab schil (zelfverdichtend): C45/55
- Wapeningsstaal: B500B

Materialen bij 3-puntsbuigproef (LAM34)

- Beton druklaag:  $f_{cm;cube} = 37,5 \text{ N/mm}^2$
- Beton prefab schil (zelfverdichtend): C45/55
- Wapeningsstaal: B500B

Materialen t.b.v. versterking:

- Lijm CFRP met  $E = 5000 \text{ N/mm}^2$  en  $G = 2083 \text{ N/mm}^2$
- CFRP lamel met  $E = 170.000 \text{ N/mm}^2$

### 2.4 Gebruikte software

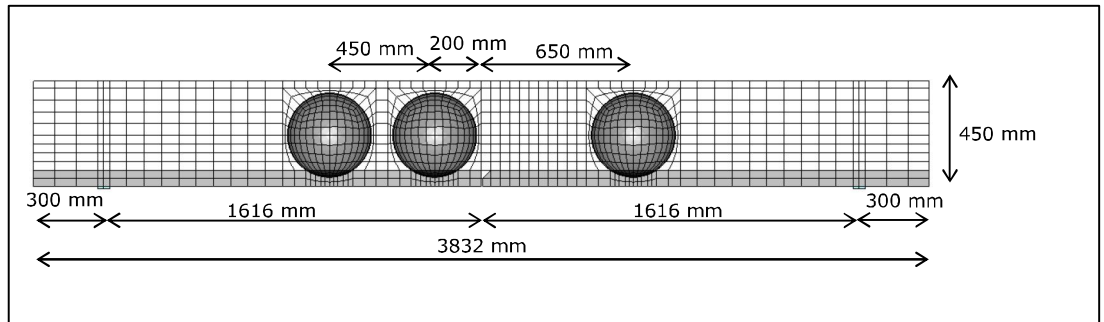
- Voor de berekening is gebruik gemaakt van het eindige elementen programma DIANA versie 10.2

**3 DIANA 4-puntsbuigproef 3D-basismodel (VL34a)**

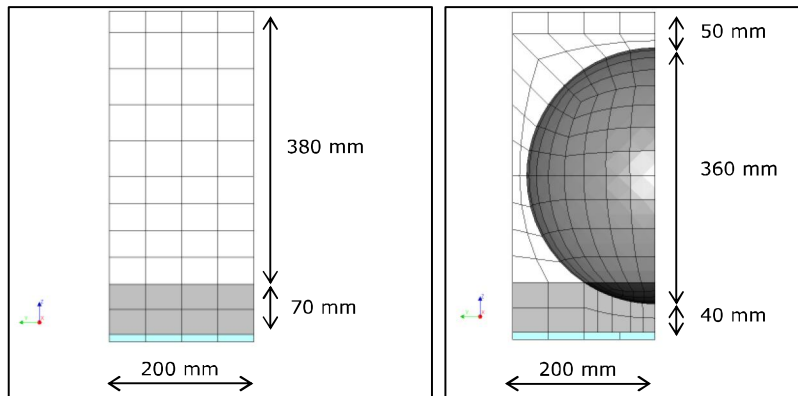
3.1

*Geometrie en mesh*

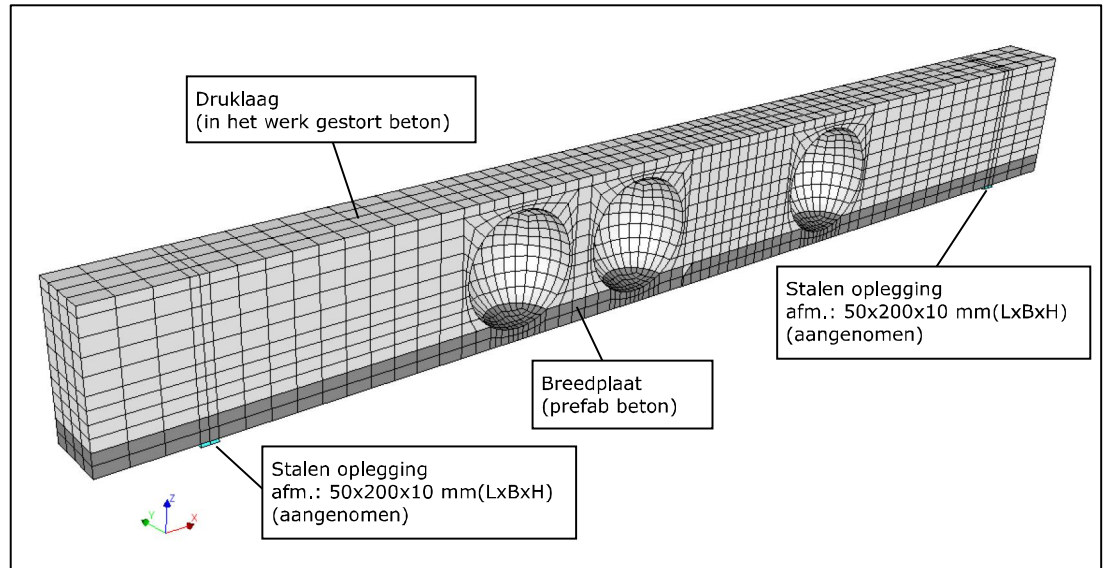
Geometrie van het model is gebaseerd op de beschikbare gegevens van de proefopstelling, uitgangspunt is de geometrie van het proefstuk VL34a. In verband met kortere rekentijd is slechts een kwart van de constructie in langsricting gemodelleerd, zodoende bevinden zich in het model 3 halve bollen. In onderstaande figuren is de geometrie van het DIANA model weergegeven.



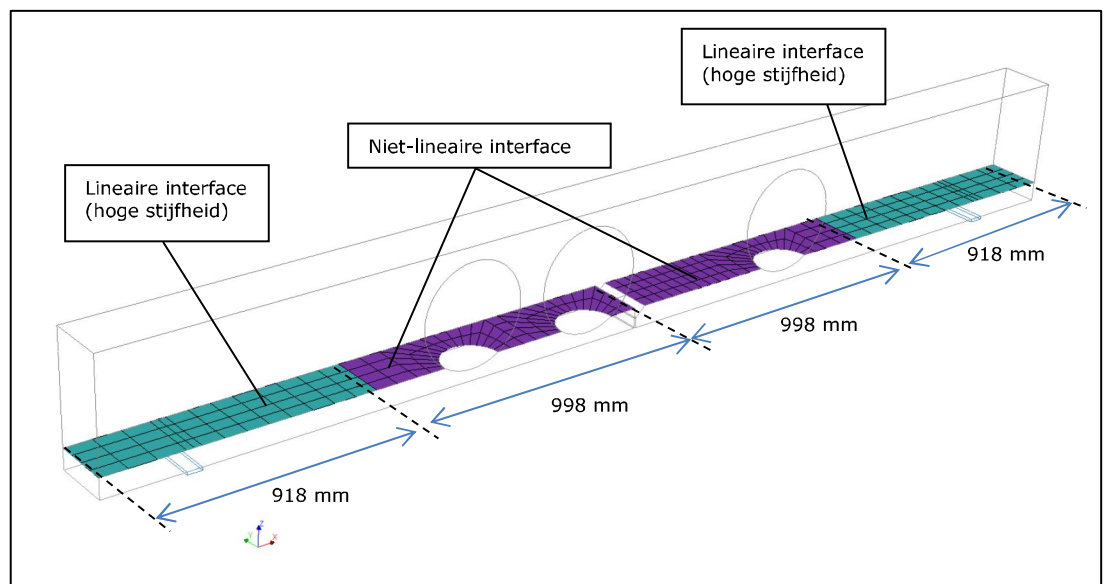
Figuur 5: vooraanzicht DIANA model



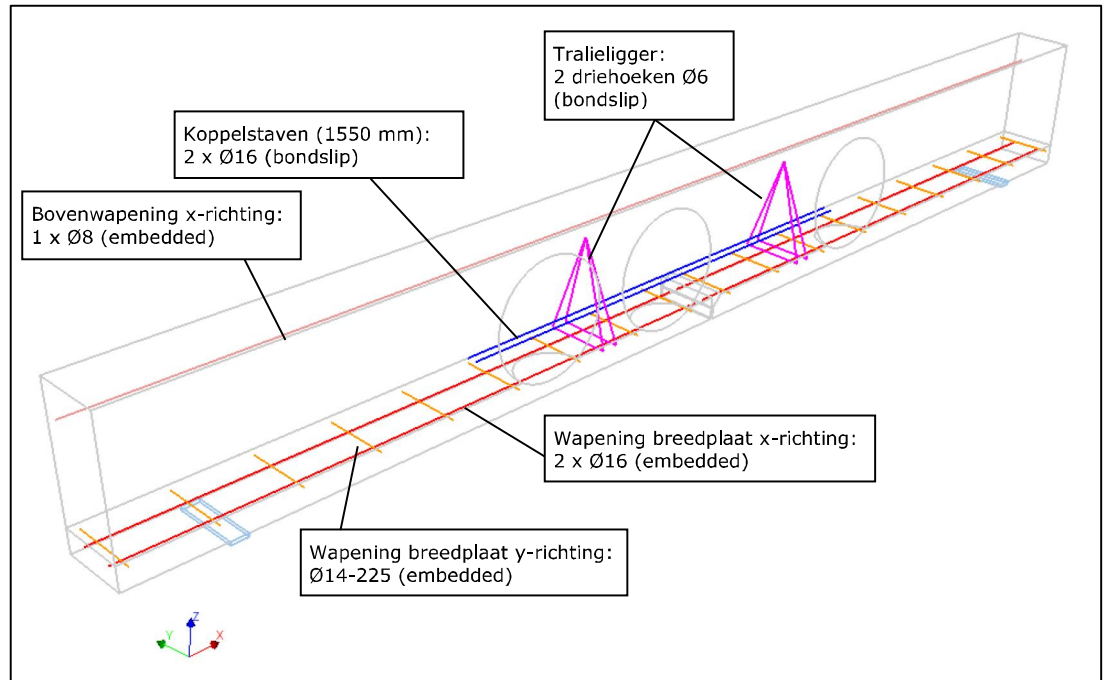
Figuur 6: dwarsdoorsnede massief deel en dwarsdoorsnede t.p.v. bol



Figuur 7: overzicht DIANA model in 3d



Figuur 8: interface elementen



Figuur 9: wapening in het model

3.2

*Toegepaste elementen*

In het model worden kwadratische volume elementen en interface elementen toegepast. In volgende tabel zijn deze type elementen weergegeven.

Tabel 1: toegepaste type elementen

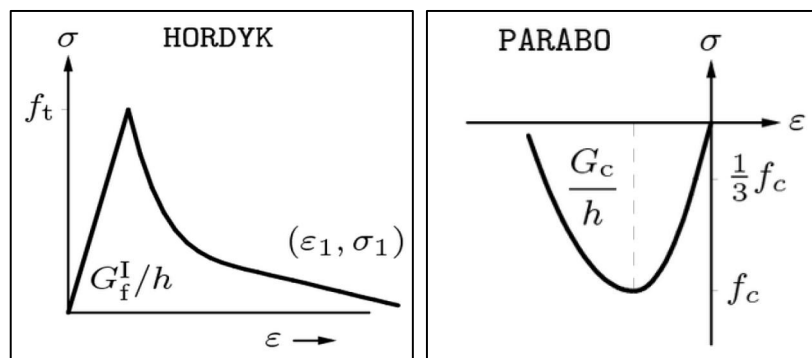
<p>CHX60 volume elementen, 20 knoops</p>	<p>CQ48I plane interface elementen, 8+8 knoops</p>



### 3.3 Toegepaste materiaal eigenschappen

#### 3.3.1 Beton

Normaliter wordt er in constructieve berekeningen gerekend met sterk gereduceerde materiaal parameters (methode van de partiële factoren), echter zou dit voor dit soort niet-lineaire berekeningen kunnen leiden tot sterkte afwijkingen in de respons van de constructie, oftewel het bezwijkmechanisme (zie ook paragraaf 4.2.2. van de RTD:1016-2017). Aangezien het DIANA model gevalideerd dient te worden aan de "echte" proeven moeten de materiaal parameters zo realistisch mogelijk overeenkomen. Voor het beton worden zodoende niet-lineaire materiaal eigenschappen toegekend op basis van gemiddelde waarden. Het beton kan daarbij scheuren volgens het uitgesmeerde scheurconcept ("smeared cracking"). Er wordt daarbij een zogenaamd "total strain rotating crack" model toegepast met een Hordijk curve voor het nascheur gedrag. Zodra optredende spanningen de treksterkte bereiken ontstaat een scheur waarbij de spanning niet direct terug valt naar nul maar wel snel afneemt. Voor het gedrag onder druk is een parabolisch spanning-rek diagram toegepast. Dit alles is conform de aanbeveling uit de RTD:1016-1:2017. In onderstaande figuren zijn deze diagrammen weergegeven.



Figuur 10: Hordijk curve voor beton onder trek en parabolisch diagram

In onderstaande tabel zijn de specifieke waarden voor de toegepaste materiaal eigenschappen voor het beton weergegeven. Deze zijn gebaseerd op gemiddelde waarden afkomstig van het materiaal onderzoek uitgevoerd aan de TU Eindhoven en gepubliceerd in de rapportage van Hageman, zie [Ref. 01] en [Ref. 02].

Tabel 2: toegepaste eigenschappen voor het beton in basismodel

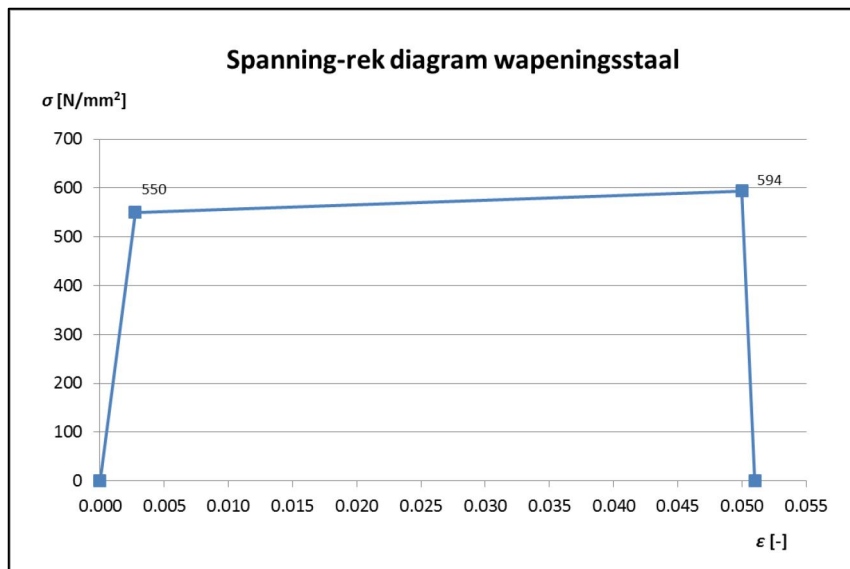
Eigenschap	Druklaag (gebaseerd op $f_{cm,cube} = 36,6 \text{ N/mm}^2$ )	Prefab schil (gebaseerd op C45/55)
Material class	Concrete and masonry	Concrete and masonry
Material model	Total strain based crack model	Total strain based crack model
Young's modulus	31500 N/mm <sup>2</sup>	37500 N/mm <sup>2</sup>
Poisson's ratio	0.15	0.15
Mass density	2500 kg/m <sup>3</sup>	2500 kg/m <sup>3</sup>
Crack orientation	Rotating	Rotating
Tensile curve	Hordijk	Hordijk
Tensile strength	2.5 N/mm <sup>2</sup>	3.8 N/mm <sup>2</sup>
Mode-I tensile fracture energy	0.136 N/mm	0.149 N/mm
Crack bandwidth specification	Rots	Rots
Reduction model	Damage based	Damage based
Compression curve	Parabolic	Parabolic
Compressive strength	31.6 N/mm <sup>2</sup>	53 N/mm <sup>2</sup>
Compressive fracture energy	34 N/mm	37.3 N/mm
Reduction model	Vecchio and Collins 1993	Vecchio and Collins 1993
Lower bound reduction curve	0.4	0.4
Confinement model	No increase	No increase

3.3.2

*Wapeningsstaal*

Wapeningsstaal wordt tevens met niet-lineaire materiaal eigenschappen gebaseerd op gemiddelde waarden gemodelleerd:

- $E_s = 200.000 \text{ N/mm}^2$
- $f_{ym} = f_{yk} \times 1,1 = 500 \times 1,1 = 550 \text{ N/mm}^2$  bij een rek  $\epsilon = 0,00275$
- $f_{tm} = f_{ym} \times k = 550 \times 1,08 = 594 \text{ N/mm}^2$  bij een rek van  $\epsilon = 0,050$
- Voor de tralies en koppelstaven is een *Shima bondslip function* ingeschakeld, dit houdt in dat de wapeningselementjes zich kunnen verplaatsen (slippen) t.o.v. de beton elementjes waarin ze zich bevinden. Tevens bevatten deze elementjes buigstijfheid waardoor de uvelwerking kan optreden.



Figuur 11: toegepast spanning-rek diagram voor niet-lineair wapeningsstaal

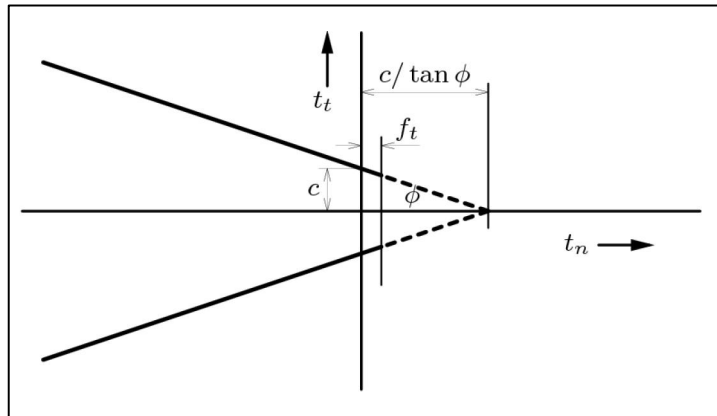
3.4 Toegepaste interface eigenschappen

3.4.1 Eigenschappen lineaire interface elementen

- $k_{\text{normaal}} = 60000 \text{ N/mm}^3$
- $k_{\text{schuif}} = 6000 \text{ N/mm}^3$

3.4.2 Eigenschappen niet-lineaire interface elementen

Voor de interface van het basismodel wordt een zogenaamd coulomb-frictie model toegepast. Dit houdt in dat de maximaal opneembare schuifspanning afhankelijk is van de optredende normaalspanning. Deze afhankelijkheid wordt onder andere bepaald door de cohesie en de wrijvingshoek. Tevens wordt de maximaal opneembare normaal trekspanning afgetopt op een bepaalde treksterkte  $f_t$ , welke gelijk gekozen is als de cohesie (aanname). Als de optredende normaalspanning deze waarde bereikt zal er een "gap" (opening) ontstaan en kunnen er geen trekspanningen meer worden overgedragen. Hieronder wordt het coulomb-frictie diagram weergegeven met daarbij de ingevoerde waarden.



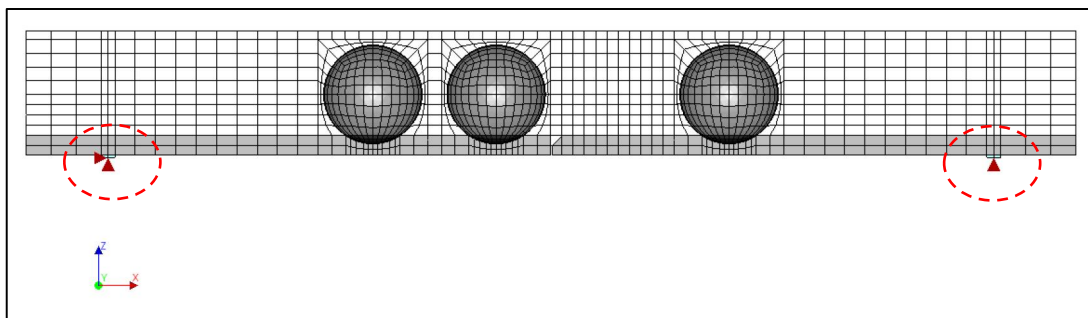
Figuur 12: coulomb frictie model

- Aangehouden ruwheidsclassificatie: glad
- Aangehouden cohesie:  $c = 0,5 \text{ N/mm}^2$  (o.b.v.  $0,2 \times f_{\text{ctm;druklaag}}$ )
- Wrijvingscoëfficiënt:  $\mu = 0,6$  (EC2 art. 6.2.5)  $\Rightarrow$  wrijvingshoek:  $\phi = 31^\circ$
- Maximale normaal trekspanning:  $f_t = 0,5 \text{ N/mm}^2$
- $k_{\text{normaal}} = 60000 \text{ N/mm}^3$
- $k_{\text{schuif}} = 6000 \text{ N/mm}^3$

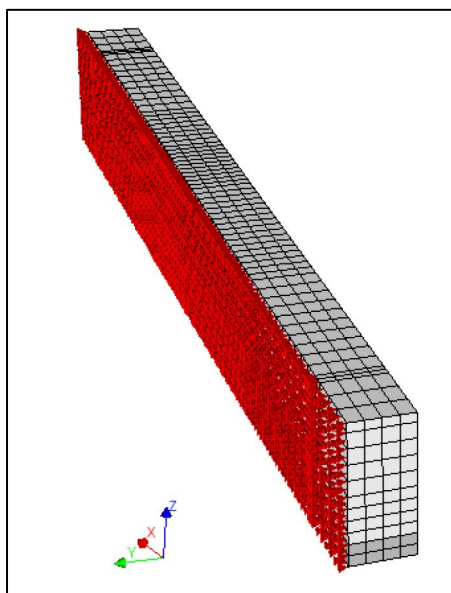
3.5

*Toegepaste randvoorwaarden*

De vloerstrook is vrij opgelegd. Als randvoorwaarde worden zodoende aan de linkerkant de middelste knopen van de onderkant van de oplegging in verticale en horizontale richting verhinderd. Aan de rechterkant alleen in verticale richting. De opleggingen kunnen verder vrij roteren. Bovendien zijn de knopen op het symmetrie vlak in dwarsrichting verhinderd. In onderstaande figuren zijn de toegepaste randvoorwaarden in het model weergegeven.



Figuur 13: randvoorwaarden opleggingen



Figuur 14: randvoorwaarden symmetrievlak

3.6 *Toegepaste belastingen*

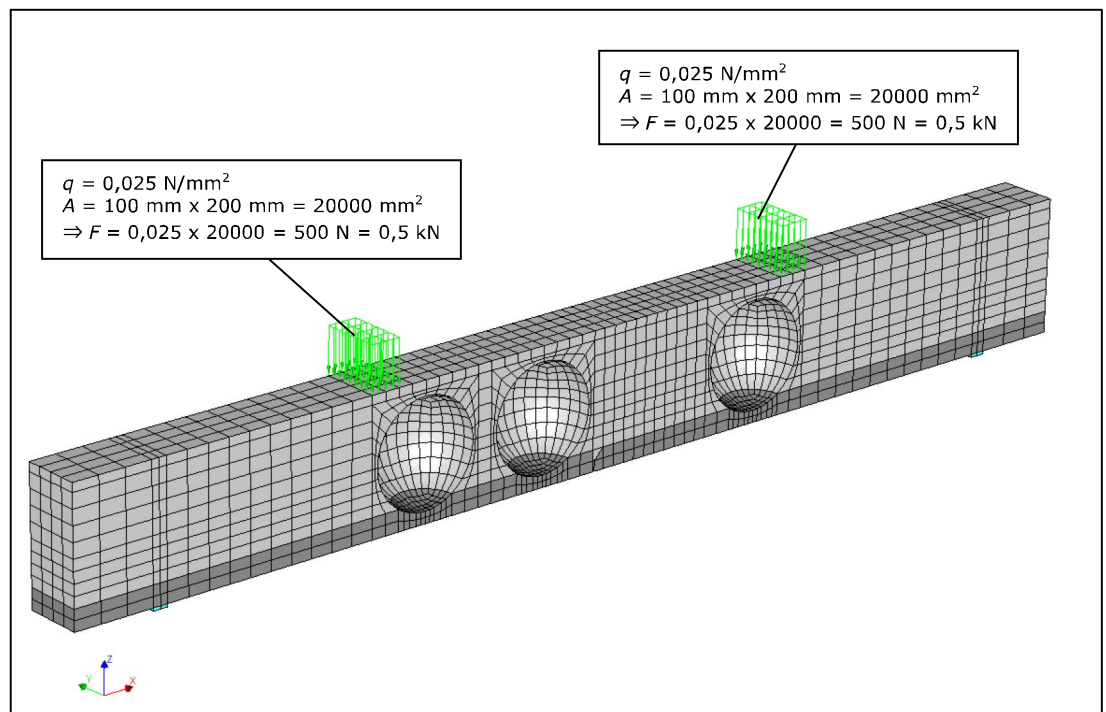
3.6.1 *BG1 - eigen gewicht*

Eigen gewicht wordt automatisch meegenomen door het programma door het invoeren van de dichtheid van de toegepaste materialen (zie 3.3) en het specificeren van de gravitatie versnelling:

- $g = 10 \text{ m/s}^2$

3.6.2 *BG2 - puntlasten*

De puntlasten worden elk aangebracht als een gelijkmatig verdeelde belasting van  $0,025 \text{ N/mm}^2$  op een oppervlakte van  $100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ . Een loadfactor van  $1,0$  correspondeert dan met een puntlast van  $0,5 \text{ kN}$  in het model en een puntlast van  $2 \text{ kN}$  uit de proef. De positie van de puntlasten is conform de proefopstelling.



Figuur 15: BG2 – puntlasten

## 3.7

*Analyse instellingen*

De analyse betreft een kracht gestuurde fysisch en geometrisch niet-lineaire structurele berekening waarbij de belasting in stappen wordt aangebracht. In deze paragraaf wordt beschreven welke stapgroottes worden toegepast met welke iteratie methode en convergentie criteria.

## 3.7.1

*Belastingschema*

In onderstaande tabel wordt het toegepaste belastingschema weergegeven met bijbehorende stapgroottes.

*Tabel 3: toegepast belastingschema basismodel*

	<b>Belastinggeval</b>	<b>Stapgroottes</b>	<b>Belastingfactor</b>
1	BG1: eigengewicht	0,5 (x 2)	1
2	BG2: puntlasten	1,0 (x 5) 0,5 (x 130)	5 65 ----- + 70

*Tabel 4: toegepast belastingschema model met versterking*

	<b>Belastinggeval</b>	<b>Stapgroottes</b>	<b>Belastingfactor</b>
1	BG1: eigengewicht	0,5 (x 2)	1
2	BG2: puntlasten	1,0 (x 250)	250

## 3.7.2

*Iteratiemethode en convergentiecriteria*

Voor de berekening wordt als numerieke iteratie methode gebruik gemaakt van de *Newton-Raphson* methode conform aanbeveling uit de RTD:1016-1:2017 (paragraaf 3.3).

Als convergentie criteria worden in de berekening criteria aangehouden op basis van energie samen met kracht conform de aanbevelingen uit de RTD:1016-1:2017 paragraaf 3.4. In de tabel hieronder worden tevens de toleranties weergegeven die gehanteerd worden bij de genoemde convergentie criteria.

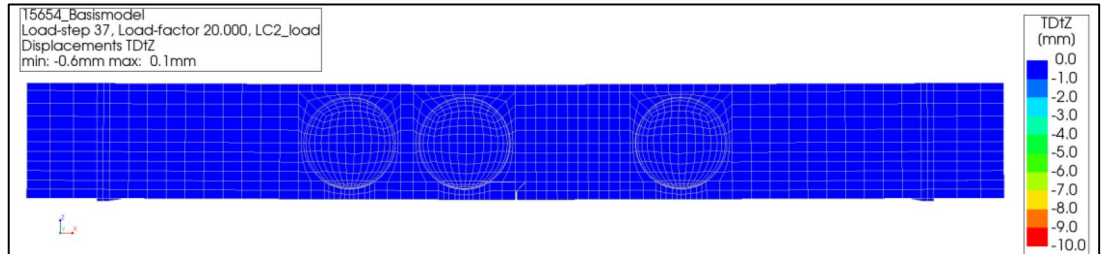
*Tabel 5: toegepaste convergentie criteria en tolerantie*

<b>Convergentie op basis van</b>	<b>Tolerantie</b>
Energie	0,001
Kracht	0,01

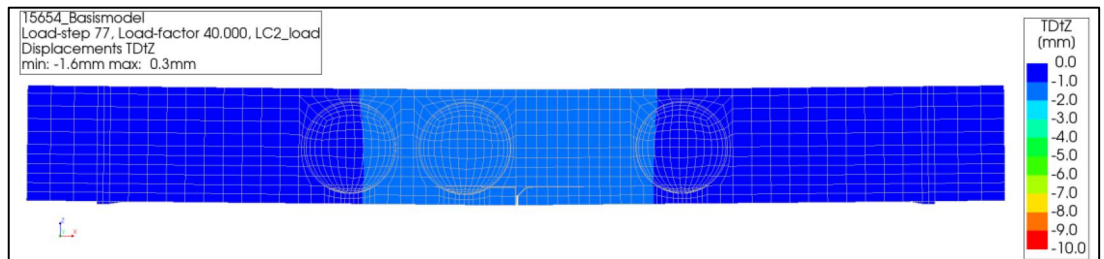
### 3.8 Resultaten basismodel

#### 3.8.1 Verplaatsingen

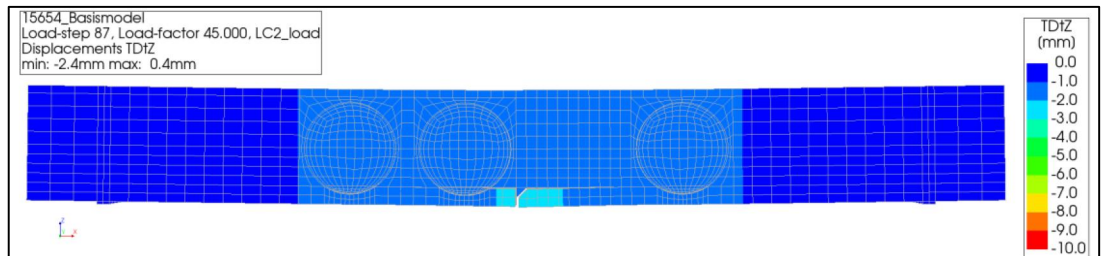
Puntlast = 40 kN:



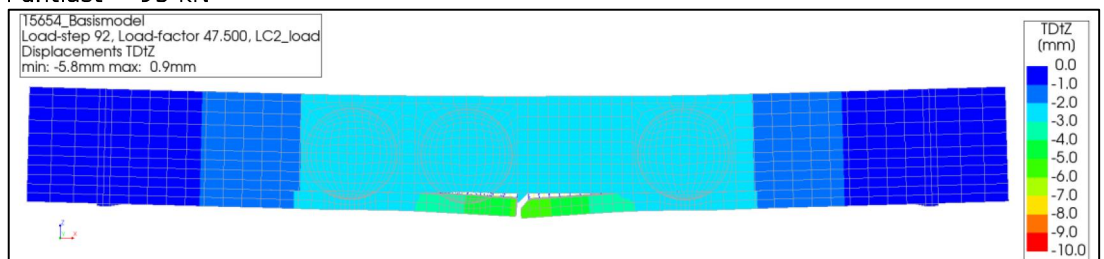
Puntlast = 80 kN



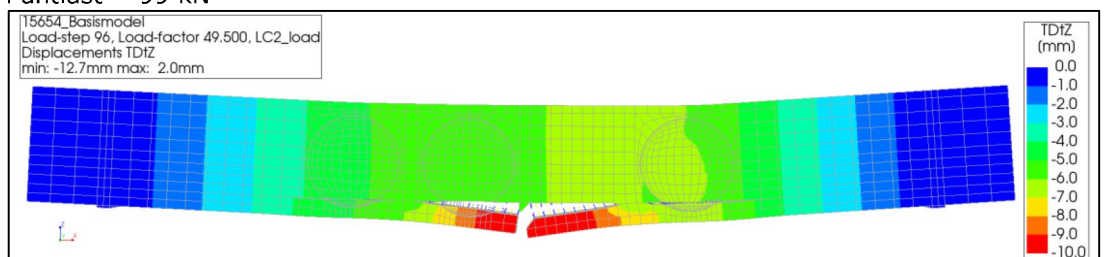
Puntlast = 90 kN



Puntlast = 95 kN



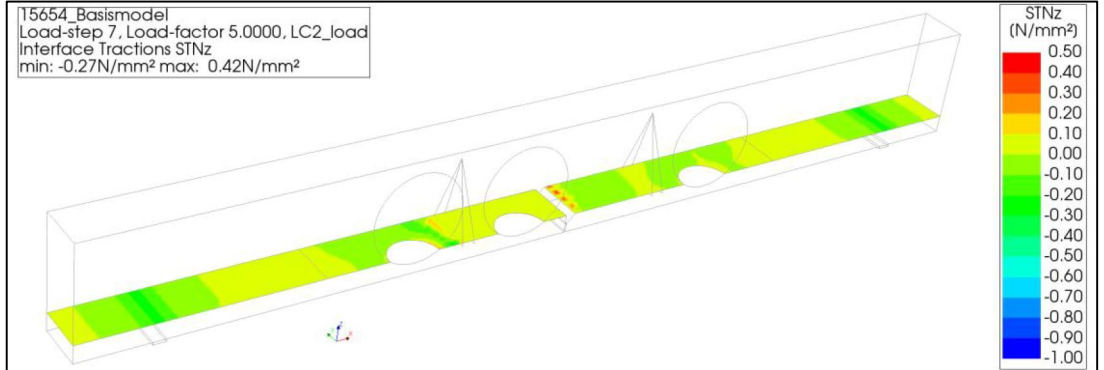
Puntlast = 99 kN



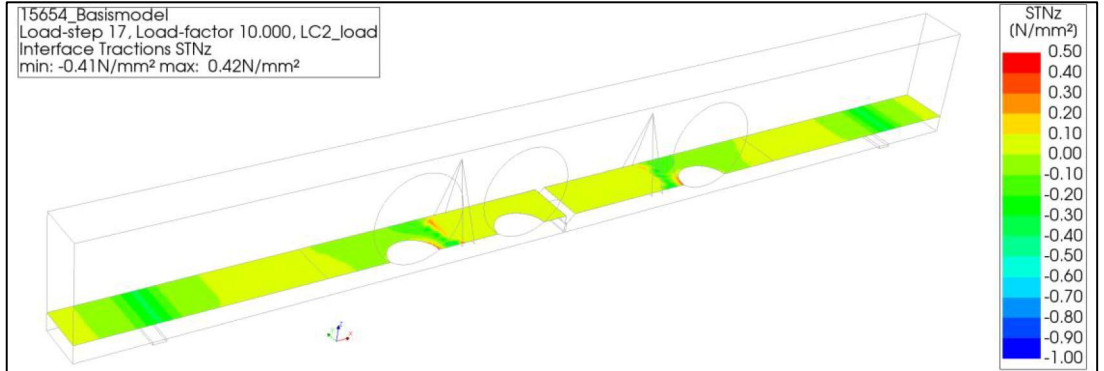
3.8.2

*Normaalspanningen interface*

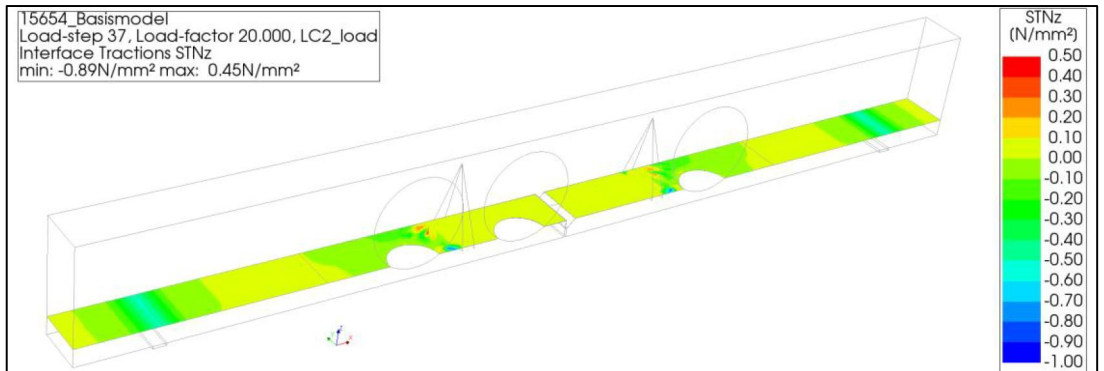
Puntlast = 10 kN:



Puntlast = 20 kN:

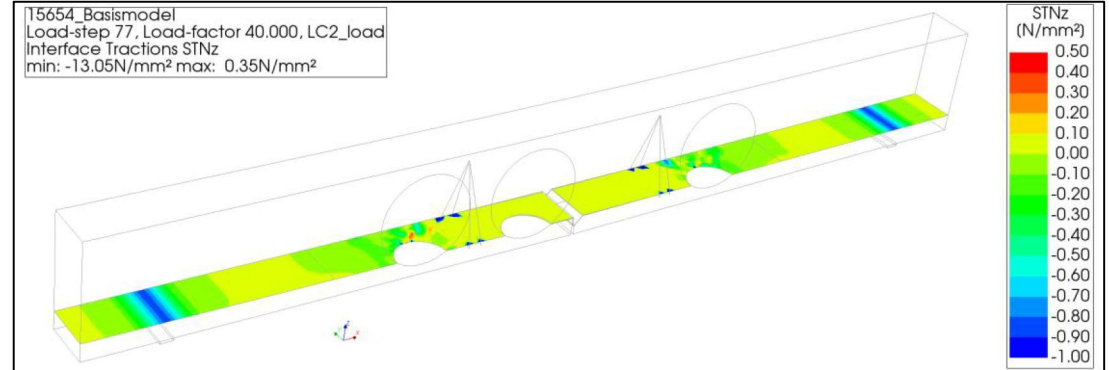


Puntlast = 40 kN:

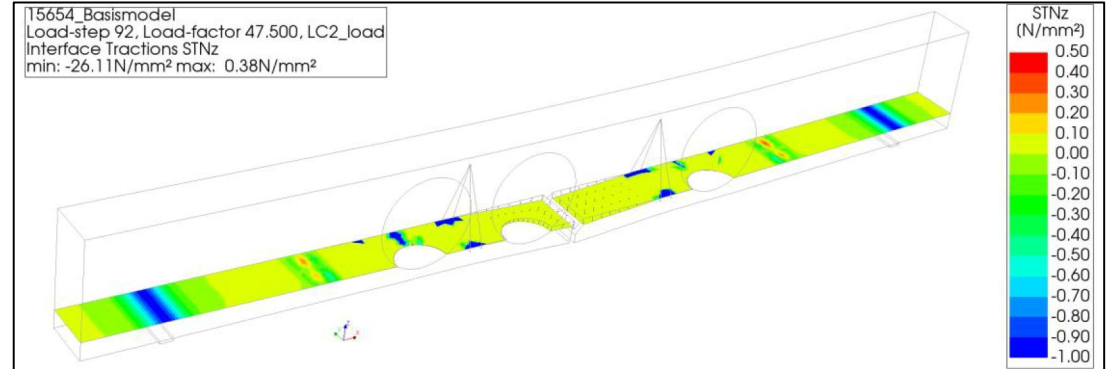




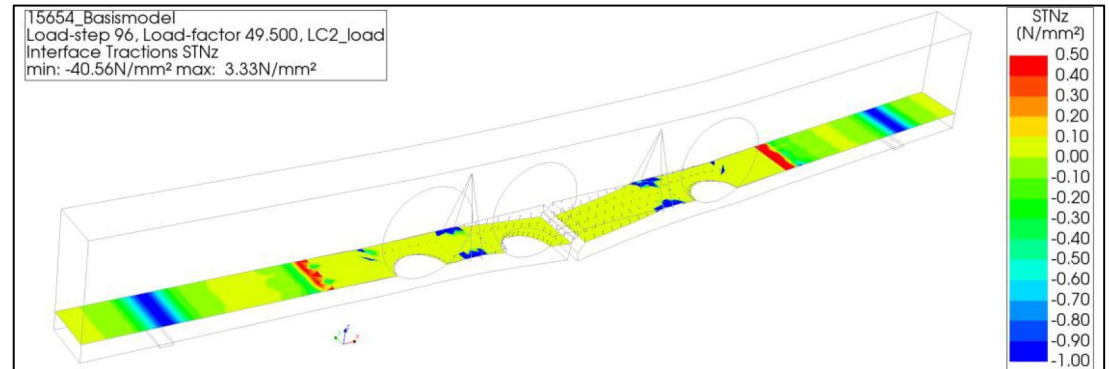
**Puntlast = 80 kN:**



**Puntlast = 95 kN:**



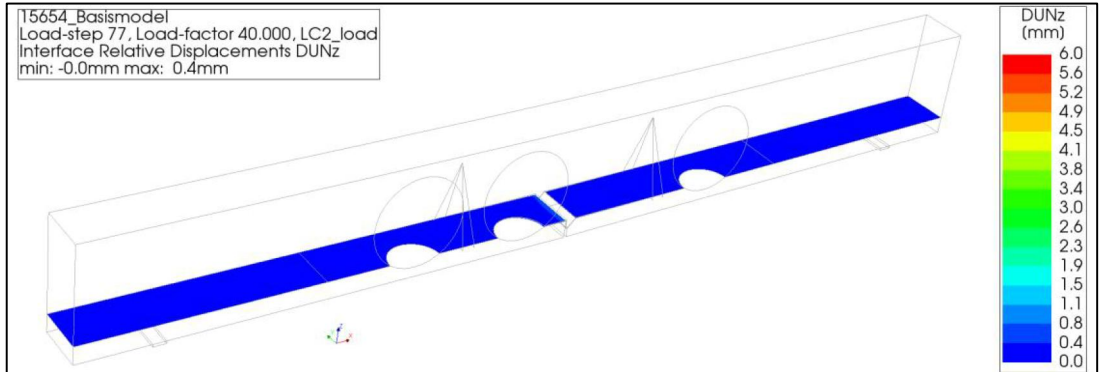
**Puntlast = 99 kN:**



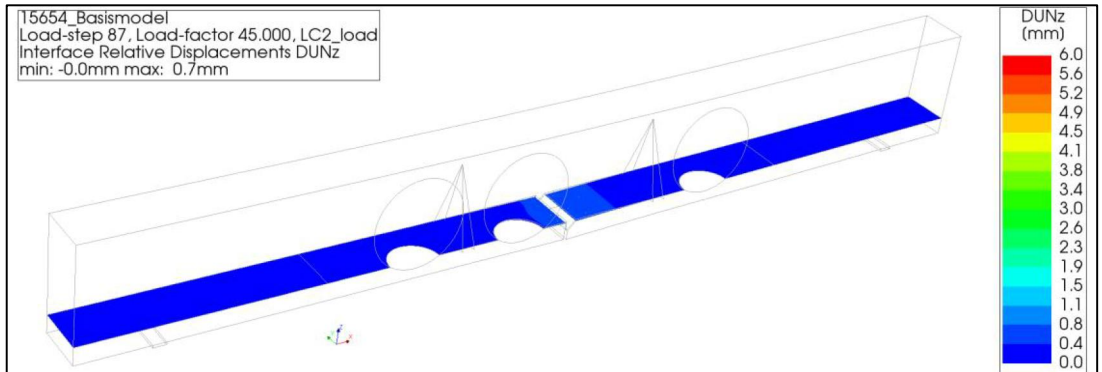
3.8.3

Relatieve verplaatsingen normaal richting interface

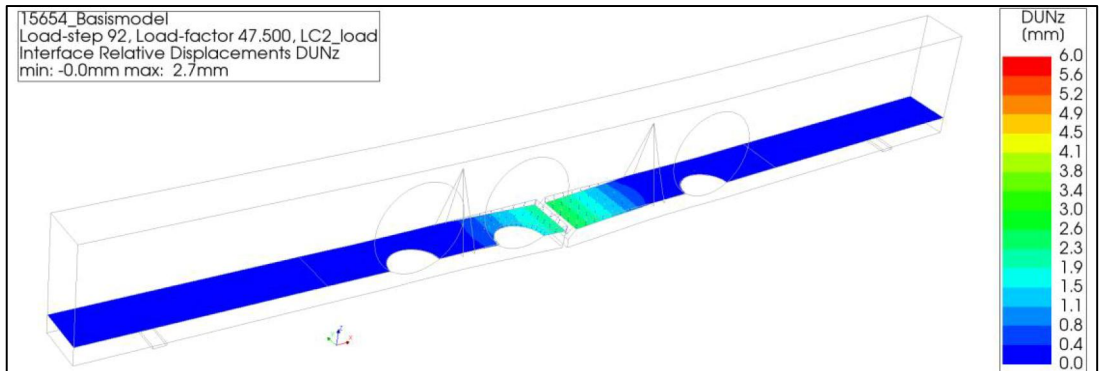
Puntlast = 80 kN:



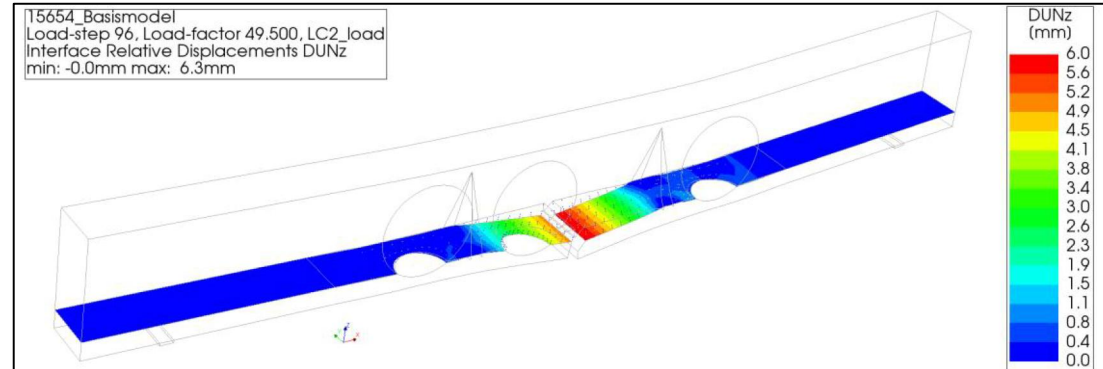
Puntlast = 90 kN:



Puntlast = 95 kN:



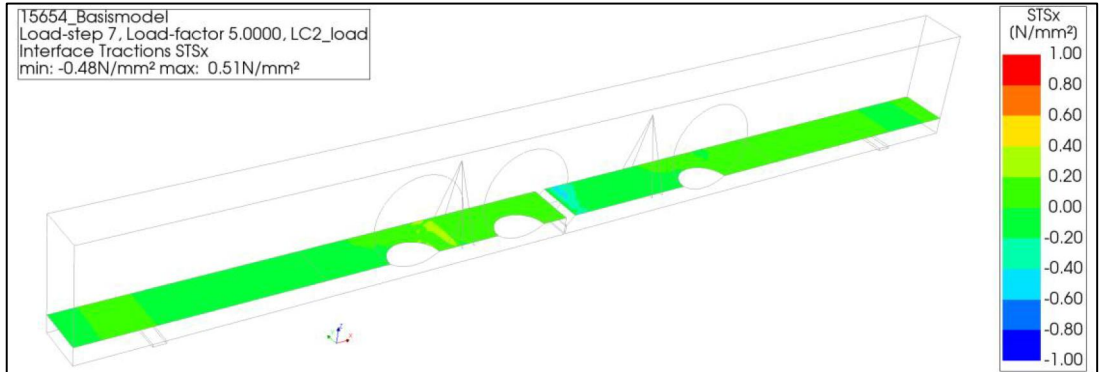
Puntlast = 99 kN:



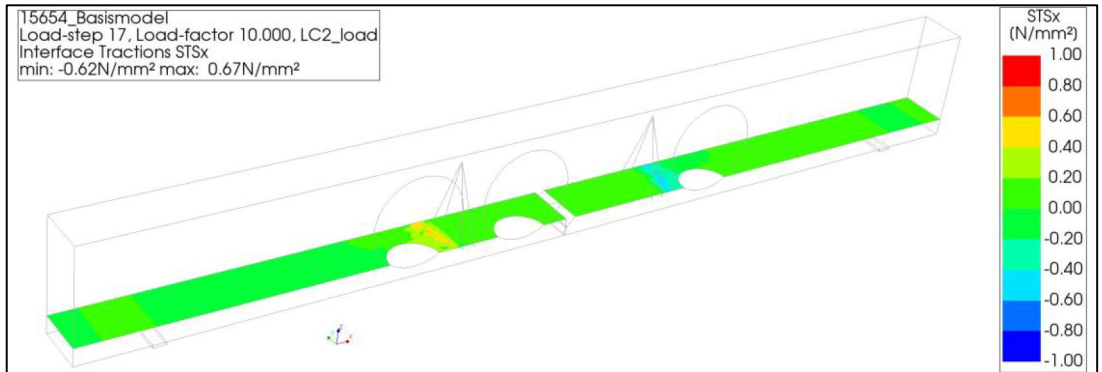
3.8.4

*Schuifspanningen interface*

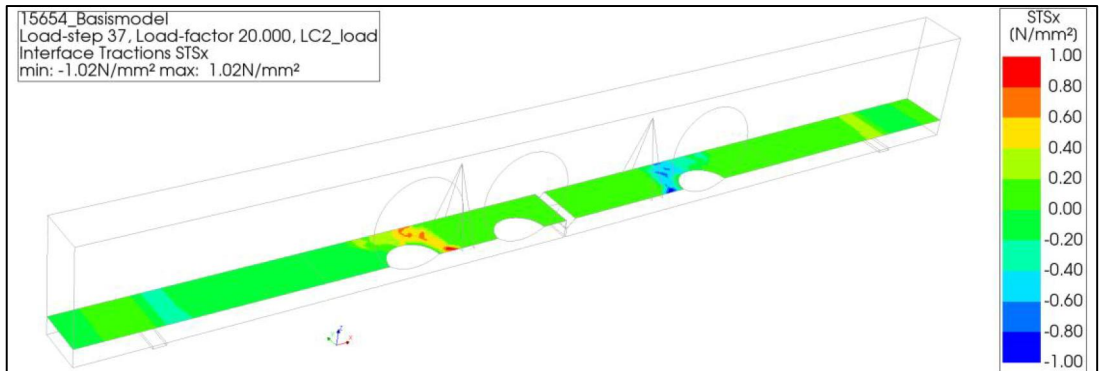
Puntlast = 10 kN



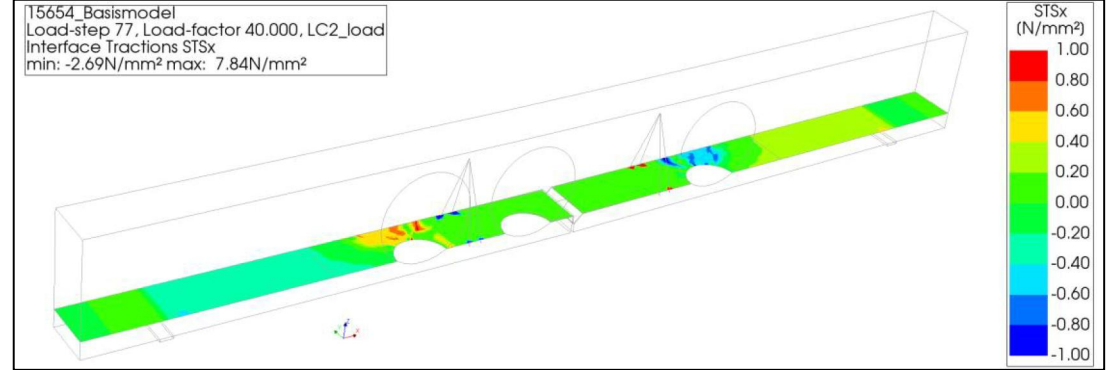
Puntlast = 20 kN



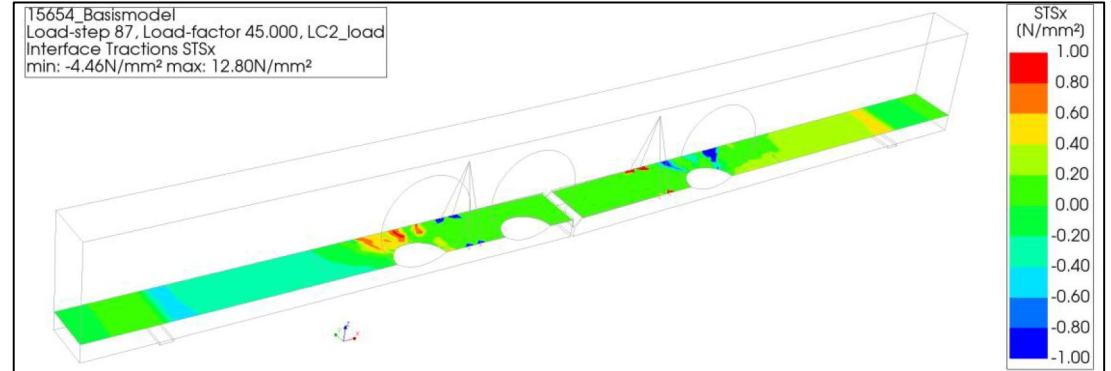
Puntlast = 40 kN



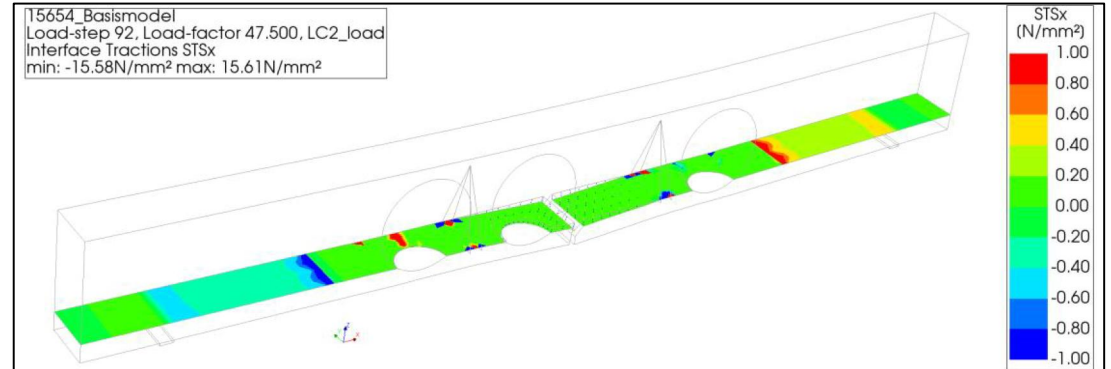
**Puntlast = 80kN**



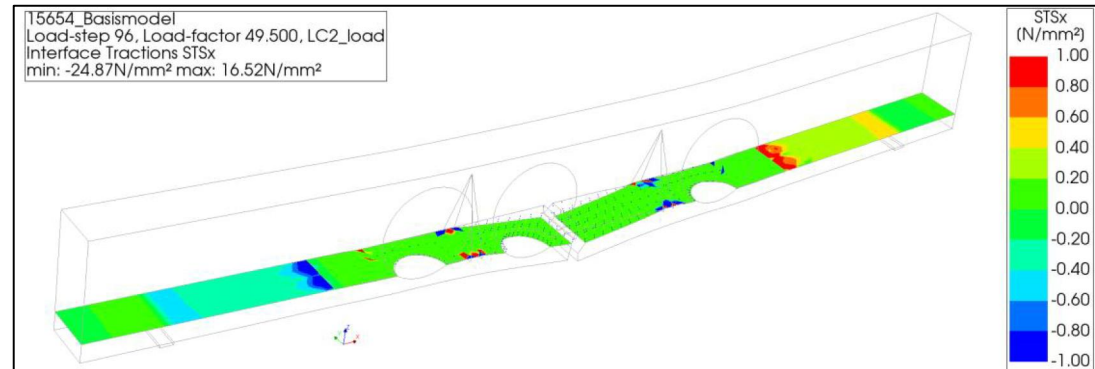
**Puntlast = 90 kN**



**Puntlast = 95 kN**



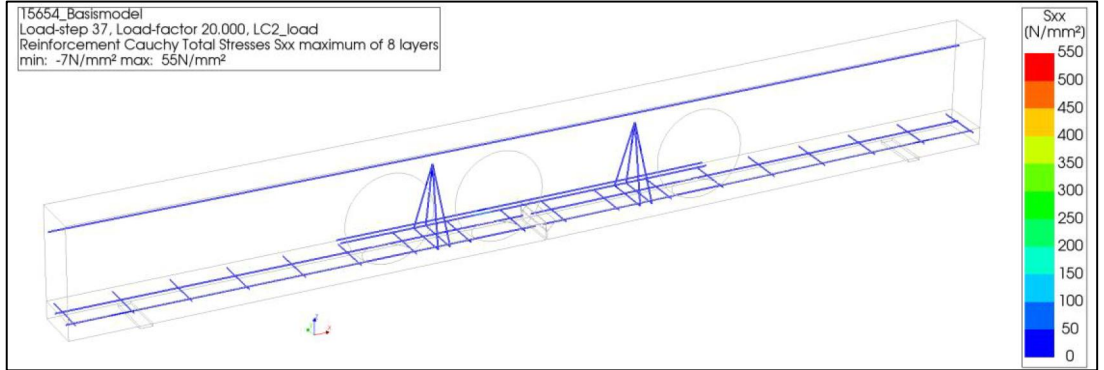
Puntlast = 99 kN



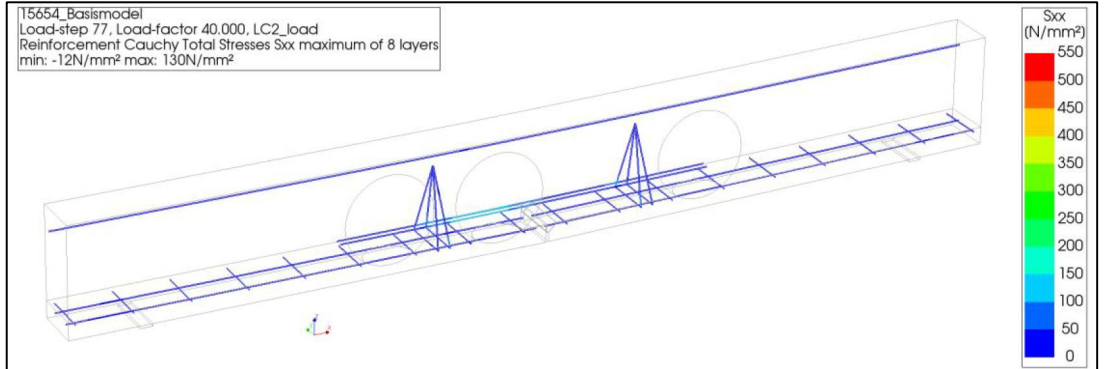
3.8.5

Staalspanningen wapening

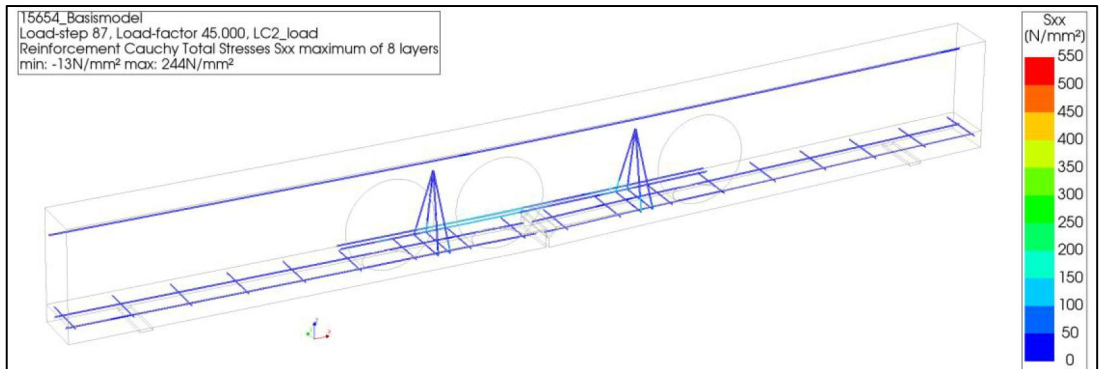
Puntlast = 40 kN



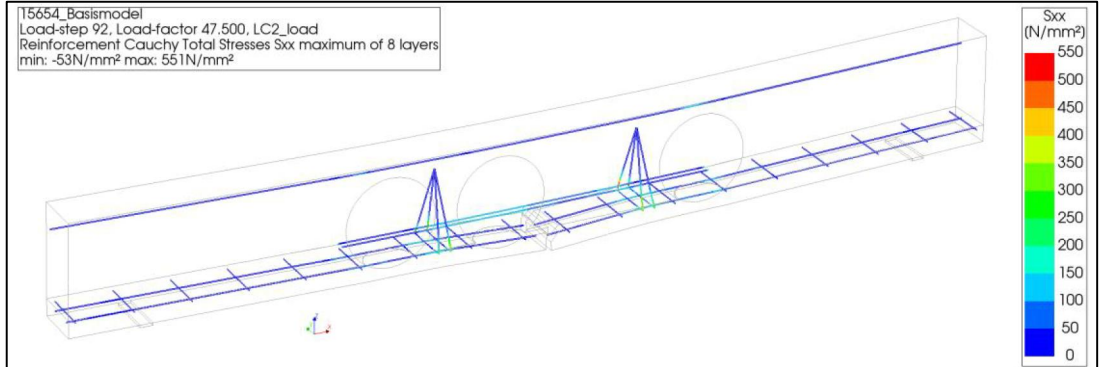
Puntlast = 80 kN



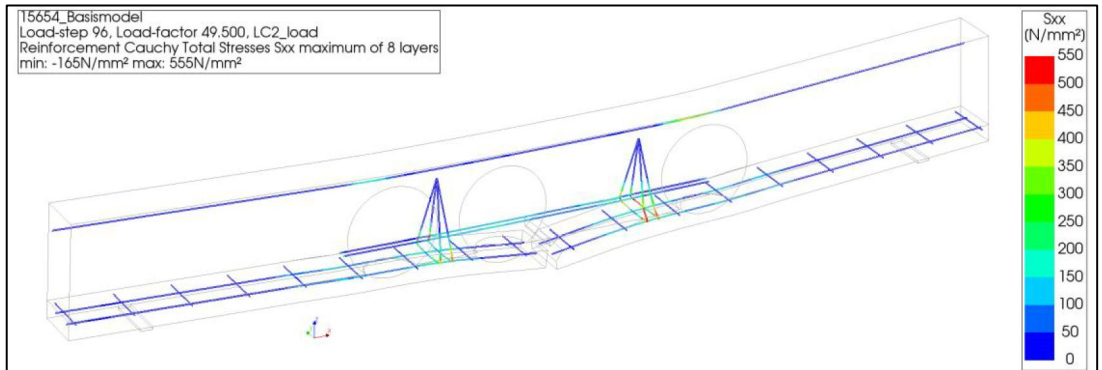
Puntlast = 90 kN



Puntlast = 95 kN



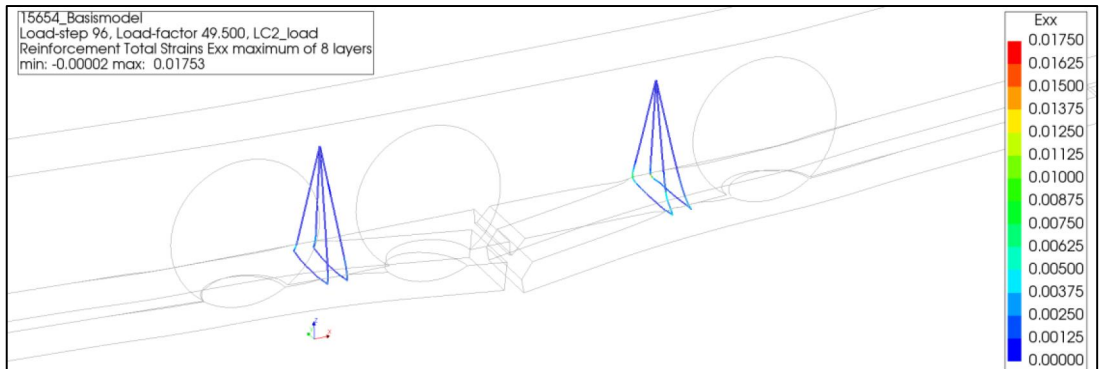
Puntlast = 99 kN



3.8.6

Staalrekken wapening

Puntlast = 99 kN

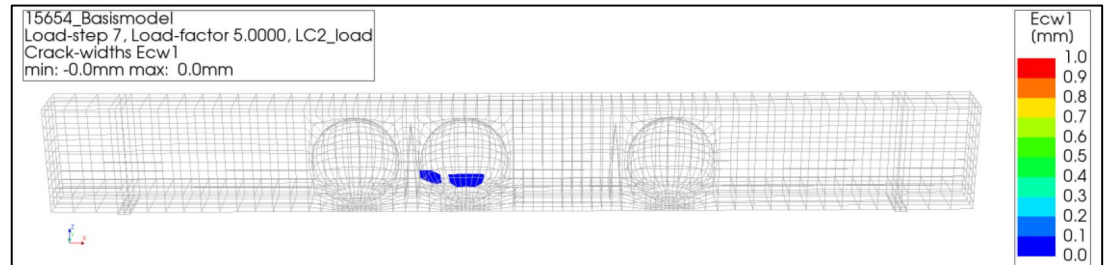




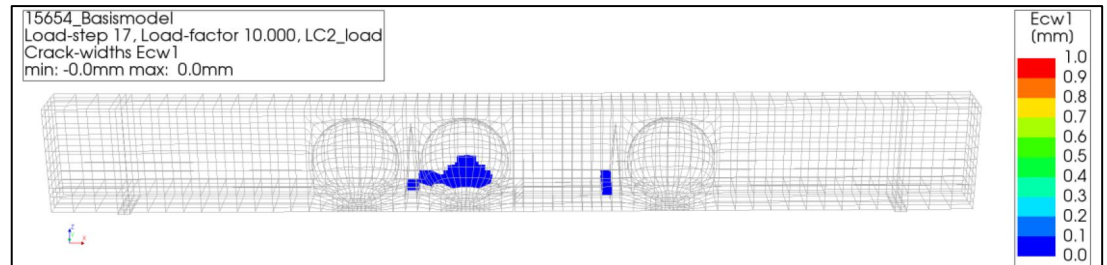
3.8.7

*Scheurvorming*

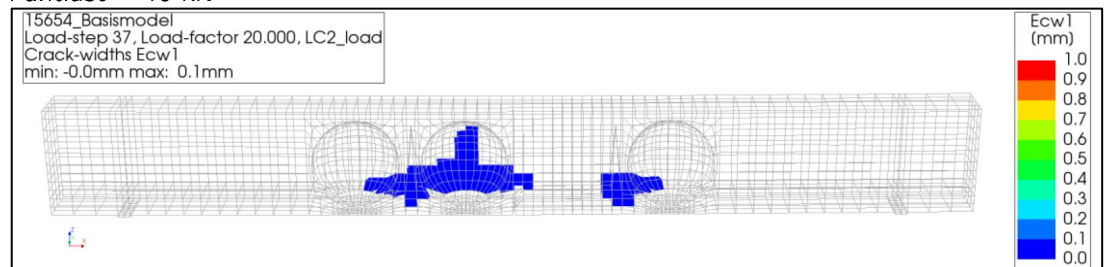
Puntlast = 10 kN



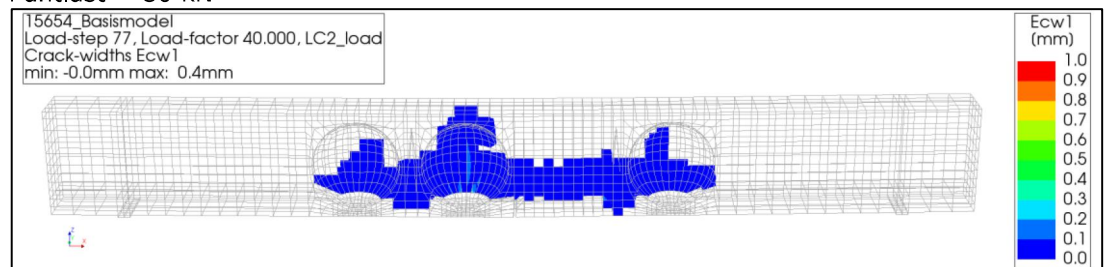
Puntlast = 20 kN



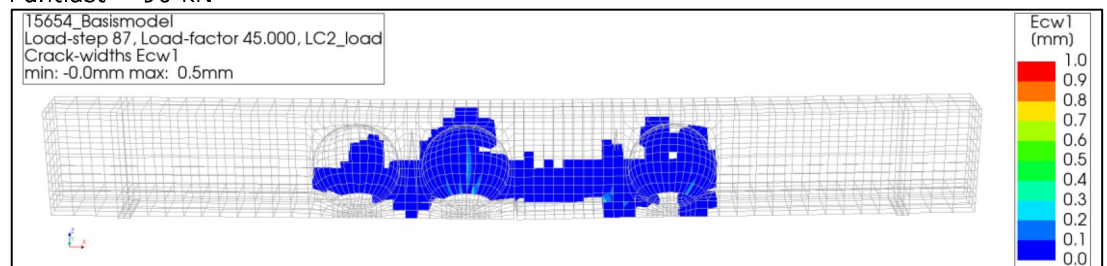
Puntlast = 40 kN



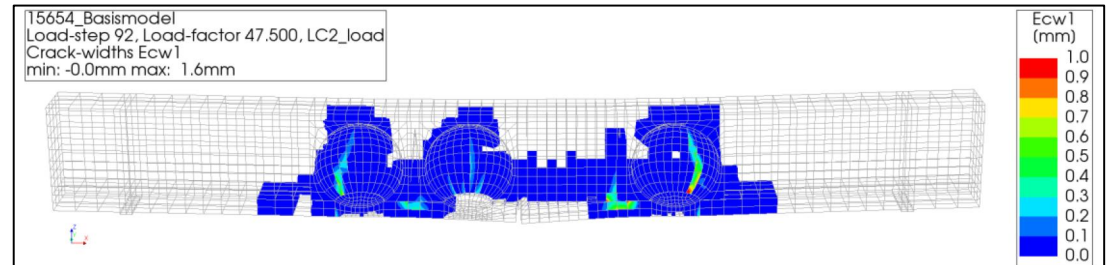
Puntlast = 80 kN



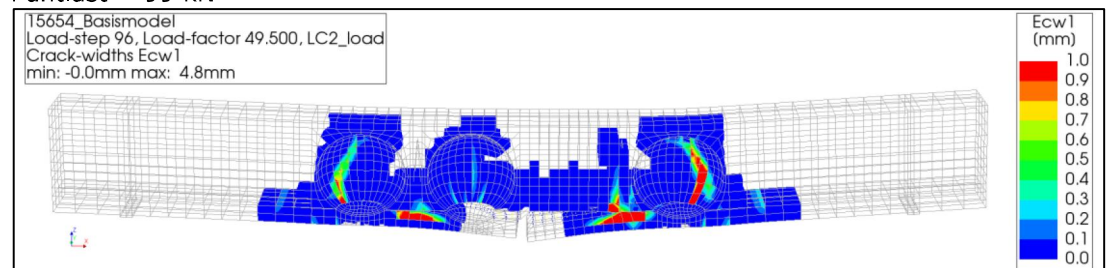
Puntlast = 90 kN



Puntlast = 95 kN



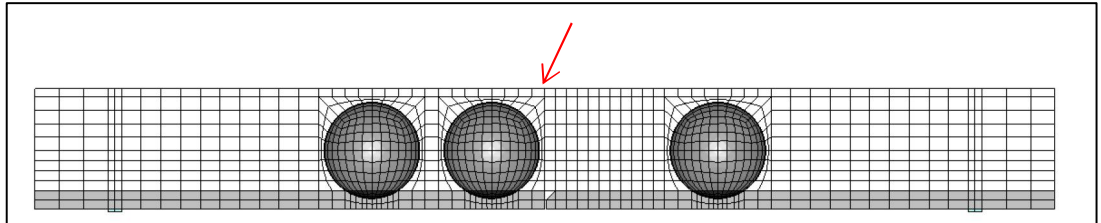
Puntlast = 99 kN



3.8.8

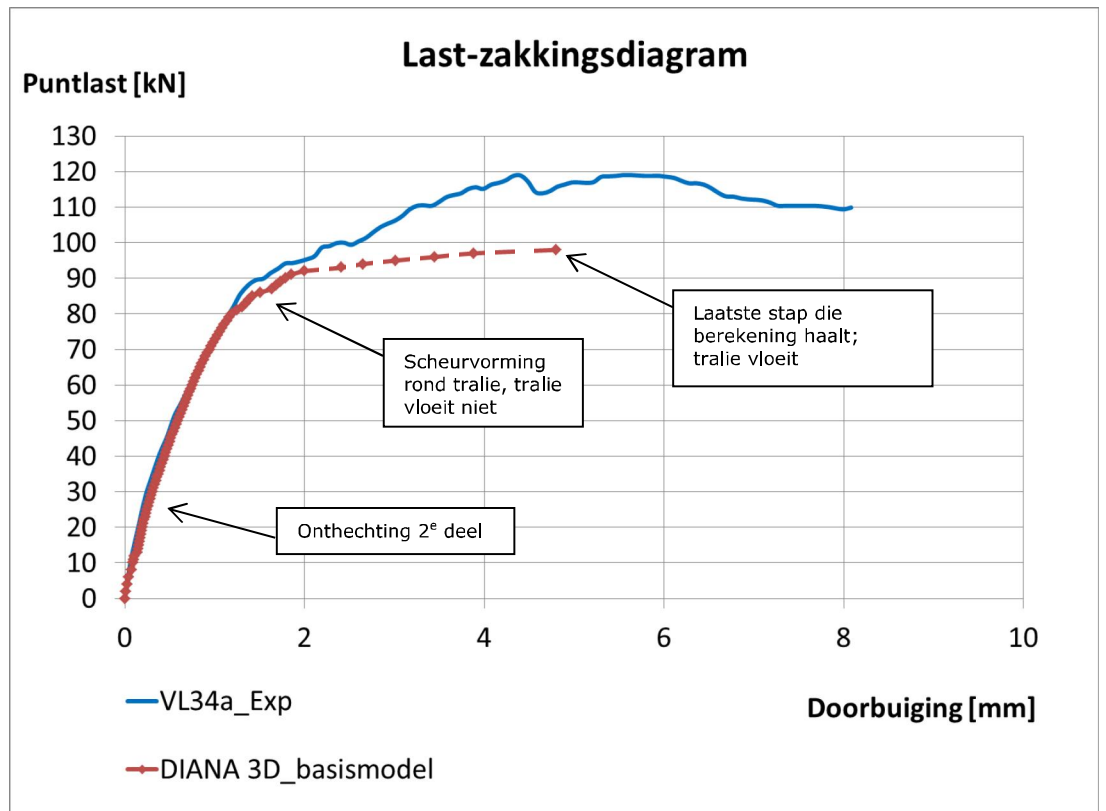
*Last-zakkingsdiagram en beoordeling van de resultaten*

Hieronder wordt het last-zakkingsdiagram weergegeven die volgt uit de berekening. De verticale zakking is daarbij gemeten aan de bovenkant van het model in het midden en uitgezet tegenover de omgerekende puntlast.



*Figuur 16: locatie uitgelezen zakking*

Dit leidt tot het onderstaand last-zakkingsdiagram waarbij de grafiek afkomstig van de fysieke proef is toegevoegd ter vergelijking.



*Figuur 17: last-zakkingsdiagram (gestippelde lijn = minder goede convergentie)*

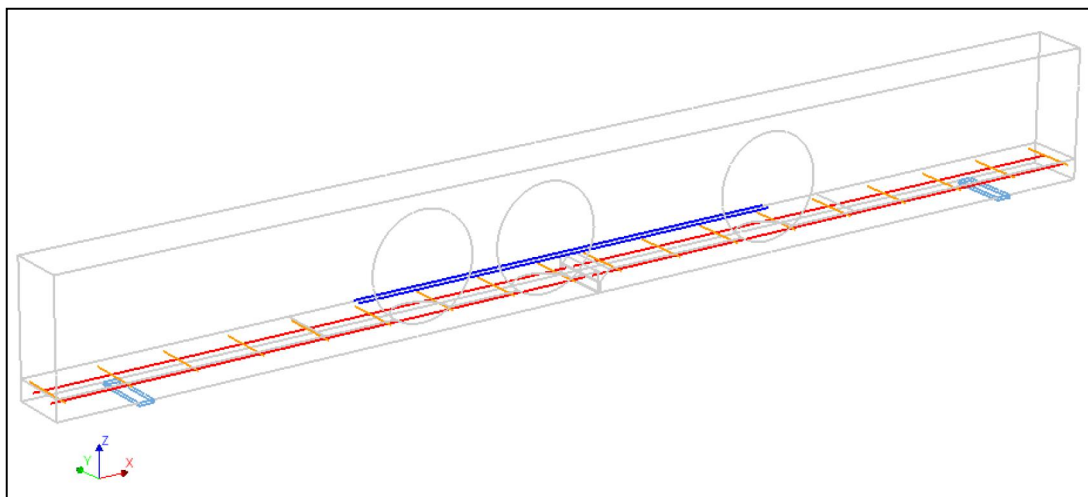
Uit het last-zakkingsdiagram is te zien dat de grafiek op basis van het DIANA model tot een belasting van 80 kN vrijwel gelijk loopt met de grafiek van de proef. Aan beide kanten van de naad is dan al onthechting opgetreden maar vloeien van de wapening treedt nog niet op. Vervolgens loopt de grafiek op basis van het DIANA model wat minder stijl door. Vanaf een puntlast van ca. 90 kN begint de analyse minder goede convergentie te vertonen. De analyse blijft echter doorlopen tot een belasting van 99 kN bereikt is, waarbij vloeien van de tralie optreedt. Hierna treedt er divergentie op in het model. Het model haalt zodoende een wat lagere belasting dan de proef, het globale gedrag komt echter alsnog goed overeen.

#### 4 DIANA 4-puntsbuigproef 3D-basismodel excl. tralie

##### 4.1

##### *Geometrie en mesh*

De geometrie en mesh van deze variant zijn gelijk aan die van het basismodel, alleen zijn de tralie liggers verwijderd. Zie onderstaande figuur van de wapening



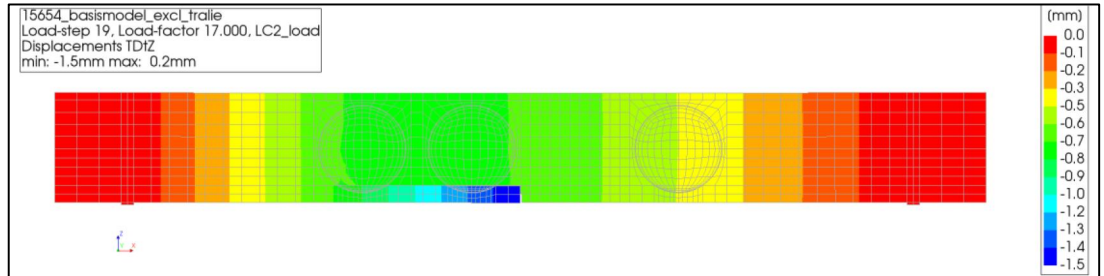
*Figuur 18: wapening in model zonder tralie liggers*

Materiaaleigenschappen, randvoorwaarden, belastingen en analyse instellingen zijn verder gelijk aan van het basismodel.

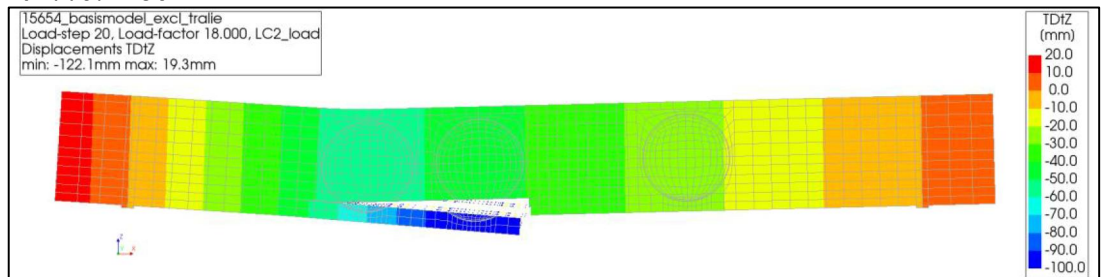
## 4.2 Resultaten basismodel excl. tralie

### 4.2.1 Verplaatsingen

Puntlast = 34 kN

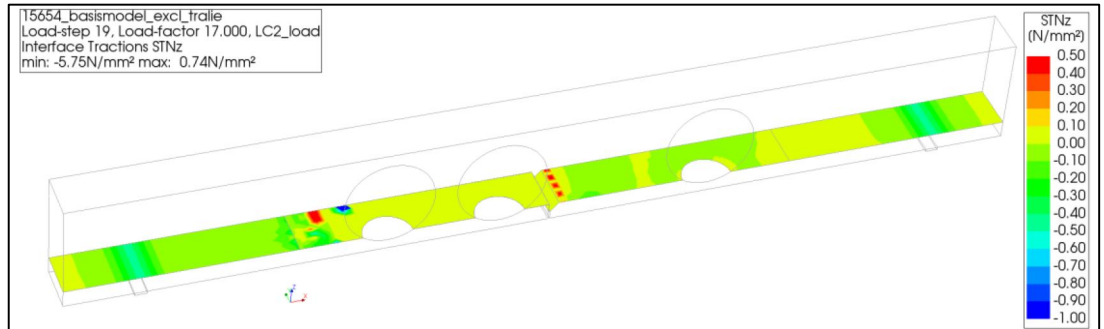


Puntlast = 36 kN

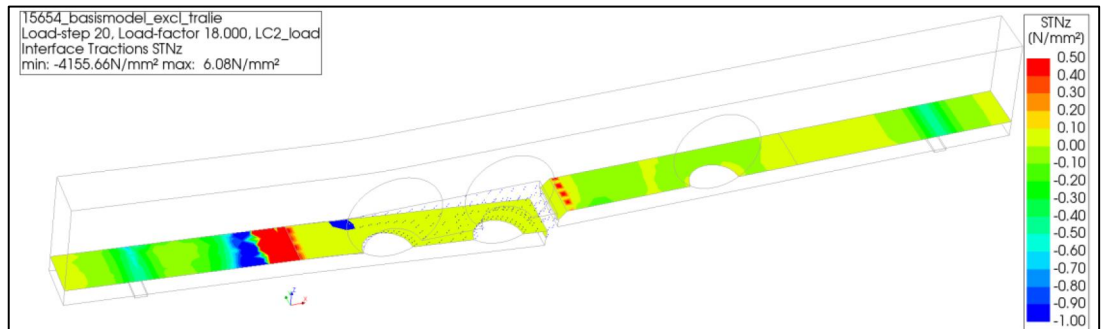


### 4.2.2 Normaalspanningen interface

Puntlast = 34 kN



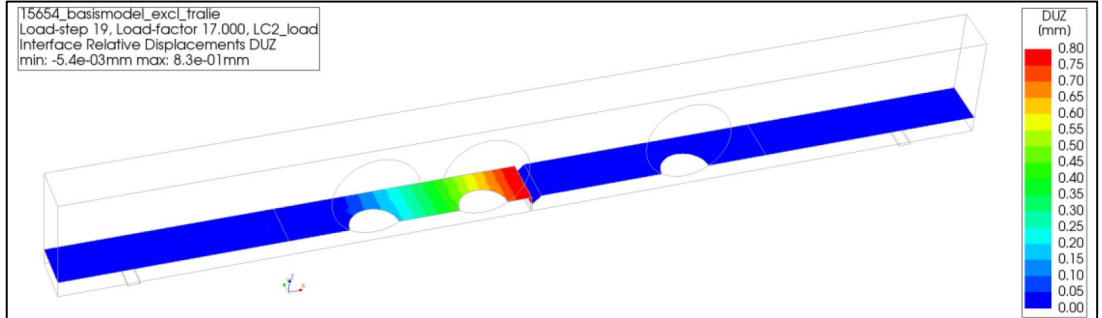
Puntlast = 36 kN



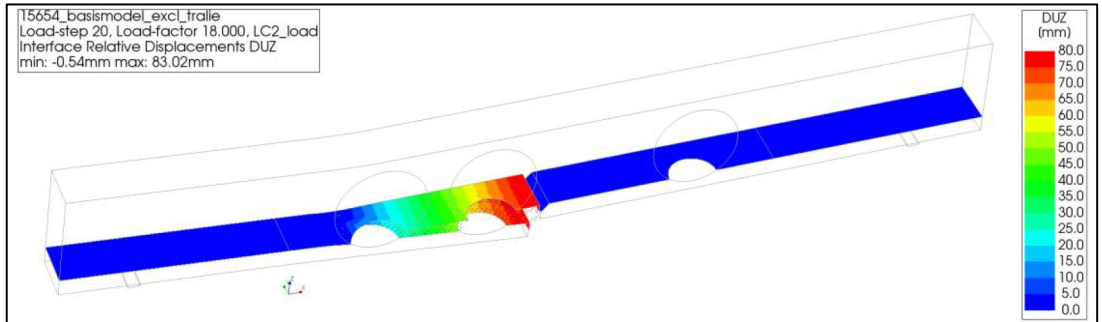
4.2.3

Relatieve verplaatsingen normaal richting interface

Puntlast = 34 kN



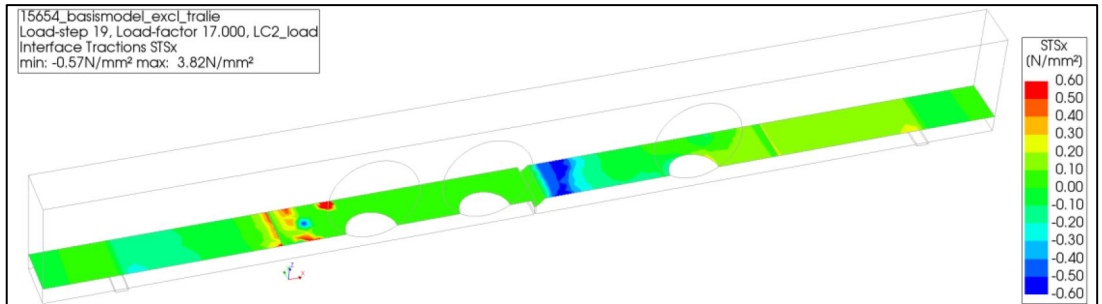
Puntlast = 36 kN



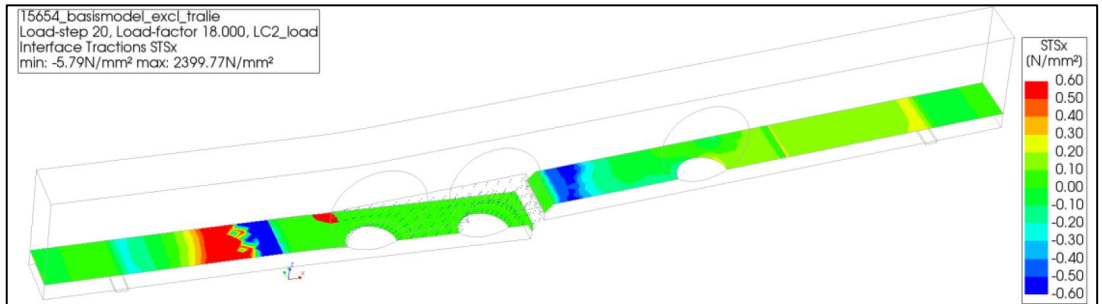
4.2.4

Schuifspanningen interface

Puntlast = 34 kN



Puntlast = 36 kN



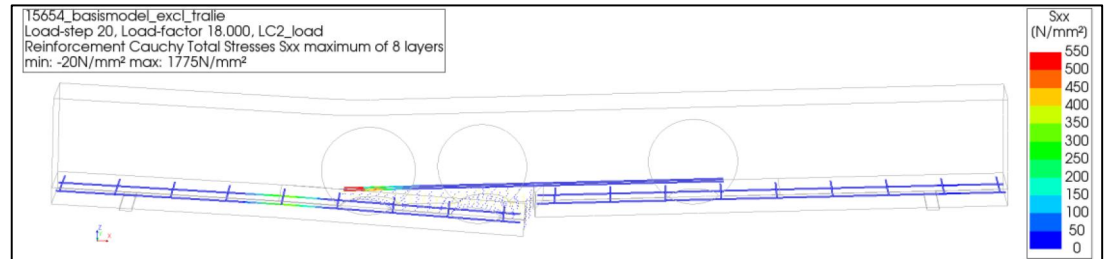
4.2.5

**Staalspanningen wapening**

Puntlast = 34 kN



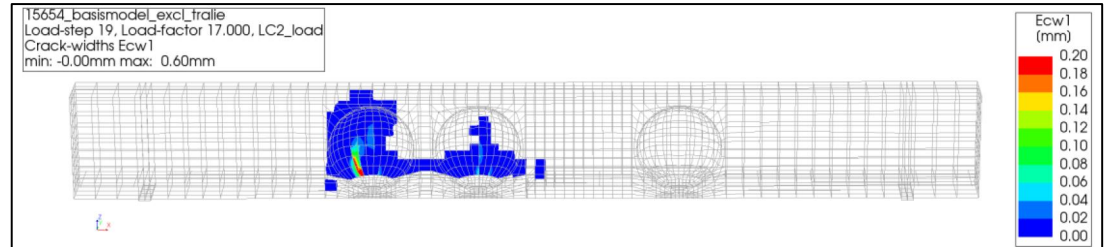
Puntlast = 36 kN



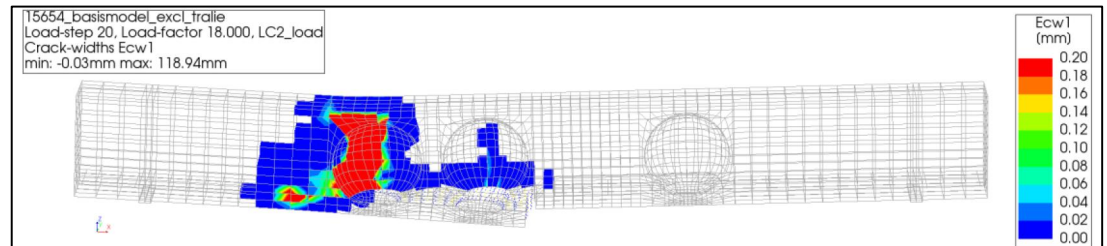
4.2.6

**Scheurvorming**

Puntlast = 34 kN



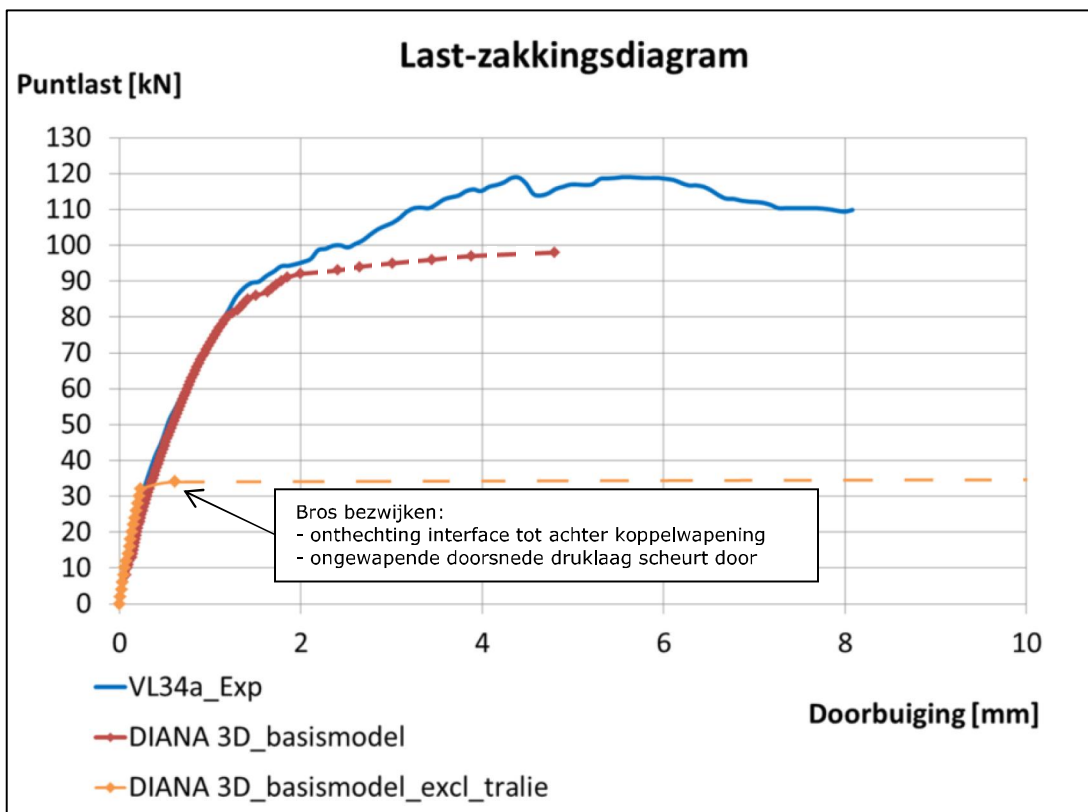
Puntlast = 36 kN



4.2.7

*Last-zakkingsdiagram en beoordeling van de resultaten*

Hieronder wordt het last-zakkingsdiagram weergegeven die volgt uit de berekening. De verticale zakkings is daarbij op dezelfde locatie gemeten als bij het basismodel (bovenkant van het model in het midden) en uitgezet tegenover de omgerekende puntlast. Dit leidt tot het onderstaand last-zakkingsdiagram waarbij de grafiek afkomstig van de fysieke proef en van het basismodel is toegevoegd ter vergelijking.



Figuur 19: last-zakkingsdiagram (gestippeld = minder goede convergentie)

Uit de resultaten van de berekening en uit het last-zakkingsdiagram is te zien dat dat in het model zonder tralie liggers er sprake is van een veel lagere capaciteit van de constructie. Bij een belasting van 34 kN (loadfactor 17) treedt bros bezwijken op waarbij de prefab schil onthecht aan één kant tot achter de koppelstaaf waarna de ongewapende doorsnede van de druklaag verticaal doorscheurt. De analyse rekent hierna nog wel door maar heeft geen convergentie meer en geen logische resultaten. Gesteld kan worden dat de tralie ligger in grote mate bijdraagt aan de capaciteit van de constructie.



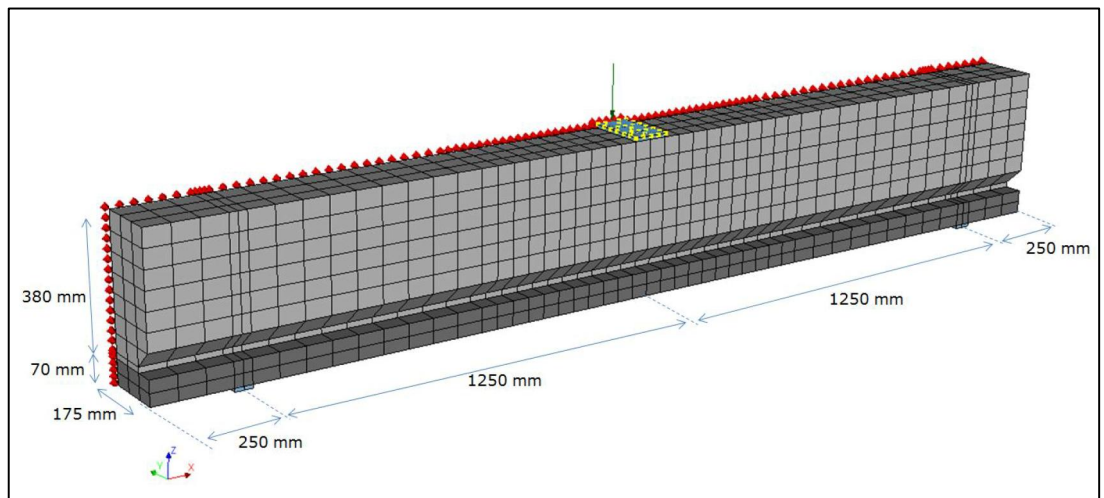
**5 DIANA 3-puntsbuigproef 3D-model (LAM34)**

In dit hoofdstuk wordt het DIANA model van de 3-puntsbuigproef behandeld. Doel van het doorrekenen van dit model is aantonen dat het coulomb-frictie model van de 4-punts buigproef ook goede resultaten geeft voor het model van de 3-punts buigproef. Daarmee wordt het afschuifgedrag van de constructie ter plaatse van de interface gevalideerd.

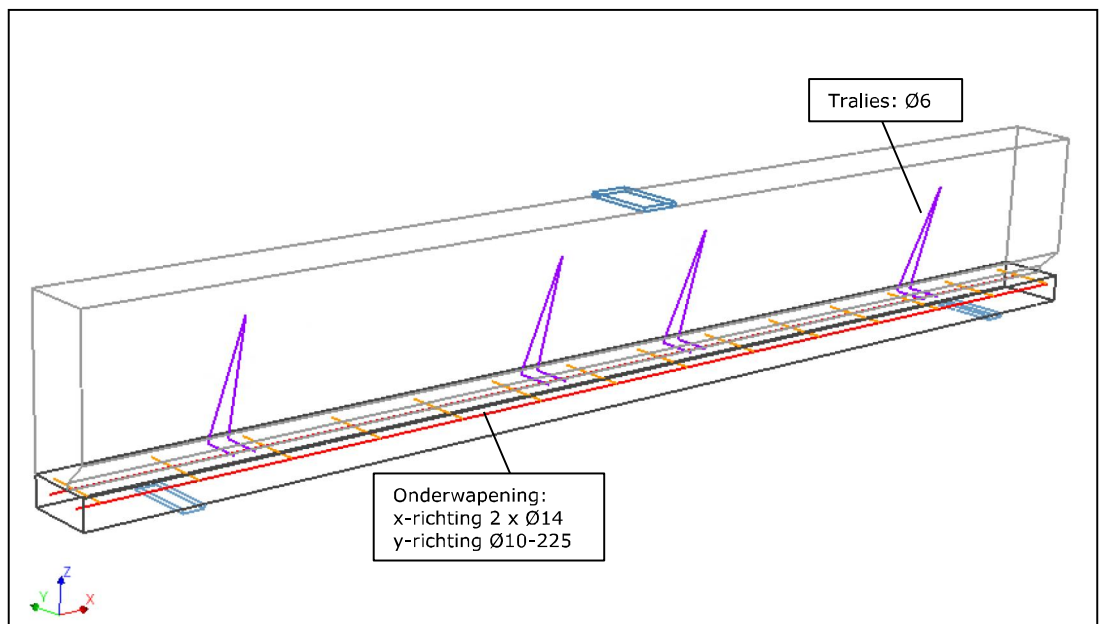
**5.1**

*Geometrie en mesh*

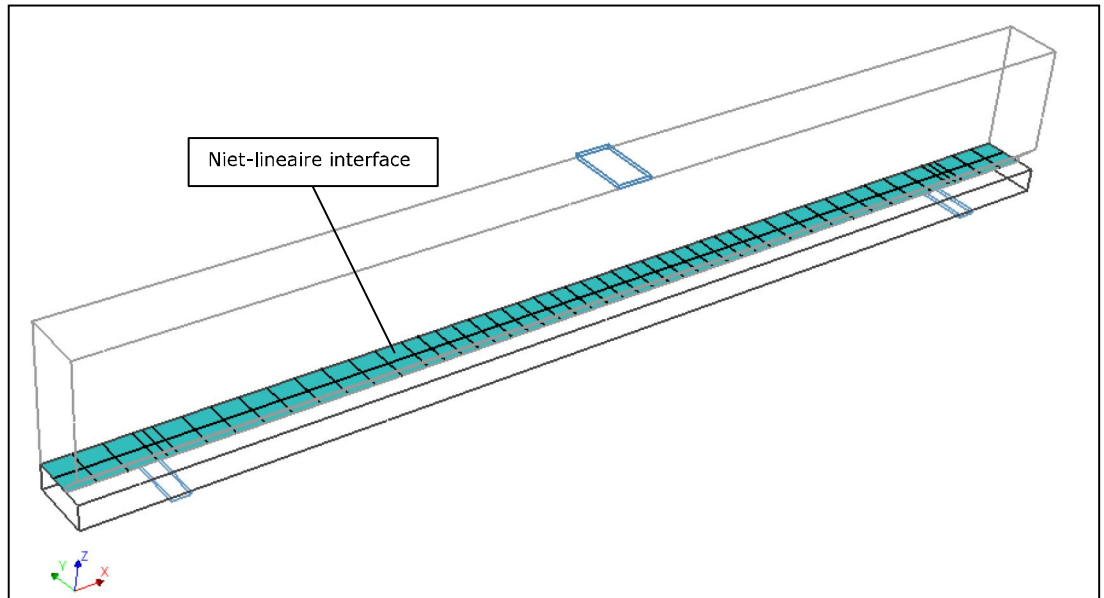
Geometrie van het model is gebaseerd op de beschikbare gegevens van de proefopstelling, uitgangspunt is de geometrie van het proefstuk LAM34. In verband met kortere rekentijd is slechts de helft van de constructie in langsrichting gemodelleerd. In onderstaande figuren is de geometrie van het DIANA model weergegeven.



*Figuur 20: DIANA model driepuntsbuigproef*



*Figuur 21: wapening in het model*



Figuur 22: interface elementen

5.2

*Toegepaste elementen*

In het model worden kwadratische volume elementen en interface elementen toegepast. In volgende tabel zijn deze type elementen weergegeven.

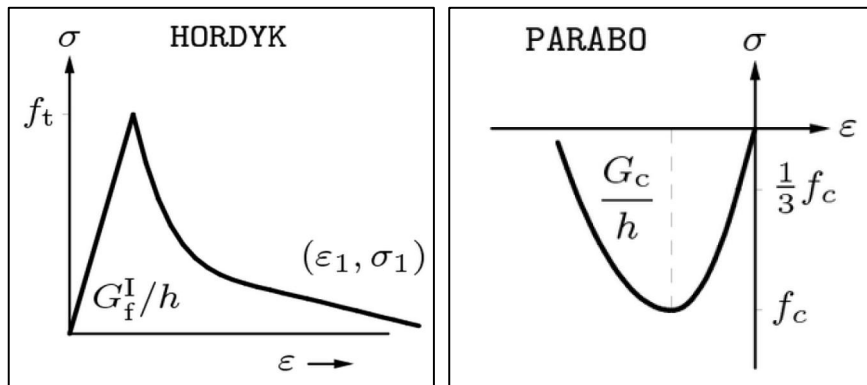
Tabel 6: toegepaste type elementen 3-puntsbuigproef 3D-model

<p><i>CHX60 volume elementen, 20 knoops</i></p>	<p><i>CQ48I plane interface elementen, 8+8 knoops</i></p>

5.3

*Toegepaste materiaal eigenschappen*

Voor het beton van dit model worden tevens niet-lineaire materiaal eigenschappen toegekend op basis van gemiddelde waarden om een zo realistisch mogelijk bezwijkmechanisme te verkrijgen. Het beton kan daarbij scheuren volgens het uitgesmeerde scheurconcept ("smeared cracking"). Er wordt daarbij een zogenaamd "total strain rotating crack" model toegepast met een Hordijk curve voor het nascheur gedrag. Zodra optredende spanningen de treksterkte bereiken ontstaat een scheur waarbij de spanning niet direct terug valt naar nul maar wel snel afneemt. Voor het gedrag onder druk is een parabolisch spanning-rek diagram toegepast. Dit alles is conform de aanbeveling uit de RTD:1016-1:2017. In onderstaande figuren zijn deze diagrammen weergegeven.



Figuur 23: Hordijk curve voor beton onder trek en parabolisch diagram

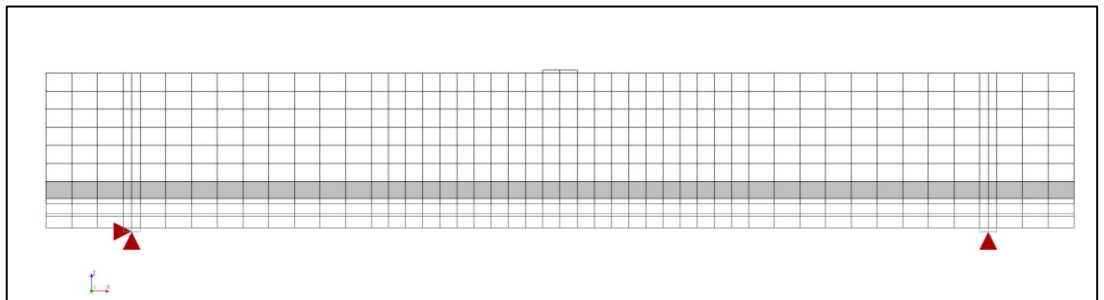
In onderstaande tabel zijn de specifieke waarden voor de toegepaste materiaal eigenschappen voor het beton weergegeven. Deze zijn gebaseerd op gemiddelde waarden afkomstig van het materiaal onderzoek uitgevoerd aan de TU Eindhoven en gepubliceerd in de rapportage van Hageman, zie [Ref. 01] en [Ref. 02].

Tabel 7: toegepaste eigenschappen voor het beton in basismodel

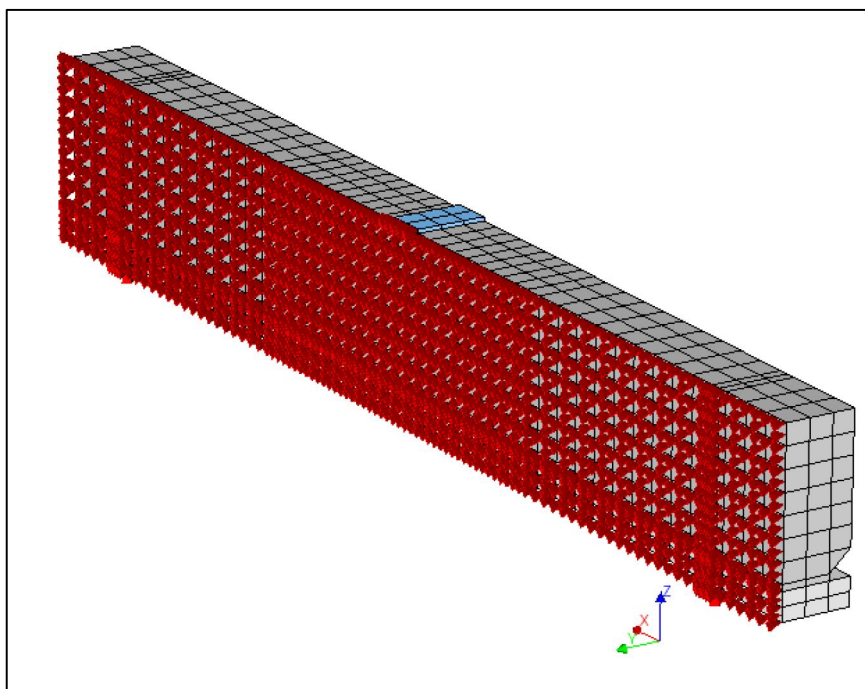
Eigenschap	Druklaag (gebaseerd op $f_{cm,cube} = 37,5 \text{ N/mm}^2$ )	Prefab schil (gebaseerd op C45/55)
Material class	Concrete and masonry	Concrete and masonry
Material model	Total strain based crack model	Total strain based crack model
Young's modulus	31800 N/mm <sup>2</sup>	37500 N/mm <sup>2</sup>
Poisson's ratio	0.15	0.15
Mass density	2500 kg/m <sup>3</sup>	2500 kg/m <sup>3</sup>
Crack orientation	Rotating	Rotating
Tensile curve	Hordijk	Hordijk
Tensile strength	2.5 N/mm <sup>2</sup>	3.8 N/mm <sup>2</sup>
Mode-I tensile fracture energy	0.137 N/mm	0.149 N/mm
Crack bandwidth specification	Rots	Rots
Reduction model	Damage based	Damage based
Compression curve	Parabolic	Parabolic
Compressive strength	32.5 N/mm <sup>2</sup>	53 N/mm <sup>2</sup>
Compressive fracture energy	34.2 N/mm	37.3 N/mm
Reduction model	Vecchio and Collins 1993	Vecchio and Collins 1993
Lower bound reduction curve	0.4	0.4
Confinement model	No increase	No increase

5.4 *Toegepaste interface eigenschappen*  
 Interface eigenschappen voor lineaire en niet-lineaire interface zijn gelijk als die toegepast in het basismodel, zie 3.4.

5.5 *Toegepaste randvoorwaarden*  
 De balk is vrij opgelegd. Als randvoorwaarde worden zodoende aan de linkerkant de middelste knopen van de onderkant van de oplegging in verticale en horizontale richting verhinderd. Aan de rechterkant alleen in verticale richting. De opleggingen kunnen verder vrij roteren. Bovendien zijn de knopen op het symmetrie vlak in dwarsrichting verhinderd. In onderstaande figuren zijn de toegepaste randvoorwaarden in het model weergegeven.



Figuur 24: randvoorwaarden opleggingen model



Figuur 25: randvoorwaarde symmetrievlak (translaties in dwarsrichting verhinderd)

5.6 *Toegepaste belastingen*

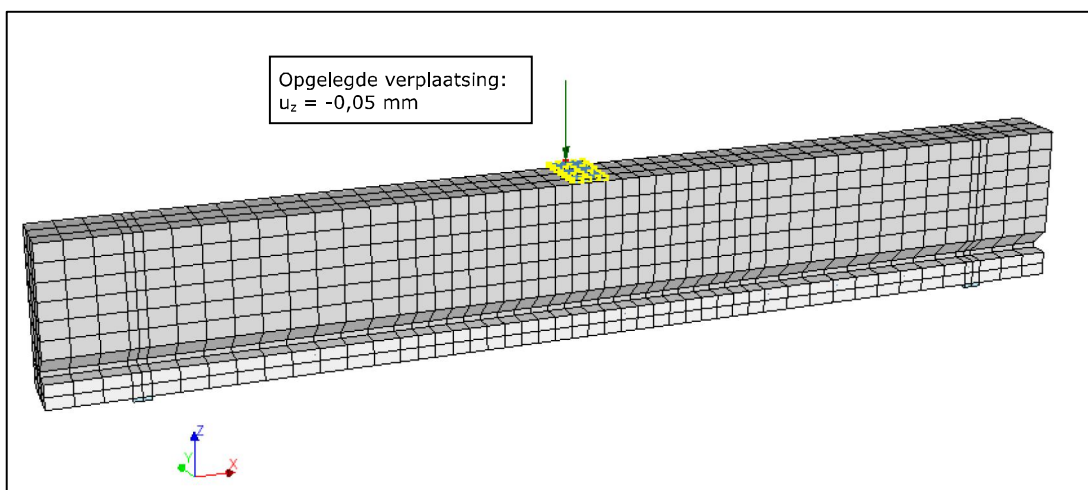
5.6.1 *BG1 - eigen gewicht*

Eigen gewicht wordt automatisch meegenomen door het programma door het invoeren van de dichtheid van de toegepaste materialen (zie 3.3) en het specificeren van de gravitatie versnelling:

- $g = 10 \text{ m/s}^2$

5.6.2 *BG2 - verplaatsing bovenkant midden proefstuk*

Belastinggeval 2 betreft een opgelegde verticale verplaatsing in het midden van de balk aan de bovenkant. De eenheidsverplaatsing is 0,05 mm, d.w.z. bij een loadfactor van 1.0 is een verticale verplaatsing aangebracht van 0,05 mm. De verticale verplaatsing kan verder worden opgevoerd door een hogere loadfactor op te geven.



Figuur 26: opgelegde verplaatsing bovenkant midden proefstuk

5.7

*Analyse instellingen*

De analyse betreft een combinatie van een kracht gestuurde en vervorming gestuurde berekening met fysische en geometrische niet-lineairiteit ingeschakeld. Hierbij geldt dat het eigen gewicht kracht gestuurd wordt aangebracht en vervolgens belasting geval 2 (opgelegde verplaatsing) vervorming gestuurd verder wordt opgevoerd. In deze paragraaf wordt beschreven welke stapgroottes worden toegepast met welke iteratie methode en convergentie criteria.

5.7.1

*Belastingschema*

In onderstaande tabel wordt het toegepaste belastingschema weergegeven met bijbehorende stapgroottes.

*Tabel 8: toegepast belastingschema basismodel*

	<b>Belastinggeval</b>	<b>Stapgroottes</b>	<b>Belastingfactor</b>
1	BG1: eigengewicht	0,5 (x 2)	1
2	BG2: opgelegde verplaatsing	1,0 (x 250)	250

5.7.2

*Iteratiemethode en convergentiecriteria*

Voor de berekening wordt als numerieke iteratie methode gebruik gemaakt van de *Newton-Raphson* methode conform aanbeveling uit de RTD:1016-1:2017 (paragraaf 3.3).

Als convergentie criteria worden in de berekening criteria aangehouden op basis van energie samen met kracht conform de aanbevelingen uit de RTD:1016-1:2017 paragraaf 3.4. In de tabel hieronder worden tevens de toleranties weergegeven die gehanteerd worden bij de genoemde convergentie criteria.

*Tabel 9: toegepaste convergentie criteria en tolerantie*

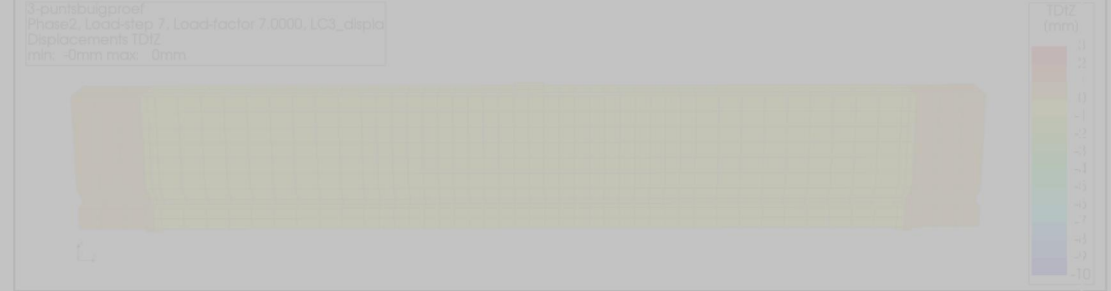
<b>Convergentie op basis van</b>	<b>Tolerantie</b>
Energie	0,001
Kracht	0,01

5.8 Resultaten 3-puntsbuigproef model

5.8.1

Verplaatsingen

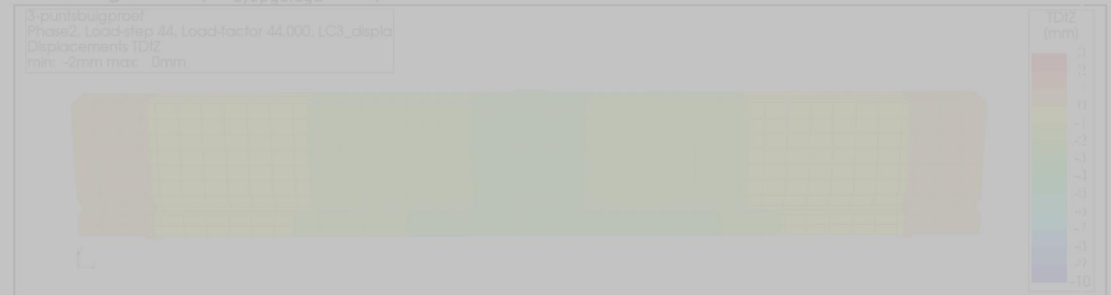
Belasting 92 kN,  $u_{z,opgelegd} = 0,37$  mm



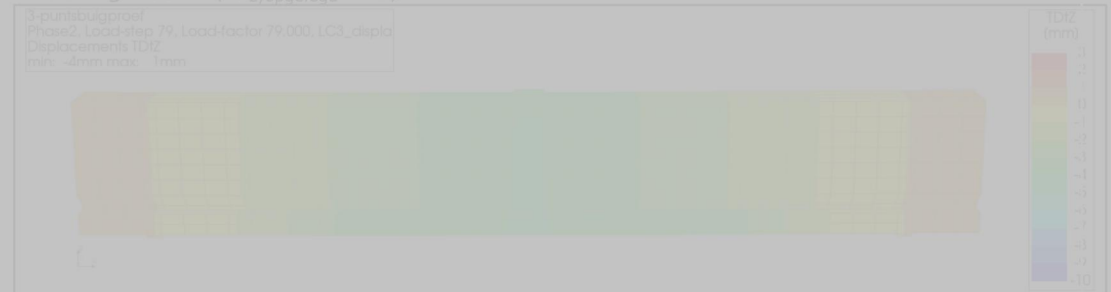
Belasting 71 kN,  $u_{z,opgelegd} = 0,87$  mm



Belasting 90 kN,  $u_{z,opgelegd} = 2,22$  mm



Belasting 108 kN,  $u_{z,opgelegd} = 3,97$  mm



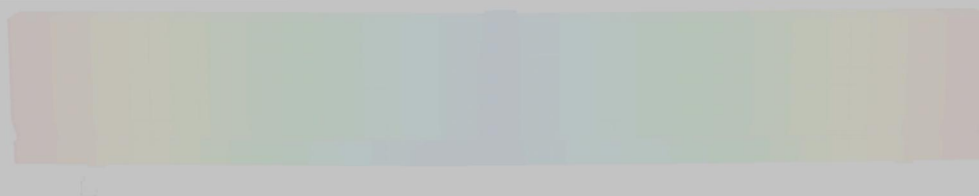
## Belasting 91 kN, $u_{z,opgelegd} = 6,07$ mm

3-puntsbuisproef  
Phase2, Load-step 121, Load-factor 121.00, LC3\_displa  
Displacements TDZ  
min: -8mm max: 1mm



## Belasting 57,5 kN, $u_{z,opgelegd} = 10,02$ mm

3-puntsbuisproef  
Phase2, Load-step 200, Load-factor 200.00, LC3\_displa  
Displacements TDZ  
min: -11.0mm max: 2.1mm





5.8.2

Normaalspanningen interface

Belasting 92 kN,  $u_{z,opgelegd} = 0,37$  mm



Belasting 71 kN,  $u_{z,opgelegd} = 0,87$  mm



Belasting 90 kN,  $u_{z,opgelegd} = 2,22$  mm



Belasting 108 kN,  $u_{z,opgelegd} = 3,97$  mm



Belasting 91 kN,  $u_{z,opgelegd} = 6,07$  mm



Belasting 57,5 kN,  $u_{z,opgelegd} = 10,02$  mm



5.8.3

Relatieve verplaatsingen normaal richting interface

Belasting 92 kN,  $u_{z,opgelegd} = 0,37$  mm



Belasting 71 kN,  $u_{z,opgelegd} = 0,87$  mm



Belasting 90 kN,  $u_{z,opgelegd} = 2,22$  mm



Belasting 108 kN,  $u_{z,opgelegd} = 3,97$  mm



Belasting 91 kN,  $u_{z,opgelegd} = 6,07$  mm



Belasting 57,5 kN,  $u_{z,opgelegd} = 10,02$  mm



5.8.4

*Schuifspanningen interface*

Belasting 92 kN,  $u_{z,opgelegd} = 0,37$  mm



Belasting 71 kN,  $u_{z,opgelegd} = 0,87$  mm



Belasting 90 kN,  $u_{z,opgelegd} = 2,22$  mm



Belasting 108 kN,  $u_{z,opgelegd} = 3,97$  mm



Belasting 91 kN,  $u_{z,opgelegd} = 6,07$  mm

5-puntsbuisproef  
Phase2, Load-step 121, Load-factor 121.00, LC3\_displa  
Interface Tractions STSx  
min: -13.16N/mm<sup>2</sup> max: 6.26N/mm<sup>2</sup>



Belasting 57,5 kN,  $u_{z,opgelegd} = 10,02$  mm

5-puntsbuisproef  
Phase2, Load-step 200, Load-factor 200.00, LC3\_displa  
Interface Tractions STSx  
min: -12.89N/mm<sup>2</sup> max: 4.97N/mm<sup>2</sup>



5.8.5

Staalspanning breedplaat wapening

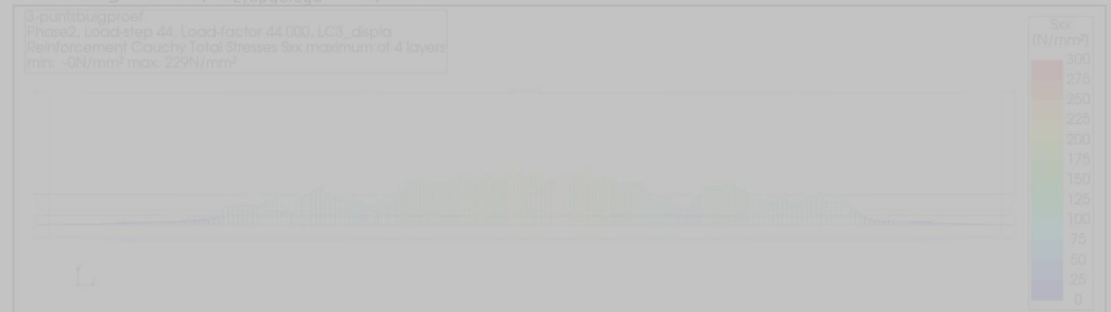
Belasting 92 kN,  $u_{z,opgelegd} = 0,37$  mm



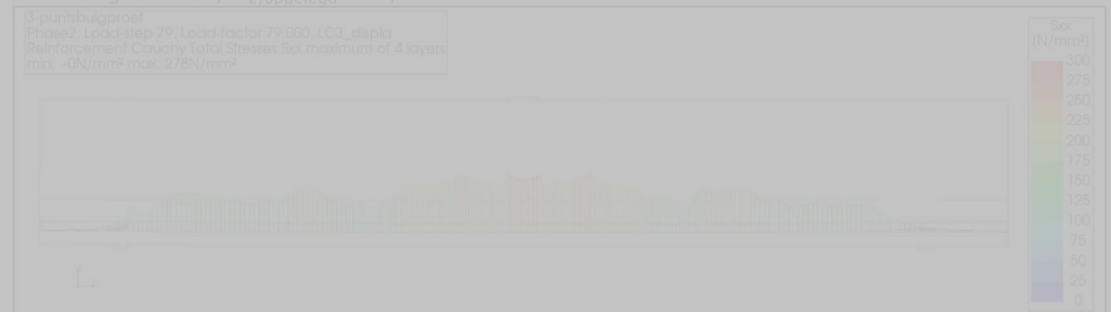
Belasting 71 kN,  $u_{z,opgelegd} = 0,87$  mm



Belasting 90 kN,  $u_{z,opgelegd} = 2,22$  mm



Belasting 108 kN,  $u_{z,opgelegd} = 3,97$  mm



Belasting 91 kN,  $u_{z,opgelegd} = 6,07$  mm

3-puntsbuigproef  
Phase2, Load-step 121, Load-factor 121.00, LC3\_displa  
Reinforcement Cauchy Total Stresses Sxx maximum of 4 layers  
min: -0N/mm<sup>2</sup> max: 264N/mm<sup>2</sup>



Belasting 57,5 kN,  $u_{z,opgelegd} = 10,02$  mm

3-puntsbuigproef  
Phase2, Load-step 200, Load-factor 200.00, LC3\_displa  
Reinforcement Cauchy Total Stresses Sxx maximum of 4 layers  
min: -0N/mm<sup>2</sup> max: 303N/mm<sup>2</sup>

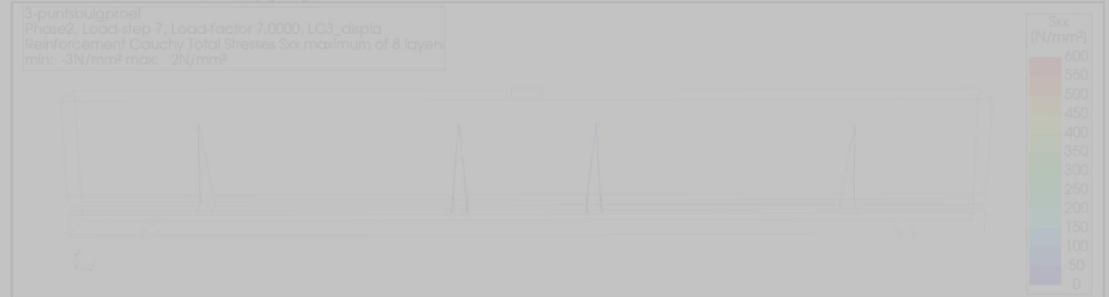




5.8.6

Staalspanning tralie liggers

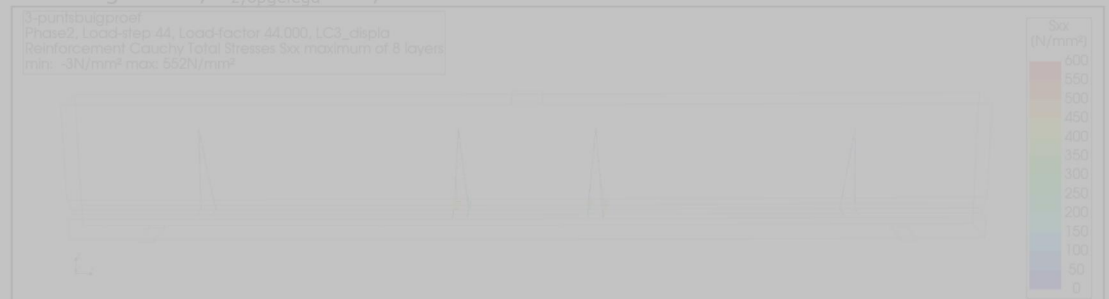
Belasting 92 kN,  $u_{z,opgelegd} = 0,37$  mm



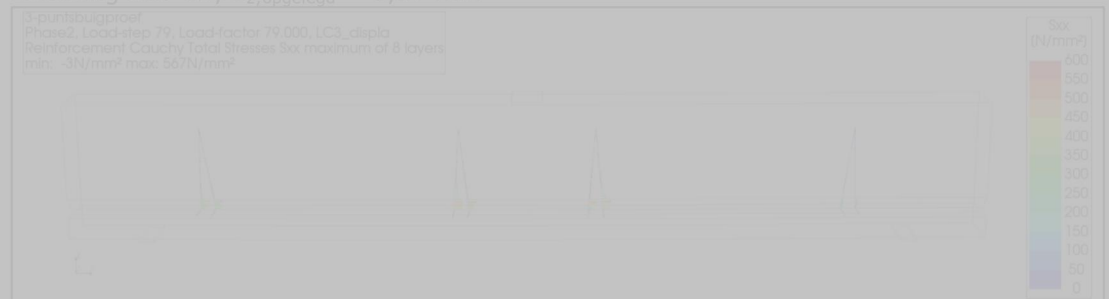
Belasting 71 kN,  $u_{z,opgelegd} = 0,87$  mm



Belasting 90 kN,  $u_{z,opgelegd} = 2,22$  mm

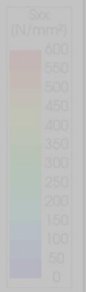


Belasting 108 kN,  $u_{z,opgelegd} = 3,97$  mm



Belasting 91 kN,  $u_{z,opgeleed} = 6,07$  mm

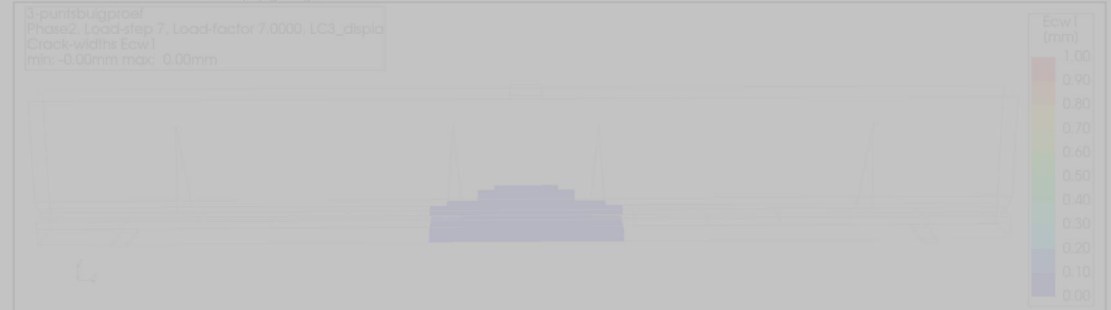
3-puntbuigproef  
Phase2, Load-step 121, Load-factor 121.00, LC3\_displa  
Reinforcement Cauchy Total Stresses  $S_{xx}$  maximum of 8 layers  
min: -3N/mm<sup>2</sup> max: 624N/mm<sup>2</sup>



5.8.7

*Scheurvorming*

Belasting 92 kN,  $u_{z,opgeleed} = 0,37$  mm



Belasting 71 kN,  $u_{z,opgeleed} = 0,87$  mm



Belasting 90 kN,  $u_{z,opgeleed} = 2,22$  mm

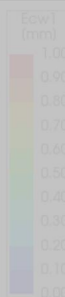


Belasting 108 kN,  $u_{z,opgeleed} = 3,97$  mm



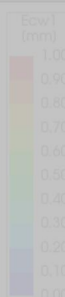
Belasting 91 kN,  $u_{z,opgelegd} = 6,07$  mm

8-puntsbuigproef  
Phase2, Load-step 121, Load-factor 121.00, LC3\_displa  
Crack-widths Ecw1  
min: -0.00mm,max: 8.71mm



Belasting 57,5 kN,  $u_{z,opgelegd} = 10,02$  mm

8-puntsbuigproef  
Phase2, Load-step 200, Load-factor 200.00, LC3\_displa  
Crack-widths Ecw1  
min: -0.00mm,max: 24.03mm



5.8.8

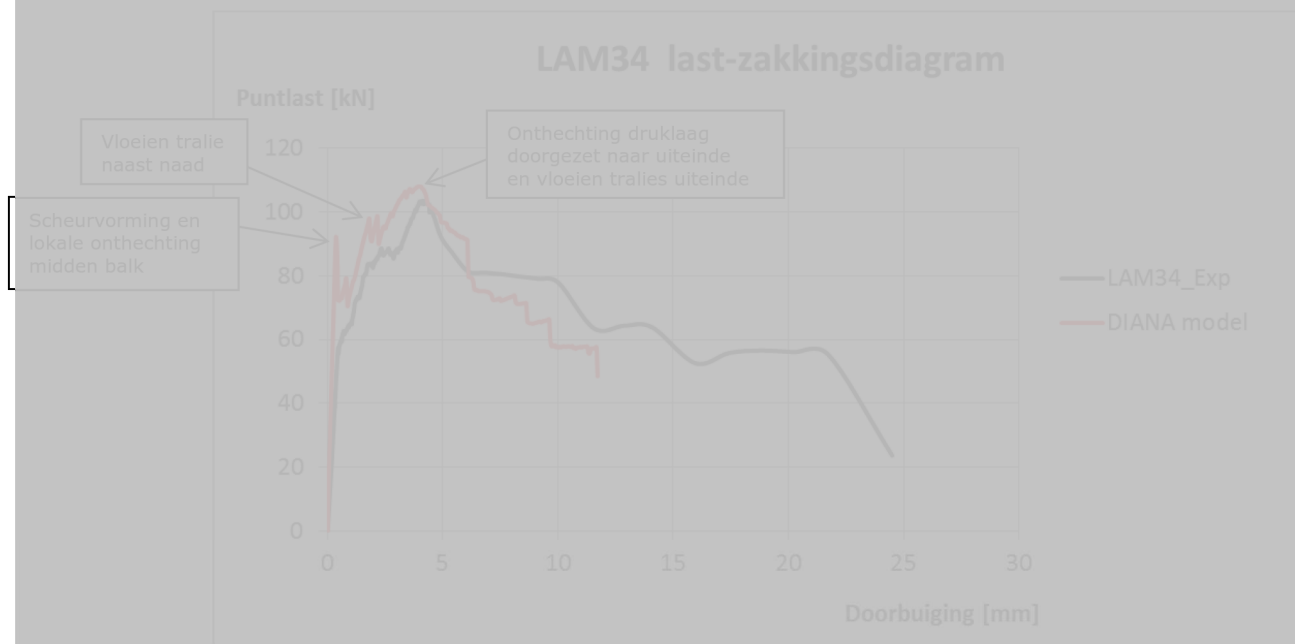
*Last-zakkingsdiagram en beoordeling van de resultaten*

Hieronder wordt het last-zakkingsdiagram weergegeven die volgt uit de berekening. De verticale zakking is daarbij gemeten aan de bovenkant van het model in het midden en uitgezet tegenover de omgerekende puntlast.



*Figuur 27: locatie uitgelezen zakking / reactiekracht*

Dit leidt tot het onderstaand last-zakkingsdiagram waarbij de grafiek afkomstig van de fysieke proef en van het basismodel is toegevoegd ter vergelijking.



*Figuur 28: last-zakkingsdiagram 3-puntsbuigproef model*

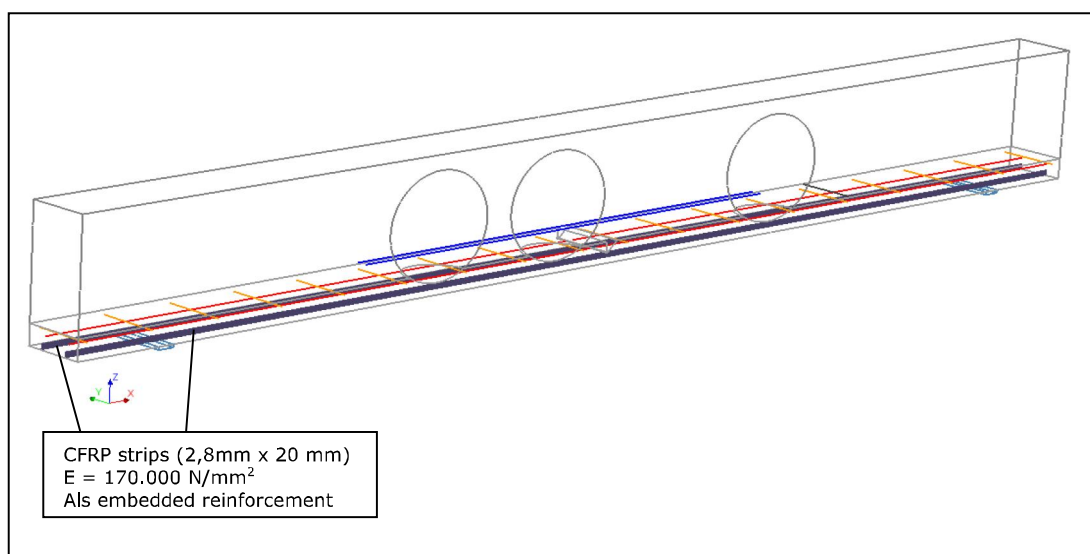
Uit de resultaten en het lastzakkingsdiagram van het 3-puntsbuigproef DIANA model blijkt dat de constructie zich in eerste instantie redelijk lineair gedraagt tot een belastingniveau van 92 kN. Er treedt dan scheurvorming op en lokale onthechting van de druklaag in het midden van de balk. De belasting valt hierna terug tot 71 kN. Vervolgens neemt de belasting weer toe tot 90 kN waarbij vloeien optreedt in de tralies in het midden van de balk. Hierbij is tevens een toename te zien in de scheurvorming in de druklaag nabij de middelste tralie liggers. De belasting neemt hierna nog verder toe tot maximaal 108 kN, waarbij de onthechting van de druklaag wordt doorgezet naar het uiteinde en tevens de tralie liggers aan het uiteinde vloeien. De balk wordt hierbij als bezweken geacht, bij verder doordrukken neemt de belasting alleen maar af. De behaalde belasting is iets hoger dan uit de proef volgt, 4% hoger, desalniettemin komt het globale gedrag goed overeen met de proefresultaten.

## 6 DIANA 4-puntsbuigproef 3D-model met CFRP strips versterking

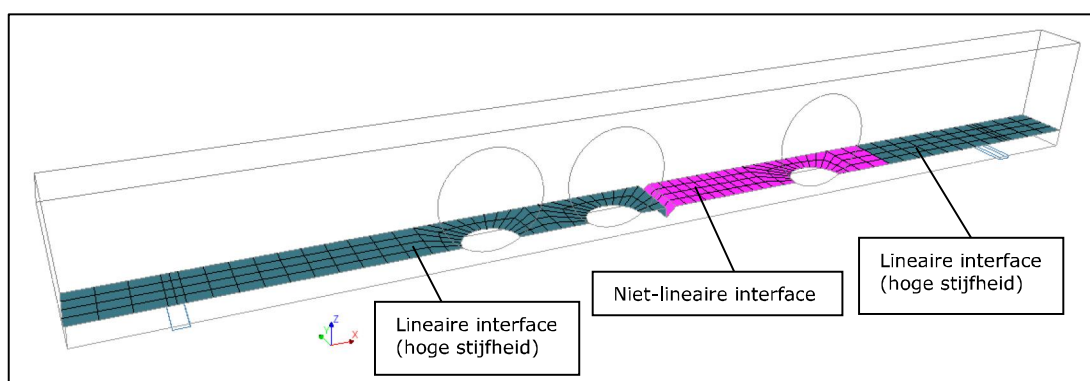
### 6.1

#### *Geometrie en mesh*

Geometrie van het model met CFRP versterking is voor een groot deel identiek aan het basismodel, echter zijn in dit model twee CFRP strips gemodelleerd in de prefab schil, zijn de tralie liggers verwijderd en de interface slechts aan één kant niet-lineair gemaakt. Dit is gedaan omdat onregelmatige verticale vervorming en ontbreken van de tralieligger nadelig is voor de CFRP-strip t.a.v. mogelijke onthechting, zodoende wordt dit als een conservatieve benadering gezien.



Figuur 29: toegepaste strips



Figuur 30: lineair en niet-lineaire interfaces model

### 6.2

#### *Toegepaste elementen*

De toegepaste type elementen voor het model met CFRP strip versterking zijn gelijk aan die van het basismodel, zie 3.2.

### 6.3

#### *Toegepaste materiaal eigenschappen*

##### CFRP strip

- $E = 170.000 \text{ N/mm}^2$

Overige materiaal eigenschappen gelijk aan die van het basismodel

- 6.4 *Toegepaste interface eigenschappen*  
Interface eigenschappen voor lineaire en niet-lineaire interface zijn gelijk als die toegepast in het basismodel, zie 3.4.
- 6.5 *Toegepaste randvoorwaarden*  
De toegepaste randvoorwaarden voor het model met versterking zijn gelijk aan die van het basismodel, zie 3.5.
- 6.6 *Toegepaste belastingen*  
Belastinggevallen voor het model met versterking zijn gelijk aan die van het basismodel, zie 3.6. Het belastinggeval 2 (puntlasten) zal echter verder worden opgevoerd (zie 6.7.1).
- 6.7 *Analyse instellingen*  
De analyse betreft een kracht gestuurde fysisch en geometrisch niet-lineaire structurele berekening waarbij de belasting in stappen wordt aangebracht. In deze paragraaf wordt beschreven welke stapgroottes worden toegepast met welke iteratie methode en convergentie criteria.
- 6.7.1 *Belastingschema*  
In onderstaande tabel wordt het toegepaste belastingschema weergegeven met bijbehorende stapgroottes.

*Tabel 10: toegepast belastingschema basismodel*

	<b>Belastinggeval</b>	<b>Stapgroottes</b>	<b>Belastingfactor</b>
1	BG1: eigengewicht	0,5 (x 2)	1
2	BG2: puntlasten	1,0 (x 250)	250

- 6.7.2 *Iteratiemethode en convergentiecriteria*  
Voor de berekening wordt als numerieke iteratie methode gebruik gemaakt van de *Newton-Raphson* methode conform aanbeveling uit de RTD:1016-1:2017 (paragraaf 3.3).

Als convergentie criteria worden in de berekening criteria aangehouden op basis van energie samen met kracht conform de aanbevelingen uit de RTD:1016-1:2017 paragraaf 3.4. In de tabel hieronder worden tevens de toleranties weergegeven die gehanteerd worden bij de genoemde convergentie criteria.

*Tabel 11: toegepaste convergentie criteria en tolerantie*

<b>Convergentie op basis van</b>	<b>Tolerantie</b>
Energie	0,001
Kracht	0,01

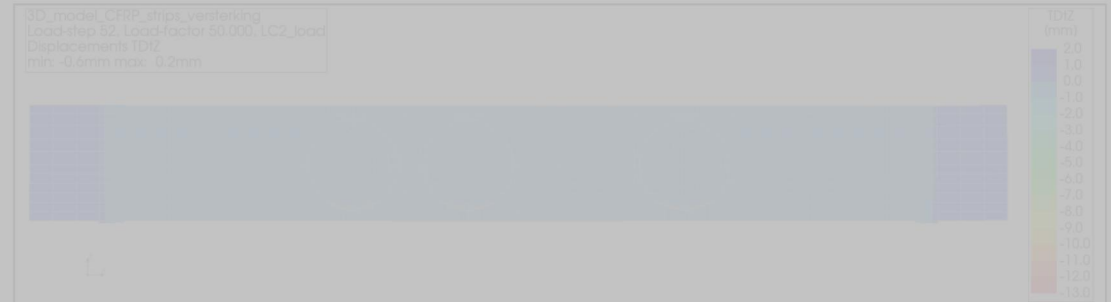
6.8

Resultaten 4-puntsbuigproef model met CFRP strips versterking

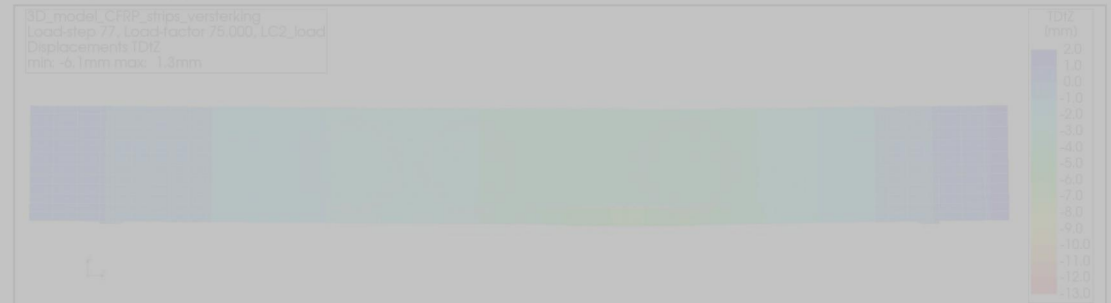
6.8.1

Verplaatsingen

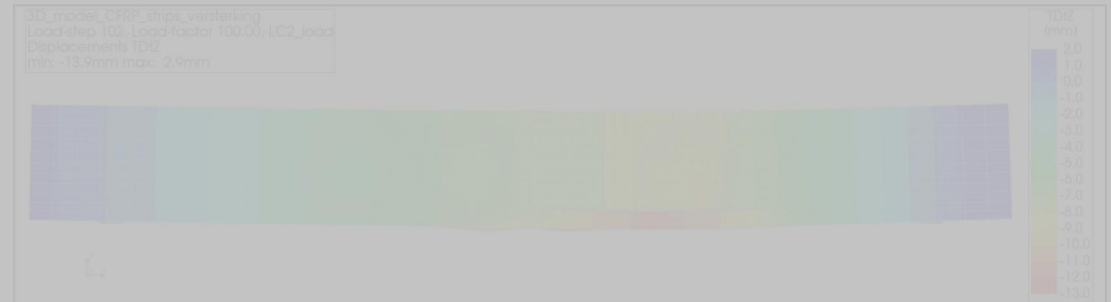
Puntlast = 100 kN



Puntlast = 150 kN



Puntlast = 200 kN

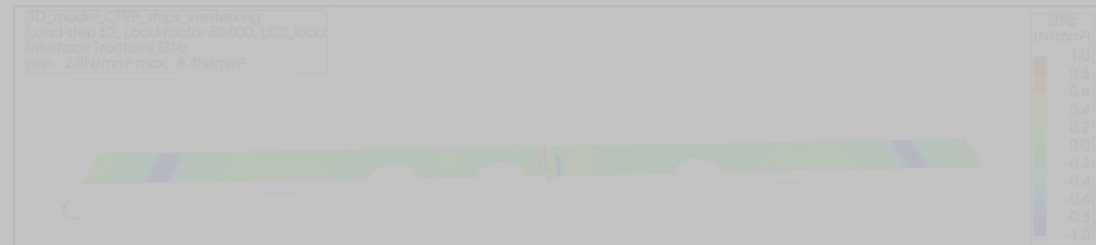




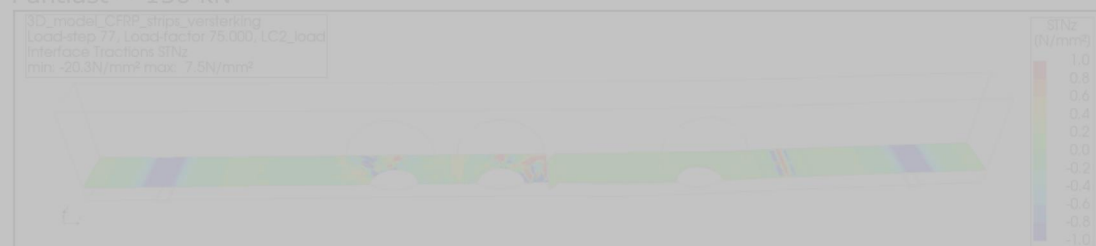
6.8.2

Normaalspanningen interface

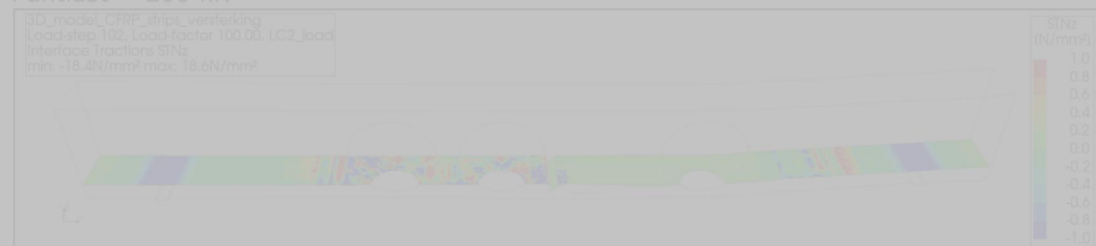
Puntlast = 100 kN



Puntlast = 150 kN



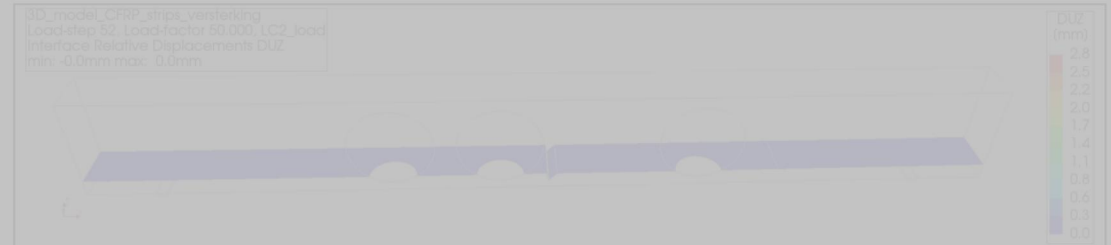
Puntlast = 200 kN



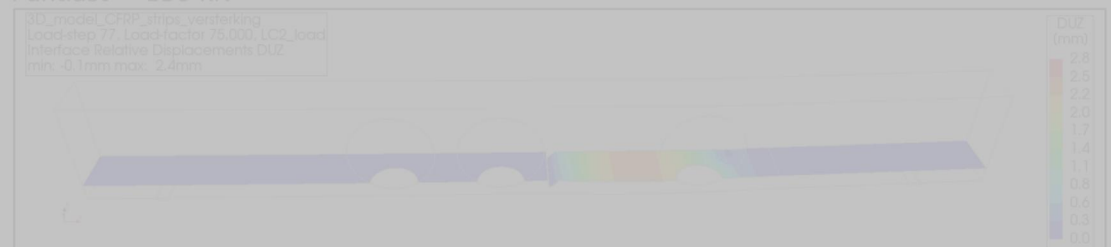
6.8.3

Relatieve verplaatsingen normaal richting interface

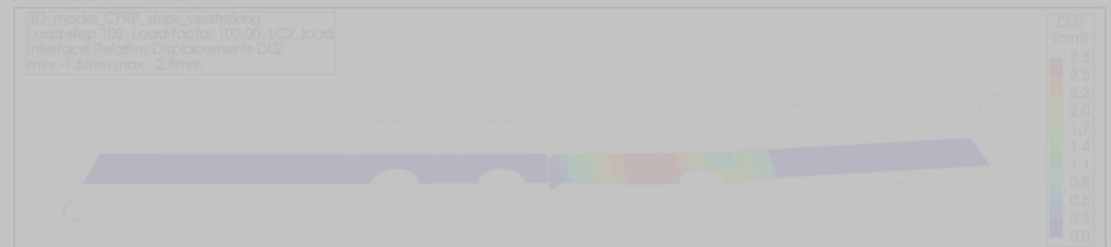
Puntlast = 100 kN



Puntlast = 150 kN



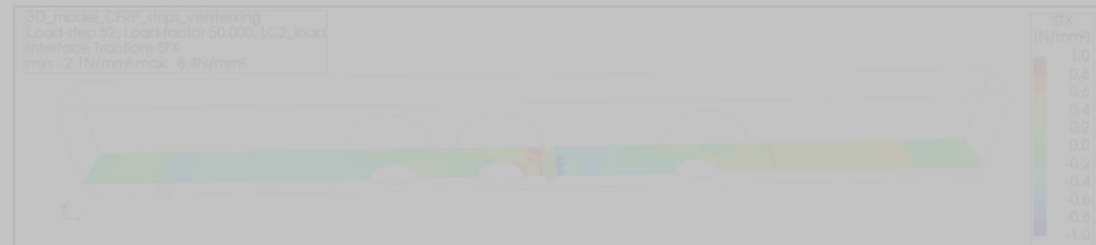
Puntlast = 200 kN



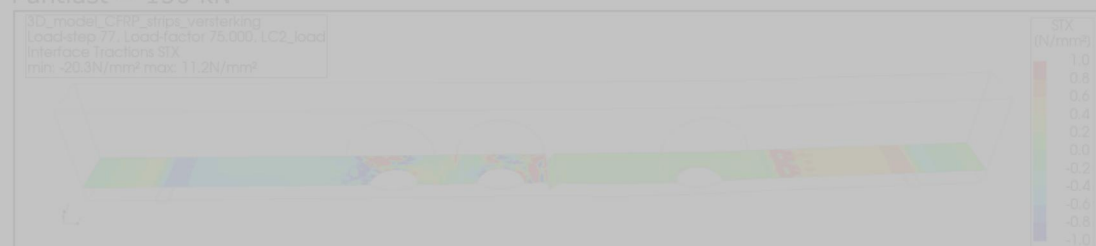
6.8.4

*Schuifspanningen interface*

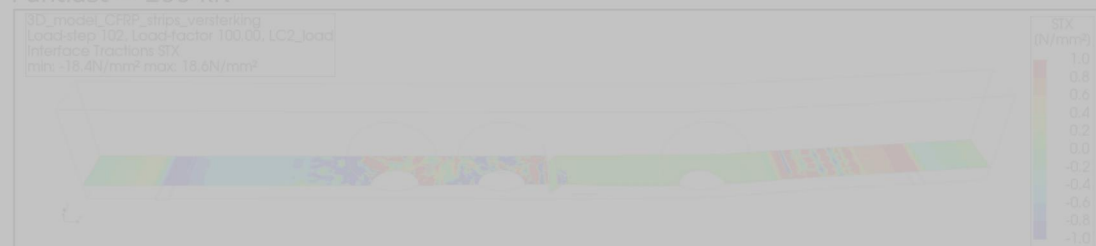
Puntlast = 100 kN



Puntlast = 150 kN



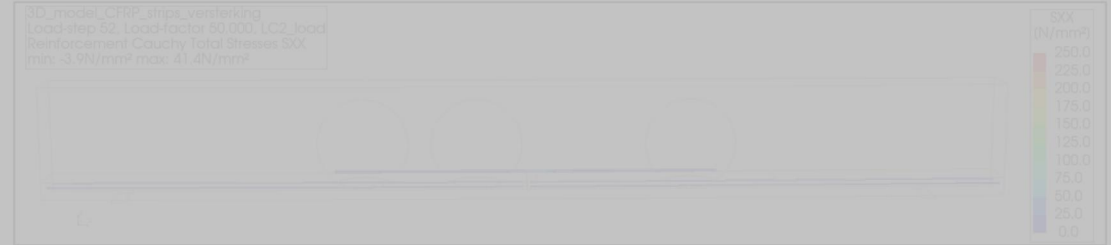
Puntlast = 200 kN



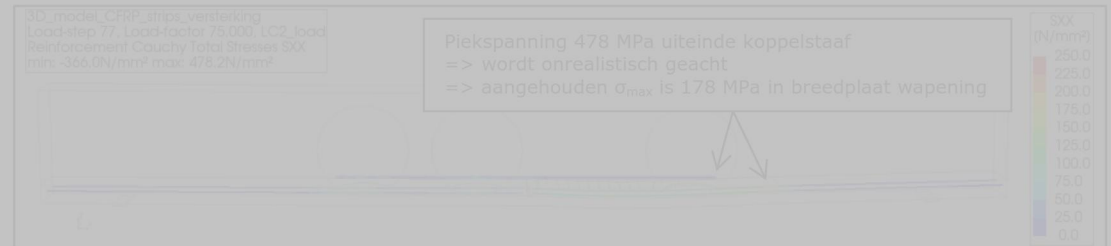
6.8.5

Staalspanningen wapening

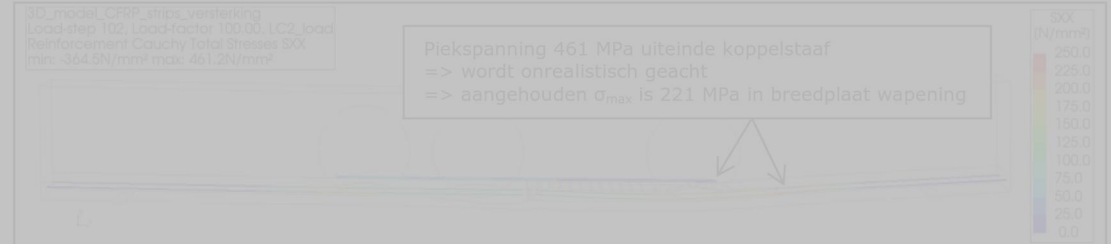
Puntlast = 100 kN



Puntlast = 150 kN



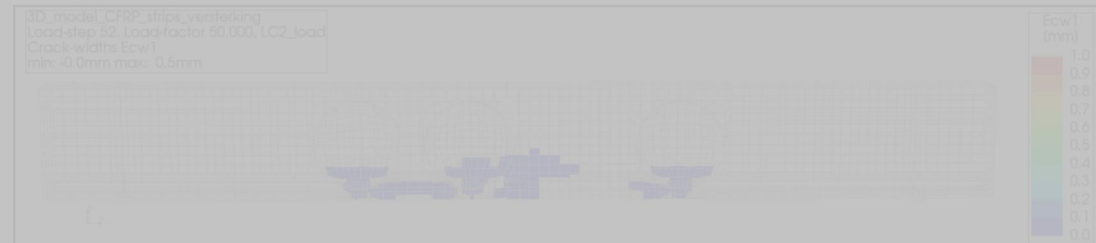
Puntlast = 200 kN



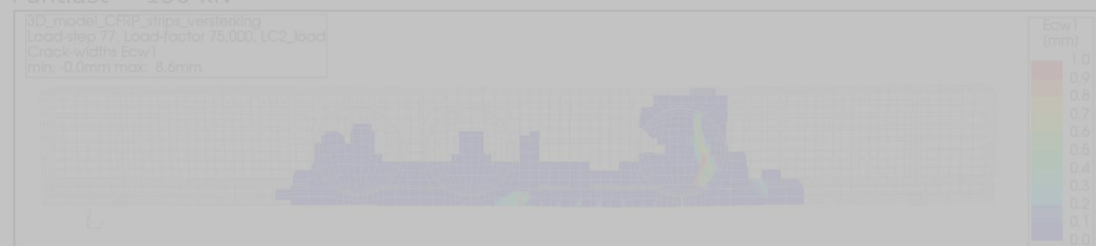
6.8.6

*Scheurvorming*

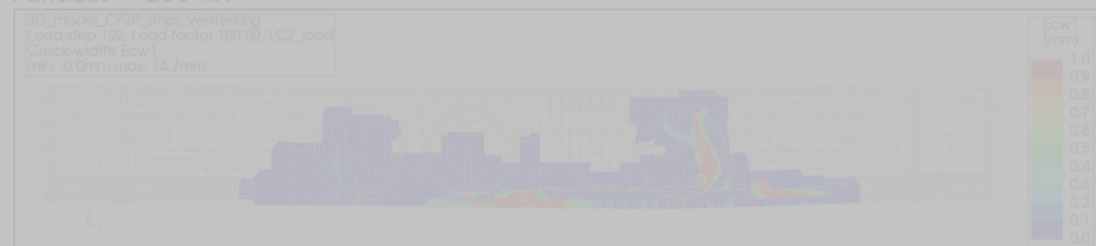
Puntlast = 100 kN



Puntlast = 150 kN



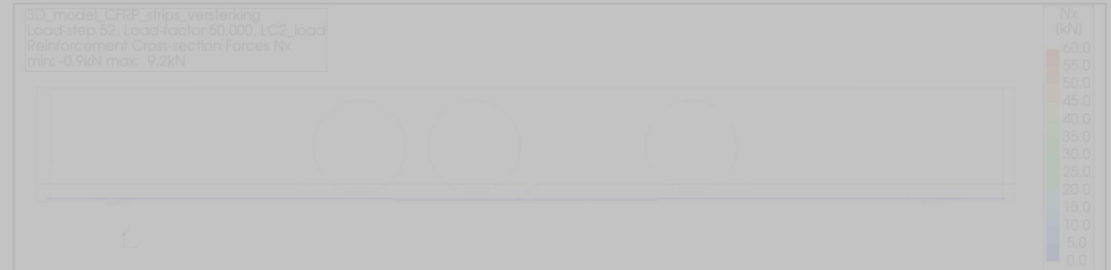
Puntlast = 200 kN



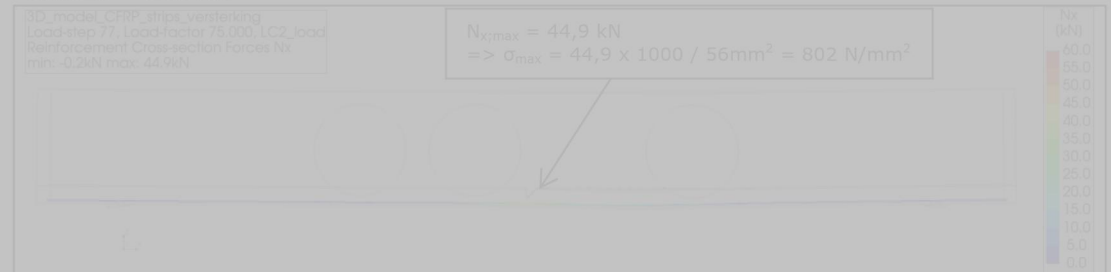
6.8.7

Kracht in de CFRP strips

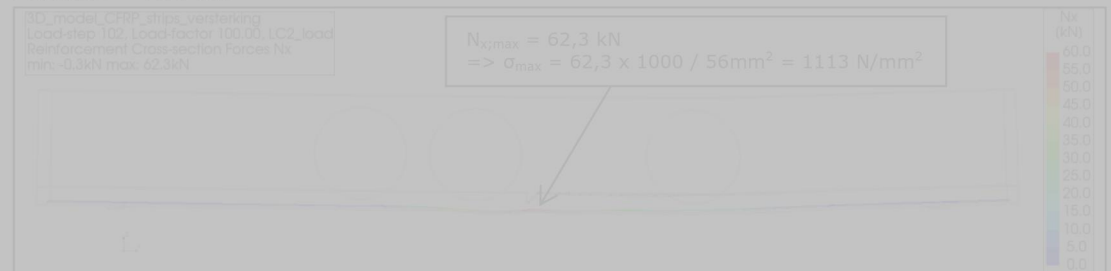
Puntlast = 100 kN



Puntlast = 150 kN



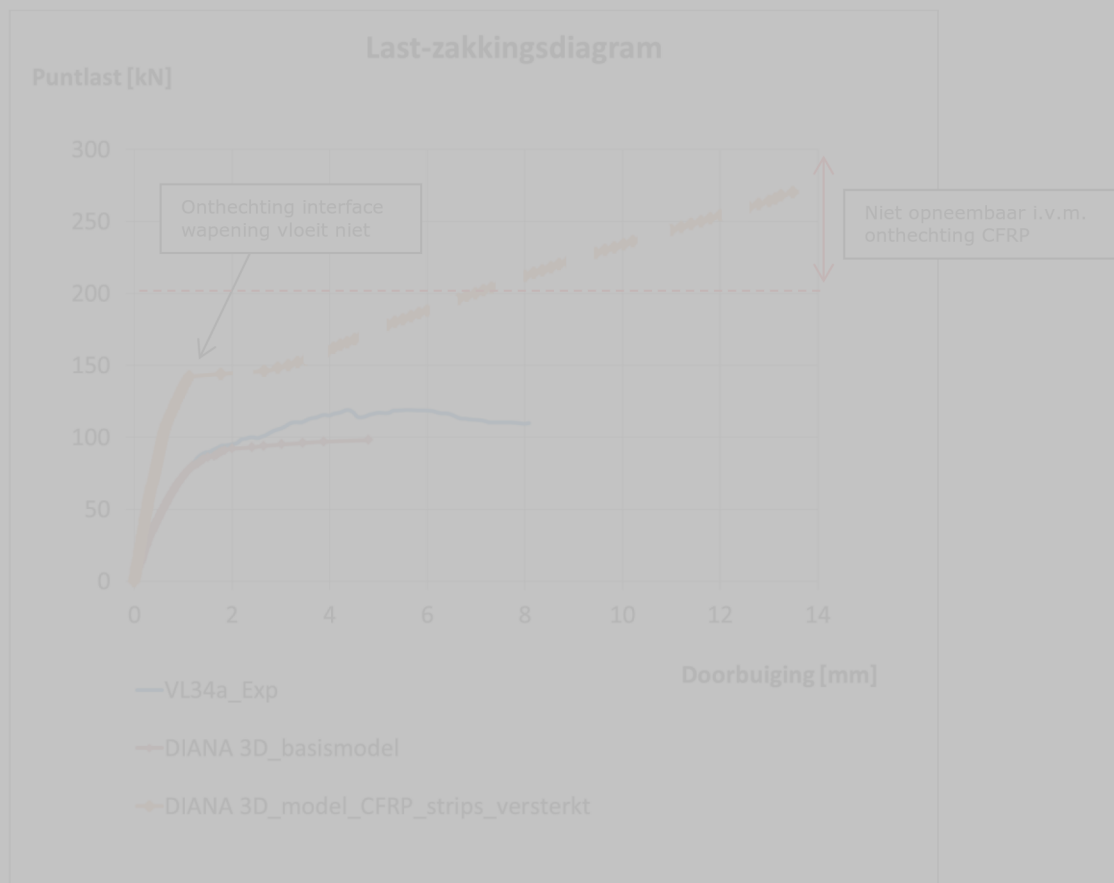
Puntlast = 200 kN



6.8.8

Last-zakkingsdiagram en beoordeling van de resultaten

Hieronder wordt het last-zakkingsdiagram weergegeven die volgt uit de berekening. De verticale zakking is daarbij op dezelfde locatie gemeten als bij het basismodel (bovenkant van het model in het midden) en uitgezet tegenover de omgerekende puntlast. Dit leidt tot het onderstaand last-zakkingsdiagram waarbij de grafiek afkomstig van de fysieke proef en van het basismodel is toegevoegd ter vergelijking.



Figuur 31: last-zakkingsdiagram (gestippeld = minder goede convergentie)

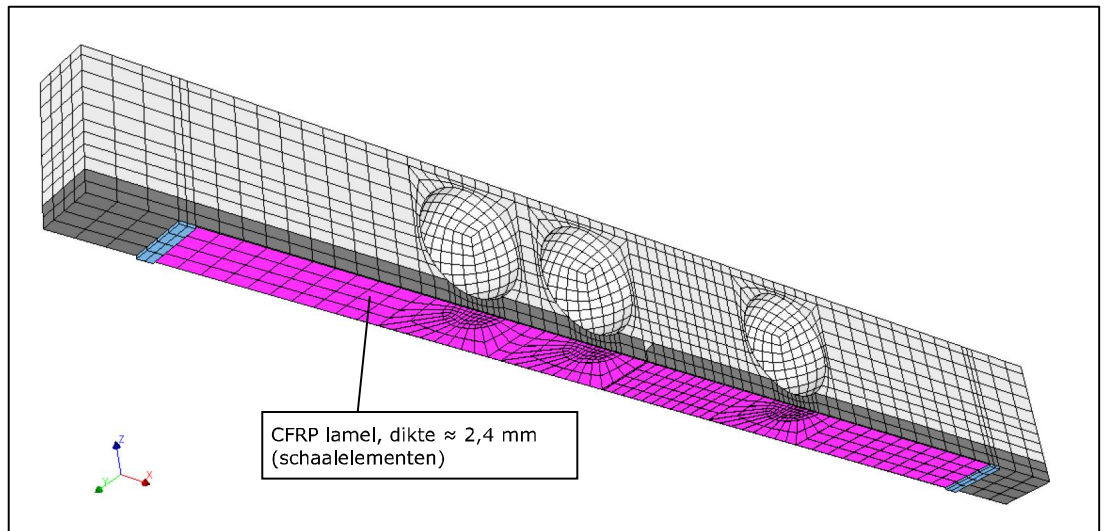
Uit de resultaten van de berekening en uit het last-zakkingsdiagram is te zien dat de CFRP strip versterking bijdraagt aan de capaciteit van de constructie. Bij een belasting van 144 kN (loadfactor 72) treedt onthechting op in de interface, maar de wapening vloeit hierbij nog niet. Het onthechte deel van de prefab schil wordt nabij de naad weer omhoog wordt getrokken tegen de druklaag. Er is zodoende sprake van een kromming in het onthechte prefab deel. De analyse rekent hierna verder maar met een minder goede convergentie. Daarbij is te zien dat de stijfheid significant is afgenomen. Desalniettemin wordt in het model een belasting van 200 kN gehaald zonder dat de wapening vloeit. Hogere belastingen worden niet opneembaar geacht door onthechting van de lijm tussen CFRP en beton.

**7 DIANA 4-puntsbuigproef 3D-model met CFRP lamel versterking**

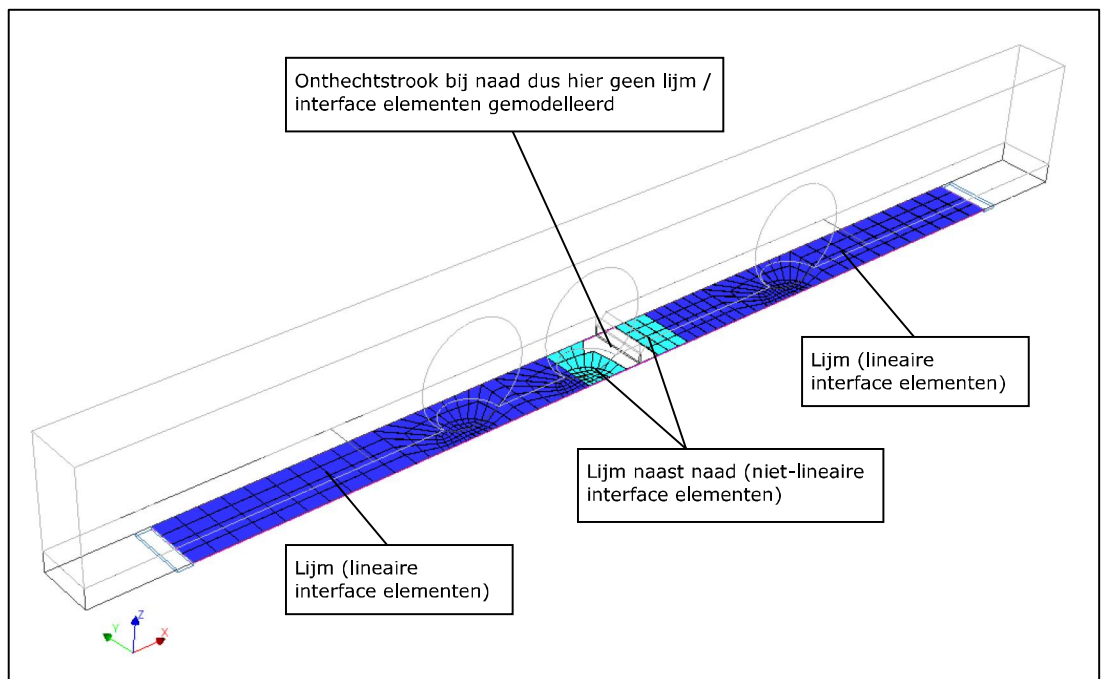
7.1

*Geometrie en mesh*

Geometrie van het model met CFRP versterking is identiek aan het basismodel maar dan met de toevoeging van een CFRP lamel aan de onderkant van de breedplaat.



*Figuur 32: overzicht model met CFRP lamel*



*Figuur 33: lijm tussen CFRP en onderkant breedplaat gemodelleerd met interface elementen*



## 7.2

**Toegepaste elementen**

In het model met CFRP versterking kwadratische volume-, interface- en schaalementen toegepast.

Tabel 12: toegepaste type elementen model met CFRP versterking

CHX60 volume elementen, 20 knoops	CQ48I plane interface elementen, 8+8 knoops	CQ40S curved shell elementen, 8-knoops

## 7.3

**Toegepaste materiaal eigenschappen**
CFRP lamel

- $E = 170.000 \text{ N/mm}^2$

Overige materiaal eigenschappen gelijk aan die van het basismodel

## 7.4

**Toegepaste interface eigenschappen**

## 7.4.1

**Eigenschappen lineaire interface elementen voor de lijm**

- $k_{\text{normaal}} = 1666 \text{ N/mm}^3$  op basis van  $E = 5000 \text{ N/mm}^2$  en dikte is 3 mm
- $k_{\text{schuif}} = 695 \text{ N/mm}^3$  op basis van  $G = 2083 \text{ N/mm}^2$  en dikte is 3 mm

## 7.4.2

**Eigenschappen niet-lineaire interface elementen voor de lijm**

- $k_{\text{normaal}} = 1666 \text{ N/mm}^3$
- $k_{\text{schuif}} = 695 \text{ N/mm}^3$
- Stijfheidsreductie (1%) na bereiken  $f_t = 2,5 \text{ N/mm}^2$

Overige interface eigenschappen gelijk aan die van het basismodel

## 7.5

**Toegepaste randvoorwaarden**

De toegepaste randvoorwaarden voor het model met versterking zijn gelijk aan die van het basismodel, zie 3.5.

## 7.6

**Toegepaste belastingen**

Belastinggevallen voor het model met versterking zijn gelijk aan die van het basismodel, zie 3.6.2. Het belastinggeval 2 (puntlasten) zal echter verder worden opgevoerd (zie 3.7.1)

7.7

*Analyse instellingen*

De analyse betreft een kracht gestuurde fysisch en geometrisch niet-lineaire structurele berekening waarbij de belasting in stappen wordt aangebracht. In deze paragraaf wordt beschreven welke stapgroottes worden toegepast met welke iteratie methode en convergentie criteria.

7.7.1

*Belastingschema*

In onderstaande tabel wordt het toegepaste belastingschema weergegeven met bijbehorende stapgroottes.

*Tabel 13: toegepast belastingschema basismodel*

	<b>Belastinggeval</b>	<b>Stapgroottes</b>	<b>Belastingfactor</b>
1	BG1: eigengewicht	0,5 (x 2)	1
2	BG2: puntlasten	1,0 (x 250)	250

7.7.2

*Iteratiemethode en convergentiecriteria*

Voor de berekening wordt als numerieke iteratie methode gebruik gemaakt van de *Newton-Raphson* methode conform aanbeveling uit de RTD:1016-1:2017 (paragraaf 3.3).

Als convergentie criteria worden in de berekening criteria aangehouden op basis van energie samen met kracht conform de aanbevelingen uit de RTD:1016-1:2017 paragraaf 3.4. In de tabel hieronder worden tevens de toleranties weergegeven die gehanteerd worden bij de genoemde convergentie criteria.

*Tabel 14: toegepaste convergentie criteria en tolerantie*

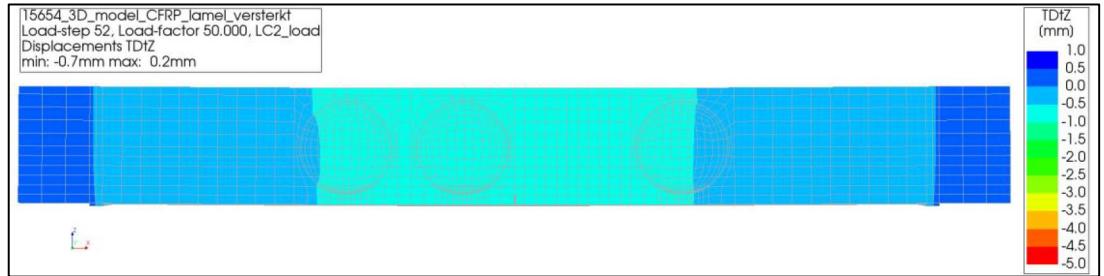
<b>Convergentie op basis van</b>	<b>Tolerantie</b>
Energie	0,001
Kracht	0,01

7.8 Resultaten 4-puntsbuigproef model met CFRP lamel versterking

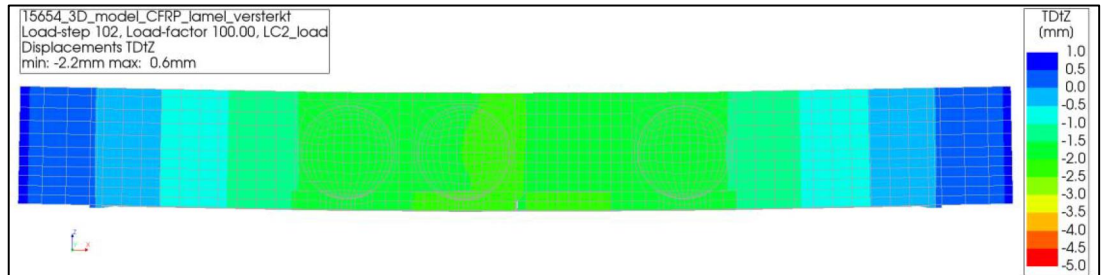
7.8.1

Verplaatsingen

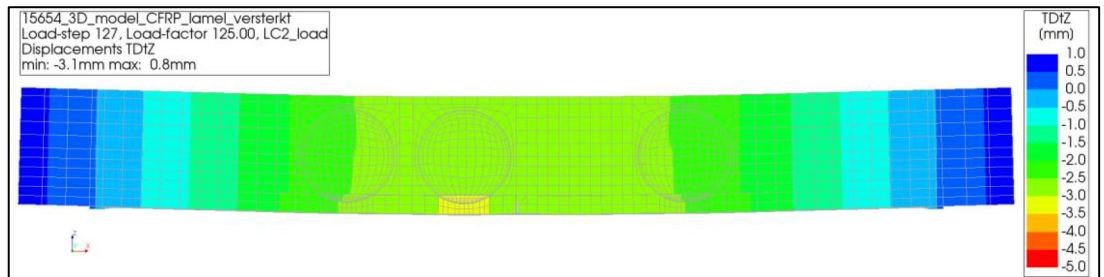
Puntlast = 100 kN



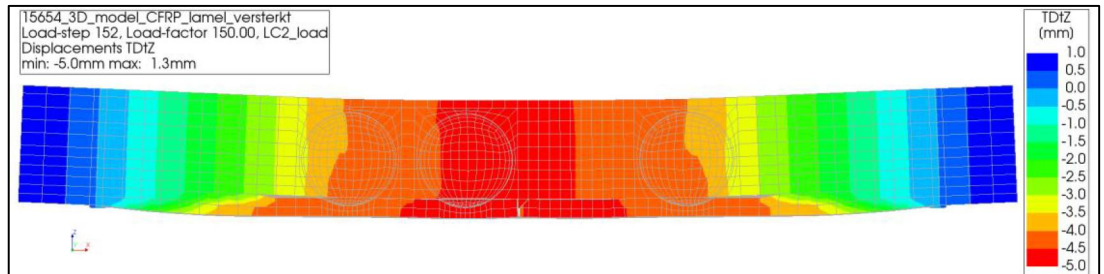
Puntlast = 200 kN



Puntlast = 250 kN



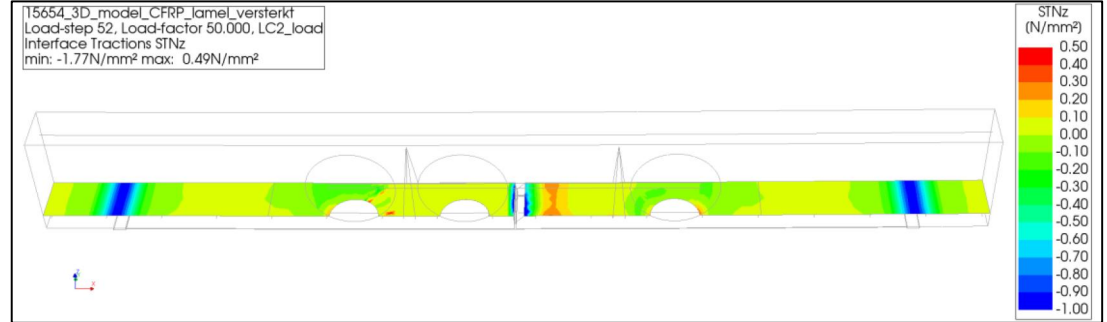
Puntlast = 300 kN



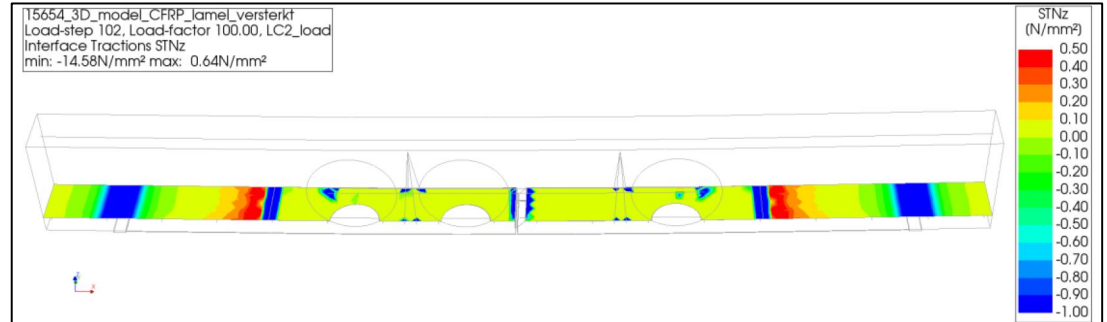
7.8.2

Normaalspanningen interface

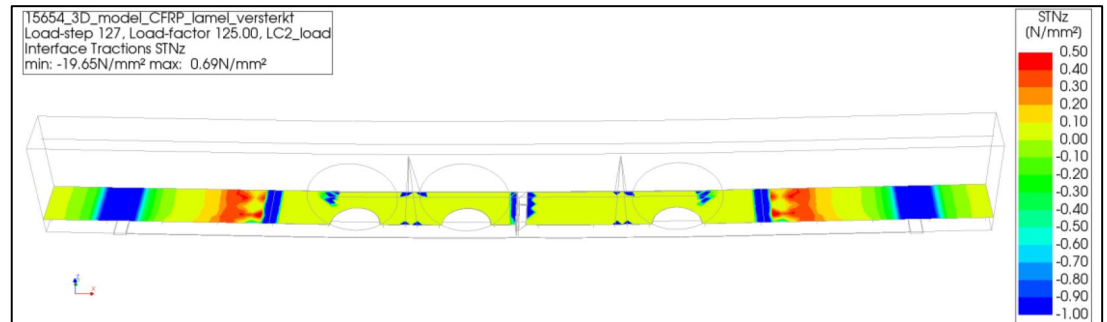
Puntlast = 100 kN



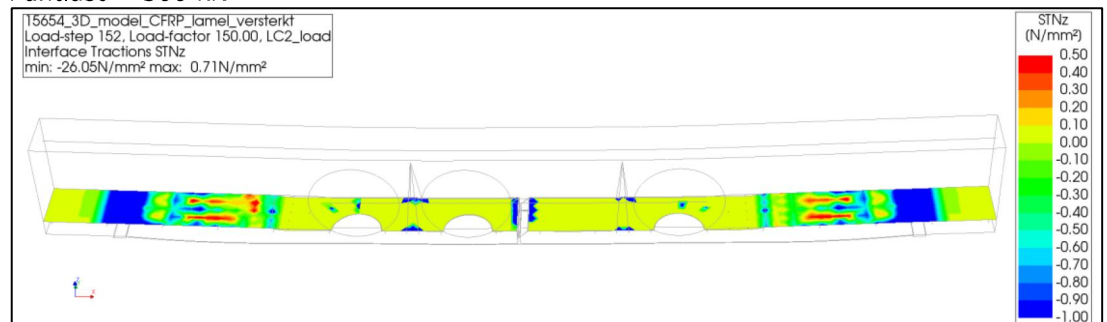
Puntlast = 200 kN



Puntlast = 250 kN



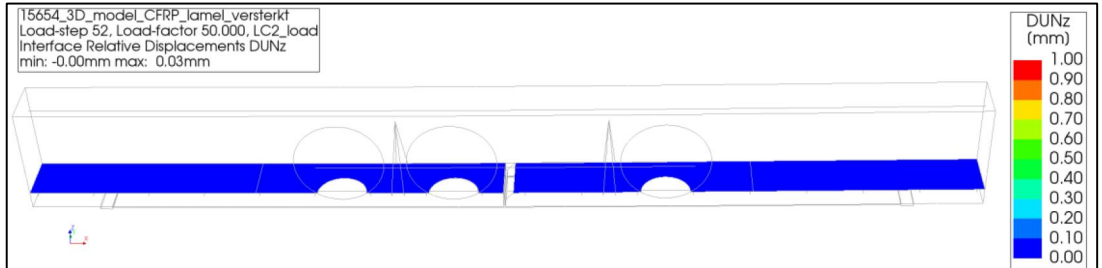
Puntlast = 300 kN



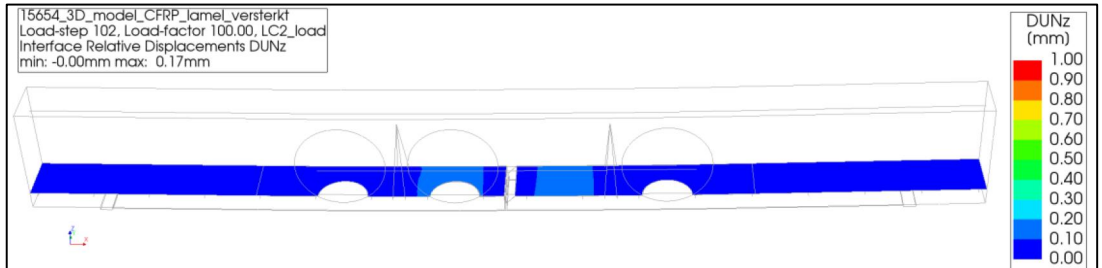
7.8.3

Relatieve verplaatsingen normaal richting interface

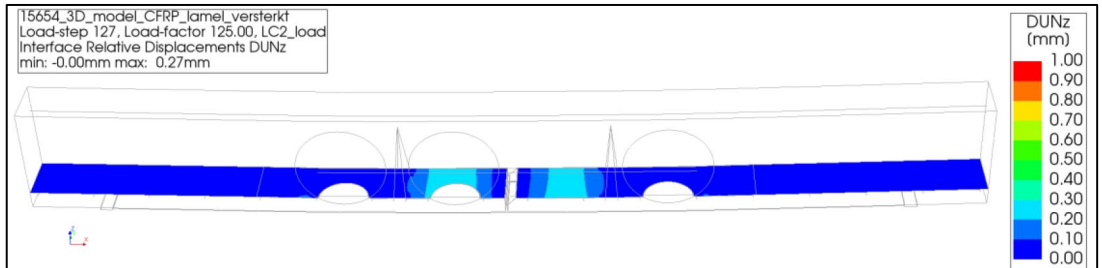
Puntlast = 100 kN



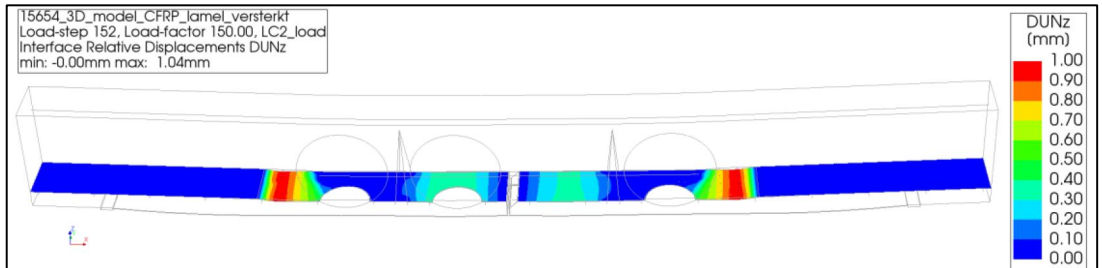
Puntlast = 200 kN



Puntlast = 250 kN



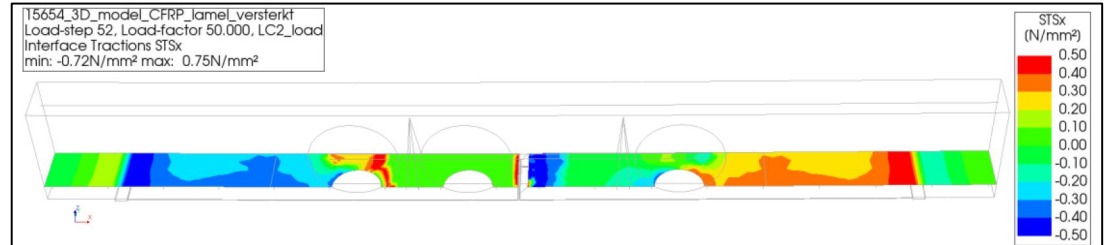
Puntlast = 300 kN



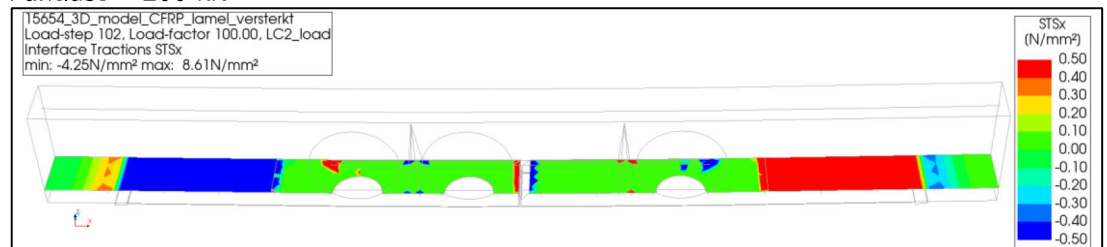
7.8.4

*Schuifspanningen interface*

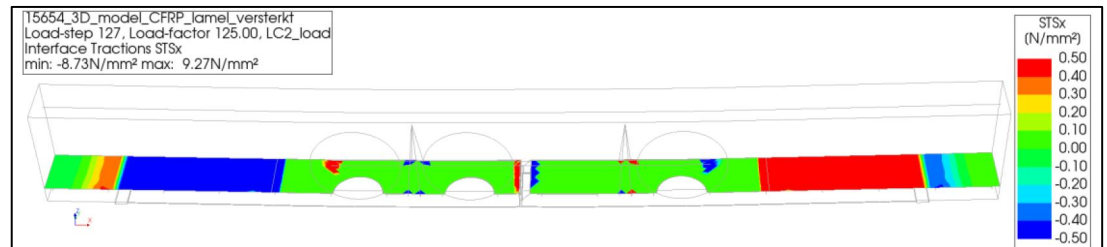
Puntlast = 100 kN



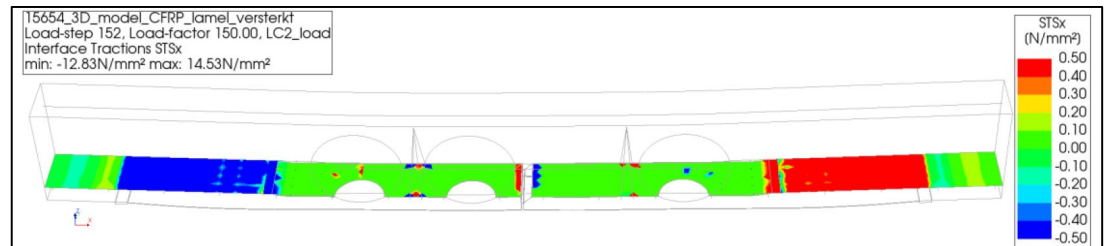
Puntlast = 200 kN



Puntlast = 250 kN



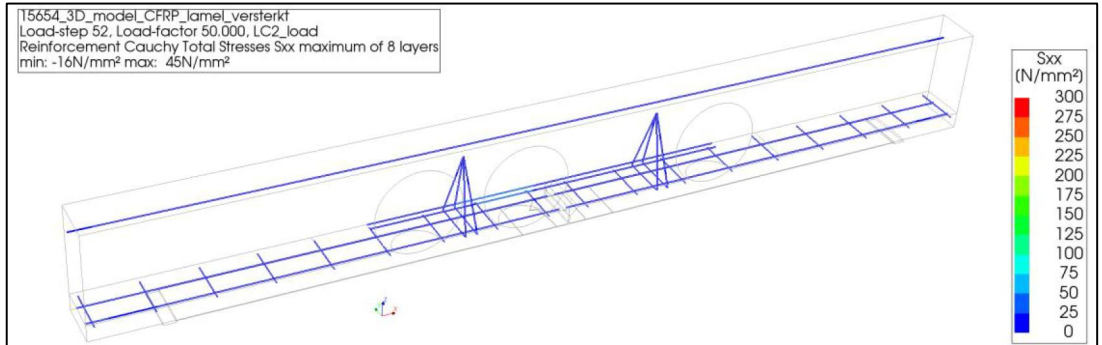
Puntlast = 300 kN



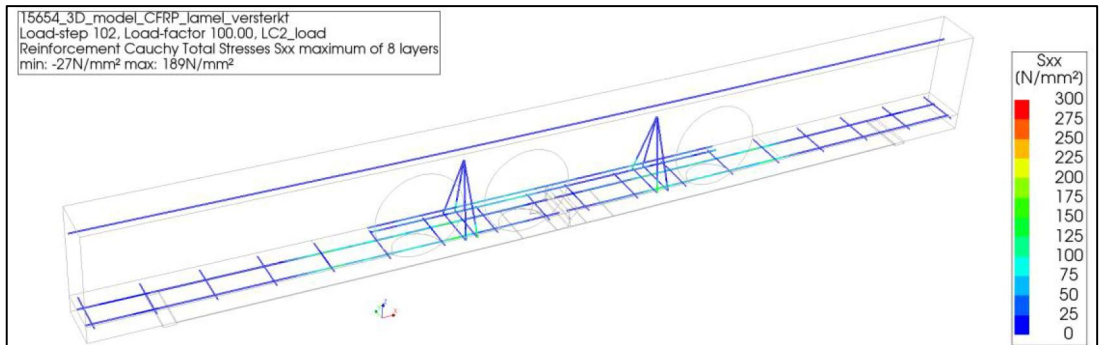
7.8.5

Staalspanningen wapening

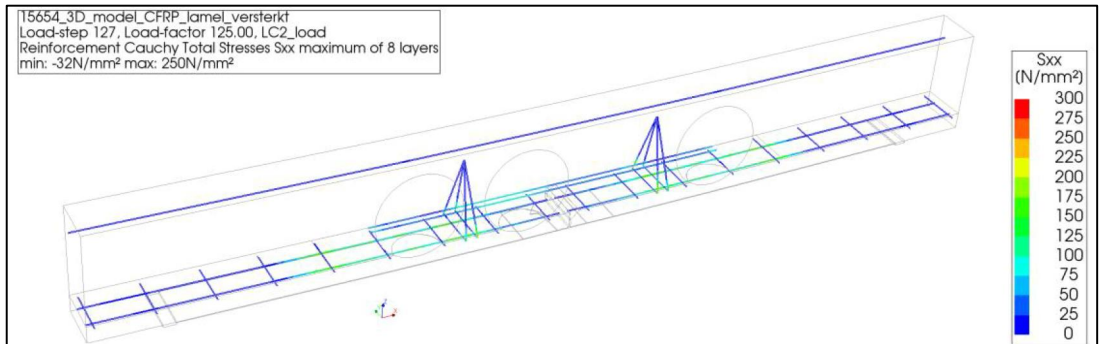
Puntlast = 100 kN



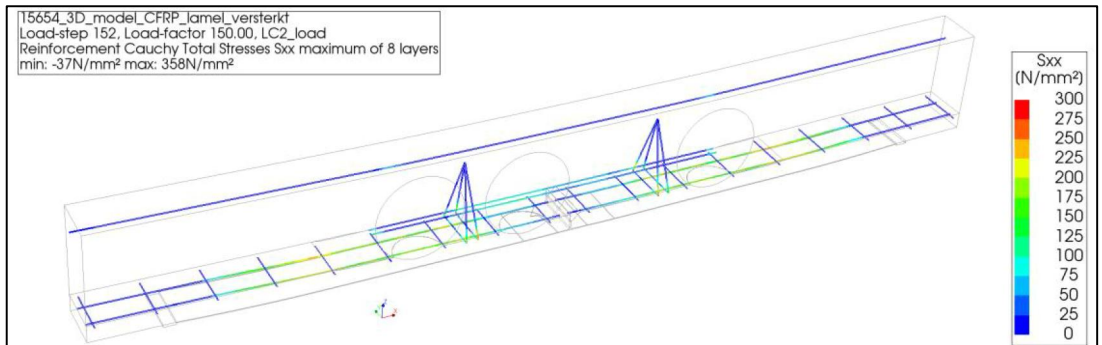
Puntlast = 200 kN



Puntlast = 250 kN



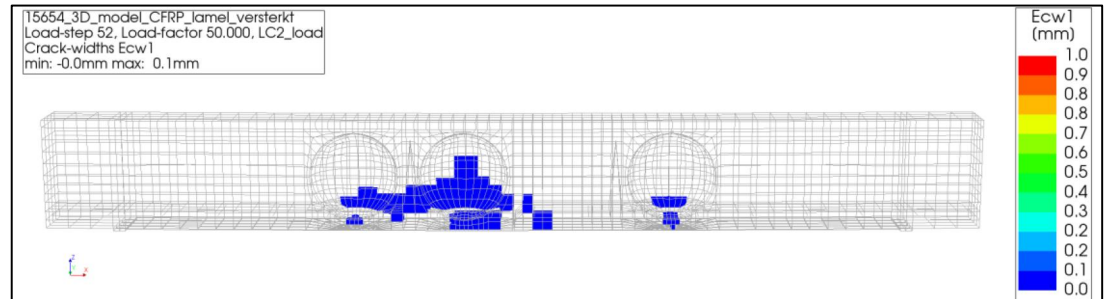
Puntlast = 300 kN



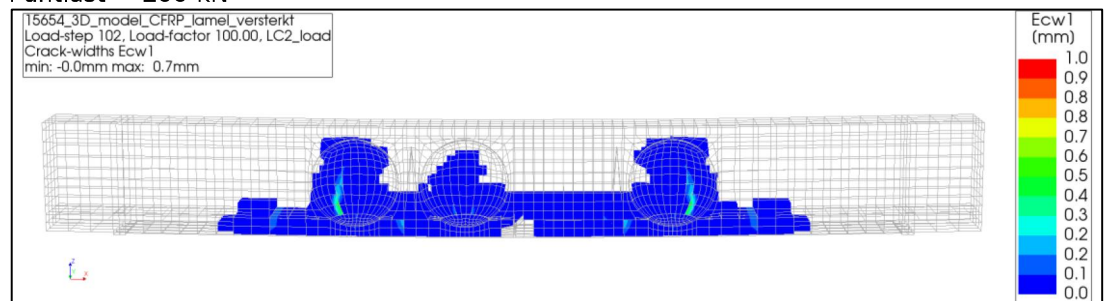
7.8.6

*Scheurvorming*

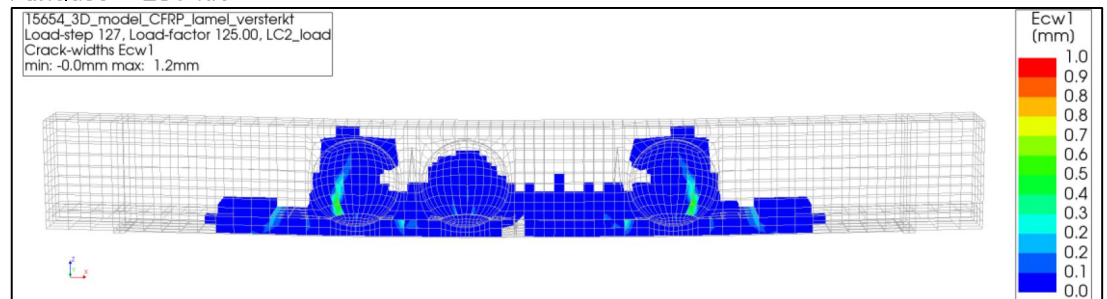
Puntlast = 100 kN



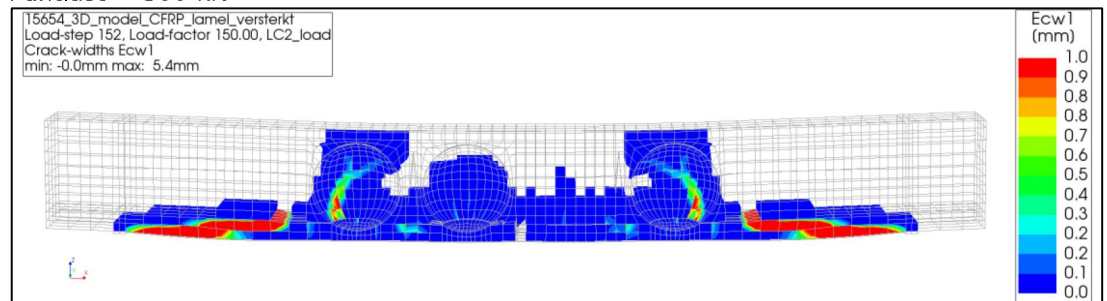
Puntlast = 200 kN



Puntlast = 250 kN



Puntlast = 300 kN

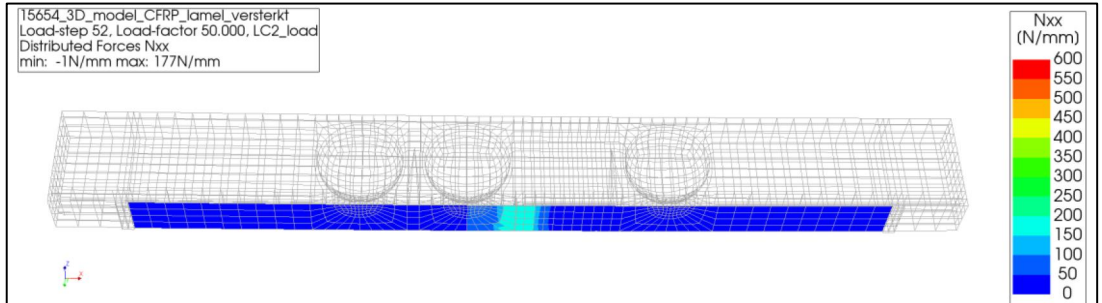




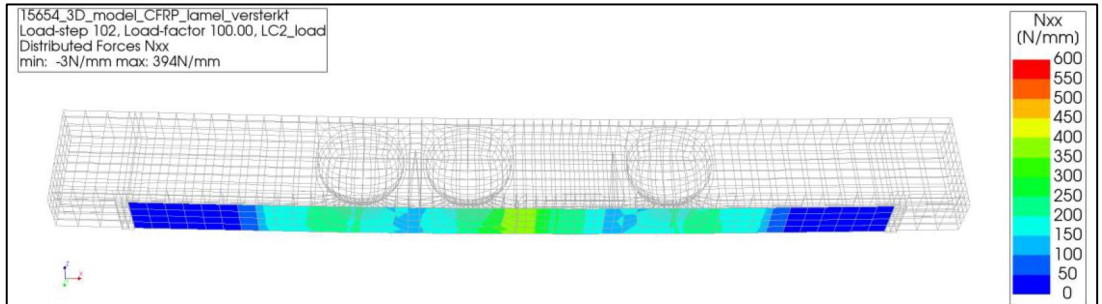
7.8.7

*Kracht in de CFRP*

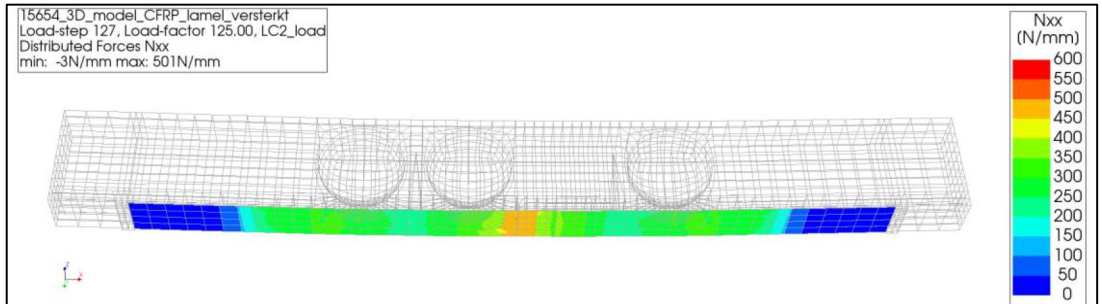
Puntlast = 100 kN



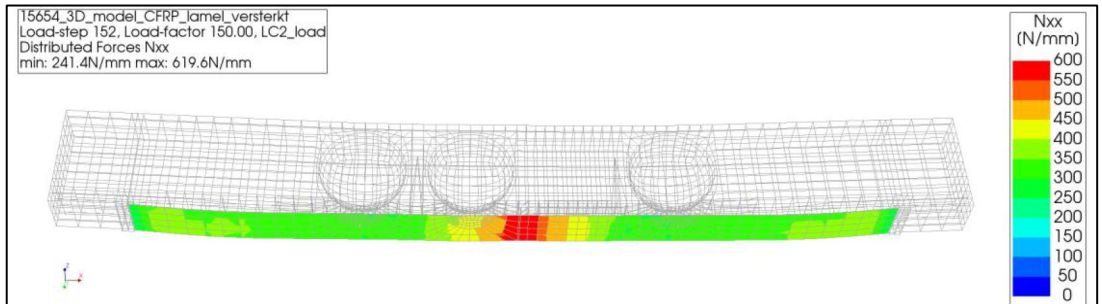
Puntlast = 200 kN



Puntlast = 250 kN



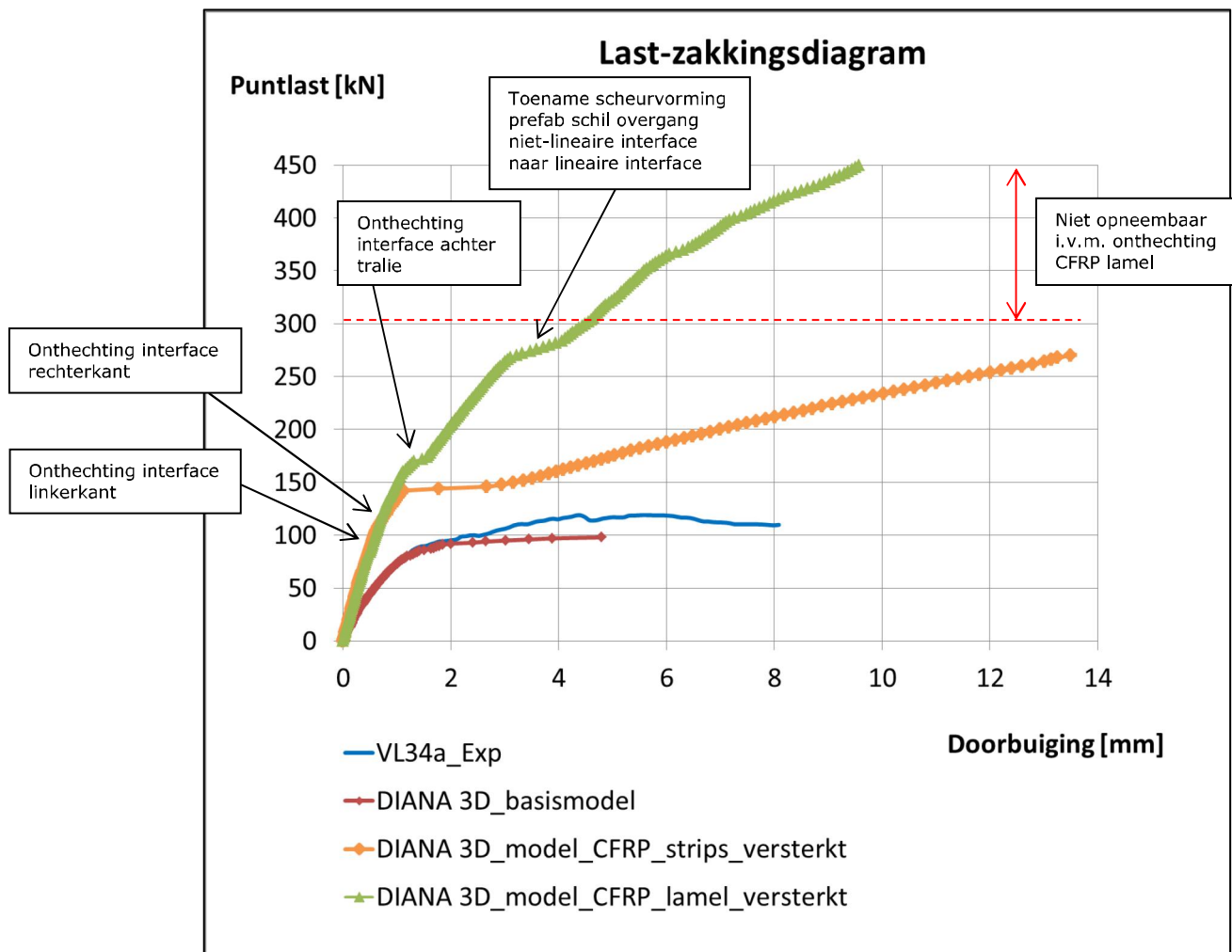
Puntlast = 300 kN



7.8.8

*Last-zakkingsdiagram en beoordeling van de resultaten*

Hieronder wordt het last-zakkingsdiagram weergegeven die volgt uit de berekening. De verticale zakkings is daarbij op dezelfde locatie gemeten als bij het basismodel (bovenkant van het model in het midden) en uitgezet tegenover de omgerekende puntlast. Tevens zijn ter vergelijking ook de last-diagrammen uit de voorgaande berekeningen toegevoegd.



Figuur 34: last-zakkingsdiagram

Uit de resultaten van de berekening en uit het last-zakkingsdiagram is te zien dat de CFRP lamel versterking significant bijdraagt aan de capaciteit van de constructie. Bij een belasting van 84 kN (loadfactor 42) treedt voor het eerst onthechting op in de interface links van de naad tot aan de tralie ligger. Bij een belasting van 136 kN (loadfactor 68) treedt ook onthechting op in de interface rechts van de naad tot aan de tralie ligger. Er is dan sprake van een beperkte reductie in stijfheid van de constructie. Vervolgens treedt bij een belasting van 172 kN (loadfactor 86) ook onthechting op in de interface tussen opstort beton en schil achter de tralie liggers, waarna de stijfheid verder reduceert. Bij een belasting van ca. 270 kN treden er in de prefab schil diagonale scheuren op bij de overgang van niet-lineaire interface naar lineaire interface. Gesteld kan worden dat aangezien de onthechting in het model zich niet kan verder ontwikkelen in de stijve lineaire interface de onthechting zich als het ware verder voortzet in de prefab schil.

Dit laatste fenomeen wordt zodoende gezien als een gevolg van de wijze van modellering c.q. proefbelasten. Bij toepassing van doorgaande ankers die prefab schil en druklaag tegen elkaar drukken, zoals in de oorspronkelijke proefopstelling het geval was, zou het gedrag naar verwachting gunstiger zijn. Desalniettemin wordt in het model een belasting van 300 kN gehaald zonder dat de wapening vloeit. Hogere belastingen worden niet opneembaar geacht door onthechting van de lijm tussen CFRP en beton.

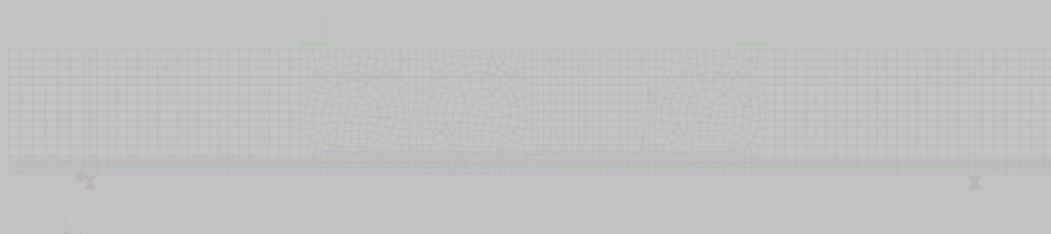
**8 DIANA 4-puntsbuigproef 2D model met CFRP versterking**

Om aan te tonen dat het gedrag van de (versterkte) constructie tevens met een 2D model te benaderen is, is als extra variant een 2D model geanalyseerd. Dit model wordt in dit hoofdstuk kort toegelicht.

8.1

*Beschrijving van het 2D model*

Het 2D model kan worden beschouwd als een "plat geslagen" 3D model. Daarbij is het beton met 2D plane stress elementen gemodelleerd. Het aanhechtvlak tussen prefab en opstort beton en de lijm tussen beton en CFRP is met 1D lijn interface elementen gemodelleerd. De CFRP is met balk elementen gemodelleerd. Wapening is als embedded reinforcement gemodelleerd terwijl de tralie liggers als bondslip wapening met buigstijfheid is gemodelleerd. Voor al de elementen geldt dat er steeds equivalente dikte eigenschappen zijn toegepast. In onderstaande figuur is het 2D model weergegeven.



*Figuur 35: DIANA 4-puntsbuigproef 2D model met CFRP versterking*

In onderstaande tabel zijn de specifiek toegepaste element types weergegeven.

*Tabel 15: toegepaste type elementen voor 2D model*

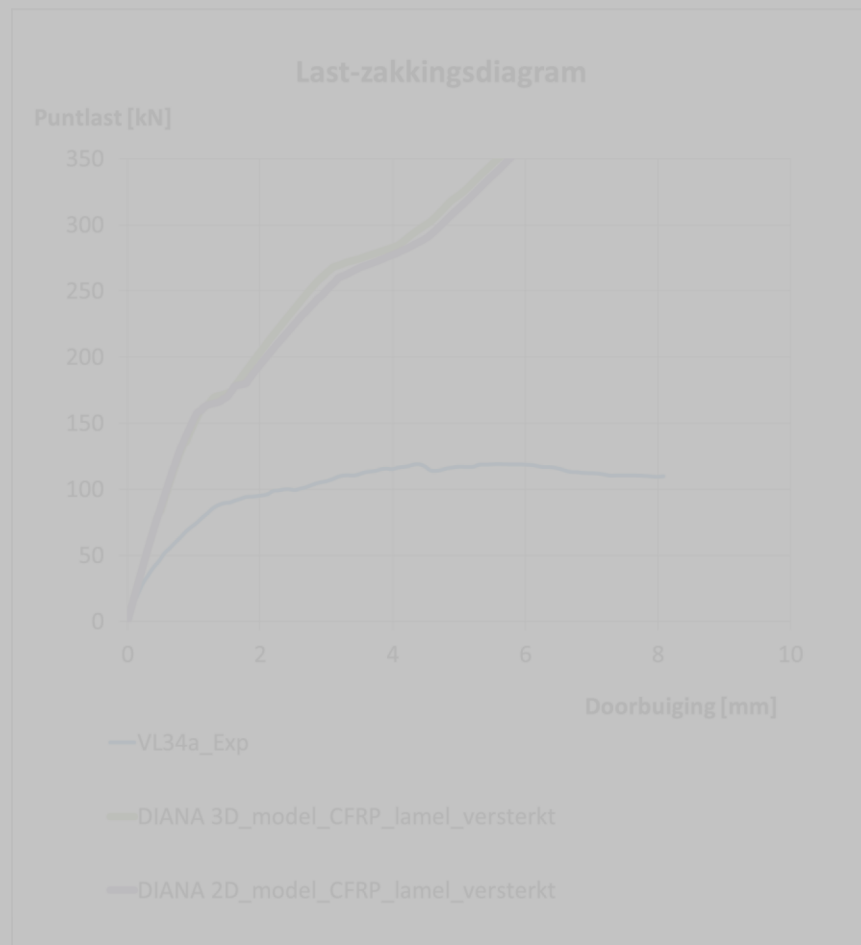
CQ16M - plane stress elementen; 8 knoeps	CT12M - plane stress elementen; 6 knoeps	CL12I - line interface elementen; 3+3 knoeps	CL9BE - class III beam elementen; 3 knoeps

Toegepaste materiaal eigenschappen, interface eigenschappen, randvoorwaarden, belastingen en analyse instellingen zijn gelijk gekozen als die van het 3D model met CFRP lamel versterking, zie 3.3 t/m 3.7.

8.2

*Resultaten 4-puntsbuigproef 2D model met CFRP versterking*

Uit de berekening volgen vrijwel dezelfde resultaten als van het 3D model met CFRP lamel versterking welke hier niet meer herhaald zullen worden. Wel wordt hieronder het last-zakkingsdiagram weergegeven die volgt uit het 2D model. De verticale zakking is daarbij op dezelfde locatie gemeten als bij het 3D model (bovenkant van het model in het midden) en uitgezet tegenover de omgerekende puntlast. Dit leidt tot het onderstaand last-zakkingsdiagram waarbij de grafiek afkomstig van de fysieke proef en van het 3D model met CFRP lamel versterking is toegevoegd ter vergelijking.



*Figuur 36: last-zakkingsdiagram 2D model*

Duidelijk is te zien dat het 2D model vrijwel hetzelfde gedrag vertoont als het 3D model. Hieruit volgt dat de toegepaste versterkingsmethode ook goed gemodelleerd kan worden met een 2D model wat als voordeel heeft dat de rekentijd aanzienlijk verkort kan worden.

## 9

**Conclusies**

Met het eindige elementen programma DIANA zijn verschillende modellen doorgerekend en geanalyseerd om inzicht te verkrijgen in het constructieve gedrag en bezwijkmechanisme van kritische bollenplaatvloeren met en zonder versterkingsmaatregelen.

Allereerst zijn modellen doorgerekend waarmee getracht is de proefresultaten uit Eindhoven (4-puntsbuigproef VL34a en 3-puntsbuigproef LAM34) te simuleren om daarmee de materiaalmodellen te valideren. Tevens is gekeken naar het effect van het niet meenemen van de tralieliggers. Vervolgens zijn modellen met versterkingsmaatregelen doorgerekend, namelijk met CFRP strips versterking en CFRP lamel versterking.

De volgende conclusies kunnen op basis van de analyses worden getrokken:

- De resultaten van het 4-puntsbuigproef basismodel en 3-puntsbuigproef model laten een goede match zien met de proefresultaten uit Eindhoven. Dit geeft vertrouwen in de gekozen manier van modelleren en toegepaste materiaalmodellen en parameters
- De tralieliggers spelen een significante rol in het constructieve gedrag en leveren een grote bijdrage aan de capaciteit bij de onversterkte vloer. Bij het basismodel en het 3-puntsbuigproef model zijn het de tralieliggers die gaan vloeien (tot breuk) waarna bezwijken plaatsvindt. In de proeven aan de TU Eindhoven werden de tralies eruit getrokken, dit gedrag zien we in de DIANA modellen ook ontstaan in de vorm van fikse scheurvorming rond het beton van de tralies (eerst in gestorte deel daarna in schil) Het wegnemen van de tralieliggers in het basismodel leidt tot een sterke reductie in capaciteit en bros bezwijken (4.2).
- Het toepassen van CFRP strips ingezaagd in de prefab schil met beperkte doorsnede oppervlakte (en daarmee beperkte stijfheid) zoals beschouwd in hoofdstuk 6 levert een beperkte bijdrage aan de capaciteit waarbij veel vervorming moet optreden. Op basis van de resultaten komt deze maatregel als een minder geschikte principe oplossing naar voren.
- Het toepassen van CFRP lamel versterking gelijmd aan de onderkant met een equivalente  $EA$  gelijk aan die van de breedplaat wapening zoals beschouwd in hoofdstuk 7, levert een significante bijdrage aan de capaciteit (van 120 kN naar 300 kN). Op basis van de resultaten komt deze maatregel als een geschikte principe oplossing naar voren.
- Het gedrag van de met CFRP lamel versterkte constructie kan tevens met een 2D model worden benaderd. Voor project-specifieke modellen heeft het zodoende de voorkeur om in eerste instantie voor een 2D model te kiezen waarmee de rekentijd aanzienlijk verkort kan worden.

## Bijlage 1

**Toelichting Shima bondslip functie**
**44.5 Bond-slip**

The general concept of material modelling through interface elements is presented in [§ 37.21].

In reinforced concrete the interaction between the reinforcement and the concrete is highly complex. The interaction is governed by secondary transverse and longitudinal cracks in the vicinity of the reinforcement. This behaviour can be modeled with a bond-slip mechanism where the relative slip of the reinforcement and the concrete is described in a phenomenological sense. The mechanical behaviour of the slip zone is then described by the interface element with a zero thickness.

The constitutive laws for bond-slip which have been proposed are mostly based on a *total deformation* theory, which expresses the tractions as a function of the total relative displacements. In DIANA the relation between the normal traction and the normal relative displacement is assumed to be linear elastic, whereas the relation between the shear traction and the slip is assumed as a nonlinear function:

$$\begin{cases} t_n &= k_n \Delta u_n \\ t_t &= f_t ( \Delta t ) \end{cases} \quad (44.16)$$

Differentiating Eq. (44.16) results in expressions for the tangential stiffness coefficients:

$$\begin{cases} D_{11} &= k_n \\ D_{12} &= 0 \\ D_{21} &= 0 \\ D_{22} &= \frac{\partial f_t}{\partial \Delta t} \end{cases} \quad (44.17)$$

DIANA offers four predefined curves for the relations between shear traction and slip: a *Cubic function* according to Dörr [§ 44.5.1], a *Power Law* relation proposed by Noakowski [§ 44.5.2], a bond-slip relation proposed by Shima et al. [§ 44.5.3], and a bond-slip-strain relation proposed by Shima et al. [§ 44.5.4], and the bond-slip model described in Chapter 6 of the fib Model Code for Concrete Structures 2010 [§ 44.5.5]. Moreover, a user-defined multi-linear diagram is available.

**44.5.3 Shima Bond-slip Relation**

The formulation of the bond-slip relation proposed by Shima et al. [213] reads:

$$t_t = 0.9 f_c^{2/3} \left( 1 - e^{-40 \left( \frac{\Delta t}{\sigma} \right)^{0.8}} \right) \quad [\text{MPa}] \quad (44.20)$$

where  $f_c$  is the concrete compressive strength in MPa.

Further, the stiffness of the Shima bond-slip relation is infinite. In DIANA, for numerical reasons, as long as the bond-slip curve exceeds the elastic curve, the elastic curve is followed.  $D$  is derived from the dimension of the interface element assuming a circular bar.

Unloading and reloading is following the elastic stiffness. The elastic unloading/reloading curve is followed until the inverse maximum traction value is reached, and from there the bond-slip curve is followed from the point where the bond-slip curve was left, in the opposite direction. In case the reloading is initiated from a point of the elastic unloading curve, the bond-slip curve is recaptured at the point where it was left.





