BRU2484 Versterking

Ontwerprapport stalen klemconstructie

Opdrachtgever:	Gemeente Amsterdam
Referentie:	INFR180842-BRU2484-RAP002
Revisie:	0b
Datum:	14-03-2022

Iv-Infra b.v.

Ingenieursbureau met Passie voor Techniek

Titel document:	BRU2484 Versterking
Ondertitel document:	Ontwerprapport stalen klemconstructie
Referentie:	INFR180842-BRU2484-RAP002
Revisie:	0b [TER BEOORDELING]
Datum:	14-03-2022
Opdrachtgever:	Gemeente Amsterdam
Projectnummer opdrachtgever:	
Project:	INFR180842

Opgesteld door:	5.1.2,e	Paraaf:
Gecontroleerd door:	5.1.2,e	Paraaf:
Goedgekeurd door:	5.1.2,e	Paraaf:

© Iv-Infra b.v., Alle rechten voorbehouden, Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand of openbaar gemaakt in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën of enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Iv-Infra b.v.

Inhoudsopgave

1	**Inleiding**	**5**
1.1.	Onderwerp	5
1.2.	Uiteenzetting en scope	7
1.3.	Doel van dit document en leeswijzer	7
2	**Uitgangspunten en randvoorwaarden**	**8**
2.1.	Documenten	8
2.1.1.	Geraadpleegde documenten	8
2.1.2.	Opleverstukken	9
2.2.	Ontwerpbeschrijving	10
2.3.	Ontwerplevensduur, gevolgklasse en uitvoeringsklasse	13
2.4.	Materiaalfactoren	13
2.5.	Materiaalkwaliteiten	14
2.5.1.	Staal	14
2.5.2.	Voorspanstaven	15
2.6.	Belastingen en belastingcombinaties	16
2.7.	Gebruikte software	16
3	**Rekenmodellen**	**17**
3.1.	Algemene beschrijving	17
3.2.	Elementen en elementennet	18
3.3.	Projectie, Randvoorwaarden en Bijzonderheden	19
3.3.1.	Projectie	19
3.3.2.	Randvoorwaarden	19
3.3.3.	Bijzonderheden	19
3.4.	Belastingen	20
4	**Constructieve beschouwingen**	**21**
5	**Resultaten toetsing**	**22**
5.1.	Sterkte	22
5.2.	Vervorming	24
5.3.	Stabiliteit	25
5.4.	Staal beton interactie	26
5.5.	Tolerantiesbeschouwing	29
5.5.1.	Geval 1: Afwijking opleggingen over lengte van evenaar	30
5.5.2.	Geval 2: Afwijkingen in inpassing drukkokerlengte	31
6	**Lasberekeningen**	**33**
7	**Raakvlakken**	**34**
7.1.	Controle betonconstructie	34
7.2.	Inpassing klemconstructie	34

8	**Risico's en Aandachtspunten**	**36**
8.1.	Risico's	36
8.1.1.	Onzeker of te groot verlies aan voorspanning.	36
8.1.2.	Inlijmankers te groot en te diep interfereren met wapening	36
8.2.	Aandachtspunten Uitvoerings Ontwerp	36
8.2.1.	Conservering	36
8.2.2.	Inpassing alternatief spansysteem	36
8.3.	Aandachtspunten Uitvoering	37
8.3.1.	Montage	37
8.3.2.	Windverband	37
8.3.3.	Spansysteem	37
8.3.4.	Naspannen	37
8.3.5.	Uitvoering en Toleranties	37
8.3.6.	Levering staal met Z-kwaliteit	37
8.3.7.	Check op dubbelingen	37
9	**Bijlagen: Belastingopgave volgens Gemeente Amsterdam**	**38**
10	**Bijlagen: Toetsing Beton**	**39**
11	**Bijlagen: Globale berekening**	**40**
12	**Bijlagen: Kolom stabiliteit**	**41**
13	**Bijlagen: FEM Rapportage**	**42**
14	**Bijlagen: Lasberekeningen**	**43**

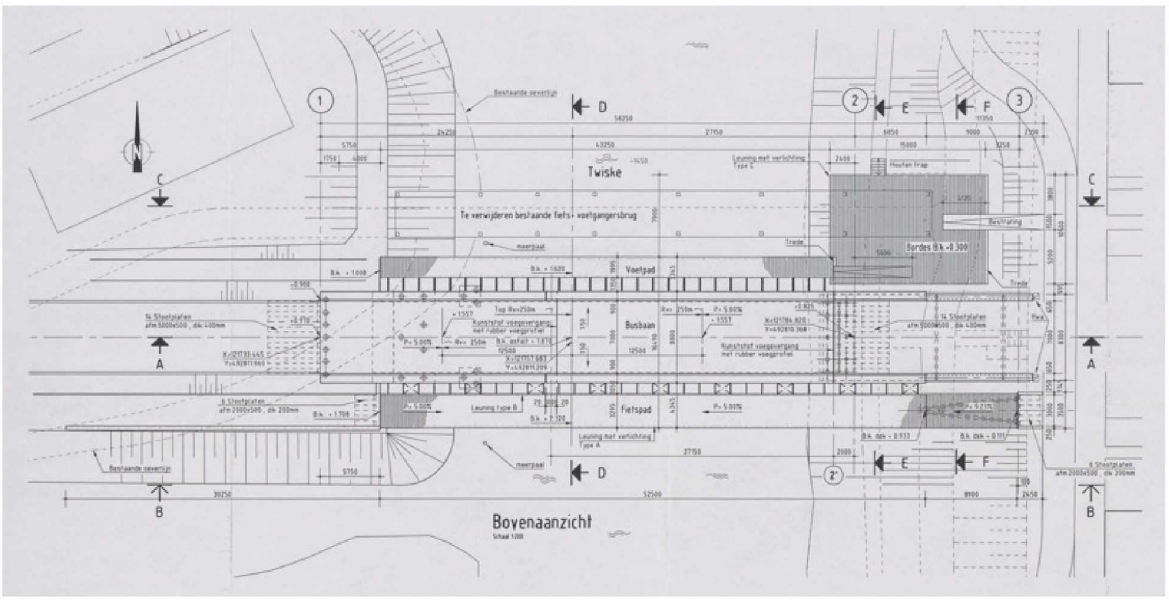
1 Inleiding

1.1. Onderwerp

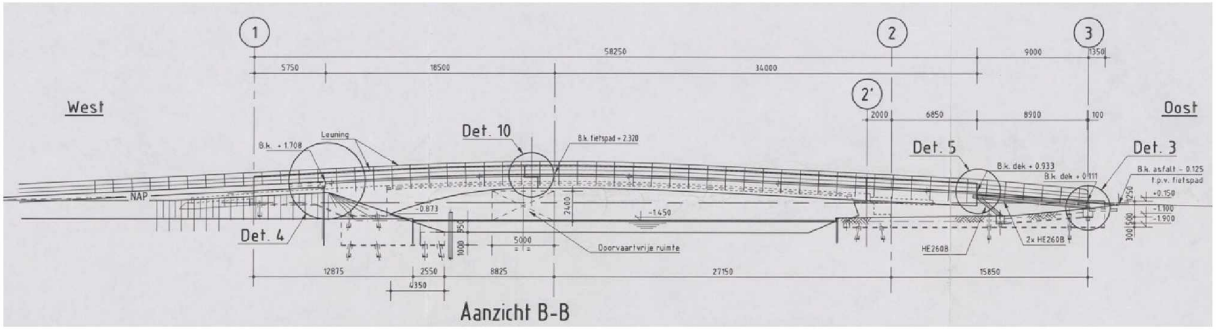
Het onderwerp van dit rapport is Brug BRU02484 (bouwjaar 2005), De Marie Thomas Tonnenbrug, in de Gemeente Amsterdam. Het betreft een betonnen verkeersbrug, welke aan beide zijden is voorzien van een aanhangend fietspad. De belasting uit het fietspad wordt via stalen consoles, verdeeld over de lengte van de brug, afdragen aan de betonnen hoofdconstructie van de brug. Oorspronkelijk werd de brug gebruikt door normaal wegverkeer, daarna enkel nog door busverkeer, wat gereguleerd wordt door een bussluis. Aan deze brug zijn recent schades aangetroffen. De schades gaven aanleiding de brug per 7 februari 2022 af te sluiten voor alle verkeer over en onder de brug op de watergang 't Twiske . Deze schades betreffen diagonale scheuren ter plaatse van de nok opleggingen aan beide zijden van de brug aan het einde van het uitkragende Westelijke landhoofd. Zie Figuur 3.
De schades van de brug zijn door constructeurs van Iv-Infra en Gemeente Amsterdam geanalyseerd en onderling besproken d.d. 8 februari 2022. Conclusies daarbij waren:

- In de ontwerpberekening is (fors) meer ophangwapening berekend dan op tekening is weergegeven.
- De brug dient sowieso versterkt te worden, zodanig dat deze weer functioneel wordt voor gebruik door Bussen, fietsers en voetgangers.

Dit heeft zich vertaald in de uitvoering van een nader onderzoek naar de wapeningsconfiguratie en scheurvorming van de nokconstructie. Zie referentie: Tabel 2-1, ref. 1 voor nadere toelichting en beeldvorming van de schades en het resultaat van dit onderzoek.
Voor de versterking zijn enkele alternatieven opgesteld en afgewogen in een Trade Off Matrix. Hieruit volgde de keuze voor een versterking in de uitvoering van een uitwendige stalen klemconstructie. Toegepast direct achter de nokoplegging van de hoofdliggers van het uitkragende Westelijke landhoofd. In totaal worden er twee klemconstructies uitgevoerd. Eén per hoofdligger. Via excentrische voorspanning zorgt de klemconstructie samen met de aanwezige ophangwapening voor de opvang van het totaal aan belasting uit het inhangende brugdeel. Naast de versterking zullen de aanwezige scheuren nog gedicht gaan worden om aantasting van de wapening verder te voorkomen. Overzicht van de brug is aangegeven in Figuur 1, Zijaanzicht in Figuur 2 en verduidelijking van het detail van de oplegging van het inhangdeel in Figuur 3.



Figuur 1: Overzicht aanzicht



Figuur 2: Zijaanzicht (Het betreffende detail met schade bevind zich binnen de cirkel aangegeven met Det. 10)



Figuur 3: Locatie oplegpunt met schade op tekening en indicatieve foto van geconstateerde schade.

1.2. Uiteenzetting en scope

De scope van dit rapport betreft het Definitief Ontwerp van de versterkingsmaatregel en de constructieve toetsing van de 'Klemconstructie', verder toegelicht onder de paragraaf Ontwerpbeschrijving in hoofdstuk 2.2. De nokopleggingen aan beide zijden van de brug dienen te worden versterkt. Er zullen daartoe twee klemconstructies uitgevoerd en geplaatst worden. De constructies zijn identiek, echter spiegel symmetrisch in uitvoering. Er wordt er daarom maar één uitgewerkt in dit rapport. De klemconstructie bevindt zich voor een deel in het theoretische doorvaartprofiel onder de brug, zie Figuur 2. Er zullen voorziening getroffen worden om aanvaring te voorkomen. De oplossing en uitwerking hiervan zijn geen onderdeel van dit rapport. De klemconstructie is zodanig ontworpen dat deze buiten het profiel van de Step Barrier-vorm van de hoofdligger blijft. Een aanrijding wordt hierdoor minder aannemelijk. Aanrijding kan hier echter niet mee worden uitgesloten. Daartoe wordt er nog een additionele afschermende voorziening voorzien om aanrijding van de klemvoorziening te voorkomen. De oplossing en uitwerking van deze voorzieningen zijn geen onderdeel van dit rapport.
Voor het verkrijgen van een duurzame oplossing worden de opgetreden scheuren rond de nok van de versterking gedicht. De oplossing en uitwerking van deze voorzieningen zijn geen onderdeel van dit rapport. Uit inspectie bleek dat er nog een aantal zaken bij deze brug nader onderzocht dienen te worden. Deze zaken staan los ver de versterkingsmaatregel en vallen buiten de scope van dit document.

1.3. Doel van dit document en leeswijzer

Het doel van dit document is presentatie van het ontwerp van de versterkingsmaatregel en het aantonen van de constructieve technisch haalbaarheid resulterend in een definitief ontwerp. De haalbaarheid van het ontwerp is gebaseerd op een bestaand spansysteem van een mogelijke leverancier, VSL. Het ontwerp is robuust gemaakt om alternatieve systemen, zoals bijvoorbeeld Freyssibar+ te kunnen faciliteren mocht daar uiteindelijk voor gekozen worden. Hoofdstuk 2 beschrijft de uitgangspunten en randvoorwaarden gehanteerd als basis voor het ontwerp. Hoofdstuk 3 gaat in op de uitgevoerde constructieve beschouwingen. Hoofdstuk 4 beschrijft het rekenmodel wat is hierbij is toegepast. Hoofdstuk 5 presenteert het resultaat van de toetsingen. Hoofdstuk 6 gaat in op de raakvlakken ten behoeve van afstemming tot een integraal ontwerp met de overige objecten binnen het systeem van de brug. Hoofdstuk 7 benoemd de risico's en aandachtspunten voor het uitvoeringsontwerp en uitvoering. Het ontwerp van de klemconstructie is gebaseerd op een vereiste klemkracht. Die klemkracht volgt uit een belastingopgave en aanverwante toetsing van de betonconstructie, vastgelegd en onderbouwd in Bijlagen 9 en 10.

2 Uitgangspunten en randvoorwaarden

2.1. Documenten

2.1.1. Geraadpleegde documenten

Tabel 2-1: Diverse

Nr.	Document	Versie / datum
1	INFR180842-BUR2484-RAP001-VO	0 / 9 maart 2022
2	VSL-Thread-Bar-Systems-Technical-Catalogue_2007.pdf	2007
3	BW-K01; Bestekswijziging constructie. Aanzichten en doorsneden	0 / 13 februari 2003
4	K124; Detailtekening Busbaan Wapening Landhoofd as 1	1 / 18 november 2003
5	K016; Detailtekening Voetpad Bovenaanzicht en aanzichten	0 / 25 mei 2003

Tabel 2-2: Normen en richtlijnen

Nr.	Normen en richtlijnen	Omschrijving
1	NEN-EN 1990+A1+A1/C2:2011 (nl) & NB:2011 (nl)	Eurocode: Grondslagen van het constructief ontwerp
2	NEN-EN 1991-1-1+C1:2011 (nl) & NB:2011 (nl)	Eurocode 1: Belastingen op constructies – Deel 1-1: Volumieke gewichten, eigen gewicht en opgelegde belastingen voor gebouwen
3	NEN-EN 1991-1-4+A1+C2:2011 (nl) & NB:2011 (nl)	Eurocode 1: Belastingen op constructies – Deel 1-4: Windbelastingen
4	NEN-EN 1991-1-5+C1:2011 (nl) & NB:2019 (nl)	Eurocode 1: Belastingen op constructies – Deel 1-5: Thermische belasting
5	NEN-EN 1991-1-7+C1+A1:2015 (nl) & NB:2019 (nl)	Eurocode 1: Belastingen op constructies – Deel 1-7: Algemene belastingen – Buitengewone belastingen: stootbelastingen en ontploffingen
6	NEN-EN 1991-2+C1:2015 (nl) & NB:2019 (nl)	Eurocode 1: Belastingen op constructies – Deel 2: Verkeersbelasting op bruggen
7	NEN-EN 1993-1-1+C2+A1:2016 (nl) & NB:2016 (nl)	Eurocode 3: Ontwerp en berekening van staalconstructies – Deel 1-1: Algemene regels en regels voor gebouwen
8	NEN-EN 1993-1-8+C2:2011 (nl) & NB:2011 (nl)	Eurocode 3: Ontwerp en berekening van staalconstructies – Deel 1-8: Ontwerp en berekening van verbindingen
9	NEN-EN 1993-1-9+C2:2012 (nl) & NB:2011 (nl)	Eurocode 3: Ontwerp en berekening van staalconstructies – Deel 1-9: Vermoeiing
10	NEN-EN 1993-1-10+C2:2012 (nl)	Eurocode 3: Ontwerp en berekening van staalconstructies – Deel 1-10: Materiaaltaaiheid en eigenschappen in dikterichting
11	NEN-EN 1993-2+C1:2011 (nl) & NB:2011 (nl)	Eurocode 3: Ontwerp en berekening van staalconstructies – Deel 2: Stalen bruggen
12	VOBB 2021 (NEN6786-1 2021)	Voorschriften voor het ontwerp van beweegbare bruggen
13	NEN-EN1090-2:2018	Het vervaardigen van staal- en aluminiumconstructies. Deel 2: Technische eisen

Nr.	Normen en richtlijnen	Omschrijving
14	NEN8700	Beoordeling van de constructieve veiligheid van een bestaand bouwwerk bij verbouw en afkeur.

2.1.2. Opleverstukken

Tabel 2-3: Rapporten DO

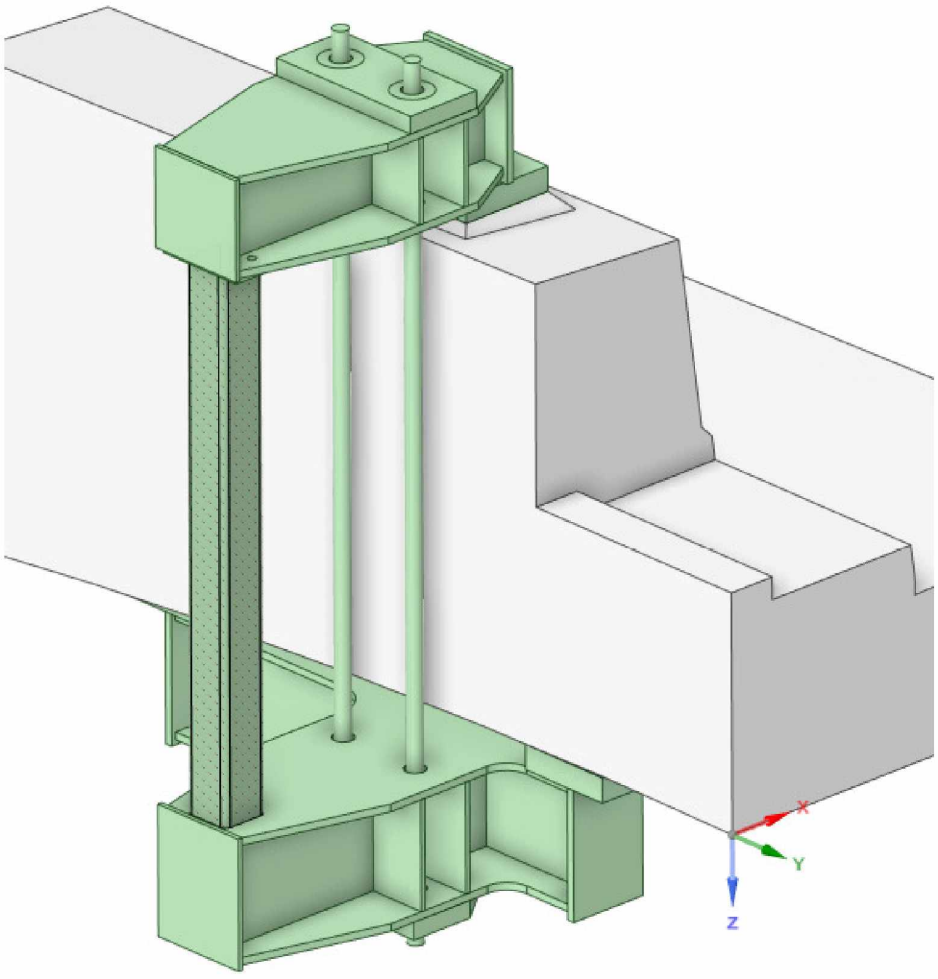
Nr.	Documentnummer	Omschrijving
1	INFR180842-BRU2484-RAP002	Ontwerprapport stalen klemconstructie

Tabel 2-4: Tekeningen DO

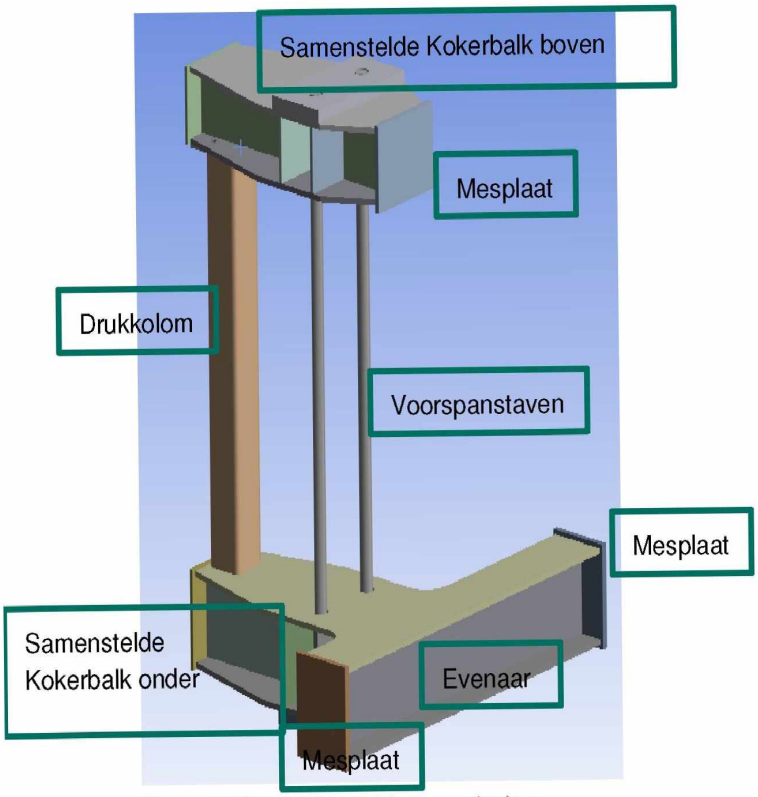
Nr.	Documentnummer	Omschrijving
1	INFR180842-BRU2484-TEK001	Overzichtstekening
2	INFR180842-BRU2484-TEK002	Samenstelling Klem Constructie/ Losse Onderdelen

2.2. Ontwerpbeschrijving

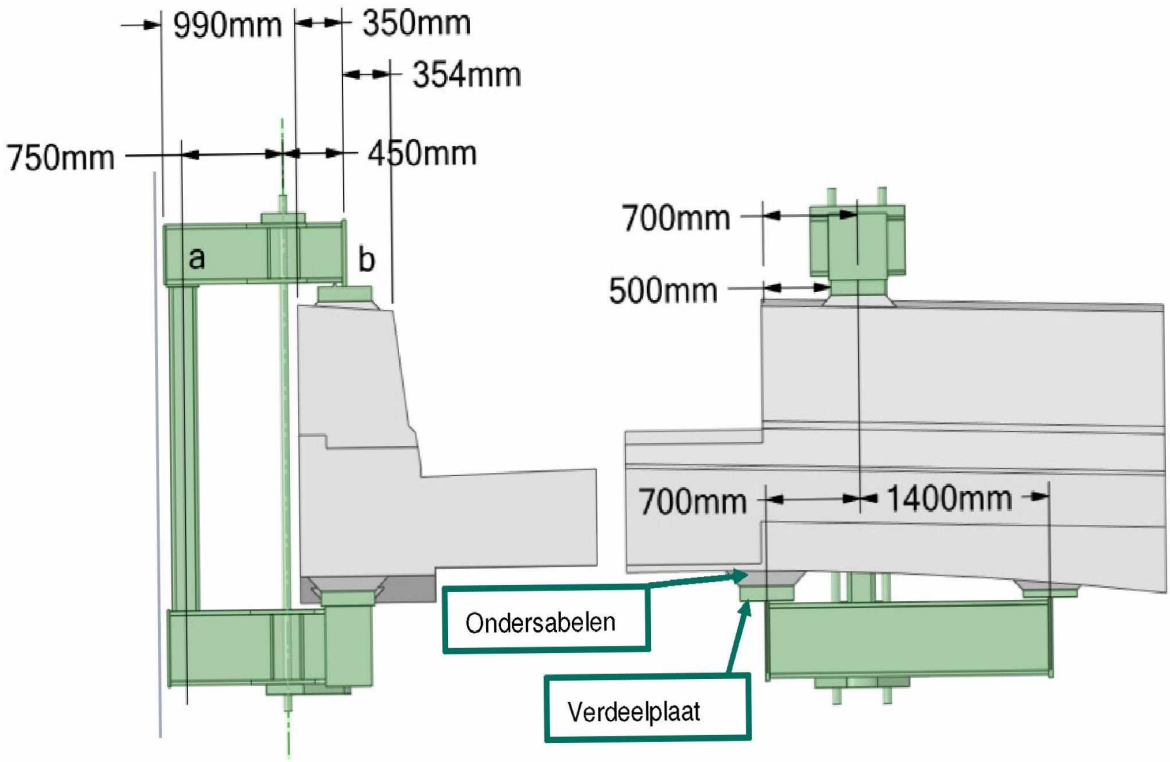
De versterking bestaat uit een uitwendige stalen klemconstructie, toegepast direct achter de nokoplegging van de hoofdliggers van het uitkragende Westelijke landhoofd. In totaal worden er twee klemconstructies uitgevoerd. Eén per hoofdligger. Via excentrische voorspanning zorgt de klemconstructie samen met de aanwezige ophangwapening voor de opvang van het totaal aan belasting uit het inhangende brugdeel. Navolgende Figuur 4 t/m Figuur 6 geven een beeld van de klemconstructie en uit welke onderdelen deze is opgebouwd. De afbeeldingen zijn indicatief met niet alle details zichtbaar. Voor een volledig beeld van constructie inclusief afmetingen en detaillering wordt verwezen naar de tekeningen genoemd onder Tabel 2-4: Tekeningen DO. Figuur 5 geeft de benaming van de onderdelen die we door de rest van dit rapport hanteren. Navolgend een beschrijving van de opbouw van de constructie met toelichting.



Figuur 4: Isometrisch overzicht klemconstructie



Figuur 5: Nomenclatuur Klemvoorziening



Figuur 6: Dwars- en langsaanzicht van de totale samenstelling

- Het principe bestaat uit het introduceren van een klemkracht doormiddel van externe voorspanning vergelijkbaar met het principe van een lijmklem.
- Uit vooronderzoek volgt de wens voor een “evenaar” constructie en de configuratie van afstanden van de aanlegvlakken, gegeven in Figuur 6. Op deze wijze wordt het meest effectief een drukdiagonaal gecreëerd door de nek van de vertanding met afdoende afstand tot de rand van de beton om afboeren van de beton te voorkomen. Onderbouwing in bijlage ??
- Er is een hoge voorspankracht nodig om de gewenste klemkracht te bereiken. De kracht is te hoog voor een enkele staaf. De klemkracht wordt geleverd door voorspanning van twee spanstaven. Type: VSL SAS D65, zie paragraaf 2.5.2.
- De voorspanning wordt omgezet naar een klemkracht op de beton en een druk op de kolom.
- Dit gebeurd via samengestelde kokerbalk boven en onder. Gekozen is voor een samengestelde koker vanwege de noodzakelijk plaatdikte onder de hoge kracht en de aanwezigheid van 2 spanstaven.
- De drukkolom is boven en onder met een boutverbindingen met 2 x M30 8.8 verbonden met de samengestelde kokers. Dit biedt mogelijkheden voor montage in geheel of afzonderlijke delen.
- Tussen de kolom en de bovenste koker is in basis een vulplaatje aanwezig van 10 mm. Bij de opleveringen schrijven we afdoende plaatjes van dikte 6-8-10 mm voor. Hierdoor kan in de praktijk de inwendige lengte van de klemvoorziening worden afgesteld met een maximale afwijking van 2 mm.
- De voorspanstaven dragen via de moer hun kracht of op de kokerbalken via een verdeelplaat. Die verdeelplaten zijn vastgelast aan de kokerbalken. Hun afmeting van 650 mm is afgeleid van de verdeelplaten die horen bij het VSL systeem (oorspronkelijk 325mmx325 mm). Dit oppervlak is afdoende om het hydraulische vijzel hierop te laten afdrukken. De voorspanstaven dienen gelijktijdig gespannen te worden. Het ontwerp is gebaseerd op de toepassing van holle vijzels. De uitwendige afmetingen van het vijzel van het VSL systeem zijn te groot om twee vijzels naast elkaar te plaatsen. Rekening gehouden moet worden dat een vijzel vanaf de bovenzijde van het frame wordt gespannen en de andere staaf vanaf de onderzijde. De vijzels dienen hydraulisch gekoppeld te worden, zodat ze een gelijke verlenging ondergaan.
- De lengte van de spanstaven zijn zodanig dat deze op te lengen zijn met een koppelmoer om het trekken met de vijzels mogelijk te maken.
- De betonconstructie is in geen enkele richting vlak. Het bovenvlak heeft een verkanting in dwarsrichting. De onderzijde van de beton heeft een toog. Op de beton worden voor het verkrijgen van een goede inleiding van de belasting vanuit de klemconstructie afzonderlijke stalen verdeelplaten gesteld.
- De verdeelplaten worden waterpas en binnen nader gestelde toleranties in hoogte ten opzichte van elkaar afgesteld via M16 8.8 ingeboorde lijmanker. Daarna worden deze met een hoogwaardige drukvaste mortel ondersabeld.
- De mortel wordt getest of deze afdoende druksterkte heeft voordat de klemkracht wordt aangebracht.
- De dikte en lengte van de verdeelplaten zijn afgestemd met de grootte van de belasting en de dikte van de ondersabeling.
- De krachtsinleiding van het klemframe op de verdeelplaten gebeurd via zogenoemde mesplaten. Deze mesplaten zorgen voor een heldere krachtsoverdracht met enige rotatiemogelijkheid. Tevens bieden zij de mogelijkheid om een hoge tolerantie nauwkeurigheid te verkrijgen na het lassen van de samenstelling.

- De dikke verdeelplaat boven en boven zijn 100 mm dik en hebben een sparing van 25 mm, waar in de mesplaten met enige speling gevangen wordt. Hiermee wordt een juiste installatie en locatie van de lastinleiding geborgd en als zekering van de constructie wanneer deze nog niet volledig is opgespannen.
- Op de bovenflens van de onderste samengestelde koker wordt een stelmogelijkheid voorzien tegen de betonnen dekrand.
- Overmaatse gaten in de verdeelplaten zorgen voor het binnen tolerantie positioneren van de verdeelplaten binnen de toepassing met lijmankers.
- Het gewicht van het totaal is ca. 3 ton. Nadere opgave via tekening.
- Het voorspansysteem heeft een verlies door metname het zetten van de staaf in de moer. Dit betekend dat op de beton en de rest van de klemconstructie tijdens het spannen tijdelijk een hogere spanning opgelegd wordt om uiteindelijk na het zetten van de moer de gewenste klemkracht over te houden. Het ontwerp is uitgelegd op die verhoogde kracht, uitgegaan van een verlies van 15%.
- Een verlies van 15% komt overeen met een zetting van 1,7 mm. De noodzakelijke diameter van de staven van het gehanteerde spansysteem van VSL zijn enkel leverbaar met grove spoed. De berekende verliezen zijn hoger. In de praktijk wordt het wel gehaald. Maar is niet gegarandeerd Bij de toepassing van een fijne spoed is het verlies kleiner binnen de gestelde 15%. Dit vraagt uitwerking in UO.
- De minimaal aanwezige vrije ruimte tussen de rand van de geinstalleerde klemconstructie en de rand van het fietspad is 50 mm.

2.3. Ontwerplevensduur, gevolgklasse en uitvoeringsklasse

- Ontwerplevensduur constructie: 100 jaar (NEN-EN 1990+A1+A1/C2:2019/NB)
- Gevolgklasse: CC2*
- Uitvoeringsklasse: EXC 3** (NEN-EN 1993-1-1 NB Tabel NB.C.1)

'* Volgens NEN-EN 1990:2019/NB Bijlage A2 Tabel NB.11 – 2.1 valt de brug gezien de gewenste ontwerplevensduur onder klasse 4 en daarmee in Consequence Class 3. In geval van 50 jaar zou dat CC2 zijn. Voor deze brug wordt vermeend dat CC2 een juiste inschaling is volgend tabel NB.23 -B1 en NB.24-B1, gezien het gebruik van de brug als busbaan en de kans dat meer dan 500 mensen tegelijktijdig gevaar lopen klein is. CC2 is het minimale niveau waarvoor de belasting op de brug op verbouwniveau volgens NEN8700 wordt uitgelegd. Dit is de basis waarop de noodzakelijke klemkracht en daarmee de voorspanning is bepaald.
** Gezien de belangrijkheid van de functie van de versterking wordt de uitvoeringseisen hoger gesteld dan volgen uit sec CC2.

2.4. Materiaalfactoren

Voor staalconstructies worden de onderstaande toegepast:

- Algemeen: $\gamma_{M;0} = 1{,}0$
- Stabiliteit: $\gamma_{M;1} = 1{,}0$
- Sterkte van verbindingen: $\gamma_{M;2} = 1{,}25$

2.5. Materiaalkwaliteiten

2.5.1. Staal

De staalconstructie zal worden uitgevoerd in sterkteklasse S355. De materiaal eigenschappen conform de norm NEN-EN1993-1-1 worden weergegeven in Figuur 7.

Tabel 3.1 — Nominale waarden van de vloeigrens f_y en de treksterkte f_u voor warmgewalst constructiestaal

Norm en staalsoort	Nominale dikte van het element t [mm]			
	t ≤ 40 mm		40 mm < t ≤ 80 mm	
	f_y [N/mm^2]	f_u [N/mm^2]	f_y [N/mm^2]	f_u [N/mm^2]
EN 10025-2				
S 235	235	360	215	360
S 275	275	430	255	410
S 355	355	490	335	470
S 450	440	550	410	550

Figuur 7: Sterkte eigenschappen staal

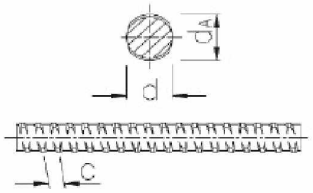
De volgende staalkwaliteiten worden minimaal toegepast:

- Platen t ≥ 16mm: S355J2 +N (toegepaste platen 20/30/40 mm)
- Platen t ≥ 50mm: S355N (verdeelplaten)
- Platen t ≥ 100mm: S355NL (verdeelplaten)

Leveringsconditie voor de Z-kwaliteit van de platen als onderdeel van de gelaste klemconstructie: Z35.
De verdeelplaten behoeven geen Z-kwaliteit.

2.5.2. Voorspanstaven

Het Definitief Ontwerp is gebaseerd op de toepassing van het navolgende systeem, ref. Tabel 2-1-5:



VSL-SAS Thread Bar (d: Nominal Diameter)

VSL-SAS Thread bar is a high tensile alloy steel bar with coarse right-hand thread over its full length. The system is proven worldwide and offers versatility in a range of applications.

Manufactured in accordance with the DIN standards, the system also offers general conformance with BS4486. The system also got ETA approval. The thread bars are hot rolled quenched and tempered, followed by stretching (further tempering) operation to achieve the necessary performance.

Thread bar configurations				
System	**Type of Thread**	**Rolling process**	**MAX. Bar Length**	**Architectural Components available**
SAS Thread Bars 18mm - 75mm	Fully threaded (right hand)	Hot Rolled	11.85m	No

VSL SAS THREAD BAR CHARACTERISTICS



Dimensions (mm) d	dA	C	Nominal Area (mm2)	Nominal Mass (kg/m)	Nominal Tensile Strength / Load (MPa)	kN	Nominal Proof Stress (Mpa)	Minimum Elongation at max force %
18	21	8	241	1.96	1050	255	950	5
26.5	31	13	551	4.48	1050	580	950	5
32	37	16	804	6.53	1050	845	950	5
36	42	18	1020	8.27	1050	1070	950	5
40	46	20	1257	10.21	1050	1320	950	5
47	53	21	1735	14.10	1050	1820	950	5
57	64	21	2581	20.95	1035	2671	835	4
65	72	21	3331	27.10	1035	3447	835	4
75	82	24	4448	35.90	1035	4572	835	4

Figuur 8: Extract uit Productinformatie VSL

Rekenwaarde van de E-modules: 195.000 MPa

2.6. Belastingen en belastingcombinaties

De klemconstructie wordt belast door enkel eigen gewicht (ca. 3 ton) van de klemconstructie en de gezamenlijke voorspanning in beide staven van 2 x 2300 = 4600 kN. Deze voorspanning is bepaald in de globale berekening, ref. bijlage 11 en volgt uit de gewenste klemkracht op de betonconstructie. Volgens opgave Gemeente Amsterdam bedraagt dit druk op de bovenzijde van de betondoorsnede van 2500 kN, welke wordt kortgesloten via de evenaar naar de twee steunpunten onder de betondoorsnede naar verhouding van de afstanden. Bijlage 9 geeft een volledig onderbouwing voor de totstandkoming van deze klemkracht. De klemkracht is het product van de optredende belastingen op de nokoplegging van het ingehangen brugdeel uit eigen gewicht en verkeersbelasting inclusief belastingfactoren met aftrek van de capaciteit van de aanwezige ophangwapening. Het uitgangspunt hierin is CC2 Verbouwniveau, ref. paragraaf 2.3.

Zoals uitgelegd onder paragraaf 1.2 wordt er niet gerekend met aanvaring of aanrijding.

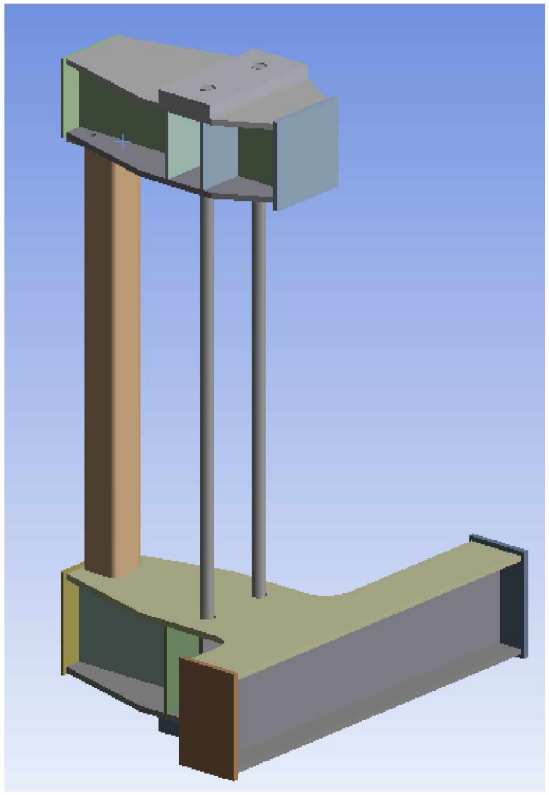
2.7. Gebruikte software

De volgende software is toegepast:

- Ansys Mechanical
- Ansys SpaceClaim
- Microsoft Excel

3 Rekenmodellen

Binnen Ansys is een rekenmodel opgesteld. Dit hoofdstuk geeft een korte toelichting van het 3D-rekenmodel.



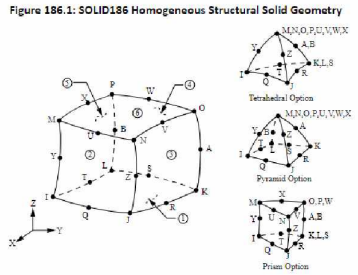
Figuur 9: Overzicht 3D model

3.1. Algemene beschrijving

Het model is opgebouwd uit volume plaat modellen, met volumen elementen, waaraan het materiaal staal is toegekend S355 toegekend, met de daaraan gekoppelde kenmerken als E-modules en vloeigrens e.d. De voorspanstaven zijn in de berekening versimpeld vertegenwoordigd als balk elementen en worden gebruikt om de voorspanning aan te brengen via een ‘Bolt Pre-tension’. De voorspanstaven hebben een E-modules van 195.000 MPa. In het basismodel heeft de constructie drie stijve randopleggingen. Dit zijn de drie randvlakken van de mesplaten. Een en ander nader toegelicht op de volgende pagina. In een aanvullende beschouwing zijn de betonconstructie en de verdeelplaten met mortel meegenomen in het model, ref. paragraaf Staal beton interactie5.4.

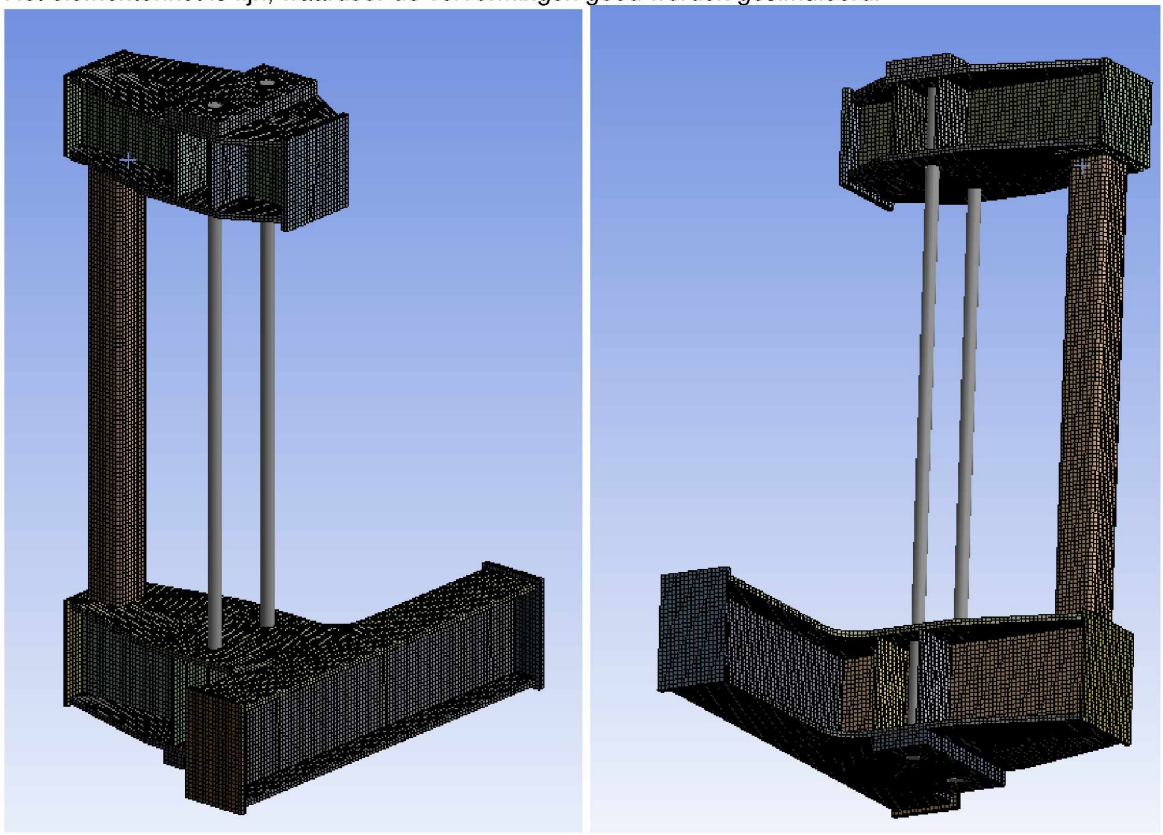
3.2. Elementen en elementennet

Hogere orde Hexahedrol volume (solid186) elementen zijn gebruikt in de simulatie met 2 elementen over de dikte van de volumes. Deze element geven een hoge nauwkeurigheid op de resultaten.



Figuur 10: Solid186, kwadratische element.

Het elementennet is fijn, waardoor de vervormingen goed worden gesimuleerd.



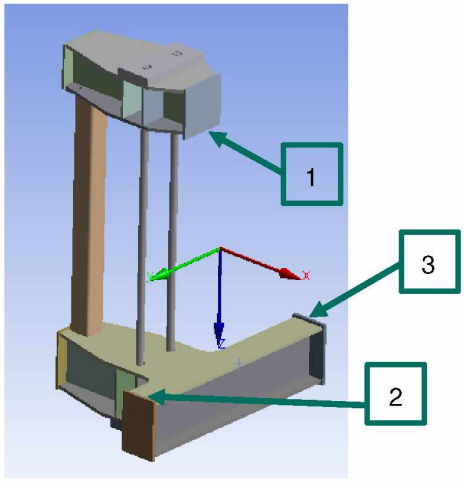
Figuur 11: Elementennet in 2 aanzichten

3.3. Projectie, Randvoorwaarden en Bijzonderheden

3.3.1. Projectie

De projectie van het model is gelijk qua richting aan die in de werkelijkheid. De langszijde is in de Y-richting. De dwarsrichting is in de X-richting.

3.3.2. Randvoorwaarden



Figuur 12: Randvoorwaarden

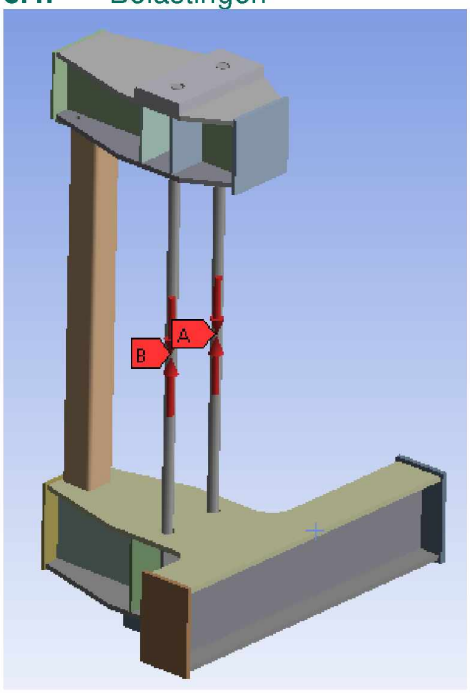
Basis randvoorwaarden:

- 1: Mesplaat aan bovenzijde beton:
  - Verplaatstingsvast in alle richtingen
  - Rotatievast om de X-as, andere rotaties zijn vrij
- 2: Mesplaat aan onderzijde:
  - Verplaatstingsvast in alle richtingen
  - Rotatievast om de Y-as, andere rotaties zijn vrij
- 3: Mesplaat aan onderzijde:
  - Verplaatstingsvast in X en Z richting, Y is vrij
  - Rotatievast om de Y-as, andere rotaties zijn vrij

3.3.3. Bijzonderheden

In de platen zijn de gaten D86 voor de doorvoer van de voorspanstaven opgenomen. De aansluiting van de voorspanstaven met de verdeelplaten, de verdeelplaten met de samengestelde kokers en de drukkoker met de samengestelde koker is uitgevoerd middels lineaire trek/druk contacten. Gecontroleerd is of deze onder druk blijven. De aansluiting van de drukkolom met de samengestelde koker aan de bovenzijde is gemodelleerd zoals in werkelijkheid. De onderzijde wordt in praktijk het zelfde uitgevoerd maar is vereenvoudigd gemodelleerd met een directe aansluiting. Aangezien de contacten hier over hele doorsnede onder druk blijven geeft dit geen ander resultaat.

3.4. Belastingen



Figuur 13: Opgelegde voorspanning

Basis belastingen:

- 1: Eigengewicht:
  - Eigengewicht werkt in de +Z-richting
- 2: Voorspanning (zie Figuur 13):
  - Voorspanning werkt in de richting van de spanstaven.
  - 2300kN per staaf.
  - Een gedetailleerde bepaling van de voorspankracht is opgenomen in de Bijlagen: Globale berekening

4 Constructieve beschouwingen

De volgende beschouwingen zijn uitgevoerd op de klemconstructie. Toelichting en resultaten zijn gegeven onder hoofdstuk 5.

- Sterkte
  - Toetsing van de optredende spanningen
    - Globale ontwerptoetsing controle in bijlage 11.
    - Toetsing op detailniveau binnen het Ansys rekenmodel.
- Vervormingsgedrag
- Stabiliteit
  - Globale knik van de kolom
  - Lokale plooi
- Tolerantiebeschouwing
  - Gevoeligheid en Invloed op resultaten
    - 5 mm onderling verschil in lengterichting.
    - 2 mm verschil in het vlak van de klemconstructie dwars op de brug. Als gevolg van de vulplaten verschil veelvoud van 6-8-10 mm.
- Interactie klemconstructie met betondoorsnede
  - Invloed op resultaat als de betondoorsnede meegenomen wordt met een aanname van de E-modules voor de mortel en beton en indicatie druklijn verloop.

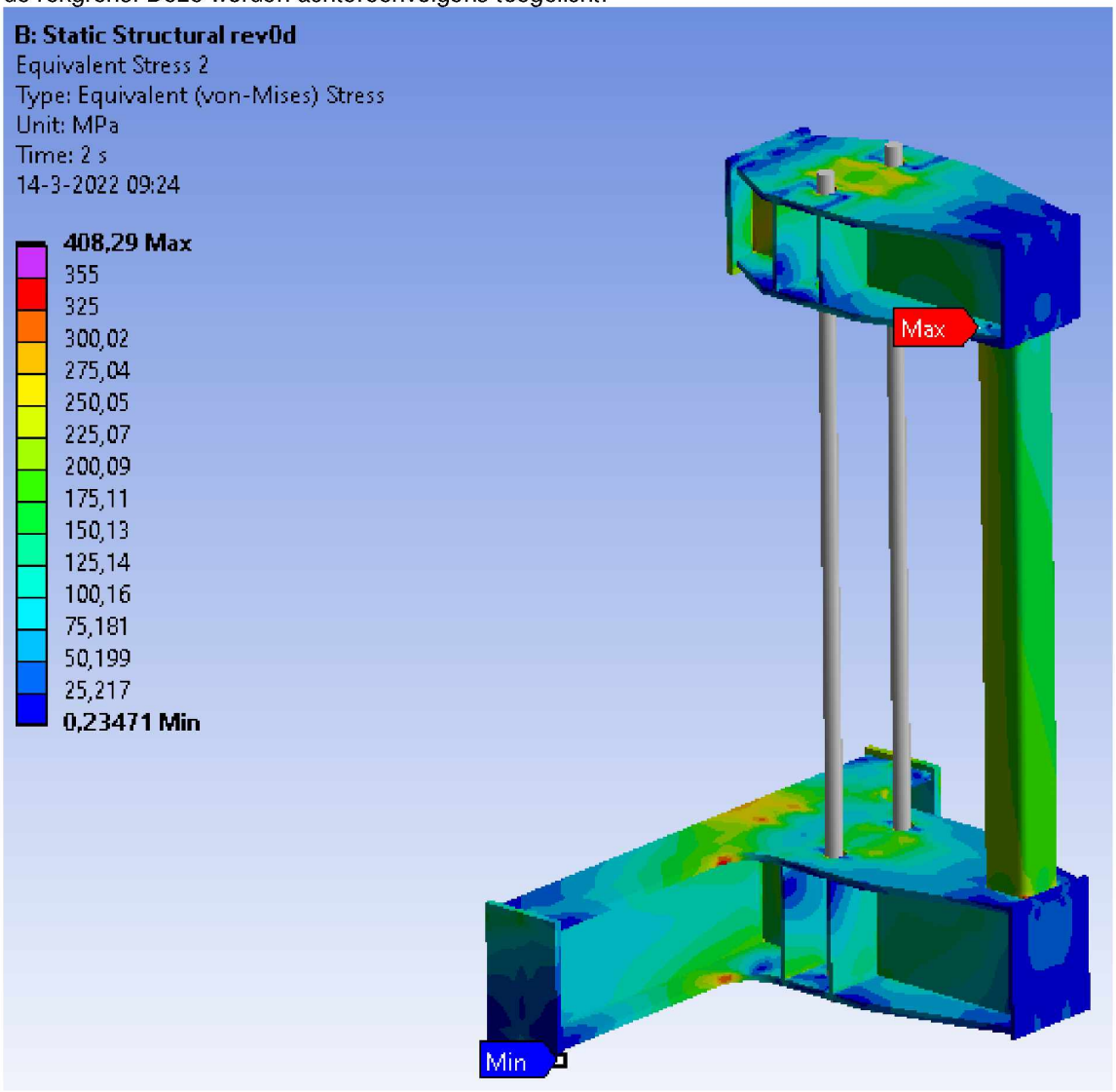
5 Resultaten toetsing

5.1. Sterkte

De volgende situaties zijn gecontroleerd.

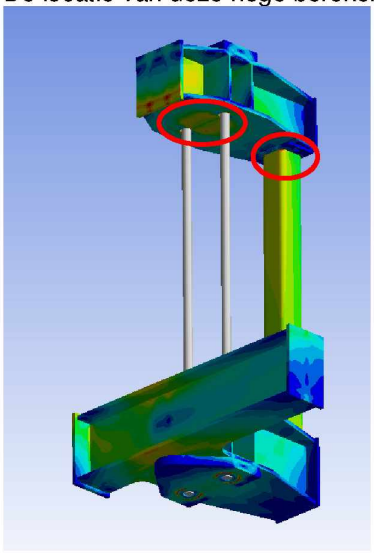
- Voorspanning van voorspanstaven met eigen gewicht.

Globale spanningen blijven onder het vloeicriterium van $f_{y;d}$ =355 MPa, zie **Error! Reference source not found.**. Er zijn enkele lokale spanningsgebieden die zich boven deze vloeispanning uitkomen, doch onder de rekgrens. Deze worden achtereenvolgens toegelicht.



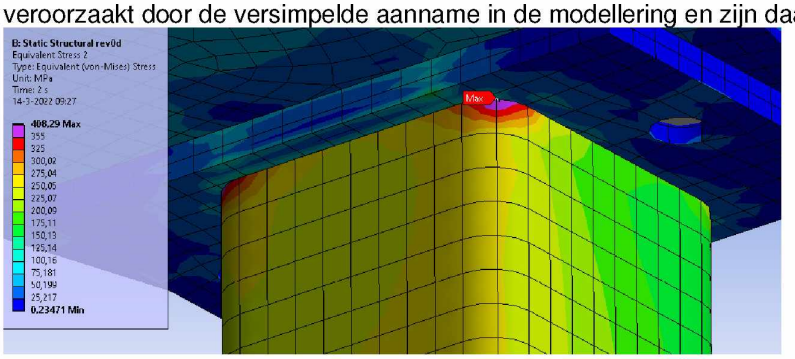
Figuur 14: Globale Spanningen

De locatie van deze hoge berekende spanningen zijn weergegeven in **Error! Reference source not found.**.

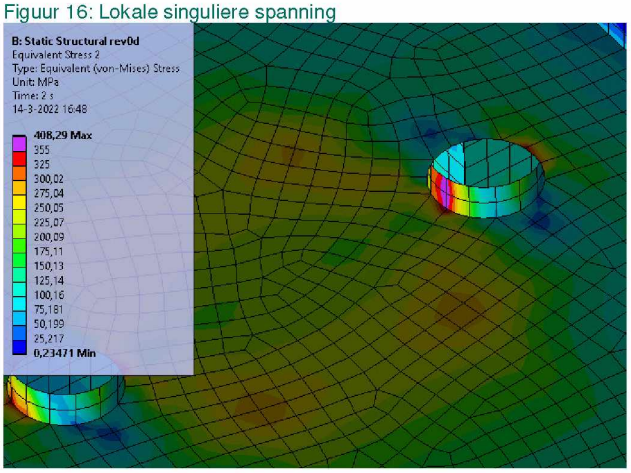


Figuur 15: Locaties van singuliere spanningen

In **Error! Reference source not found.** en **Error! Reference source not found.** is te zien dat de spanningen heel lokaal boven het vloeicriterium uitkomen. De hoge spanningen in deze details worden veroorzaakt door de versimpelde aanname in de modellering en zijn daardoor irreëel.



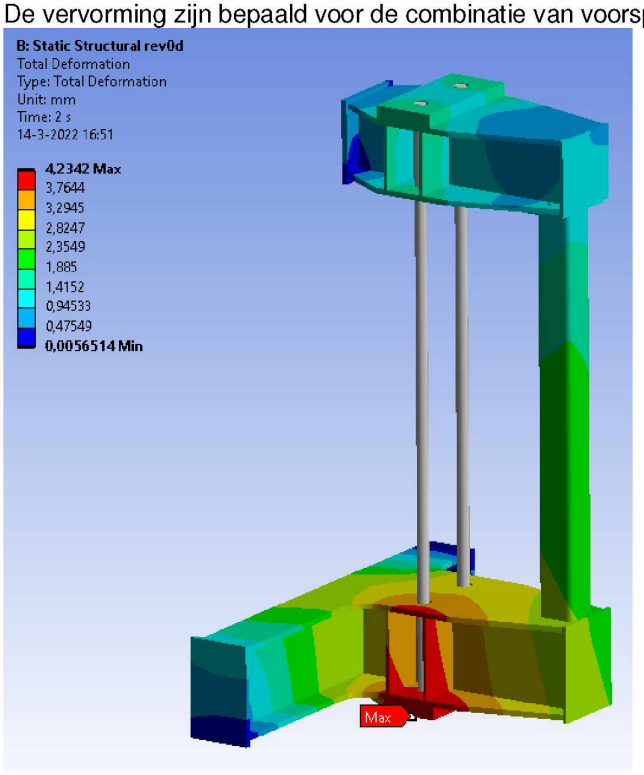
Figuur 16: Lokale singuliere spanning



Figuur 17: Lokale singuliere spanningen

5.2. Vervorming

De vervorming zijn bepaald voor de combinatie van voorspankracht en eigen gewicht.

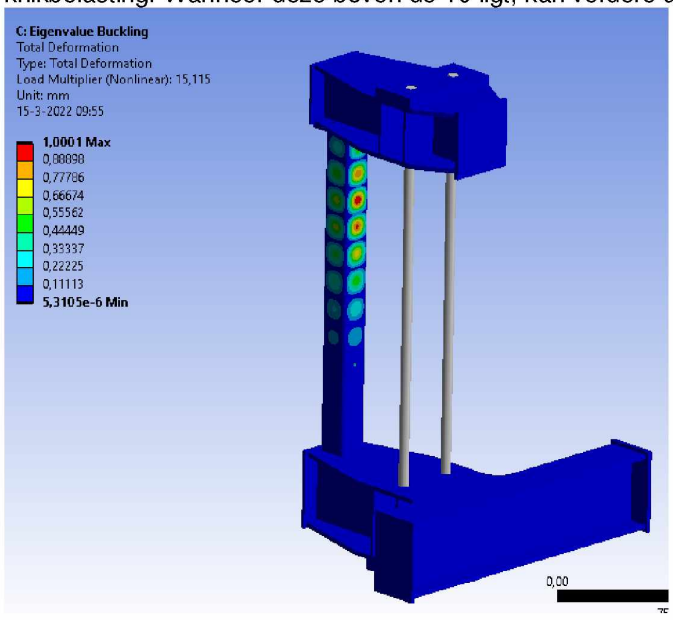


Figuur 18: Vervorming tgv voorspanning en eigengewicht

De maximale vervormingen is 3-4 mm. Het vervormingsplaatje toont een kleine verdraaiing van de onderste balk, Dit verschil is af te leiden uit de niet symmetrische lengteverdeling van de evenaar aan de onderzijde.

5.3. Stabiliteit

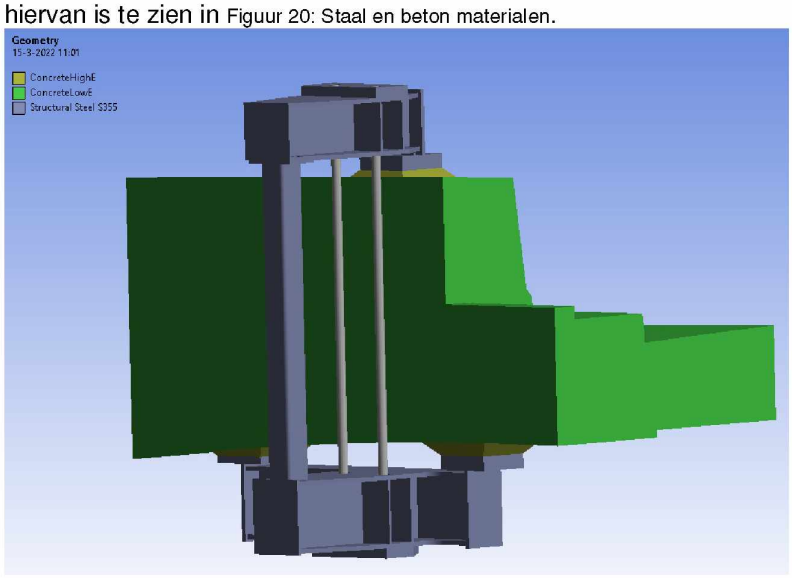
In de bijlage 11 is een kniktoets uitgevoerd van de op druk belaste kolom met een drukkracht van 1725 kN op de kolom van 200 mm x 200 mm x wanddikte van 12,5mm. UC = 0,67 < 1; Voldoet.
De profielklasse van de lijven onder druk vallen onder klasse 1, waardoor zij niet gevoelig zijn voor lokale plooi. Dit wordt bevestigd door een aanvullend knik analyse uitgevoerd met de zelfde belasting situatie als hiervoor beschreven. De laagste eigenwaarden van de gehele constructie bevinden zich in de drukkolom en geven een knikwaarde van 15. Deze waarde is de vergrotingsfactor voor het bepalen van de kritische knikbelasting. Wanneer deze boven de 10 ligt, kan verdere analyse achterwege blijven.



Figuur 19: Staal en beton materialen

5.4. Staal beton interactie

Om een indicatie te krijgen hoe efficiënt de klem druk zal doorgeven aan de tussen liggende betonnen constructie is er een simulatie uitgevoerd van de klem constructie samen met het beton. Een overzicht hiervan is te zien in Figuur 20: Staal en beton materialen.

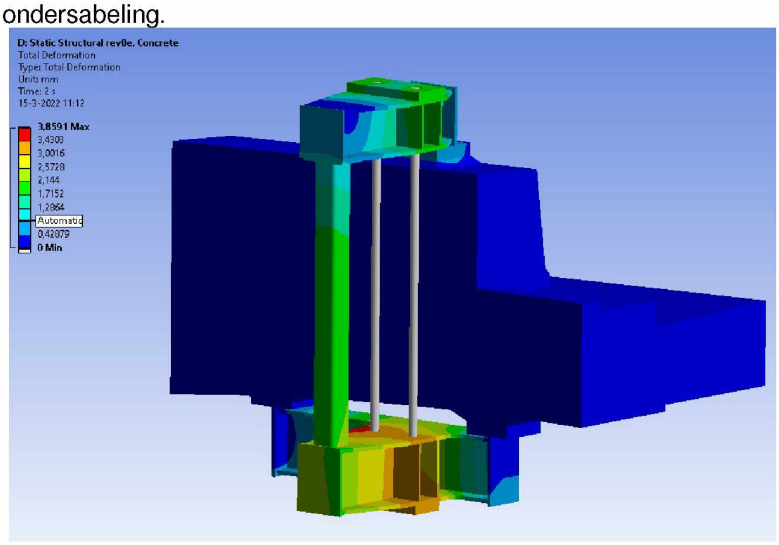


Figuur 20: Staal en beton materialen

Het beton materiaal bestaat uit twee onderdelen met elk een eigen stijfheid. Het ondersabelen materiaal heeft een grotere druksterkte en daardoor een hogere elasticiteit modules.

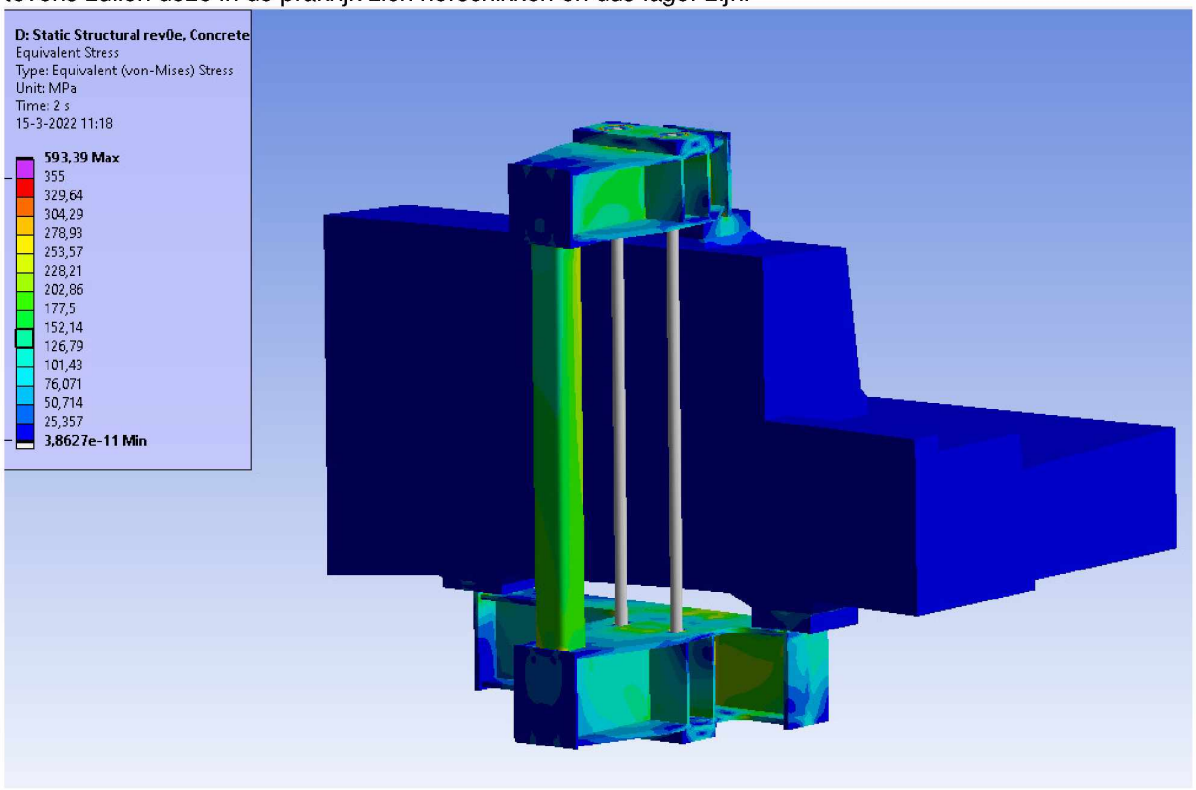
- Ondersabeling → Elasticiteit Modules : 42.000 Mpa (beige aanduiding)
- Betondrsn. → Elasticiteit Modules : 29.000 Mpa (groene aanduiding)

Dezelfde voorspanning is gehanteerd in de voorspanstaven als al eerder aangegeven van 2300kN per staaf. In deze situatie is eigengewicht niet meer genomen om mogelijk neven effecten van beton gewicht niet te introduceren. De totale vervormingen zijn te zien in onderstaande figuur. Deze is iets een fractie minder dan volgt uit de analyse zonder beton. Dit verschil kan toegekend worden aan de indrukking van de beton met ondersabeling.



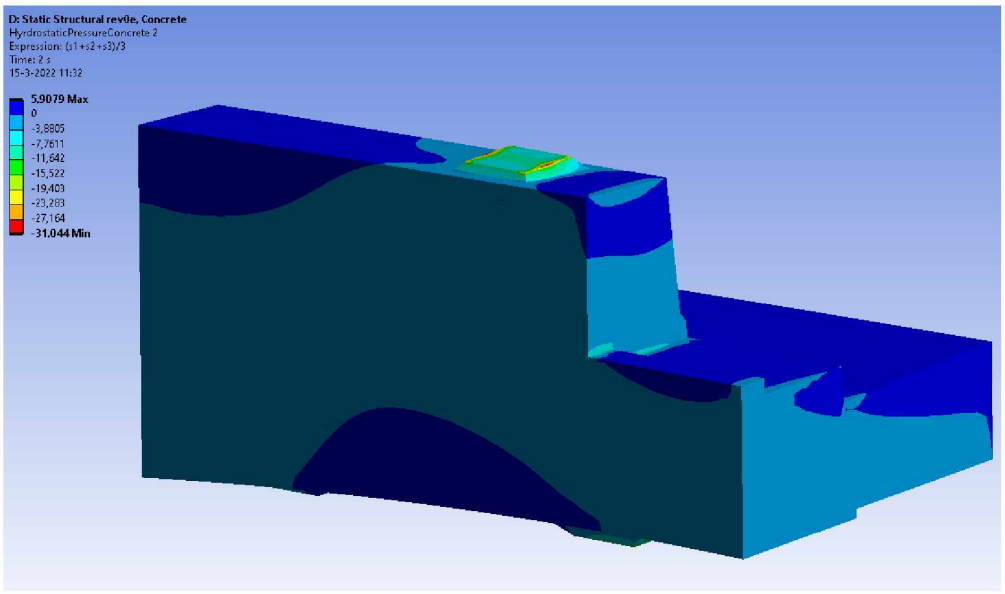
Figuur 21: Totale vervormingen Staal en beton.

Het spanningsbeeld (Figuur 22: Spanningen) in de globale staal constructie is ook gelijkwaardig aan de voorgaande berekeningen. Wel zijn er hogere spanning tpv de mesplaten. Deze hoge spanningen zijn een gevolg van het hertz(lijn) contact. In de berekening kunnen we deze deels aanduiden als singulier maar tevens zullen deze in de prakrijk zich herschikken en dus lager zijn.

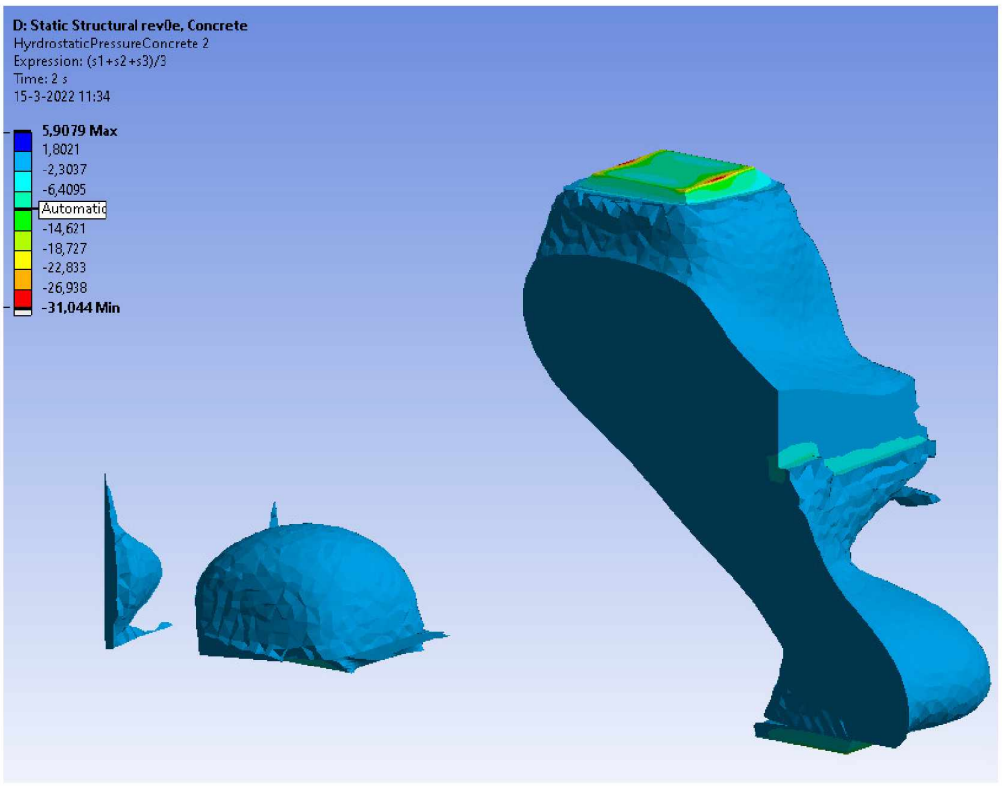


Figuur 22: Spanningen

De betondrukken afgegeven door de klem zijn te zien in Figuur 23: Totale betondruk en Figuur 24: Betondruk zone. Hierin is duidelijk de spreiding te zien over de breedte van de doorsnede en het ontstaan van een drukdiagonaal opgelegd door de voorspanning. De betondruk lokaal onder de ondersabeling is 6 MPa. De verdeelplaten doen goed hun werk. De abrupte overgang van randbelasting uit mesplaat zorgt voor een logische spanningspiek.



Figuur 23: Totale betondruk

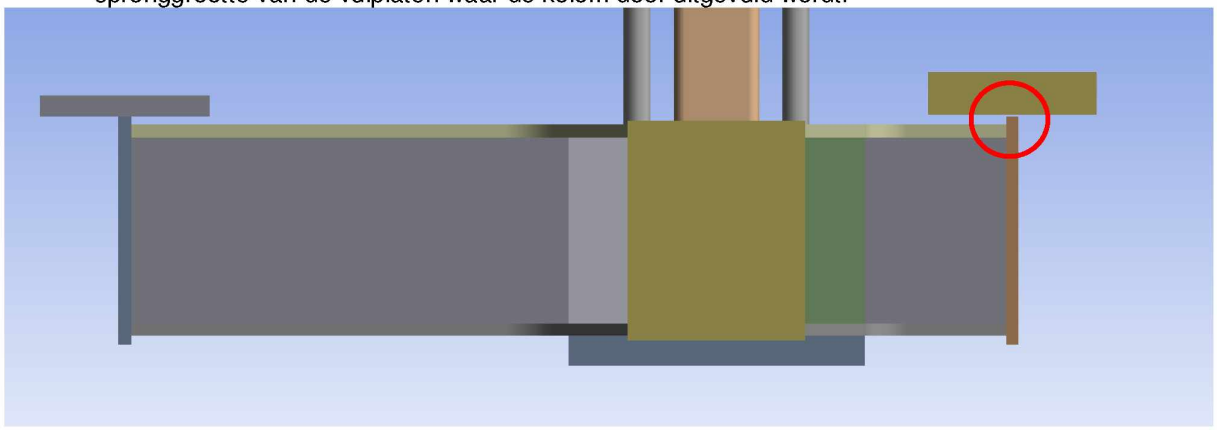


Figuur 24: Betondruk zone

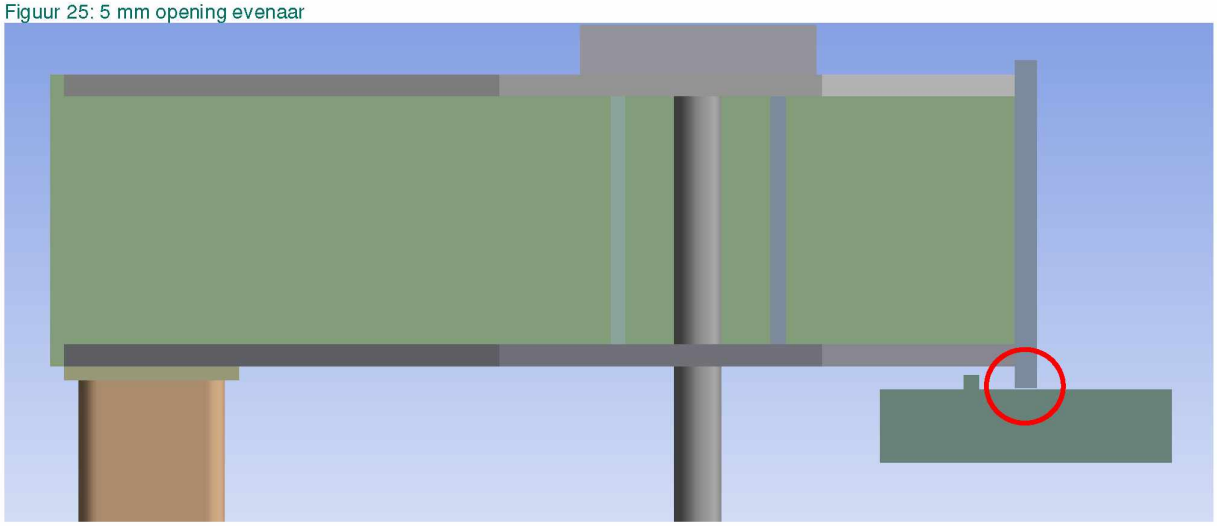
5.5. Tolerantiesbeschouwing

Voor de bepaling van toelaatbare toleranties zijn er een 2-tal simulaties uitgevoerd van mogelijke afwijkingen:

1. Afwijking 5 mm van een van de aanlegvlakken aan de onderzijde evenaar. Dit is een vertaling van het totaal aan mogelijke afwijkingen zoals hoogteligging van de verdeelplaten onderling, hoogteligging van de mesplaten, maar ook onrechtheid van de samengestelde koker.
2. Afwijking van 2 mm over de samengestelde koken aan de bovenkant. Die zijn oorsprong vind in de spronggrootte van de vulplaten waar de kolom door uitgevuld wordt.



Figuur 25: 5 mm opening evenaar

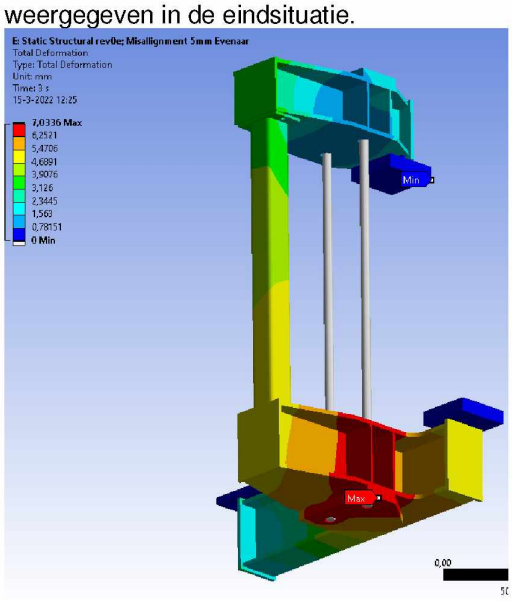


Figuur 26: 2 mm opening samengestelde koker boven

In de navolgende paragrafen zijn beide gevallen afzonderlijk beschouwd. Globaal hebben de afwijkingen geen invloed op de klemconstructie. Enkel lokaal op het contactvlak van de krachtsinleiding van de mesplaat worden de spanningen hoger, maar die zullen herverdelen. De gevallen zouden samen kunnen optreden, waardoor de effecten opgeteld dienen te worden. De conclusie is daarom dat we de tolerantie in lengte over de evenaar willen minimaliseren. De 5 mm wordt beperkt tot 2 mm. Opgebouwd uit 1 mm toelaatbaar in het onderlinge verschil van de hoogteligging van de verdeelplaten en 1 mm op de parallelliteit tussen de mesplaatranden boven en onder die contact maken met de verdeelplaten. De tolerantie in hoogte (geval 2) blijft praktisch op 2 mm als maximaal haalbaar volgend uit het samenstellen van vulplaten.

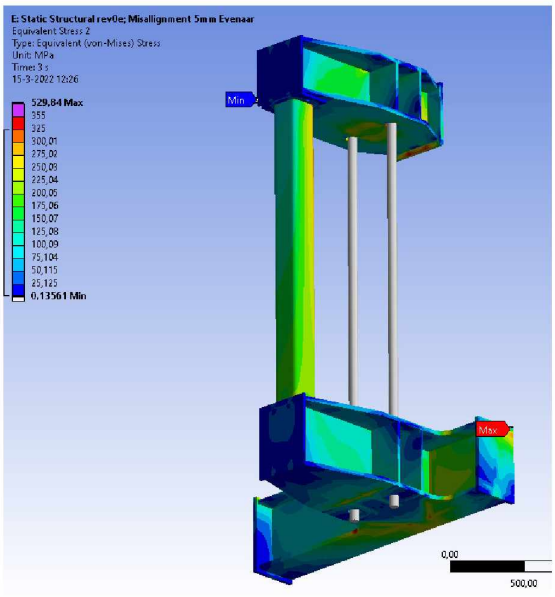
5.5.1. Geval 1: Afwijking opleggingen over lengte van evenaar

Zoals in Figuur 25: 5 mm opening te zien is wordt d.m.v. het introduceren van een onnauwkeurigheid een opening van 5 mm aangebracht. Tgv de voorspanning zal deze afstand eerst worden verkleind tot de mesplaat aan ligt en druk kan gaan doorgeven aan de stelplaat. In Figuur 27: Vervormingen zijn de vervormingen hiervan weergegeven in de eindsituatie.



Figuur 27: Vervormingen 5 mm opening

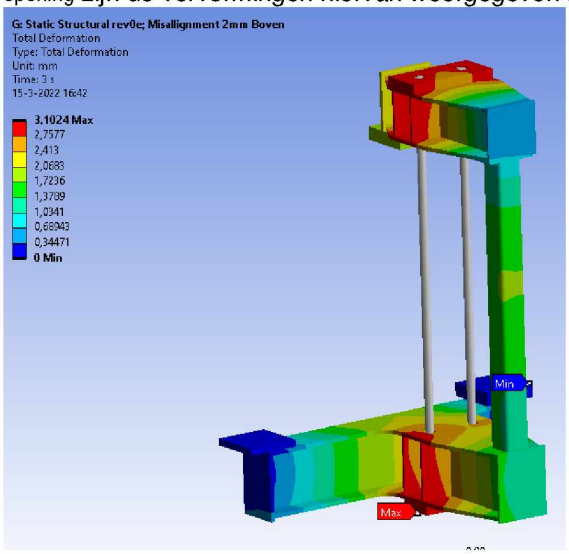
De globale spanningen in Figuur 28: Globale spanningen zijn hogere waarden te zien in vergelijk met de berekening uit paragraaf **Error! Reference source not found.**. Maar deze zijn een gevolg van het contact tussen de mesplaat en de stelplaat. Deze hoge spanningen worden veroorzaakt door het hertz(lijn) contact. In de berekening kunnen we deze deels aanduiden als singulier. Tevens zullen deze spanningen lokaal herverdelen.



Figuur 28: Globale spanningen

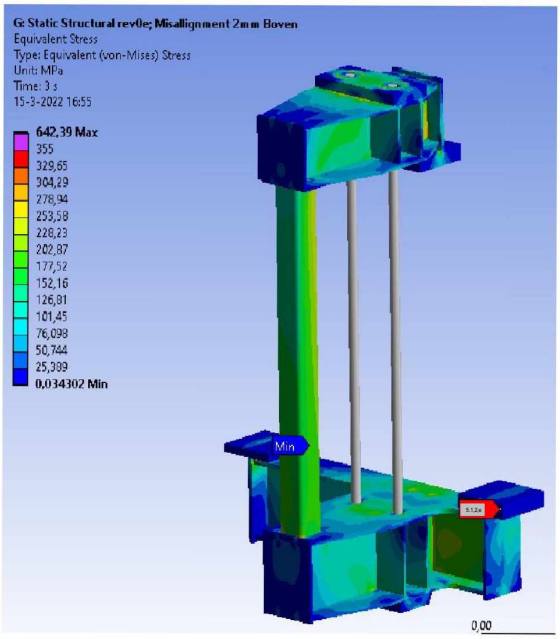
5.5.2. Geval 2: Afwijkingen in inpassing drukkokerlengte

Zoals in Figuur 26: 2 mm opening samengestelde koker boven te zien is wordt d.m.v. het introduceren van een onnauwkeurigheid een opening van 2mm aangebracht. Tgv de voorspanning zal deze afstand eerst worden verkleind tot de mesplaat aan ligt en druk kan gaan doorgeven aan de stelplaat. In Figuur 29: Vervormingen 2mm opening zijn de vervormingen hiervan weergegeven in de eindsituatie.



Figuur 29: Vervormingen 2mm opening

Net zoals in de voorgaande paragraaf zijn in Figuur 30: Globale Spanningen hogere spanningswaarden te zien in vergelijk met de berekening uit paragraaf **Error! Reference source not found.**. Ook hier zijn deze een gevolg van het contact tussen de mesplaat en de stelplaat. Deze hoge spanningen worden veroorzaakt door het hertz(lijn) contact. In de berekening kunnen we deze deels aanduiden als singulier. Tevens zullen deze spanningen lokaal herverdelen zijn.



Figuur 30: Globale Spanningen

6 Lasberekeningen

In een afzonderlijke bijlagen zijn lasberekeningen gemaakt. Ref. Bijlage 14.

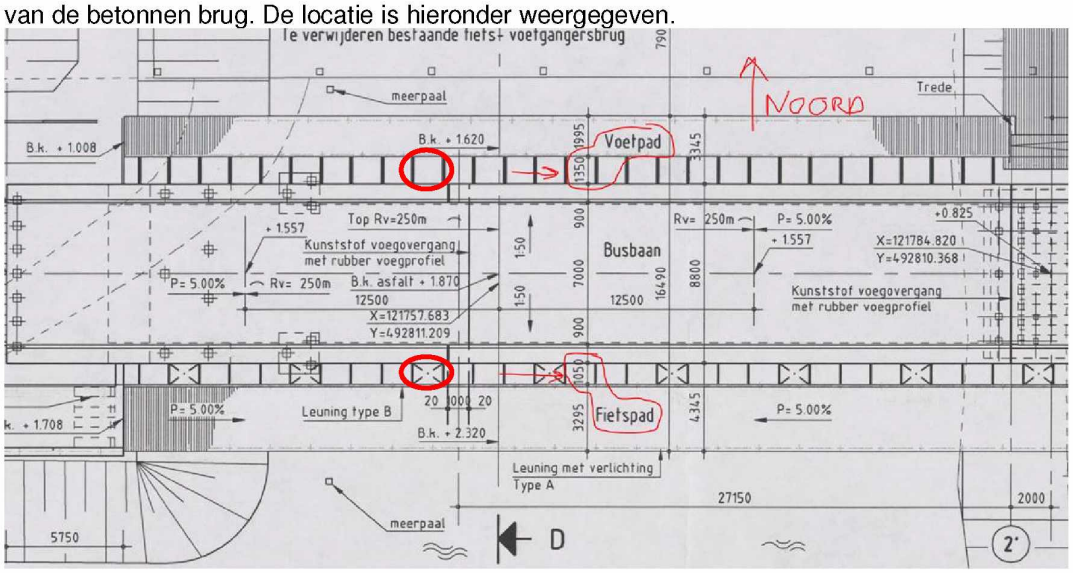
7 Raakvlakken

7.1. Controle betonconstructie

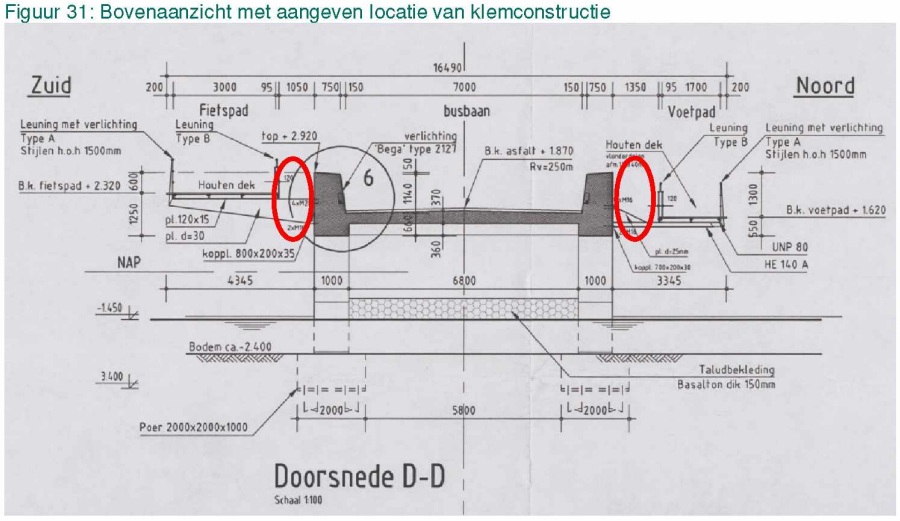
Dit hoofdrapport beschrijft het DO en aanverwante toetsing van de klemconstructie. Een beeld is gegeven van de werking van puur de voorgespannen klemconstructie op de betonconstructie in paragraaf 5.4. Verdere toetsingen de betonconstructie onder de totale belasting vanuit het ingehangen brugdek inclusief die opgelegd uit de klemconstructie is getoetst in bijlage 10.

7.2. Inpassing klemconstructie

Beide klemconstructies worden in breedte richting aangebracht tussen de reling van het fietsbrug en de rand van de betonnen brug. De locatie is hieronder weergegeven.



Figuur 31: Bovenaanzicht met aangeven locatie van klemconstructie



Figuur 32: Doorsnede met aangeven locatie van klemconstructie

De minimale vrije maten zijn ingemeten ter plaatse en wijken iets af van tekening:
Zuidzijde: 104 cm
Noordzijde: 133 cm.
De breedte van de klemconstructie in geinstalleerde positie is 990 mm. Hierdoor is er een minimale vrije ruimte tussen fietsbrug en klemconstructie van 5 cm. Dit is afdoende speling.
Aan de Zuidzijde is een windverband aanwezig tussen de consoles. Gecontroleerd wordt via tekening INFR180842-BRU2484-TEK001 of de klemconstructie hiervan vrij blijft. Het kan zijn dat het windverband dan verplaatst moet worden, maar het lijkt erop dat het enkel tijdelijk verwijderd moet worden bij installatie. Dit is een aandachtspunt voor uitvoering.

8 Risico's en Aandachtspunten

8.1. Risico's

De volgende risico's zijn gesignaleerd:

8.1.1. Onzeker of te groot verlies aan voorspanning.

In de bepaling van de krachten is uitgegaan van CC2. CC3 resulteert in niet veel hogere belastingfactoren.

Nagaan wat nu aangehouden wordt in bijlage 9. En evt. hierop ingaan. Kan ook een kans zijn voor meer slipverlies (lagere resterende voorspanning) toe te laten.

8.1.2. Inlijmankers te groot en te diep interfereren met wapening

Nu M16 8.8. 5 mm rondom speling vanwege afwijking inboorlocatie anker

Gevaar Druk op de ankers ipv mortel?

8.2. Aandachtspunten Uitvoerings Ontwerp

8.2.1. Conservering

Welke eisen coating?
Eisen aan afdichten voorspanstaven. Voorzien van kappen?

8.2.2. Inpassing alternatief spansysteem

Het DO is zodanig uitgevoerd dat het waarschijnlijk zonder aanpassingen toepasbaar is voor een andere

8.3. Aandachtspunten Uitvoering

8.3.1. Montage

Een uitgebreid werkplan moet opgesteld worden hoe de klemconstructies aan te brengen met focus op V&G en constructieve veiligheid. Hierbij rekening houdend met:

- Geldende Wegafsluiting voor verkeer
- Gewicht en zwaartepunt van de constructie elementen (in geheel of afzonderlijk) afhankelijk van de wijze van montage.
- Stabiliteit van het geheel over alle stappen van de montage heen. Voorkomen van vallen of verschuiven

8.3.2. Windverband

Aan de zuidzijde wordt montage verhinderd door de aanwezigheid van een windverband. Deze mag (tijdelijk) verplaatst te worden, maar dient ten alle tijden aanwezig te zijn evt. tijdelijk in alternatieve vorm.

8.3.3. Spansysteem

Een uitgebreid werkplan moet opgesteld worden hoe de voorspanning aangebracht wordt en de gewenste voorspankracht aantoonbaar aanwezig is na het optreden van spanningsverlies. Het voorgestelde spansysteem met grove spoed kent in basis relatief veel verlies en vraagt aandacht. Er bestaan ook andere spansystemen met fijne spoed die in basis minder verlies zouden moeten kennen. Voor elke toepassing van spansystemen geldt dat deze moeten gedekt zijn door de ETA-richtlijnen.
De toepassing voor ogen dient door middel van bijvoorbeeld een gelijkwaardige proefopstelling met een van de klemconstructies een test uitgevoerd te worden om meetbaar (d.m.v. loadcel) de resulterende klemkracht aan te tonen en dat de verliezen binnen de 15% blijft d.m.v. rekstrookjes.
Afhankelijk van ruimtebeslag vijzels beide boven of boven en onder tegelijk voorspannen. De beide vijzels moeten hydraulisch gekoppeld zijn zodat er geen verschilkracht tussen de ankers ontstaat.

8.3.4. Naspannen

Beton relaxeert. Het zal nodig zijn om de ankers nog een na te spannen.
Bijwerken conservering na het naspannen rond de contactvlakken van de klemconstructie met de verdeelplaten en duurzame afwerking en bescherming van voorspanstaven.

8.3.5. Uitvoering en Toleranties

De klemconstructies dient uitgevoerd te worden volgens NEN-EN1090-2 EXC.3. Er zijn aanvullend toleranties gesteld via DO-tekening voor de lassamenstelling en de afstelling.

8.3.6. Levering staal met Z-kwaliteit

Leveringsconditie voor de Z-kwaliteit van de platen als onderdeel van de gelaste klemconstructie: Z35.
De verdeelplaten behoeven geen Z-kwaliteit.

8.3.7. Check op dubbelingen

Platen die loodrecht op de plaat getrokken worden moeten qua leveringsconditie voldoen aan eisen ten aanzien van Z-kwaliteit volgens NEN-EN 1993-1-10. Hoog belaste onderdelen en onderdelen die bij lokaal bezwijken leiden tot bezwijken van de hoofddraagconstructie of leiden tot niet beschikbaarheid, moeten ter plaatse van de las bovendien ultrasoon worden onderzocht op dubbelingen en andere fouten.

9 Bijlagen: Belastingopgave volgens Gemeente Amsterdam

10 Bijlagen: Toetsing Beton

11 Bijlagen: Globale berekening

12 Bijlagen: Kolom stabiliteit

13 Bijlagen: FEM Rapportage

14 Bijlagen: Lasberekeningen