

TETRA-project PRO³
Werkpakket 3 – Structurele aspecten

**Studie van de gebruikelijke verankeringen bij houten prefab gevelpanelen
voor gevelrenovatie**

**Studie van de relatie tussen de vervormingen van een prefab gevelelement in
het vlak en die van het structurele element waarin dat element verankerd is.**

Onderzoeksrapport

Prof. dr. ir. Wouter De Corte

Hoofddocent

Onderzoeksgroep Schoonmeersen

Vakgroep Bouwkundige Constructies

Universiteit Gent

1. Inhoudsopgave

1 Inhoudsopgave	1
2 Context en afbakening van de opdracht	3
3 Verankering van houten prefab gevelpanelen	4
3.1 Principe van de verankering	4
3.2 Belastingen op de verankering	5
3.3 Vereenvoudigde berekening van de optredende spanningen in de verankering	5
3.4 Parameterstudie van de krachtswerking in de verankering op basis van de vereenvoudigde berekening	7
3.4.1 Meer excentrische plaatsing met sleufgaten	8
3.4.2 Meer excentrische plaatsing	8
3.4.3 Verlengde bovenplaat	9
3.5 Verticale stijfheid van de verankeringen	9
3.6 Relatie tot op de markt beschikbare verankeringen voor houten elementen	10
3.7 Conclusies	10
4. Verticale stijfheid van een houten gevelelement in het vlak in relatie tot de stijfheid van de hoofddragstr	11
4.1 Rekenmodel	11
4.2 Eigenschappen van de samenstellende elementen	12
4.2.1 Regels en stijlen	12
4.2.2 Beplating	13
4.2.3 Stijfheid van de ondersteuning	15
4.2.4 Afmetingen van het caisson	15
4.2.5 Openingen in het caisson	15
4.2.6 Ondersteuning	16
4.3 Bepaling van de aangebrachte belasting	16
4.4 Resultaten basisconfiguratie zonder openingen	17
4.5 Parameterstudie	18
4.5.1 Invloed van de afmetingen (gesloten caisson)	18
4.5.2 Invloed van kruip	19
4.5.3 Invloed van een dubbele beplating	20
4.5.4 Invloed van het effect van de niet volledige samenwerking tussen regels en beplating	21
4.5.5 Invloed van de dikte van het caisson	22

4.5.6 Invloed van een zwakkere houtsoort	23
4.5.7 Invloed van de verticale stijfheid van de steunen	23
4.5.8 Invloed van de stijfheid van de balk (verhoogde stijfheid)	24
4.5.9 Invloed van de stijfheid van de balk (veranderlijke stijfheid)	25
4.5.10 Invloed van de openingen (kleine openingen)	26
4.5.11 Invloed van de openingen (grote openingen)	27
4.6 Conclusies	28
5 Testprogramma	30
5.1 Principe testopstelling	30
5.2 Afmetingen	32
5.3 Aanvankelijke test : bepaling van de stijfheid van de hoofddraagstructuur	32
5.4 Test met een caisson zonder beplating	34
5.5 Vergelijking met rekenresultaten	36
5.6 Test met een eenzijdig verstijfd paneel zonder openingen (schroeven diameter 3mm)	37
5.7 Test met een eenzijdig verstijfd paneel zonder openingen (schroeven diameter 3mm)	39
5.8 Test met een eenzijdig verstijfd paneel met openingen (schroeven diameter 3mm)	42
5.9 Bepaling van de stijfheid van de steunen	45
5.10 Interpretatie van de rekmetingen tijdens de proeven besproken in 5.7 en 5.8	50
5.11 Conclusies van het testprogramma	52
6 Confrontatie berekeningen en testprogramma	52
7 Algemene conclusies	54

2. Context en afbakening van de opdracht

Deze onderzoeksopdracht kadert in **Werkpakket 3 – Structurele aspecten** van het TETRA-project PRO³. De aanleiding voor dit werkpakket is de vaststelling dat er al heel wat kennis bestaat over de structurele performantie van prefab gevelelementen bij producenten en ontwerpers, maar dat niettemin een eerste bevraging voorafgaand aan het project bij de leden van de potentiële gebruikersgroep aangetoond heeft dat er bij renovatie nog enkele vragen bestaan op structureel vlak.

Uiteraard zijn prefab gevelelementen zeer verschillend van aard, in materiaalgebruik (beton – hout – aluminium – FRP,...), in verankering, in toepassingsgebied etc.. Ook zijn de vragen uit de sector van verschillende aard, meer of minder fundamenteel, en ook vaak niet oplosbaar binnen het raamwerk van een TETRA-project.

Na een aanvankelijk aftoetsen van de verschillende initiële vragen met verschillende leden van de gebruikersgroep bleken de voornaamste vragen die onderzocht kunnen worden binnen dit TETRA-project zich te situeren binnen het domein van de Prefab Houtsector.

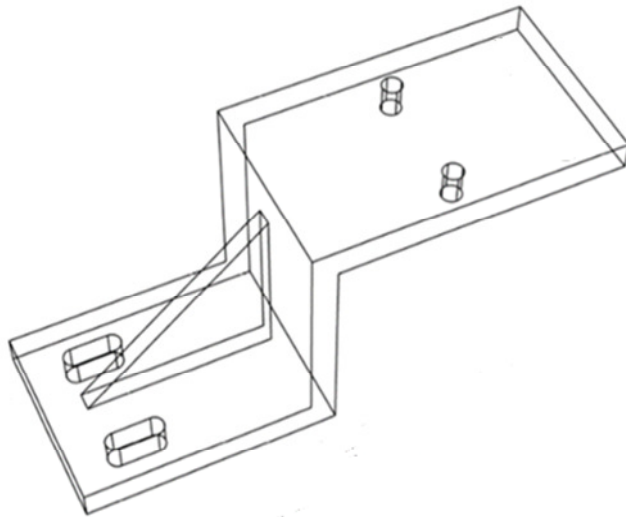
Er werd dan ook op 5 oktober 2016 een rondetafelgesprek georganiseerd met verschillende actoren binnen deze sector waaruit volgende 2 onderzoeksvragen zijn gedestilleerd.

1. Verankeringen van houten gevelelementen worden individueel en per project ontworpen (en vaak gefabriceerd), ook op de werf is de installatie arbeidsintensief en bovendien is de invloed van de tolerantie zeer groot (4cm op plan, 0-7cm in realiteit). Wat zijn de eisen te stellen aan deze verankeringen, wat zijn de optredende krachtswerkingen, wat zijn toelaatbare uitvoeringstoleranties, wat is de invloed van de toleranties, zijn er vereenvoudigde oplossingen mogelijk en wat is de invloed van deze verankeringen op de vervormingen van de prefab panelen?
2. Wat is de relatie van de vervormingen van een houten gevelement in het vlak tot de vervormingen van het structurele (beton)element waar het in verankerd is? De vraag stelt zich in het bijzonder wanneer deze vervormingen op opeenvolgende verdiepingen grondig verschillend zijn, waardoor panelen van opeenvolgende verdiepingen elkaar kunnen raken, dan wel er onaanvaardbare verticale openingen zouden kunnen ontstaan tussen de panelen.

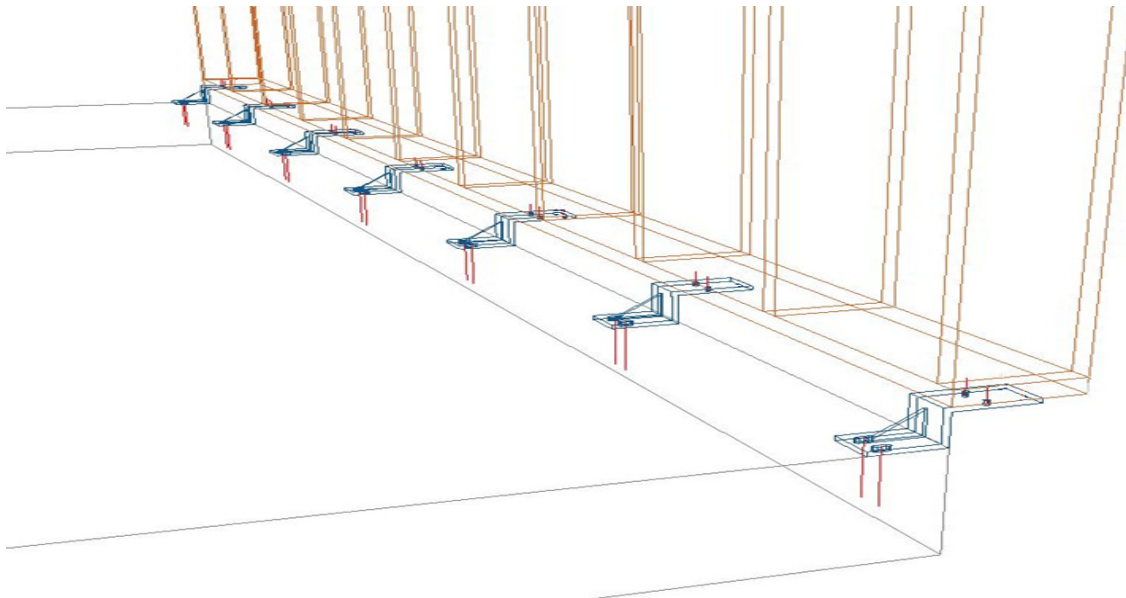
3. Verankering van houten prefab gevelpanelen

3.1 Principe van de verankering

Op basis van het rondetafelgesprek is naar voren gekomen dat de gebruikelijke manier van verankeren van prefab gevelpanelen van het caisson-type een Z-vormige steun (Figuur 3.1) betreft die op de rand van de vloerplaat wordt bevestigd (Figuur 3.2). De steunen worden aangebracht op vaste afstanden (typisch 1 à 1.5m) licht uitkragend (20mm typisch) ten behoeve van de eisen voor brandveiligheid. Omwille van de noodzakelijke hoogteregeling worden deze individueel in 3 richtingen op de correcte positie afgeregeld.



Figuur 3.1 : Steun voor caisson-type prefab gevelpanelen



Figuur 3.2 : Bevestiging van de prefab gevelpanelen aan de bestaande vloer

Deze steunen moeten voldoen aan volgende eisen :

- Het eigengewicht, de vaste en mobiele verticale belastingen op de caissons worden puntsgewijs via de individuele steunen overgebracht naar de individuele verdiepingen. Hiermee wordt aan de betreffende eis voor brandveiligheid voldaan (KB van 12 juli 2012 tot wijziging van het koninklijk besluit van 7 juli 1994 tot

vaststelling van de basisnormen voor de preventie van brand en ontploffing waaraan de nieuwe gebouwen moeten voldoen)

- Bovenstaande belastingen grijpen excentrisch aan ten opzichte van de rand van de draagstructuur van het gebouw. Dit is een atypische belasting voor een verbindingselement in de houtbouw, waar deze elementen quasi uitsluitend worden gedimensioneerd op basis van langs- en dwarskrachten. Typische prefab dunwandige verbindingselementen uit de houtbouw voldoen niet.
- De mobiele horizontale belastingen (windkrachten) op de caissons worden typisch boven en onder het caisson afgedragen naar opeenvolgende verdiepingen en dus ook overgebracht via dezelfde steunen. Deze boven-onder overdracht is logisch gezien de verhouding van kolomafstand tot verdiepingshoogte en gezien het feit dat kolommen minder geschikt zijn voor het opnemen van de lokale windlasten.
- Gezien de Z-vorm grijpen deze horizontale krachten excentrisch aan ten opzichte van de verankering wat een bijkomend moment in de verbinding als gevolg heeft.

3.2 Belastingen op de verankering

Om een inschatting te maken van de belastingen worden volgende uitgangswaarden gebruikt :

- Tussenafstand steunen : 1m
- Hoogte caisson : 3m
- Gewicht caisson : 0.5 kN/m² (±50 kg/m²)
- Gewicht bekleding : 1 kN/m² (±100 kg/m²)
- Andere vaste en mobiele verticale belastingen : geen

Totale verticale belasting per steun : 4.5 kN in gebruiksgrenstoestand (x1.35 = 6.1 kN in uiterste grenstoestand)

- Tussenafstand steunen : 1m
- Hoogte caisson : 3m
- Windbelasting : 2 kN/m² (±200 kg/m²)
- Andere vaste en mobiele horizontale belastingen : geen

Totale horizontale belasting per steun : 3 kN in gebruiksgrenstoestand (x1.5 = 4.5 kN in uiterste grenstoestand)

Deze belasting kan per steun worden afgedragen door een element onder- en boven de steun.

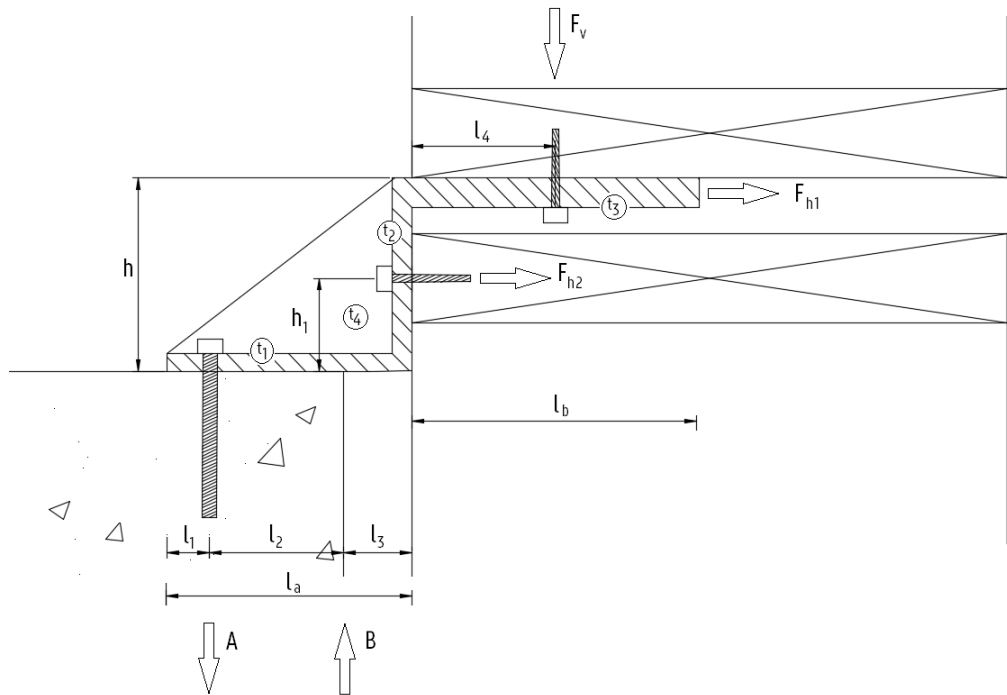
3.3 Vereenvoudigde berekening van de optredende spanningen in de verankering

Voor een vereenvoudigde berekening van de optredende spanningen en krachtswerkingen in de verankering wordt uitgegaan van de afmetingen van Figuur 3.3. De verticale reactiekrachten worden bepaald door een krachten- en momentenevenwicht. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat het drukpunt zich op de rand van het beton (of de onderlegmortel) bevindt. Gezien de beperkte grootte van de krachtswerkingen is dit verantwoord. De horizontale krachten worden enkel ter plaatse van de ankerbout overgedragen.

In het evenwicht worden zowel de trekkracht in de bouten als de drukkracht op de rand positief gekozen.

Het evenwicht vereist :

- $A + B = F_v$
- $A \cdot l_2 = F_{h2} \cdot h_1 + F_v \cdot (l_3 + l_4) + F_{h1} \cdot h$



Figuur 3.3 : Afmetingen en krachtwervingen steun : principeschets

Om een inschatting te maken van de krachtwervingen worden volgende uitgangswaarden gebruikt :

- Lengte onder (l_a) : 125mm
- Hoogte (h) : 90mm
- Lengte boven (l_b) : 160mm
- Breedte loodrecht op het vlak van de tekening (b) : 100mm
- Positie bout (l_1) : 40mm
- Tussenafstand (l_2) : 65mm
- Uitkraging (l_3) : 20mm
- Positie horizontale verankering onderste caisson (h_1) : 45mm
- Positie verticale en horizontale verankering bovenste caisson (l_4) : 80mm
- Dikte onderplaat (t_1) : 10mm
- Dikte verticaal (t_2) : 10mm
- Dikte bovenplaat (t_3) : 15mm
- Dikte schuine plaat (t_4) : 8mm

Met deze waarden en een verticale belasting $F_v = 6.1$ kN en horizontale belastingen van $F_{h1} = F_{h2} = 4.5$ kN van worden de krachten A en B :

- Trekkracht in de bouten A = 18.7 kN (verdeeld over 2 bouten = 9.35 kN per ankerbout)
- Drukresultante op de rand B = 24.8 kN
- Horizontale afschuifkracht in de bouten = 9 kN (verdeeld over 2 bouten = 4.5 kN per ankerbout)

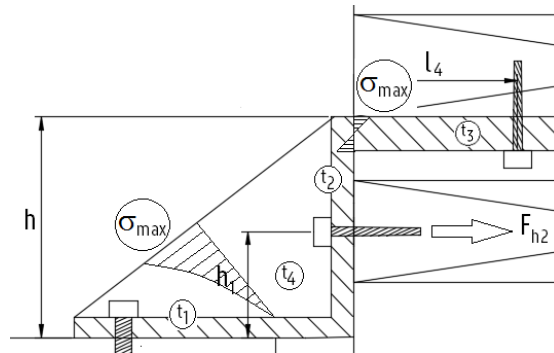
In de trek- en drukresultante zijn de aandelen van verticale en horizontale belasting gelijkwaardig.

De berekening van de spanningen en de vervormingen in het hoekstuk, in het bijzonder in het verstijfde deel kunnen niet nauwkeurig zonder een eindige elementenanalyse berekend worden. Het aantal variabelen in deze berekening ($l_a, l_b, l_1, l_2, l_3, l_4, t_1, t_2, t_3, t_4, h, h_1$ en b) is ook te groot om een volledige parameteranalyse te maken. Er kunnen wel enkele analytische berekeningen worden uitgevoerd. Belangrijk zijn de buigspanning in de bovenplaat en de maximale spanning in de schuine plaat (Figuur 3.4).

- Buigspanning in de bovenplaat : $\sigma_{\max, \text{bovenplaat}} = \frac{6 \cdot F_v \cdot l_4}{b \cdot t_3^2} = 129.6 \text{ MPa} (< 235 \text{ MPa})$

- Schatting max spanning in de schuine plaat : $\sigma_{\max, \text{schuine plaat}} = \frac{9 \cdot A \cdot l_2}{2 \cdot [(l_1 + l_2) \cdot \sin(\theta)]^2 \cdot t_4} = 181.57 \text{ MPa} (< 235 \text{ MPa})$

Hierin is θ de hoek tussen de schuine rand en de horizontale.



Figuur 3.4 : spanningen steun : principeschets

Beide vereenvoudigd berekende waarden voldoen aan de maximale spanningsvoorwaarden. De plaatdikte van de bovenplaat kan zelfs nog verminderd worden tot 12mm (202.5 MPa).

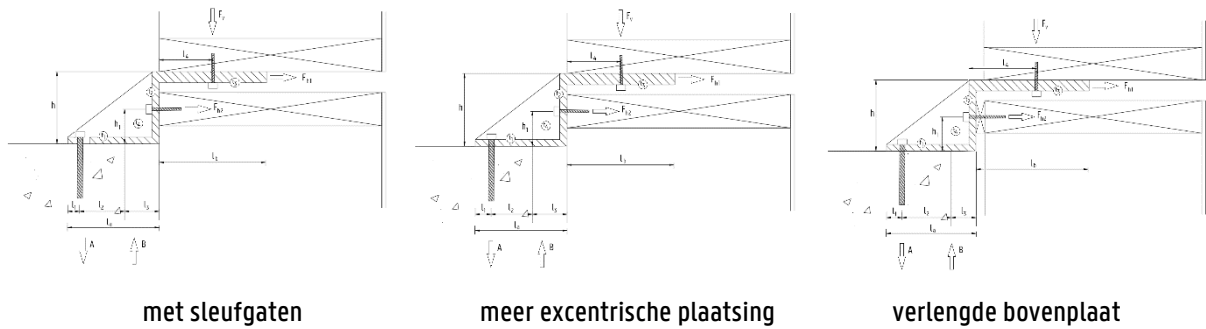
Gezien de belangrijke tolerantie op de uitkraging (l_3) wordt de vraag gesteld wat de invloed hiervan is op de inwendige spanningen in de steunen. In wat volgt wordt hiertoe een parameterstudie uitgevoerd.

3.4 Parameterstudie van de krachtswerking in de verankering op basis van de vereenvoudigde berekening

Wanneer een uitvoerder op de werf geconfronteerd wordt met een groter dan verwachte afmeting l_3 (uitkraging), dan zijn er verschillende mogelijkheden (Figuur 3.5) :

- Mogelijkheid 1 : de steunen worden voorzien van sleufgaten, om een tolerantie van 20mm op te vangen. de steunen worden dicht bij de rand geplaatst en de afstand l_3 wordt groter. De afstand l_2 blijft echter gelijk. Hierdoor vergroot de uitwendige hefboomsarm, maar blijft de inwendige hefboomarm gelijk.
- Mogelijkheid 2 : de steunen worden dicht bij de rand geplaatst : de afstand l_2 wordt kleiner en de afstand l_3 wordt groter, hierdoor vergroot de uitwendige hefboomsarm en verkleint tegelijk de inwendige hefboomarm.
- Mogelijkheid 3 : de tolerantie wordt opgevangen in de bovenste horizontale plaat. Deze wordt verlengd en eventueel voorzien van bijkomende boorgaten voor de verankering. Voor de horizontale verankering van de onderste caisson wordt eventueel een passtukje gebruikt. Hierdoor vergroot de spanning in de bovenste plaat door de verhoging van l_4 en de uitwendige hefboomsarm voor de schuine plaat.

- Mogelijkheid 4 : er wordt gebruik gemaakt van een grotere steun, die in staat is om grotere toleranties, bijvoorbeeld tot 40mm op te vangen (niet vermeld op figuur 3.5)

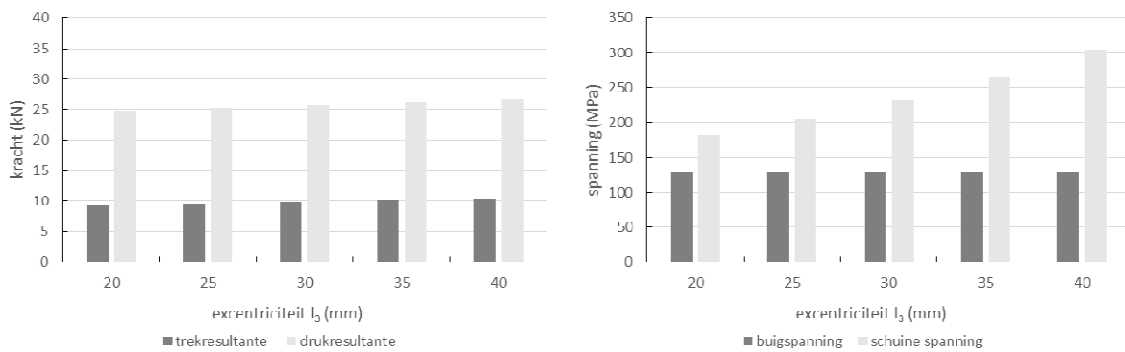


Figuur 3.5 : mogelijke oplossingen voor het opnemen van de tolerantie

Met de basiswaarden van de belastingen uit 3.2 en de afmetingen uit 3.3 wordt een parameterstudie uitgevoerd om de invloed van de tolerantie op de excentriciteit en de keuze voor de mogelijke oplossing op de vereenvoudigd berekende waarden voor de spanningen in bovenplaat en schuine plaat te onderzoeken.

3.4.1 Plaatsing met sleufgaten

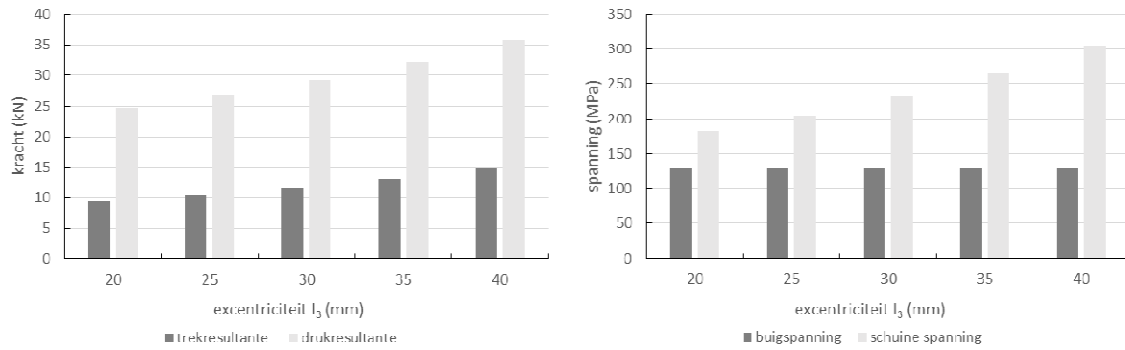
Bij een meer excentrische plaatsing met sleufgaten wordt de afmeting l_3 vergroot tot 40mm terwijl de afmeting l_2 gelijk blijft. De gevolgen van deze plaatsing zijn weergegeven in Figuur 3.6 voor de krachswerkingen en de spanningen. Deze figuur geeft aan dat de invloed van deze oplossing nog steeds aanzienlijk is. De toename van de trekresultante is beperkt tot ongeveer 10% en de spanning in de schuine plaat stijgt met ongeveer 50%. Deze toename kan eventueel opgenomen worden door de keuze voor een grotere plaatdikte. Voor de buigspanning in de bovenplaat verandert er niets. De vraag stelt zich wel in hoeverre deze oplossing het opnemen van de horizontale reactie hindert. Wellicht kan een licht aanspannen van de verbinding een oplossing bieden.



Figuur 3.6 : Verschillen in krachswerking en spanningen : mogelijkheid 1

3.4.2 Meer excentrische plaatsing

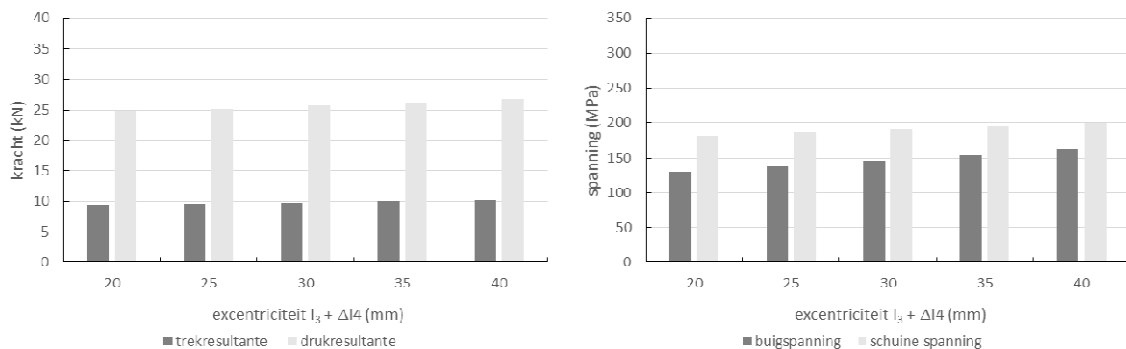
Bij een meer excentrische plaatsing wordt de afmeting l_3 vergroot tot 40mm terwijl de afmeting l_2 verkleint tot 45mm. De gevolgen van deze plaatsing zijn weergegeven in Figuur 3.7 voor de krachswerkingen en de spanningen. Deze figuur geeft aan dat de invloed van deze oplossing aanzienlijk is. Zowel de trekresultante als de spanning in de schuine plaat stijgen met ongeveer 50%. Deze toename is aanzienlijk en niet toelaatbaar. Voor de buigspanning in de bovenplaat verandert er niets.



Figuur 3.7 : Verschillen in krachtswerking en spanningen : mogelijkheid 2

3.4.3 Verlengde bovenplaat

Bij de toepassing van een verlengde bovenplaat wordt de afmeting l_4 vergroot tot 100mm terwijl de afmeting l_2 en l_3 gelijk blijven. De gevolgen van deze plaatsing zijn weergegeven in Figuur 3.8 voor de krachtswerkingen en de spanningen. Deze figuur geeft aan dat de invloed van deze oplossing op gebied van krachtswerking en spanningen eerder beperkt is. De toename van de trekresultante en de spanning in de schuine plaat zijn beperkt tot ongeveer 10%, terwijl de spanning in de bovenplaat stijgt met ongeveer 25%. Deze toename is aanvaardbaar. Op basis van deze vereenvoudigde studie is deze oplossing aanvaardbaar.



Figuur 3.8 : Verschillen in krachtswerking en spanningen : mogelijkheid 3

3.5 Verticale stijfheid van de verankeringen

De verticale vervormbaarheid van een steun van het type van Figuur 3.1 is relatief hoog. Er is een vervorming door de rek in de ankerbouten, de lokale indrukking van het beton ter plaatse van het drukpunt, de vervorming van het schuine gedeelte en in het bijzonder de buiging van de bovenplaat. Benaderd wordt de vervormbaarheid van de verankering gedefinieerd als de verticale buigingsvervorming ter plaatse van de verticale belasting F_v .

$$u = \frac{F_v \cdot l_4^3}{3 \cdot E \cdot b \cdot t_3^2 \cdot 12}$$

Met de basiswaarden van de belastingen uit 3.2 en de afmetingen uit 3.3 wordt de verticale verplaatsing :

$$u = 0.130 \text{ mm (in deze is uitgegaan van de waarde van } F_v \text{ in gebruiksgrenstoestand)}$$

De verticale stijfheid van de verankering is hiermee :

- $K_{v,15mm} = 34607 \text{ N/mm}$

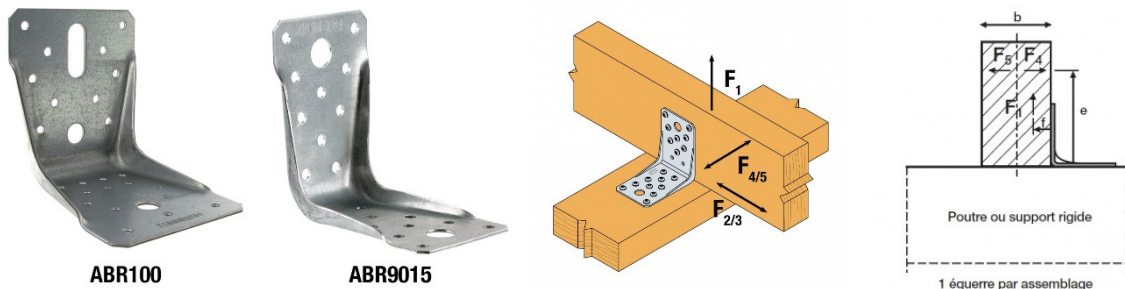
Deze waarde is zeker een bovengrens. De reële waarde zal beduidend (tot een orde) lager zijn ten gevolge van bovenvermelde redenen. Paragraaf 5 geeft hierover meer duiding.

Voor andere waarden van de dikte van bovenplaat kunnen de stijfheden berekend worden als :

- $K_{v,12mm} = 17719 \text{ N/mm}$
- $K_{v,10mm} = 10254 \text{ N/mm}$

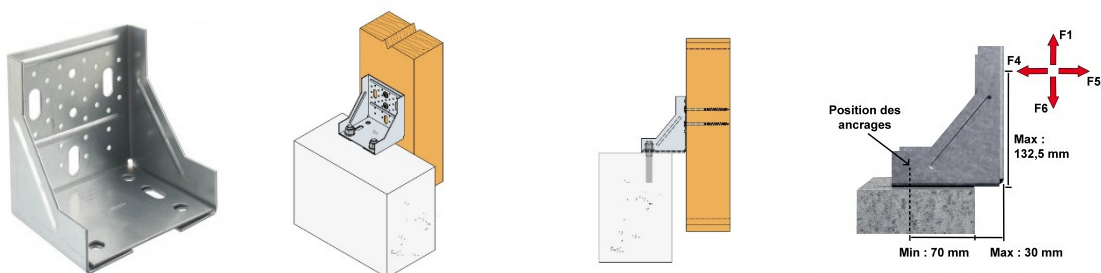
3.6 Relatie tot op de markt beschikbare verankeringen voor houten elementen

Typische verstevigde hoekijzers (bijv. ABR100 en ABR9015 via <http://www.strongtie.be> in Figuur 3.9) voorzien niet in de mogelijkheid tot een excentrische plaatsing ($l_3 = 0$), bovendien zijn zij intrinsiek niet voor een dergelijke toepassing.



Figuur 3.9 : Verstevigde hoekijzers (<http://www.strongtie.nl>)

Een alternatief is een gordijngewel hoekijzer (bijv. ACW via <http://www.strongtie.be> in Figuur 3.10). Dit voorziet in een mogelijkheid tot excentrische plaatsing ($l_3 > 0$) evenwel tot een maximum van 30mm. De opneembare belastingen liggen in de lijn van de aangrijpende zoals berekend in 3.2. Echter is het opzet van de montage fundamenteel verschillend. De elementen kunnen nu geen tijdelijke steun vinden op de horizontale plaat en er dient onderzocht hoe de verankering van het onderste paneel kan gebeuren.



Figuur 3.10 : Gordijngewel hoekijzers (<http://www.strongtie.nl>)

3.7 Conclusies

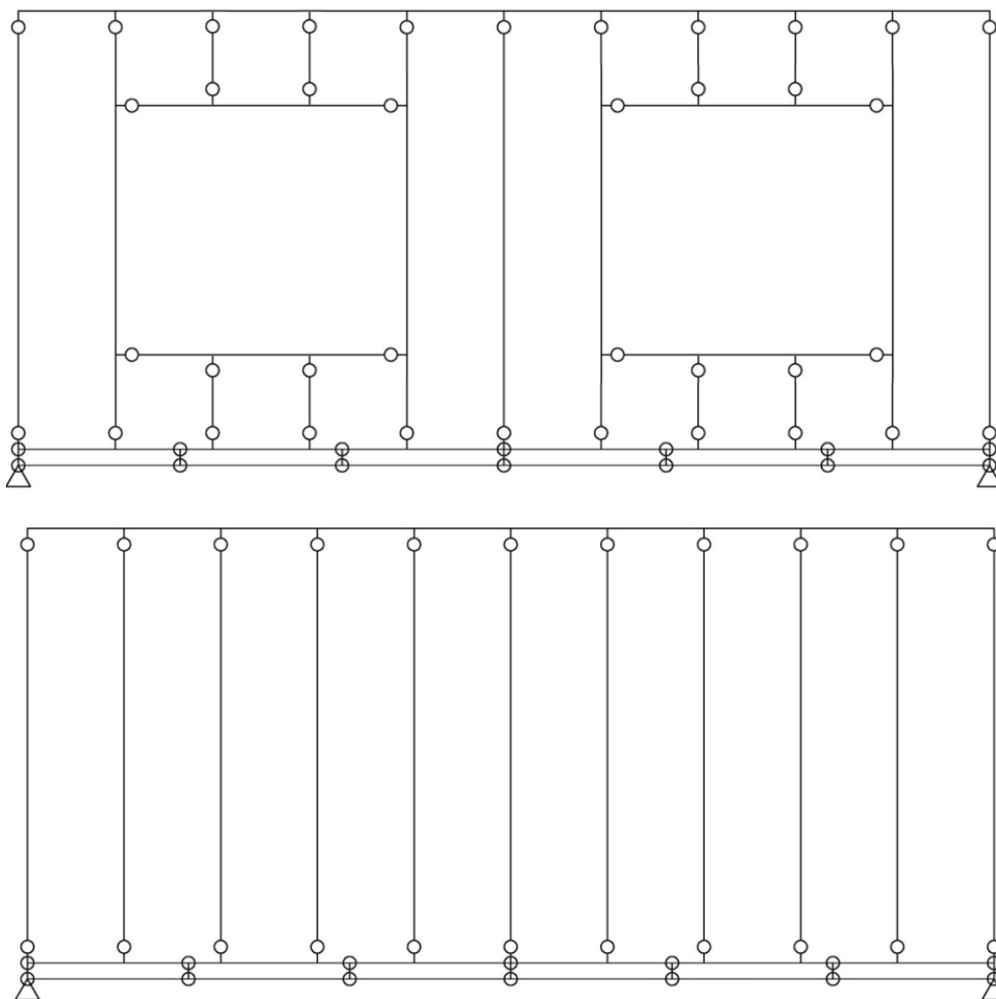
In dit deel werd de in Vlaanderen gangbare manier van verankering van uitkragende prefab gevelpanelen geschikt voor renovatiedoeleinden geschetst, samen met een vereenvoudigde rekenmethodiek en een daarop gebaseerde parameterstudie. Hieruit blijkt duidelijk het belang van de afstand tussen de voorzijde van de vloer en de achterzijde van het caisson. Er werd een aanvankelijke inschatting gemaakt van de verticale stijfheid van deze steunen die een belangrijke parameter zal blijken in de analyse van de vervorming van het caisson in relatie tot de hoofddragstructuur. Ten slotte werden enkele op de markt beschikbare hoekijzers toegelicht.

4. Verticale stijfheid van een houten gevelement in het vlak in relatie tot de stijfheid van de hoofddraagstructuur

4.1 Rekenmodel

Om na te gaan hoe een caisson zich gedraagt wanneer het verticaal wordt verankerd met een hoofddraagstructuur met verankeringen zoals voorgesteld in 3 is in wat volgt een rekenmodel opgesteld. Aan de hand van dit 2D-rekenmodel is een parameterstudie uitgevoerd die inzicht beoogt te verschaffen in de invloed van de vele parameters op de relatie tussen de verticale vervorming van de hoofddraagstructuur en die van het caisson.

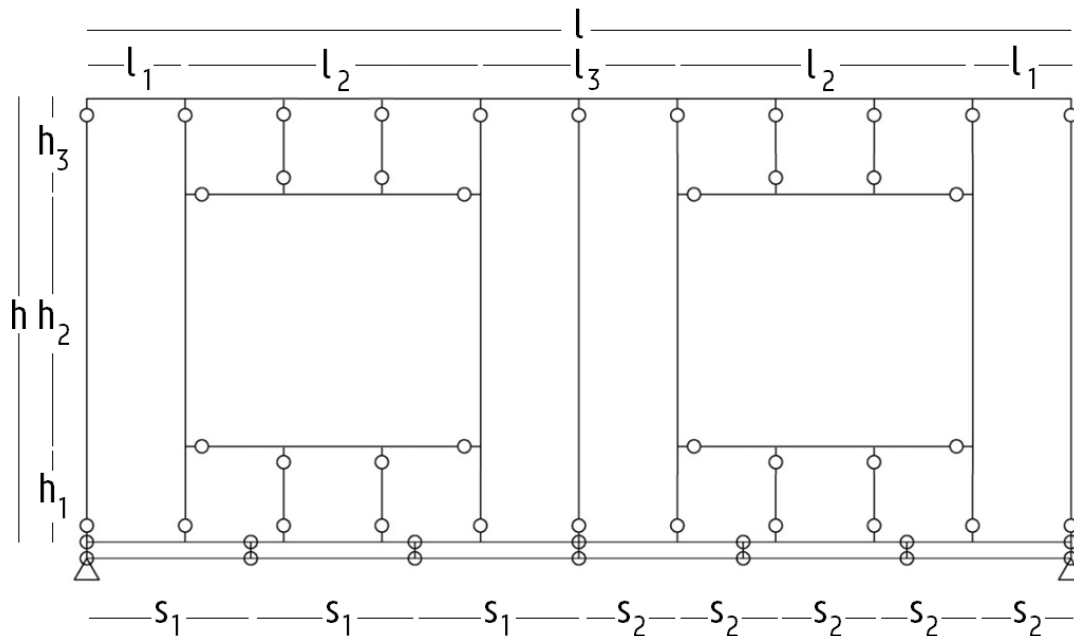
Figuur 4.1 geeft de basismodellen met en zonder openingen weer. Alhoewel er nog oneindig veel andere configuraties mogelijk zijn is op basis van de beschikbare literatuur, het rondetafelgesprek en een gesprek met Pierre-Antoine Cordy (Ney & Partner) gekozen voor de basismodellen van figuur 4.1. Deze modellen beschrijven een rechthoekig caisson bestaande uit doorlopende boven- en onderregel over de volledige lengte van het caisson en verticale stijlen die door een schroefverbinding scharnierend verbonden worden aan de boven- en onderregel. Bij het voorkomen van raamopeningen wordt hetzelfde principe van doorlopende regels en scharnierende stijlen toegepast. Door de raamopeningen vermindert de stijfheid in het vlak van het caisson in aanzienlijke mate. De grootste vermindering treedt op wanneer de ramen nabij de steunpunten worden geplaatst. De keuze voor 2 symmetrische ramen volgt hieruit.



Figuur 4.1 : basismodellen caisson met en zonder openingen

Onder het caisson bevinden zich de steunen. Deze steunen worden gemodelleerd als verticale veren met een veerstijfheid volgens 3.5 en scharnierend verbonden met de hoofd draagstructuur. Deze hoofd draagstructuur is gemodelleerd als een ééndimensionale balk, scharnierend opgelegd ter plaatse van de verticale randen van het caisson.

De parameters van het basismodel zijn aangegeven op figuur 4.2.



Figuur 4.2: basismodellen caisson met afmetingen

Basisparameters

- Lengte caisson en balk (l): 6000 mm
- Zijafstand opening (l_1): 600mm
- Breedte opening (l_2): 1800mm
- Tussenafstand opening (l_3): 1200mm
- Hoogte (h): 2700mm
- Hoogte onder opening (h_1): 600mm
- Hoogte opening (h_2): 1500mm
- Hoogte boven opening (h_3): 600mm
- Steunafstand (s_1): 1000mm
- Stijlafstand (s_2): 600mm
- Dikte regels en stijlen (loodrecht op het vlak van de tekening) (d): 220mm
- Breedte regels en stijlen (in het vlak van de tekening) (t): 45mm
- Beplating eenzijdig OSB: 12mm

Alle andere onderdelen van een eventuele opbouw worden als niet structureel aanzien.

4.2 Eigenschappen van de samenstellende elementen

4.2.1 Regels en stijlen

De regels en stijlen zijn in de basismodel van het type 220 x 45 mm en van klasse C24 (Tabel 4.1). De keuze is ingegeven door het rondetafelgesprek. In de parameterstudie wordt de dikte aangepast tot 300mm en de

sterkteklasse verminderd naar C18. In de parameterstudie wordt ook een berekening uitgevoerd die rekening houdt met de gevolgen van kruip volgens EC5.

Tabel 4.1 : Eigenschappen sterkteklassen hout (WTCB, 2013)

Eigenschap	Sterkteklasse naaldhout	
	C18	C24
Buigweerstand [N/mm ²]	18	24
Axiale druksterkte [N/mm ²]	18	21
Gemiddelde axiale elasticiteitsmodulus [kN/mm ²]	9	11
Gemiddelde volumieke massa [kg/m ³]	380	420
Visuele klasse	S6	S8

De stijflafstand van 600mm wordt niet veranderd.

4.2.2 Beplating

De beplating is in het basismodel van het type OSB en heeft een dikte van 12 mm. Volgens de gegevens van Tabel 4.2 is de stijfheid van OSB afhankelijk van de oriëntatie van de plaat. Aangezien niet geweten is in welke richting de beplating in praktijk zal aangebracht worden, is uitgegaan van de meest nadelige waarde voor de rekstijfheid ($E=3000\text{MPa}$). In de parameterstudie wordt ook een berekening uitgevoerd die rekening houdt met de gevolgen van kruip en een berekening met dubbele beplating (2x12mm).

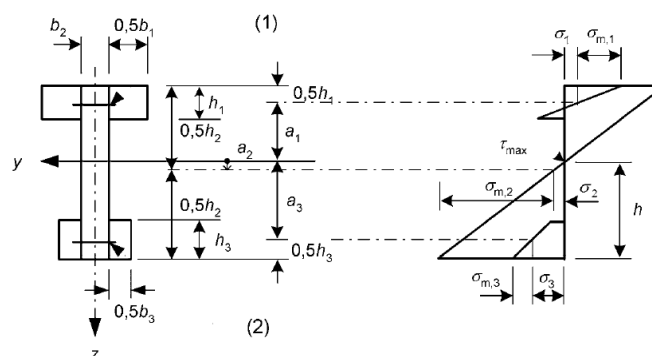
De beplating wordt door middel van een vernageling om de 100mm verbonden aan het stijl- en regelwerk. De primaire functie van de beplating in de berekening van de stijfheid in het vlak is het voorzien van schuifstijfheid zodat de boven- en onderregel als de boven- en onderflens van een balk kunnen worden beschouwd.

Dit principe wordt geïllustreerd in Bijlage B (Mechanisch Verbonden Liggers) van Eurocode 5 Part 1-1 (Figuur 4.3).

B.2 Effectieve buigstijfheid

(1) De effectieve buigstijfheid behoort als volgt te zijn genomen:

$$(EI)_{ef} = \sum_{i=1}^3 (E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2) \quad (\text{B.1})$$



Figuur 4.3 : Mechanisch verbonden liggers volgens Eurocode 5.

In deze uitdrukking wordt de effectieve buigstijfheid van een samengestelde balk (in dit geval de buigstijfheid van het caisson in het vlak) berekend als de som van de stijfheden van de samenstellende elementen en de oppervlaktes vermenigvuldigd met het kwadraat van de hefboomsarmen in toepassing van de stelling van Steiner. Toepassing van deze laatste formule noodzaakt echter een volledig schuifvaste verbinding tussen regels en beplating. Door de puntsgewijze verbinding van regels en beplating is deze verbinding echter niet 100% schuifvast. De Eurocode houdt hier rekening mee door de invoering van een gamma (γ) waarde. In de basisberekening wordt hier geen rekening mee gehouden ($\gamma=1$). In de parameterstudie wordt de invloed ervan bekeken door ook een lagere waarde ($\gamma=0,9$) aan te nemen. Deze waarde hangt af van het aantal en het type bevestigingsmiddelen.

Tabel 4.2 : Eigenschappen OSB (CPD 13 2014: Specifying oriented strand board, 2014)

Property	Characteristic value [N/mm ²]		
	Thickness range [mm]		
	> 6-10	> 10-18	> 18-25
Bending strength			
Parallel to span	18	16,4	14,8
Perpendicular to span	9,0	8,2	7,4
Tensile strength			
Parallel tot span	9,9	9,4	9,0
Perpendicular to span	7,2	7,0	6,8
Compressive strength			
Parallel to span	15,9	15,4	14,8
Perpendicular to span	12,9	12,7	12,4
Shear strength			
Panel (as in a racking panel)	6,8	6,8	6,8
Planar (as in a racking panel)	1,0	1,0	1,0
Modulus of elasticity			
Mean, in bending parallel tot span	4 930	4 930	4 930
Mean, in bending perpendicular to span	1 980	1 980	1 980
Mean, in tension and compression perpendicular to span	3 800	3 800	3 800
Mean, in tension and compression perpendicular to span	3 000	3000	3000
Shear modulus			
Panel (as in a racking panel)	1 080	1 080	1 080
Planar (as in floor/roof decking)	50	50	50

4.2.3 Stijfheid van de ondersteuning

Zoals aangegeven in 3.5 kan de verticale stijfheid van de verankeringen binnen een ruim interval liggen. De K-waarden voor de vereenvoudigde verticale stijfheidsberekening liggen tussen te 10 en 35 kN/mm. In de proeven van paragraaf 5 liggen de gemeten waarden veel lager tussen de 0.5 en 3.5 kN/mm. De zeer lage waarden doen zich voor bij een opwaartse trekkracht in de verankering ten gevolge van het tegenwerken van de doorbuiging van de hoofddraagstructuur door het caisson in combinatie met een vergrote excentriciteit. In dat geval is de vervorming veel groter dan deze enkel te wijten aan de vervorming van de bovenplaat en is de bijhorende K-waarde veel kleiner.

De basiswaarde voor de parameterstudie wordt gekozen als :

- $K_{v,basis} = 10 \text{ kN/mm}$

In de parameterstudie wordt ook een lagere ($K_{v,min} = 1 \text{ kN/mm}$) waarde gebruikt. Indien de stijfheid van de steunen oneindig klein wordt ten opzichte van deze van het caisson en de hoofddraagstructuur ($K_v = 0.01 \text{ kN/mm}$) dan zal het caisson zijn vorm behouden en de gemiddelde doorbuiging van de hoofddraagstructuur aannemen.

De steunafstand van 1000 mm wordt niet veranderd.

4.2.4 Afmetingen van het caisson

De basisafmetingen van een caisson worden gekozen als :

- $l = 6000\text{mm}$ en $h = 2700\text{mm}$

In de parameterstudie worden de overspanningen aangepast tot $l = 9000\text{mm}$ en $l = 12000\text{mm}$. De hoogtes worden aangepast tot $h = 3000\text{mm}$, $h = 3300\text{mm}$ en $h = 3600\text{mm}$.

De stijfstand van 600mm en de steunafstand van 1000mm worden niet veranderd.

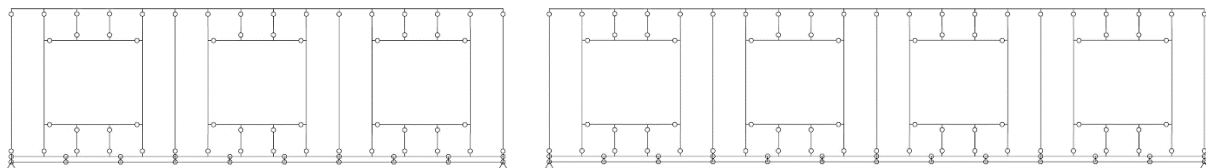
4.2.5 Openingen in het caisson

Er worden 3 modellen gedefinieerd :

- Geen openingen
- Grote openingen
- Kleine openingen

De volledige parameterstudie wordt uitgevoerd op het model zonder openingen. Bij de modellen met kleine en grote openingen worden enkel de variaties van de globale afmetingen gevarieerd.

Met *grote openingen* wordt bedoeld de configuratie zoals beschreven in 4.1 (Figuur 4.2) met 2 openingen van 1800mm lengte en 1500mm hoogte, geplaatst verticaal op halve hoogte en horizontaal op 600mm van de steunen bij een overspanning van 6000mm, dus met een tussenafstand van 1200mm. Bij een overspanning van 9000mm worden dit 3 openingen en bij een overspanning van 12000mm wordt dit 4 openingen, waarbij de tussenafstand tussen de openingen telkens 1200mm blijft. Bij een aanpassing van de hoogte verandert de hoogte van de raamopeningen tot maximaal 2400mm bij een hoogte van het caisson van 3600mm. Figuur 4.4 geeft de configuraties voor 9000mm en 12000mm weer.



Figuur 4.4 : Configuratie openingen voor 9000mm en 12000mm

Met *kleine openingen* wordt bedoeld de configuratie zoals beschreven in 4.1 met 2 openingen van 1800mm lengte en 700mm hoogte, geplaatst verticaal op halve hoogte en horizontaal op 600mm van de steunen bij een overspanning van 6000mm, dus met een tussenafstand van 1200mm. Bij een overspanning van 9000mm worden dit 3 openingen en bij een overspanning van 12000mm wordt dit 4 openingen, waarbij de tussenafstand tussen de openingen telkens 1200mm blijft. Bij een aanpassing van de hoogte verandert de hoogte van de raamopeningen tot maximaal 1600mm bij een hoogte van het caisson van 3600mm.

4.2.6 Ondersteuning

De basisondersteuning is een balk HEM800 belast volgens de zwakke as. Deze basisondersteuning komt overeen met de ondersteuning toegepast in de proefopstelling. De buigstijfheid bedraagt $I = 186,3E6 \text{ mm}^4$. Als alternatieven komen in de parameterstudie voor :

- HEM800 sterke as : $I = 4426,1E6 \text{ mm}^4$.
- HEM200 sterke as : $I = 106,4E6 \text{ mm}^4$ (met HEM280 bij 9000mm en HEM360 bij 12000mm)

Met deze verschillende ondersteuning wordt zowel een situatie met een vrij starre randbalk tot een situatie met een vrij flexibele randbalk gerealiseerd.

4.3 Bepaling van de aangebrachte belasting

Er wordt van uitgegaan dat in de oorspronkelijke constructie zonder caisson de doorbuiging van de hoofddraagstructuur berekend is op een maximale doorbuiging van $l / 250$. Of dit in realiteit het geval is, is niet geweten. Een ander effect dan de doorbuiging kan ook maatgevend zijn, maar dit wordt niet beschouwd.

Welke belasting (lijnlast, puntlast(en),...) leidt tot de maximale doorbuiging is a priori ook niet geweten. We gaan ervan uit dat de resultante van deze krachtwervingen kan teruggebracht worden tot een puntlast die aangrijpt in het midden van de overspanning en noemen deze resultante F_{250} . De kracht F_{250} moet dus gezien worden als een representatie van een combinatie van veranderlijke en vaste belastingen, puntlasten en verdeelde lasten die samen hetzelfde effect (u_{\max}) in het midden van de overspanning hebben.

In de situatie met een caisson als gevel, toegevoegd aan de hoofddraagstructuur zal het bevestigen van dit caisson een invloed hebben op de stijfheid van de hoofddraagstructuur en er in mindere of meerdere mate mee vervormen. Er wordt vanuit gegaan dat de kracht F_{250} hierbij niet verandert en dat de belasting die vooraf aanleiding gaf tot de maximaal toelaatbare doorbuiging van de hoofddraagstructuur dezelfde is als op de hoofddraagstructuur met caisson. De mate waarin het caisson meebeweegt met de hoofddraagstructuur hangt af van de relatieve stijfheden van hoofddraagstructuur, caisson en verbindingen. In wat volgt worden krachts- en vervormingsresultaten voor verschillende configuraties zoals hierboven aangegeven besproken.

De doorbuiging van een buigingsbalk waarop een puntlast in het midden aangrijpt wordt gegeven door :

$$u = \frac{F_v}{12 \cdot E \cdot I} \times \left(\frac{3 \cdot l^2}{4} - x^2 \right)$$

De maximale doorbuiging van een buigingsbalk waarop een puntlast in het midden aangrijpt wordt gegeven door :

$$u_{\max} = \frac{F_v \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot I}$$

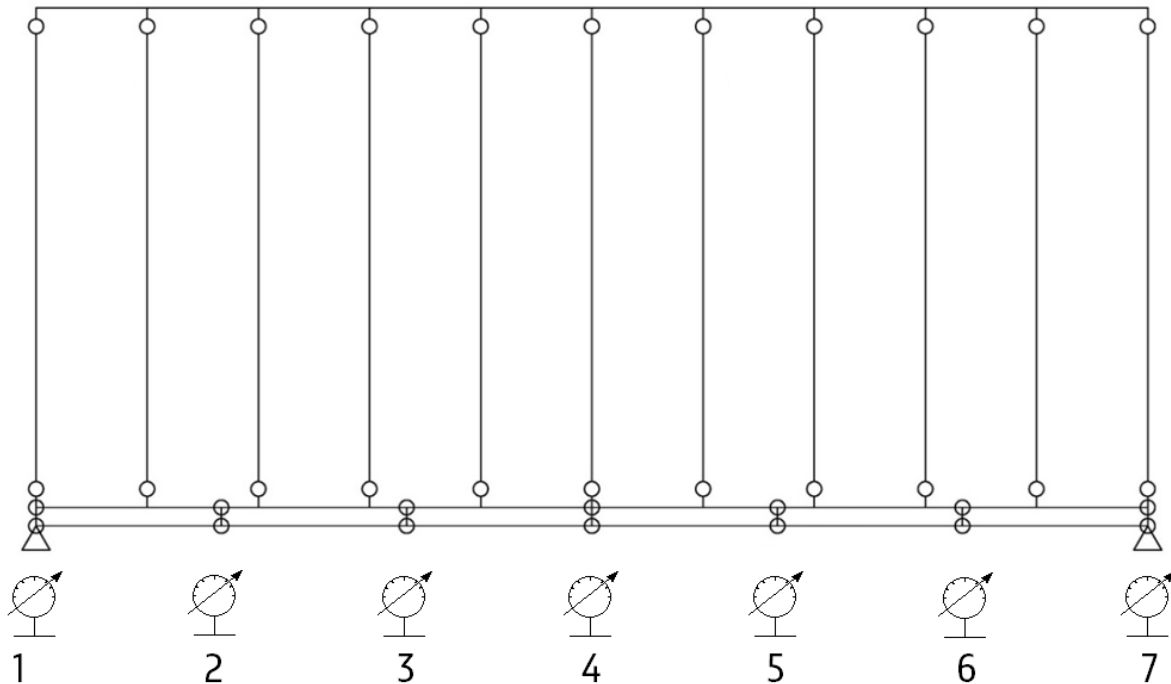
Met $F_v = 208.7 \text{ kN}$, $l = 6000\text{mm}$, $E = 210000 \text{ MPa}$ en $I = 186,3E6 \text{ mm}^4$ wordt deze waarde :

$$u_{\max} = \frac{F_v \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot I} = 24\text{mm} (l/250).$$

Bij de basisopstelling ($l=6000\text{mm}$ en HEM800 zwakke as) is $F_{250} = 208.7\text{kN}$, de doorbuiging bedraagt er in het midden van de overspanning 24mm ($l/250$). De F_{250} waarden voor de andere afmetingen en balktypes kunnen eenvoudig worden bepaald.

4.4 Resultaten basisconfiguratie zonder openingen

Voor de basisconfiguratie zonder openingen worden ter plaatse van de steunen de doorbuigingen en de krachten in de steunen genoteerd. De nummering van de metingen is conform Figuur 4.5.



Figuur 4.5 : meetpunten doorbuiging en krachtswerking in de steunen

De resultaten voor de basisconfiguratie zijn weergegeven in Tabel 4.3. De doorbuigingen zijn naar beneden toe als negatieve waarden voorgesteld. De krachtswerkingen zijn in trek positief en in druk negatief weergegeven.

Tabel 4.3 : Resultaten doorbuigingen en krachtswerkingen basismodel

meetpunt	doorbuiging (mm)	krachtswerking (kN)
1	-4.4	-44.8
2	-7	-0.9
3	-9.9	24.9
4	-10.4	41.3
5	-9.9	24.9
6	-7	-0.9
7	-4.4	-44.8
balk	-14.5	

Tabel 4.3 geeft volgende belangrijke resultaten. Bij de basisparameterinstelling zoals hierboven afgeleid wordt de doorbuiging van de hoofddragstructuur met 40% gereduceerd tot -14.5mm . De doorbuiging van het caisson zelf is beperkt tot maximaal -10.4mm , ongeveer 43% van de oorspronkelijk doorbuiging van de hoofddragstructuur. Hierbij

treden evenwel bijzonder grote krachten op de verbindingen op. Deze zijn 10x groter dan de krachtswerkingen die aangenomen zijn in de oorspronkelijke berekening. Ze zullen wellicht leiden tot het prematuur uittrekken van de schroeven in het midden van de overspanning en/of overschrijden van de vloeigrens in de bovenplaat van de steunen nabij de steunpunten van de hoofddraagstructuur.

In de hiernavolgende parameterstudie worden uit tabel 4.3 de volgende waarden weerhouden :

- Doorbuiging van de balk in het midden (hoofddraagstructuur) : ref = -14.5mm
- Doorbuiging van het caisson in het midden : ref = -10.4mm
- Opening tussen caisson en balk : ref = 4.1mm
- Maximale drukkracht in de verbindingen : ref = -44.7kN
- Maximale trekkracht in de verbindingen : ref = 41.3kN

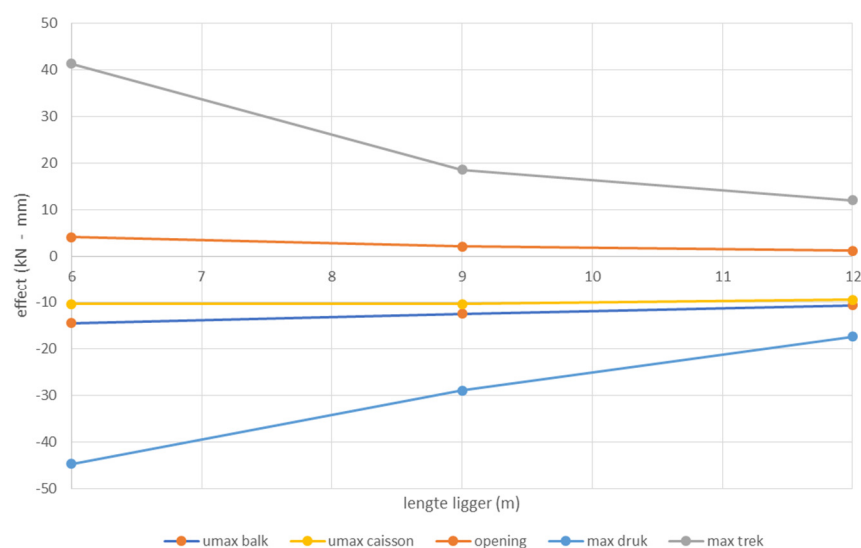
4.5 Parameterstudie

4.5.1 Invloed van de afmetingen (gesloten caisson)

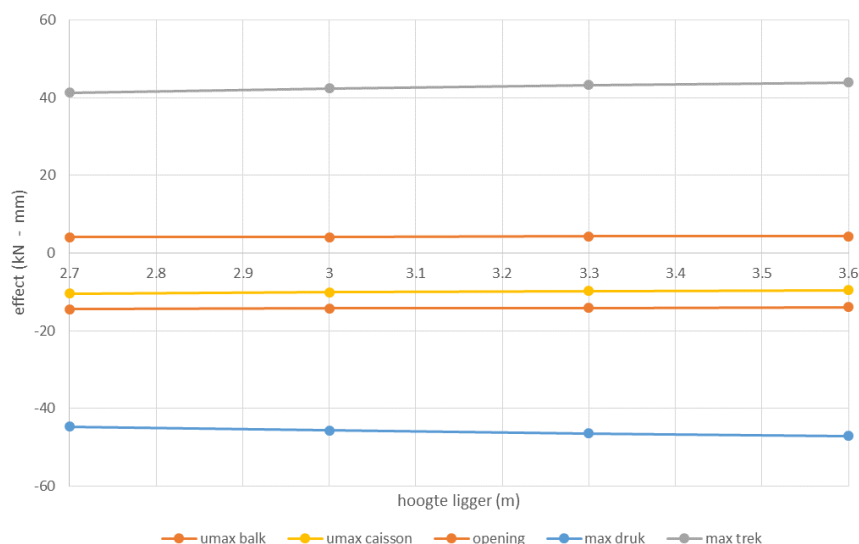
Tabel 4.4 geeft de resultaten voor de hierboven weerhouden resultaten bij een aanpassing van de afmetingen van het gesloten caisson in lengte en hoogte. De resultaten worden voor een vaste hoogte en variabele lengte weergegeven in figuur 4.6 en voor een vaste lengte en variabele hoogte in figuur 4.7.

Tabel 4.4 : Resultaten doorbuigingen en krachtswerkingen gesloten caisson als functie van de afmetingen

	6m 2.7m	6m 3m	6m 3.3m	6m 3.6m		9m 2.7m	9m 3m	9m 3.3m	9m 3.6m		12m 2.7m	12m 3m	12m 3.3m	12m 3.6m
umax balk (mm)	-14.5	-14.2	-14.1	-13.9		-12.5	-11.8	-11.4	-11		-10.7	-9.9	-9.3	-8.7
umax caisson (mm)	-10.4	-10.1	-9.8	-9.6		-10.4	-9.4	-8.9	-8.5		-9.5	-8.7	-8.1	-7.5
opening (mm)	4.1	4.1	4.3	4.3		2.1	2.4	2.5	2.5		1.2	1.2	1.2	1.2
max druk (kN)	-44.7	-45.6	-46.4	-47.1		-29	-29.5	-30	-30.3		-17.4	-17.7	-17.9	-18
max trek (kN)	41.3	42.3	43.2	43.9		18.6	19.9	20	20.1		12	12.4	12.7	12.9



Figuur 4.6 : effect van de caissonlengte op de krachtswerkingen en doorbuigingen (caisson met h=2700mm)



Figuur 4.7 : effect van de caissonhoogte op de krachswerkingen en doorbuigingen (caisson met $l=6000\text{mm}$)

Figuren 4.6 en 4.7 tonen een opmerkelijk verschil tussen de invloed van de hoogte en de lengte van het caisson op de krachswerkingen. Het is inderdaad zo dat het bereik van de hoogtestudie t.o.v. de lengtestudie veel beperkter is, maar dit hangt samen met de realistische transportafmetingen en verdiepingshoogtes.

Uit Tabel 4.4 en Figuren 4.6 en 4.7 kunnen de volgende conclusies getrokken worden.

- De hoogte van het gesloten caisson heeft een beperkte invloed op de doorbuigingen en krachswerkingen in vergelijking met het basismodel (max 10 à 20%).
- De lengte van het caisson heeft een grote invloed op de doorbuigingen en de krachswerkingen in vergelijking met het basismodel.
- Naarmate het caisson langer wordt, vermindert de totale doorbuiging van de balk (-30% tussen 6 en 12m)
- Naarmate het caisson langer wordt, vermindert de totale doorbuiging van de balk in beperkte mate (-10% tussen 6 en 12m)
- Naarmate het caisson langer wordt, vermindert de opening in grote mate (-50% tussen 6 en 12m)
- Naarmate het caisson langer wordt, vermindert de maximale drukkracht in grote mate (-60% tussen 6 en 12m)
- Naarmate het caisson langer wordt, vermindert de maximale drukkracht in grote mate (-70% tussen 6 en 12m)

In wat volgt wordt de hoogte niet meer als afzonderlijke parameter voorgesteld. Er wordt altijd uitgegaan van de waarden bij een hoogte van 2.7m.

4.5.2 Invloed van kruip

Kruip van regels, stijlen en beplating wordt conform Eurocode 5 in rekening gebracht door een reductie van de effectieve stijfheid. Hierbij werd uitgegaan van de meest negatieve omgeving. Op de hoofddragstructuur wordt kruip niet in rekening gebracht aangezien er verondersteld wordt dat deze inbegrepen is in de oorspronkelijke berekening van $l/250$. Tabel 4.5 geeft de waarden weer, terwijl Figuur 4.8 de resultaten relatief ten opzichte van de resultaten van het basismodel (Tabel 4.4) weergeeft.

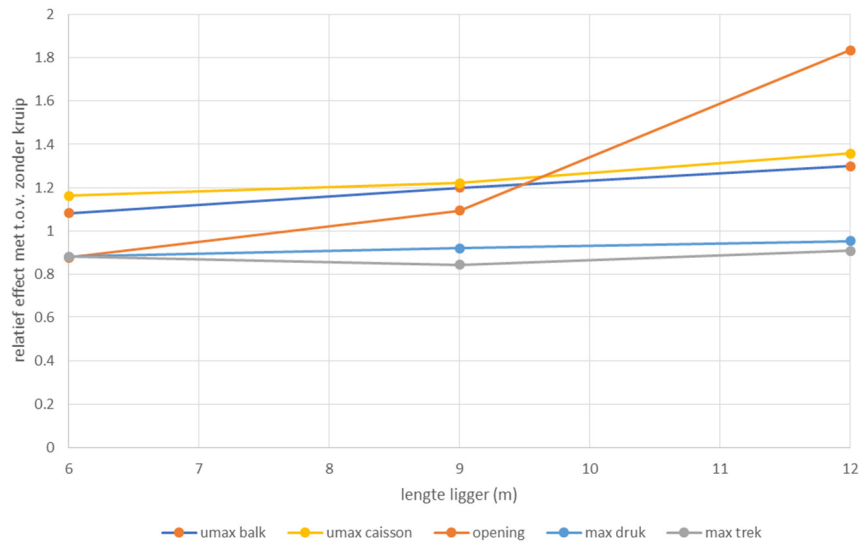
Uit Tabel 4.5 en Figuur 4.8 kunnen de volgende conclusies getrokken worden.

- Het effect van kruip is afhankelijk van de overspanning van de balk.
- De maximale doorbuigingen van zowel balk als caisson worden door kruip groter door de verminderde stijfheid van het caisson, het effect wordt groter (tot meer dan 30%) naarmate de overspanning van de balk groter wordt.
- De opening wordt door kruip tot meer dan 50% groter, alhoewel dit zich bij de kleinste opening voordoet.

- Door kruip nemen de krachtswerkingen bijna onafhankelijk van de overspanning met ongeveer 10% af.

Tabel 4.5 : Resultaten doorbuigingen en krachtswerkingen gesloten caisson als functie van de lengte rekening houdend met kruip

	6m - 2.7m	9m - 2.7m	12m - 2.7m
umax balk (mm)	-15.7	-15	-13.9
umax caisson (mm)	-12.1	-12.7	-12.9
opening (mm)	3.6	2.3	2.2
max druk (kN)	-39.4	-26.7	-16.6
max trek (kN)	36.4	15.7	10.9



Figuur 4.8 : effect van de kruip op de krachtswerkingen en doorbuigingen (caisson met h=2700mm)

4.5.3 Invloed van een dubbele beplating

De beplating draagt, naast de regels, bij aan de buigstijfheid van het caisson. Er wordt als variante een dubbele beplating (2 x 12mm) toegepast. Tabel 4.6 geeft de waarden weer, terwijl Figuur 4.9 de resultaten relatief ten opzichte van de resultaten van het basismodel (Tabel 4.4) weergeeft.

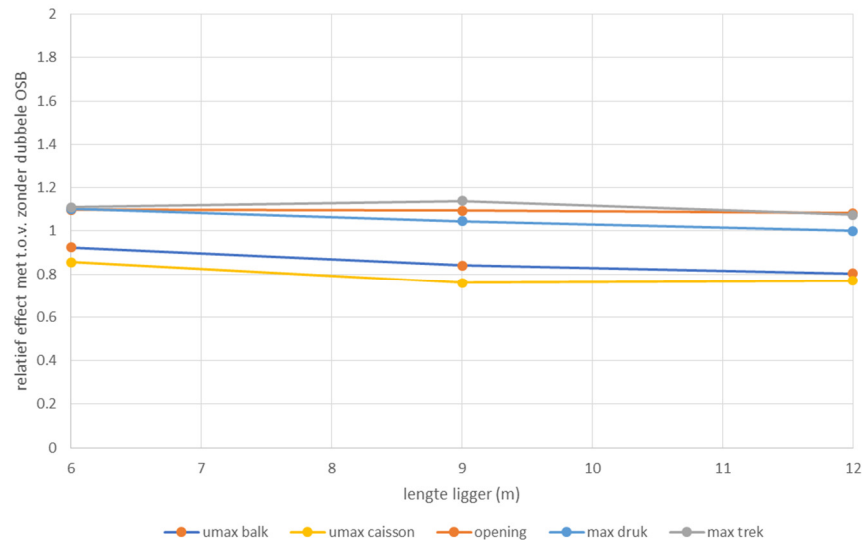
Tabel 4.6 : Resultaten doorbuigingen en krachtswerkingen gesloten caisson als functie van de lengte rekening houdend met een gamma factor van 0.9.

	6m - 2.7m	9m - 2.7m	12m - 2.7m
umax balk (mm)	-13.4	-10.5	-8.6
umax caisson (mm)	-8.9	-7.9	-7.3
opening (mm)	4.5	2.3	1.3
max druk (kN)	-49.3	-30.3	-17.4
max trek (kN)	45.8	21.2	12.9

Uit Tabel 4.6 en Figuur 4.9 kunnen de volgende conclusies getrokken worden.

- Het effect van een dubbele beplating is afhankelijk van de overspanning van de balk.

- De maximale doorbuigingen van zowel balk als caisson worden door een dubbele beplating kleiner door de verhoogde stijfheid van het caisson, het effect wordt groter (tot meer dan 30%) naarmate de overspanning van de balk groter wordt.
- Door de dubbele beplating nemen de krachtwerkingen toe met maximaal ongeveer 15%, het effect wordt kleiner naarmate de overspanning van de balk groter wordt.



Figuur 4.9 : effect van een dubbele beplating op de krachtswerkingen en doorbuigingen (caisson met h=2700mm)

4.5.4 Invloed van het effect van de onvolledige samenwerking tussen regels en beplating

Zoals aangegeven in 4.2.2 is de verbinding tussen beplating en regels niet volledig schuifvast. Dit wordt in rekening gebracht door een gamma-waarde die in deze variante gelijk aan 0.9 (i.p.v. 1) wordt gekozen. Tabel 4.7 geeft de waarden weer, terwijl Figuur 4.10 de resultaten relatief ten opzichte van de resultaten van het basismodel (Tabel 4.4) weergeeft.

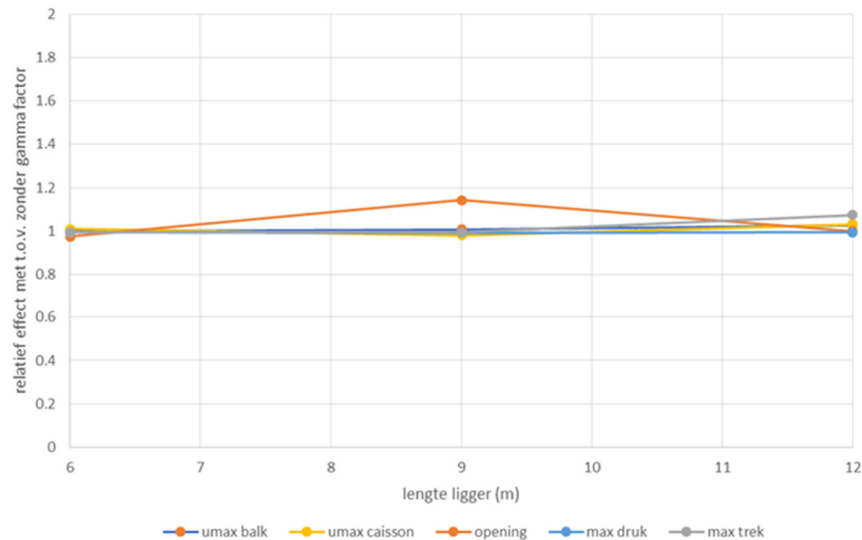
Tabel 4.7 : Resultaten doorbuigingen en krachtswerkingen gesloten caisson als functie van de lengte met een onvolledige samenwerking tussen regels en beplating

	6m - 2.7m	9m - 2.7m	12m - 2.7m
umax balk (mm)	-14.5	-12.6	-11
umax caisson (mm)	-10.5	-10.2	-9.8
opening (mm)	4	2.4	1.2
max druk (kN)	-44.4	-28.8	-17.3
max trek (kN)	41.1	18.5	12.9

Uit Tabel 4.7 en Figuur 4.10 kunnen de volgende conclusies getrokken worden.

- Het effect van een onvolledige samenwerking is afhankelijk van de overspanning van de balk.
- De maximale doorbuigingen van zowel balk als caisson worden door een onvolledige samenwerking groter door de verminderde stijfheid van het caisson, het effect wordt groter naarmate de overspanning van de balk groter wordt maar is beperkt tot ongeveer 5%.
- De krachtswerkingen veranderen ook nauwelijks.

In wat volgt wordt het effect van gamma niet meer opgenomen.



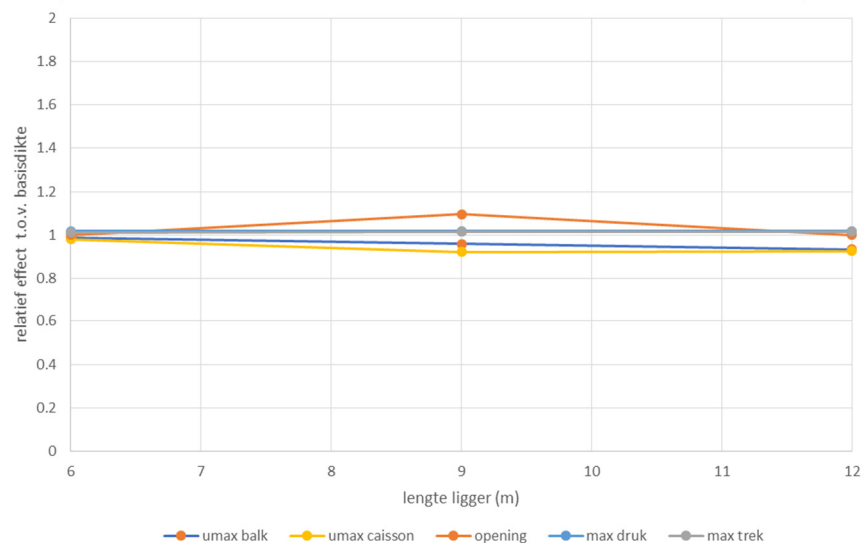
Figuur 4.10 : effect van de onvolledig schuifvaste verbinding op de krachtswerkingen en doorbuigingen (caisson met h=2700mm)

4.5.5 Invloed van de dikte van het caisson

Een alternatief is een caisson met een dikte van 300mm i.p.v. 220mm. Er kan verwacht worden dat het effect in de lijn ligt van het effect van een verhoging van caissonhoogte, dus beperkt. Tabel 4.8 geeft de waarden weer, terwijl Figuur 4.11 de resultaten relatief ten opzichte van de resultaten van het basismodel (Tabel 4.4) weergeeft.

Tabel 4.8 : Resultaten doorbuigingen en krachtswerkingen gesloten caisson als functie van de lengte bij een caissondikte van 300mm

	6m - 2.7m	9m - 2.7m	12m - 2.7m
umax balk (mm)	-14.3	-12	-10
umax caisson (mm)	-10.2	-9.6	-8.8
opening (mm)	4.1	2.4	1.2
max druk (kN)	-45.5	-29.5	-17.7
max trek (kN)	41.8	18.9	12.2



Figuur 4.11 : effect van de caissondikte op de krachtswerkingen en doorbuigingen (caisson met h=2700mm)

Uit Tabel 4.8 en Figuur 4.11 kan de volgende conclusie getrokken worden.

- Het effect van de verhoogde caissondikte is verwaarloosbaar (<10%).

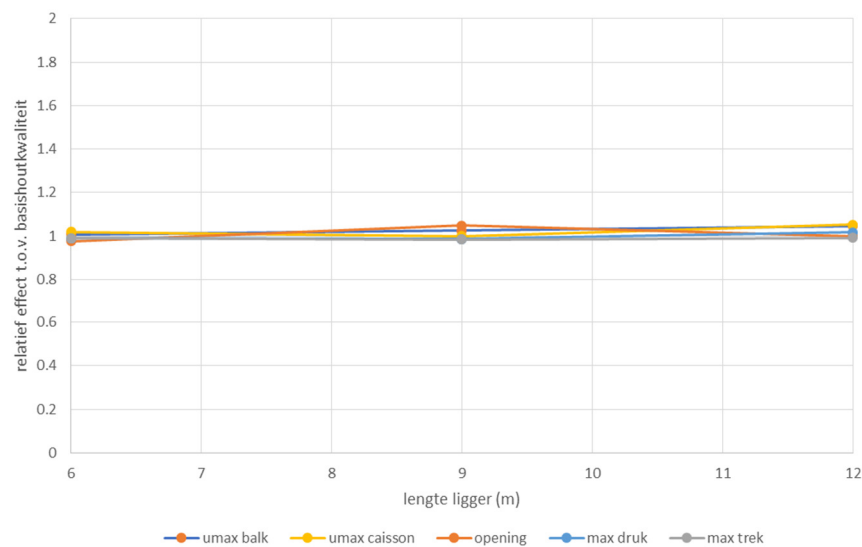
In wat volgt wordt het effect van een verhoogde caissondikte niet meer opgenomen.

4.5.6 Invloed van een zwakkere houtsoort

Een alternatief is een caisson opgebouwd uit C18 hout i.p.v. C24 hout. Er kan verwacht worden dat het effect in de lijn ligt van het effect van een verandering van caissonhoogte, dus beperkt. Tabel 4.9 geeft de waarden weer, terwijl Figuur 4.12 de resultaten relatief ten opzichte van de resultaten van het basismodel (Tabel 4.4) weergeeft.

Tabel 4.9 : Resultaten doorbuigingen en krachswerkingen gesloten caisson als functie van de lengte bij gebruik van hout C18

	6m - 2.7m	9m - 2.7m	12m - 2.7m
umax balk (mm)	-14.6	-12.8	-11.2
umax caisson (mm)	-10.6	-10.4	-10
opening (mm)	4	2.2	1.2
max druk (kN)	-44.2	-28.6	-17.7
max trek (kN)	40.9	18.3	11.9



Figuur 4.12 : effect van het gebruik van C18 op de krachswerkingen en doorbuigingen (caisson met h=2700mm)

Uit Tabel 4.9 en Figuur 4.12 kan de volgende conclusie getrokken worden.

- Het effect van de verminderde houtkwaliteit is verwaarloosbaar (<5%).

4.5.7 Invloed van de verticale stijfheid van de steunen

Zoals aangegeven in 3.5 kan de stijfheid van de verankeringen berekend worden op basis van de doorbuiging van de bovenplaat. Of dit in realiteit de enige bijdrage in de stijfheidsbepaling is, is hoogst onzeker zoals ook later zal blijken uit de proeven. Slip in de ankerbouten, speling bij het handvast aandraaien van de moeren en een gedrag dat in trek en druk niet hetzelfde is verminderen de verticale stijfheid van de steunen in zeer grote mate. Om de invloed hiervan aan te geven is een variante uitgerekend waarbij de verticale stijfheid van de steunen een waarde heeft van

$K_v = K_{v,basis} / 10 = 1 \text{ kN/mm}$ (1.000 N/mm). Tabel 4.10 geeft de waarden weer, terwijl Figuur 4.13 de resultaten relatief ten opzichte van de resultaten van het basismodel (Tabel 4.4) weergeeft.

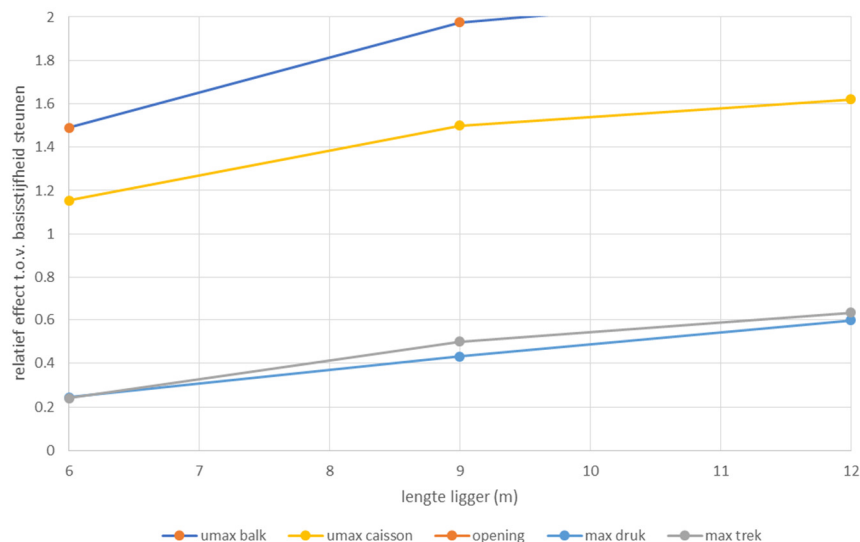
Tabel 4.10 : Resultaten doorbuigingen en krachtswerkingen gesloten caisson als functie van de lengte bij een verticale equivalente stijfheid 10 keer kleiner dan de basiswaarde

	6m - 2.7m	9m - 2.7m	12m - 2.7m
umax balk (mm)	-21.6	-24.7	-22.8
umax caisson (mm)	-12	-15.6	-15.4
opening (mm)	9.6	9.1	7.4
max druk (kN)	-10.9	-12.5	-10.4
max trek (kN)	9.9	9.3	7.6

Uit Tabel 4.10 en Figuur 4.13 kunnen de volgende conclusies getrokken worden.

- Het effect van de correcte inschatting van de stijfheid van de steunen is bijzonder groot.
- De maximale doorbuigingen van zowel balk als caisson worden groter door de verminderde invloed van de verstijving door van het caisson, het effect wordt groter naarmate de overspanning van de balk groter wordt. Op de doorbuiging van het caisson ligt de verhoging tussen de 20 en 60%, voor de balk ligt ze tussen de 50 en 110% en voor de opening tussen de 200 en 600%. Deze laatste verhoging is omwille van gelijkheid van verticale as met de voorgaande studies niet opgenomen in figuur 4.12.
- De krachtswerkingen reduceren met 40 tot 80%.

Het effect van de correcte inschatting van de verticale stijfheid van de steunen is duidelijk de belangrijkste parameter in deze studie.



Figuur 4.13 : effect van een 10 keer kleinere stijfheid van de steunen op de krachtswerkingen en doorbuigingen (caisson met h=2700mm)

4.5.8 Invloed van de stijfheid van de balk (verhoogde stijfheid)

Een alternatief is een balk met een veel grotere stijfheid. Er is gekozen voor een balk HEM800 die volgens de sterke as wordt belast. Tabel 4.11 geeft de waarden weer, terwijl Figuur 4.14 de resultaten relatief ten opzichte van de resultaten van het basismodel (Tabel 4.4) weergeeft.

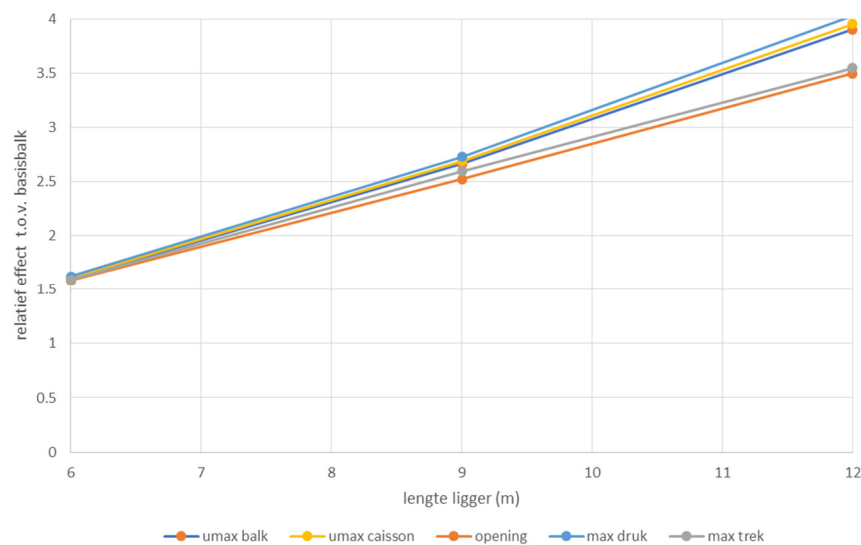
Tabel 4.11 : Resultaten doorbuigingen en krachtswerkingen gesloten caisson als functie van de lengte bij een HEM800 balk belast volgens de sterke as

	6m - 2.7m	9m - 2.7m	12m - 2.7m
umax balk (mm)	-23.3	-33.3	-41.8
umax caisson (mm)	-16.8	-28	-37.6
opening (mm)	6.5	5.3	4.2
max druk (kN)	-72.6	-79.2	-70.2
max trek (kN)	65.9	48.3	42.6

Uit Tabel 4.11 en Figuur 4.14 kunnen de volgende conclusies getrokken worden.

- Het effect van de stijfheid van de balk is bijzonder groot en wordt groter naarmate de overspanning toeneemt.
- De maximale doorbuigingen van zowel balk als caisson worden groter door de verminderde invloed van de verstijving door van het caisson, het effect wordt groter naarmate de overspanning van de balk groter wordt. De invloed ligt tussen de 60 en de 400%.
- De krachtswerkingen volgen bovenstaande redenering op dezelfde manier.
- De doorbuiging van de balk wordt nauwelijks nog verminderd door het aanwezige caisson.

Of een caisson steunt op een flexibele dan wel een stijve balk heeft een bijzonder groot effect op het meewerkend effect van het caisson. Vraag blijft of deze medewerking kan gerealiseerd worden bij de berekende krachtswerkingen.



Figuur 4.14 : effect van de verhoging van de stijfheid (HEM800 balk belast volgens de sterke as) op de krachtswerkingen en doorbuigingen (caisson met h=2700mm)

4.5.9 Invloed van de stijfheid van de balk (veranderlijke stijfheid)

Een alternatief is een balk met een stijfheid die mee verandert met de overspanning zoals gebruikelijk. Er is gekozen voor balken HEM200, HEM280 en HEM360 die volgens de sterke as worden belast. Tabel 4.12 geeft de waarden weer, terwijl Figuur 4.15 de resultaten relatief ten opzichte van de resultaten van het basismodel (Tabel 4.4) weergeeft.

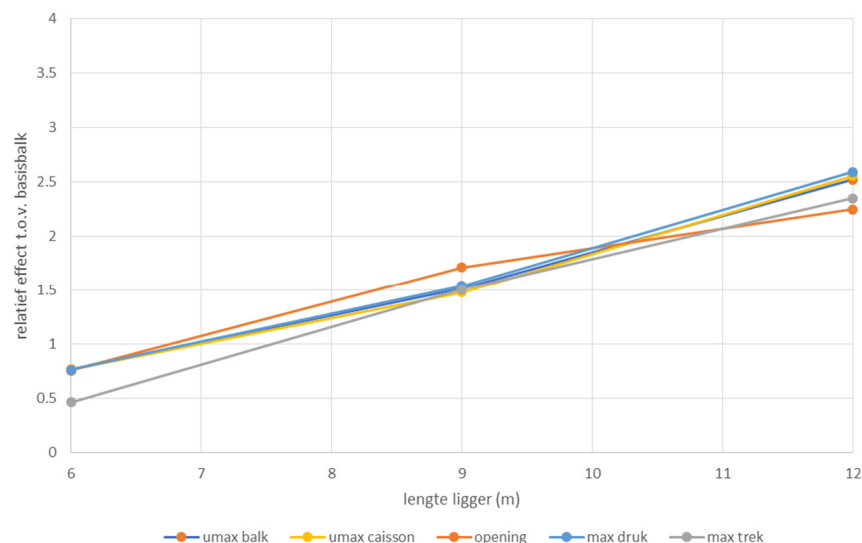
Tabel 4.12 : Resultaten doorbuigingen en krachtswerkingen gesloten caisson als functie van de lengte bij een HEM200/280/360 balk belast volgens de sterke as

	6m - 2.7m	9m - 2.7m	12m - 2.7m
umax balk (mm)	-11.1	-19	-27
umax caisson (mm)	-8	-15.4	-24.3
opening (mm)	3.1	3.6	2.7
max druk (kN)	-34.2	-44.7	-45.1
max trek (kN)	19.2	28	28.2

Uit Tabel 4.12 en Figuur 4.15 kunnen de volgende conclusies getrokken worden.

- Het effect van de stijfheid van de balk is bijzonder groot.
- Bij de overspanning van 6m is de stijfheid kleiner dan van de referentiebalk. De maximale doorbuigingen van zowel balk als caisson worden kleiner door de verhoogde invloed van de verstijving door van het caisson. De vermindering is typisch 25%.
- Bij de overspanningen van 9m en 12m is de stijfheid groter dan van de referentiebalk. De redenering van 4.5.8 kan worden overgenomen met stijgingen tot 150%.

Of een caisson steunt op een flexibele dan wel een stijve balk heeft een bijzonder groot effect op het meewerkend effect van het caisson. Vraag blijft of deze medewerking kan gerealiseerd worden bij de berekende krachtswerkingen. Anderzijds is een situatie zoals hierboven geschetst waarbij de stijfheid van de balk afhangt van de overspanning meer realistisch dan een constante stijfheidswaarde in de parameterstudie. Bij een dergelijke redenering zijn de krachten in de steunen veel minder afhankelijk van de overspanning dan uit de basisanalyse blijkt.



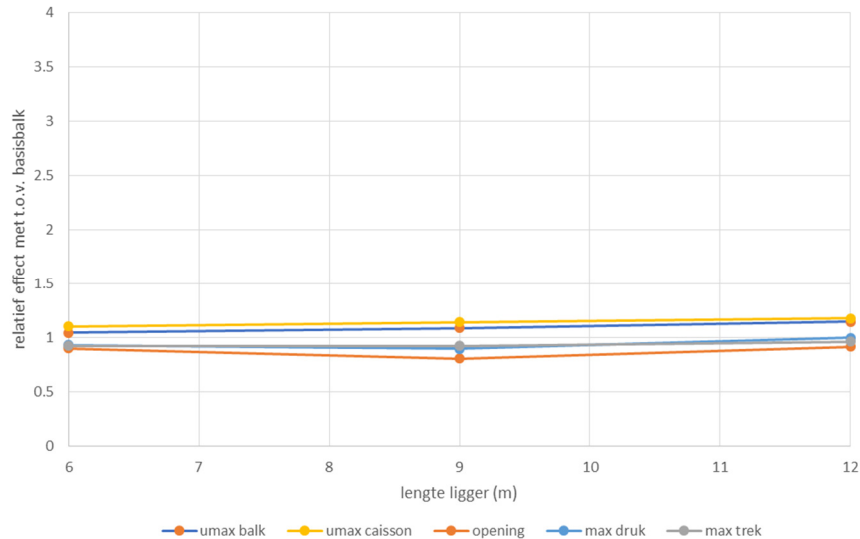
Figuur 4.15 : effect van de verlaging/aanpassing van de stijfheid (HEM200/280/360 balk belast volgens de sterke as) op de krachtswerkingen en doorbuigingen (caisson met h=2700mm)

4.5.10 Invloed van de openingen (kleine openingen)

Een alternatief is een caisson met kleine openingen (700mm hoog bij h=2700mm). Alhoewel de berekeningen zijn uitgevoerd voor de 4 beschouwde hoogtes, worden hieronder alleen de vergelijkingen voor de basishoogte getoond, gezien de geringe invloed van de totale hoogte. Tabel 4.13 geeft de waarden weer, terwijl Figuur 4.16 de resultaten relatief ten opzichte van de resultaten van het basismodel (Tabel 4.4) toont.

Tabel 4.13 : Resultaten doorbuigingen en krachtswerkingen caisson met kleine openingen als functie van de lengte

	6m - 2.7m	9m - 2.7m	12m - 2.7m
umax balk (mm)	-15.2	-13.6	-12.3
umax caisson (mm)	-11.5	-11.9	-11.2
opening (mm)	3.7	1.7	1.1
max druk (kN)	-41.8	-26.1	-17.4
max trek (kN)	38.2	17.2	11.6



Figuur 4.16 : effect van kleine openingen op de krachtswerkingen en doorbuigingen (caisson met h=2700mm)

Uit Tabel 4.13 en Figuur 4.16 kunnen de volgende conclusies getrokken worden.

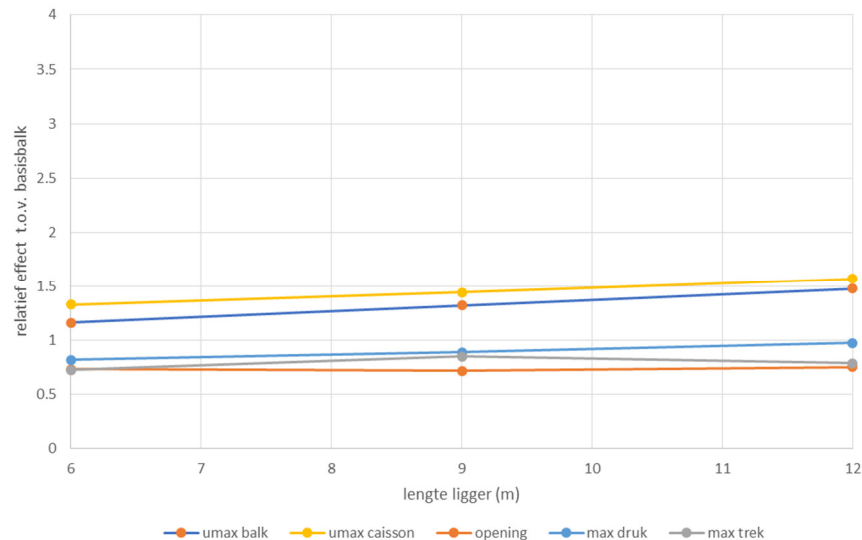
- Het effect van kleine openingen in het caisson is beperkt tot 10 à 15% op de doorbuigingen en minder dan 10% op de krachtswerkingen.

4.5.11 Invloed van de openingen (grote openingen)

Een alternatief is een caisson met grote openingen (1500mm bij h=2700mm). Alhoewel de berekeningen zijn uitgevoerd voor de 4 beschouwde hoogtes worden hieronder alleen de vergelijkingen voor de basishoogte getoond, gezien de geringe invloed van de totale hoogte. Tabel 4.14 geeft de waarden weer, terwijl Figuur 4.17 de resultaten relatief ten opzichte van de resultaten van het basismodel (Tabel 4.4) weergeeft.

Tabel 4.14 : Resultaten doorbuigingen en krachtswerkingen caisson met grote openingen als functie van de lengte

	6m - 2.7m	9m - 2.7m	12m - 2.7m
umax balk (mm)	-16.8	-16.5	-15.8
umax caisson (mm)	-13.8	-15	-14.9
opening (mm)	3	1.5	0.9
max druk (kN)	-36.5	-25.7	-16.9
max trek (kN)	29.9	15.8	9.4



Figuur 4.17 : effect van grote openingen op de krachswerkingen en doorbuigingen (caisson met h=2700mm)

Uit Tabel 4.14 en Figuur 4.17 kunnen de volgende conclusies getrokken worden.

- Het effect van grote openingen in het caisson aanzienlijk (20 tot 60%) op de doorbuigingen en beperkter (maximaal 20%) op de krachswerkingen.
- Het effect op de doorbuigingen wordt groter met de overspanning.

Worden de openingen **zeer groot** (verdiepingshoge ramen) dan is de stijfheid van het caisson verwaarloosbaar en zal het caisson volledig de nu ongehinderde doorbuiging van de balk volgen.

4.6 Conclusies

Het is duidelijk dat alle beschouwde parameters in mindere of meerdere mate belangrijk zijn voor de bepaling van de mate waarin

- de doorbuiging van de draagbalk vermindert
- het caisson meebeweegt met de draagbalk
- de trek- en drukkrachten in de verbindingen toe- of afnemen

De invloed is echter niet van elke parameter even groot. In wat volgt worden de parameters met geringe invloed gescheiden van deze met een grote invloed. Tabel 4.15 geeft de invloeden weer.

Tabel 4.15 : invloedsfactoren vervormingen caisson / draagbalk

Kleine invloed	Middelgrote invloed	Grote invloed
Hoogte (2,7m – 3,6m)	Uitgestelde vervorming (kruip)	Lengte caisson
Gamma (0,9 – 1)	Beplating (enkel – dubbel)	Stijfheid steunen (1 – 10 kN/mm)
Dikte caisson (220mm – 300mm)	Grote openingen ($\pm h/2$)	Stijfheid draagbalk
Houtkwaliteit (C18 – C24)		
Kleine openingen ($< h/3$)		

Bij overschrijden van de maximale buigspanning in de bovenplaat van de steunen kan uiteindelijk een plastisch scharnier ontstaan. In dat geval zal de stijfheid van de verbinding tot quasi nul herleid worden. Bij voldoende eigen stijfheid van het caisson (geen zeer grote openingen) zal het caisson dan zijn vorm zo goed als behouden en de gemiddelde doorbuiging van de balk aannemen zonder noemenswaardige weerstand te bieden.

In dat geval wordt de doorbuiging van het caisson gelijk aan 5/6 (puntlast) of 16/25 (verdeelde last) van de maximale doorbuiging van de balk. Beide waarde zijn ongeveer gelijk aan 0.64. Deze waarde kan als eerste zeer vereenvoudigde waarde worden aangenomen.

- doorbuiging balk : $L/250$
- doorbuiging caisson = $0.64 \cdot L/250$

Tabel 4.16 geeft de waarden voor de afmetingen van 6, 9 en 12m weer.

Tabel 4.16 : doorbuigingen bij het ontstaan van plastische scharnieren

	6m	9m	12m
u _{max} balk (mm)	-24	-36	-48
u caisson (mm)	-15.36	-23.04	-30.72
opening (mm)	-8.64	-12.96	-17.28

De relatie tussen de doorbuiging van de draagbalk en de doorbuiging van het caisson is zeer complex en wordt beïnvloed door alle geometrische en materiaalparameters die in balk en caisson voorkomen. Afhankelijk van de verhouding van parameters biedt het caisson meer of minder weerstand en zal het caisson meer of minder met de draagbalk meebewegen. Door de veelheid van parameters kan er geen vereenvoudigde aanname worden gemaakt. Behalve de stijfheid van de verbindingen zijn alle parameters gelukkig gemakkelijk in te schatten.

De doorbuiging van een caisson kan zoals zichtbaar uit de parameterstudie niet verwaarloosbaar zijn maar is zelden groter dan 25mm tenzij bij zeer grote overspanningen, zeer slappe caissons en/of zeer slappe steunen.

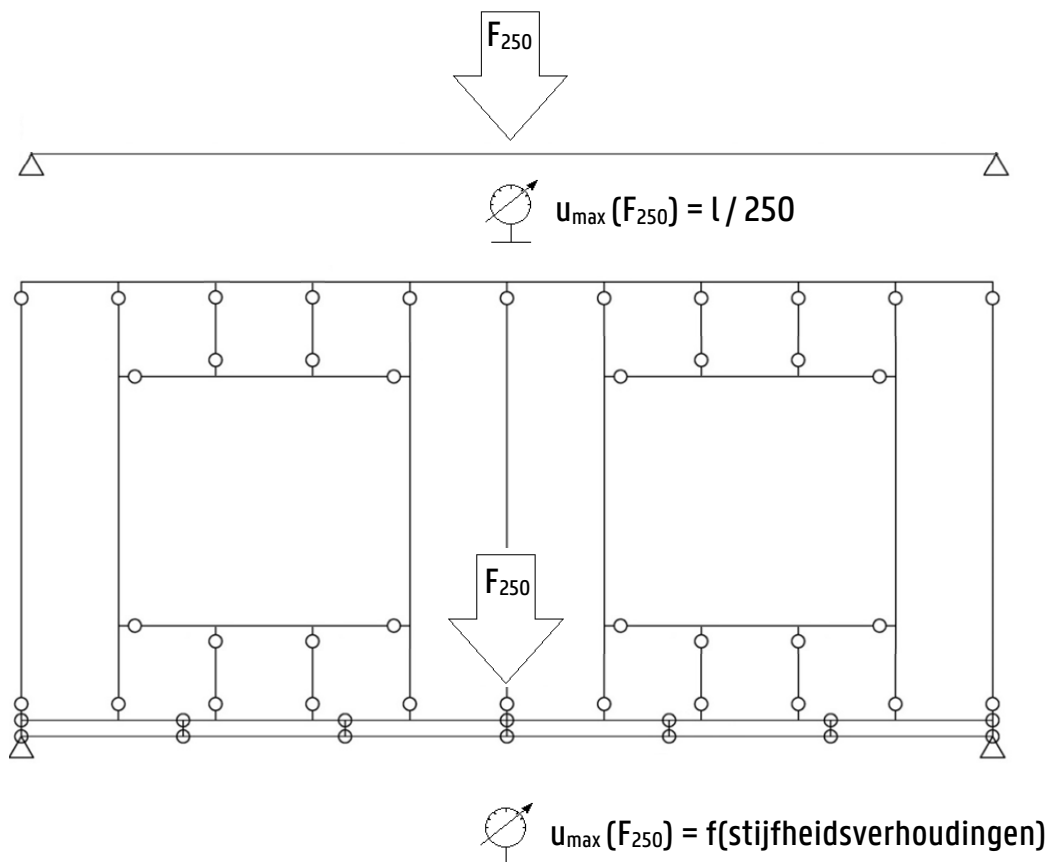
5. Testprogramma

5.1 Principe testopstelling

Om het rekenmodel van paragraaf 4 te verifiëren werd in het laboratorium van de onderzoeksgroep Schoonmeersen een testopstelling gebouwd die overeenkomt met de basisconfiguratie van het rekenmodel. Het principe van de testopstelling wordt weergegeven in figuur 5.1.

Een IPE800 balk wordt eenvoudig opgelegd (overspanning = 6m) en volgens de zwakke as belast met een puntlast in het midden. Deze puntlast (F_{250}) geeft aanleiding tot een doorbuiging $u_{\max}(F_{250})$ van $l / 250$ (=24mm) in het midden van de overspanning. Er wordt vanuit gegaan dat in de oorspronkelijke constructie de doorbuiging van de hoofddraagstructuur berekend is op een maximale doorbuiging van $l / 250$. De kracht F_{250} moet dan ook gezien worden als een representatie van een combinatie van veranderlijke en vaste belastingen, puntlasten en verdeelde lasten die samen hetzelfde effect (u_{\max}) hebben. Het meest nadelige geval doet zich voor wanneer de balk berekend is op deze doorbuiging. Of dit al dan niet het geval is, is natuurlijk niet geweten. Er wordt van de meest nadelige situatie uitgegaan.

In de situatie met een caisson als gevel, toegevoegd aan de hoofddraagstructuur zal het bevestigen van dit caisson een invloed hebben op de stijfheid van de hoofddraagstructuur en er in mindere of meerdere mate mee vervormen. Er wordt vanuit gegaan dat de kracht F_{250} hierbij niet verandert en dat de belasting die vooraf aanleiding gaf tot de maximaal toelaatbare doorbuiging van de hoofddraagstructuur dezelfde is als op de hoofddraagstructuur met caisson. De mate waarin het caisson meebeweegt met de hoofddraagstructuur hangt af van de relatieve stijfheden van hoofddraagstructuur, caisson en verbindingen. In wat volgt worden spannings- en vervormingsresultaten voor verschillende configuraties voor deze testopstelling weergegeven.



Figuur 5.1 : principe testopstelling

Figuur 5.2 geeft de voorzijde van de testopstelling in de configuratie met openingen weer. Hierbij is de hoofddraagstructuur (HEB800 volgens zwakke as) niet zichtbaar. Enkele meetklokken voor het aflezen van de verticale vervorming zijn zichtbaar.



Figuur 5.2 : voorzijde testopstelling

Figuur 5.3 geeft de achterzijde van de testopstelling in de configuratie met openingen weer en een voorbeeld van de steunen. Hierbij zijn de hoofddraagstructuur (HEB800 volgens zwakke as), de individuele uitkragende steunen en de hydraulische zuiger zichtbaar. De verankering is tot in het lijf van de HEB800 balk doorgetrokken.



Figuur 5.3 : achterzijde testopstelling / detail steun

5.2 Afmetingen

Voor de naamgeving van de afmetingen van de steunen wordt verwezen naar 3.3.

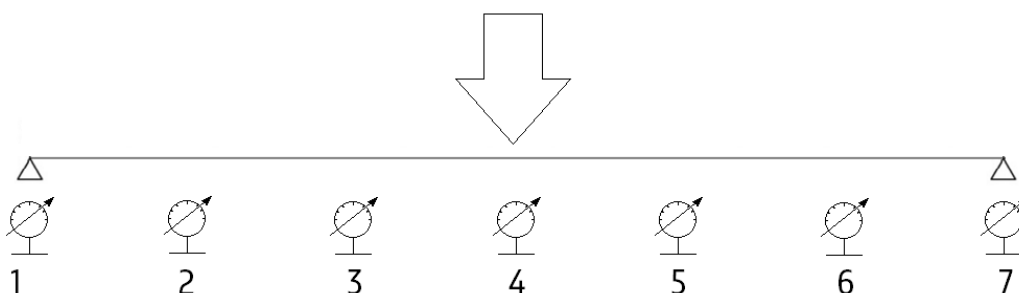
- Lengte onder (l_a) : 125mm
- Hoogte (h) : 90mm
- Lengte boven (l_b) : 160mm
- Breedte loodrecht op het vlak van de tekening (b) : 100mm
- Positie bout (l_1) : 40mm
- Tussenafstand (l_2) : 65mm
- Uitkraging (l_3) : 10mm
- Positie verticale en horizontale verankering bovenste caisson (l_4) : 80mm
- Dikte onderplaat (t_1) : 10mm
- Dikte verticaal (t_2) : 10mm
- Dikte bovenplaat (t_3) : 15mm
- Dikte schuine plaat (t_4) : 8mm

Voor de naamgeving van de afmetingen van het caisson wordt verwezen naar 4.1.

- Lengte caisson en balk (l) : 6000 mm
- Zijafstand opening (l_1) : 600mm
- Breedte opening (l_2) : 1800mm
- Tussenafstand opening (l_3) : 1200mm
- Hoogte (h) : 2700mm
- Hoogte onder opening (h_1) : 600mm
- Hoogte opening (h_2) : 1500mm
- Hoogte boven opening (h_3) : 600mm
- Steunafstand (s_1) : 1000mm
- Regelafstand (s_2) : 600mm
- Dikte regels en stijlen (loodrecht op het vlak van de tekening) (d) : 220mm
- Beplating eenzijdig OSB : 12mm

5.3 Aanvankelijke test : bepaling van de stijfheid van de hoofddraagstructuur

Een aanvankelijke test zonder caisson werd uitgevoerd tot een belasting van $F=225$ kN (Figuur 5.4). De doorbuigingen van de HEB balk werden opgemeten door 7 meetklokken om de meter. De resultaten van deze metingen zijn weergegeven in Tabel 5.1 en in figuur 5.5. Deze meetresultaten kunnen worden vergeleken met de metingen met een onverstijfd caisson zonder beplating (zie 5.4) en met rekenresultaten (zie 5.5).

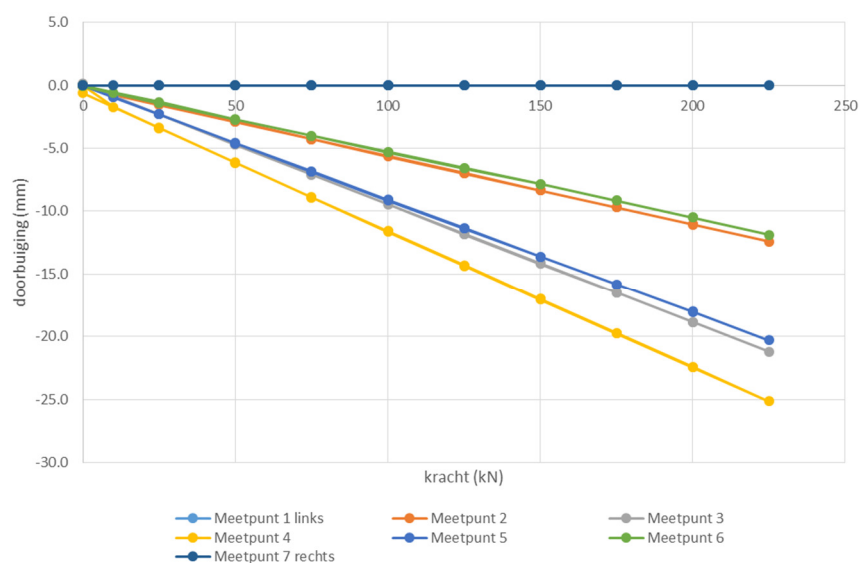


Figuur 5.4 : meetpunten doorbuiging aanvankelijke test

Tabel 5.1 : doorbuigingen HEM800 balk zonder caisson

kracht				zakking (mm)			
kN	Meetpunt 1 links	Meetpunt 2	Meetpunt 3	Meetpunt 4	Meetpunt 5	Meetpunt 6	Meetpunt 7 rechts
positie (m)	0	1	2	3	4	5	6
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	0.0	-0.7	-0.9	-1.7	-0.9	-0.6	0.0
25	0.0	-1.5	-2.3	-3.4	-2.3	-1.3	0.0
50	0.0	-2.9	-4.7	-6.1	-4.6	-2.7	0.0
75	0.0	-4.3	-7.1	-8.9	-6.8	-4.0	0.0
100	0.0	-5.6	-9.4	-11.6	-9.1	-5.3	0.0
125	0.0	-7.0	-11.8	-14.3	-11.3	-6.6	0.0
150	0.0	-8.3	-14.1	-17.0	-13.6	-7.9	0.0
175	0.0	-9.7	-16.5	-19.7	-15.8	-9.2	0.0
200	0.0	-11.0	-18.9	-22.4	-18.0	-10.5	0.0
225	0.0	-12.4	-21.2	-25.2	-20.3	-11.9	0.0
200	0.0	-11.1	-18.9	-22.4	-18.1	-10.5	0.0
175	0.0	-9.7	-16.5	-19.8	-15.8	-9.1	0.0
150	0.0	-8.4	-14.2	-17.1	-13.6	-7.8	0.0
125	0.0	-7.0	-11.8	-14.4	-11.4	-6.6	0.0
100	0.0	-5.6	-9.5	-11.6	-9.1	-5.3	0.0
75	0.0	-4.3	-7.1	-8.9	-6.9	-4.0	0.0
50	0.0	-2.9	-4.7	-6.2	-4.6	-2.7	0.0
25	0.0	-1.5	-2.3	-3.4	-2.3	-1.4	0.0
0	0.0	-0.1	0.1	-0.6	0.0	-0.1	0.0

De meetresultaten geven een lineair verband tussen kracht en verplaatsing aan. Alle resultaten bevinden zich in het elastische gebied van de ligger zoals gewenst. De maximale doorbuiging onder de belasting van 225kN is 25.2mm. Deze waarde ligt dicht bij $l/250 = 24\text{mm}$. Deze 225kN wordt in wat volgt gebruikt als F_{250} . Bij de vergelijking van berekeningen en metingen wordt uiteraard teruggerekend naar gelijke waarden (zie 6).



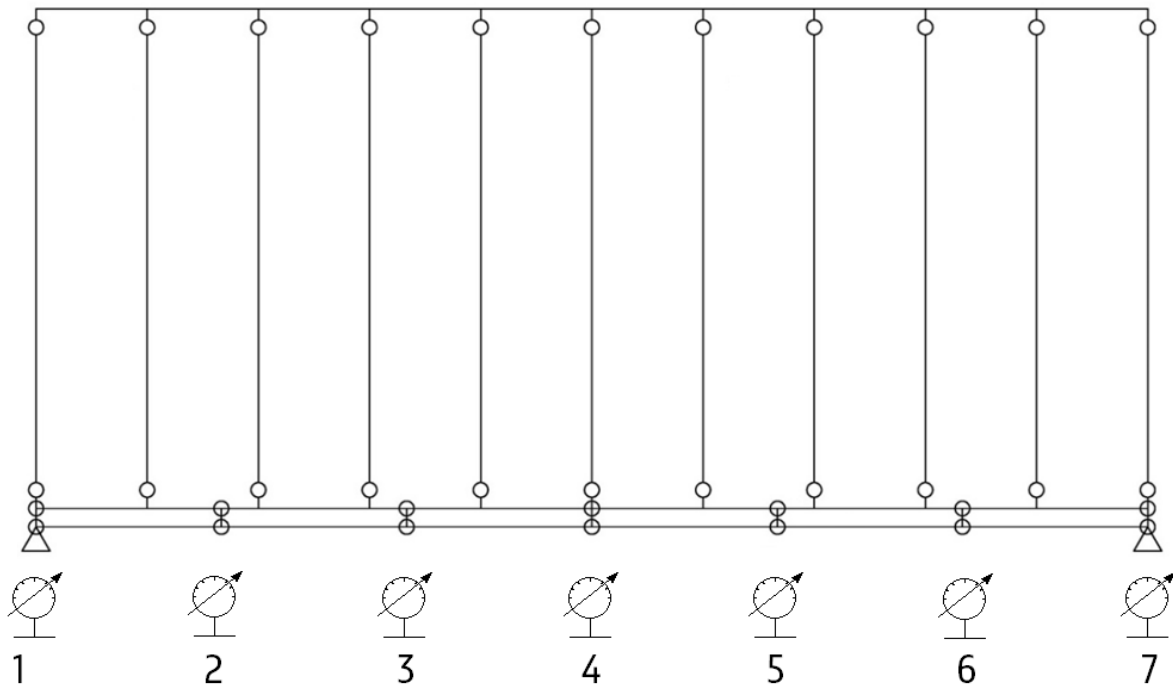
Figuur 5.5 : resultaten doorbuigingen aanvankelijke test

5.4 Test met een caisson zonder beplating

Een test met caisson zonder beplating werd uitgevoerd tot een belasting van $F=225$ kN (Figuur 5.6). De doorbuigingen werden opgemeten door 7 meetklokken om de meter (Figuur 5.7). Er wordt telkens aan de onderzijde van de steun gemeten ter plaatse van de schroefverankering van het caisson aan de steun (op $l_4 = 80$ mm). Ter plaatse van het midden van de overspanning wordt bijkomend gemeten op de balk (meetpunt 4 ligger) en op de onderzijde van het caisson (meetpunt 4 hout). De resultaten van de metingen zijn weergegeven in Tabel 5.2 en in figuur 5.8. Deze meetresultaten kunnen worden vergeleken met de metingen met een onverstijfd caisson zonder beplating (zie 5.3) en met rekenresultaten (zie 5.5).



Figuur 5.6 : testopstelling zonder beplating

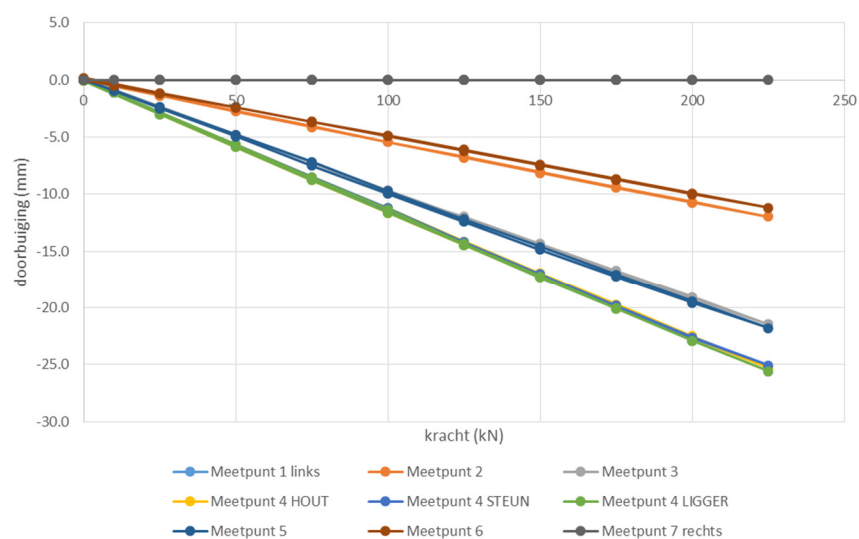


Figuur 5.7 : meetpunten doorbuiging test zonder beplating

Tabel 5.2 : doorbuigingen HEM800 balk met caisson zonder beplating

kracht					zakking (mm)				
kN	Meetpunt 1 links	Meetpunt 2	Meetpunt 3	Meetpunt 4 HOUT	Meetpunt 4 STEUN	Meetpunt 4 LIGGER	Meetpunt 5	Meetpunt 6	Meetpunt 7 rechts
positie (m)	0	1	2	3	3	3	4	5	6
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	0.0	-0.5	-0.9	-1.1	-1.1	-1.1	-1.0	-0.5	0.0
25	0.0	-1.3	-2.4	-2.8	-2.8	-2.8	-2.4	-1.2	0.0
50	0.0	-2.7	-4.8	-5.7	-5.7	-5.7	-4.8	-2.4	0.0
75	0.0	-4.0	-7.2	-8.5	-8.5	-8.6	-7.2	-3.7	0.0
100	0.0	-5.4	-9.9	-11.2	-11.2	-11.3	-9.8	-4.9	0.0
125	0.0	-6.7	-12.0	-14.2	-14.2	-14.4	-12.2	-6.1	0.0
150	0.0	-8.1	-14.3	-17.0	-17.0	-17.2	-14.6	-7.4	0.0
175	0.0	-9.4	-16.7	-19.7	-19.8	-20.1	-17.1	-8.7	0.0
200	0.0	-10.7	-19.1	-22.5	-22.6	-22.9	-19.4	-9.9	0.0
225	0.0	-12.0	-21.5	-25.3	-25.1	-25.6	-21.8	-11.2	0.0
200	0.0	-10.8	-19.2	-22.7	-22.7	-22.9	-19.6	-10.0	0.0
175	0.0	-9.4	-16.8	-20.0	-19.9	-20.1	-17.2	-8.8	0.0
150	0.0	-8.1	-14.5	-17.2	-17.2	-17.3	-14.9	-7.5	0.0
125	0.0	-6.8	-12.1	-14.5	-14.4	-14.5	-12.4	-6.2	0.0
100	0.0	-5.5	-9.7	-11.7	-11.6	-11.7	-10.0	-4.9	0.0
75	0.0	-4.1	-7.3	-8.8	-8.7	-8.8	-7.5	-3.7	0.0
50	0.0	-2.8	-4.8	-5.9	-5.8	-5.9	-5.0	-2.4	0.0
25	0.0	-1.4	-2.4	-3.0	-2.9	-3.0	-2.5	-1.2	0.0
0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	-0.1	0.0	0.2	0.0

De meetresultaten geven een lineair verband tussen kracht en verplaatsing aan. Alle resultaten bevinden zich in het elastische gebied van de ligger zoals gewenst. De maximale doorbuiging onder de belasting van 225kN is 25.3mm op het caisson, 25.1mm op de steun en 25.6mm op de ligger. Deze waarden wijken minder dan 2% af van de maximale waarde van 5.3.



Figuur 5.8 : resultaten doorbuigingen test met caisson zonder beplating

Zoals verwacht volgt een caisson zonder beplating volledig de vervorming van de HEM800 balk. Enkel de boven en onderregel geven enige stijfheid, maar de som van deze stijfheden is verwaarloosbaar ten opzichte van deze van de balk (de hoofd draagstructuur).

5.5 Vergelijking met rekenresultaten

De doorbuiging van een buigingsbalk waarop een puntlast in het midden aangrijpt wordt gegeven door :

$$\blacksquare u = \frac{F_v}{12 \cdot E \cdot I} \times \frac{(3 \cdot l^2 - x^2)}{4}$$

De maximale doorbuiging van een buigingsbalk waarop een puntlast in het midden aangrijpt wordt gegeven door :

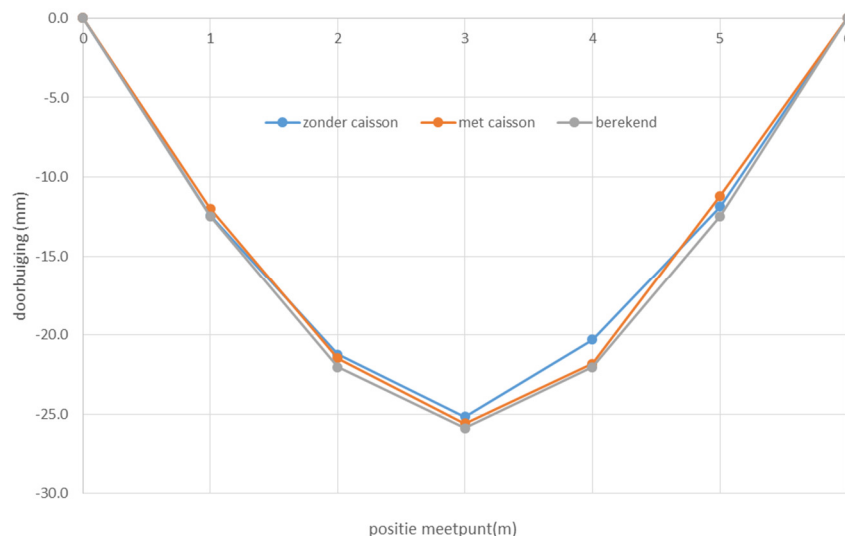
$$\blacksquare u_{\max} = \frac{F_v \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot I}$$

Met $F_v = 225 \text{ kN}$, $l = 6000 \text{ mm}$, $E = 210000 \text{ MPa}$ en $I = 186,3 \text{ E}6 \text{ mm}^4$ wordt deze waarde :

$$\blacksquare u_{\max} = \frac{F_v \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot I} = 25.87 \text{ mm}$$

Deze waarde ligt voldoende dicht bij de uitgangswaarde van $l/250 = 24 \text{ mm}$ om met $F_v = 225 \text{ kN}$ verder te rekenen.

In figuur 5.9 wordt een vergelijking gemaakt tussen de doorbuigingen berekend met de eenvoudige formule, de doorbuigingen van de balk en de doorbuigingen van de balk met caisson zonder beplating. Deze metingen geven aan dat de opgemeten doorbuigingen voldoende nauwkeurig zijn, dat de aangenomen eigenschappen van de balk (traagheidsmoment en stijfheidsmodulus) voldoende nauwkeurig zijn om te kunnen gebruikt worden en dat een onverstijfd caisson de doorbuigingen van de balk volledig volgt. Alle afwijkingen van onderstaande grafiek bij een gelijkblijvende kracht van $F_v = 225 \text{ kN}$ zijn te wijten aan de invloed van het caisson.



Figuur 5.9 : vergelijking van berekende en gemeten doorbuigingen voor een onverstijfd caisson

5.6 Test met een eenzijdig verstijfd paneel zonder openingen (schroeven diameter 3mm)

Een test met caisson met eenzijdige OSB beplating (dikte 12mm) werd uitgevoerd tot een belasting van $F=225$ kN (Figuur 5.10). In deze test werd de onderregel verbonden met de steunen om de meter via 2 schroeven van diameter 3mm (lengte > 45mm) per steun. De OSB beplating bestaat uit horizontaal geplaatste OSB3 platen van 1200mm x 900mm die geschrankt worden vernageld aan de regels en stijlen met een tussenafstand van 200mm.



Figuur 5.10 : testopstelling met beplating zonder openingen

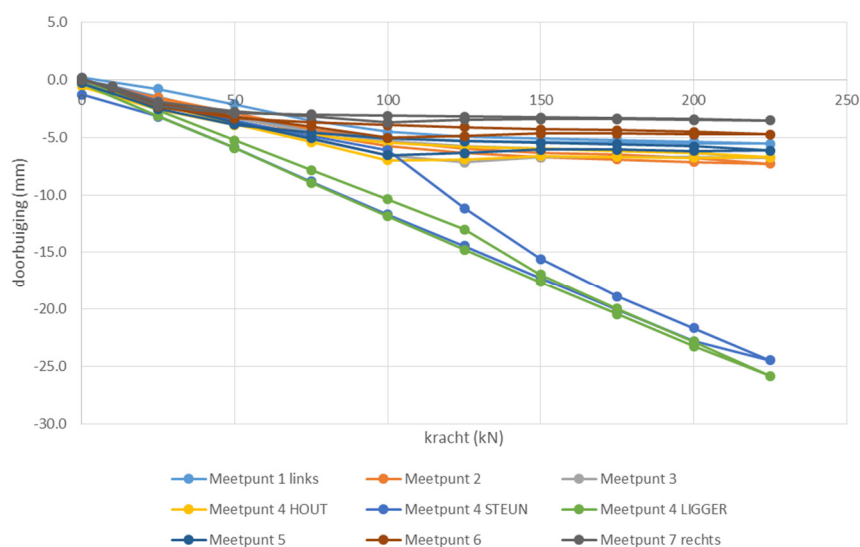
De doorbuigingen werden opnieuw opgemeten door 7 meetklokken om de meter op dezelfde manier als weergegeven in Figuur 5.7. Er wordt telkens aan de onderzijde van de steun gemeten ter plaatse van de schroefverankering van het caisson aan de steun (op $l_s = 80$ mm). Ter plaatse van het midden van de overspanning wordt bijkomend gemeten op de balk (meetpunt 4 ligger) en op de onderzijde van het caisson (meetpunt 4 hout). **Tijdens de proef zijn de schroeven ter plaatse van meetpunt 4 uitgetrokken bij een belasting tussen de 100 en 125 kN (Figuur 5.11).** De resultaten van de metingen zijn weergegeven in Tabel 5.3 en in figuur 5.13.



Figuur 5.11 : opening tussen caisson en steun

Tabel 5.3 : doorbuigingen HEM800 balk met caisson met beplating (schroeven diameter 3mm)

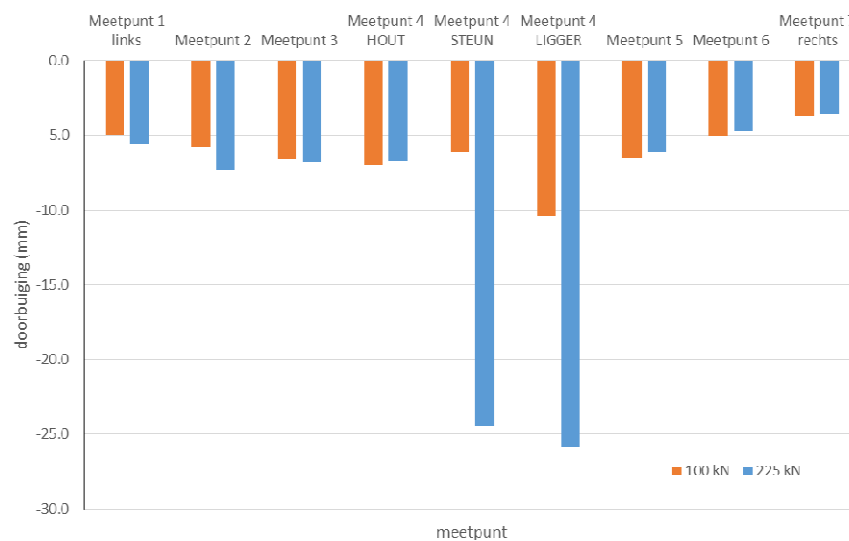
kracht					zakking (mm)				
kN	Meetpunt 1 links	Meetpunt 2	Meetpunt 3	Meetpunt 4 HOUT	Meetpunt 4 STEUN	Meetpunt 4 LIGGER	Meetpunt 5	Meetpunt 6	Meetpunt 7 rechts
positie (m)	0	1	2	3	3	3	4	5	6
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7	-0.6	-0.9	-0.7	-0.7	-0.6
25	-1.5	-1.6	-1.9	-2.1	-1.9	-2.6	-2.1	-2.0	-1.9
50	-3.2	-3.3	-3.7	-3.8	-3.5	-5.3	-3.7	-3.2	-2.7
75	-4.3	-4.6	-5.2	-5.4	-4.8	-7.8	-5.1	-4.0	-3.1
100	-5.0	-5.8	-6.6	-7.0	-6.1	-10.4	-6.5	-5.1	-3.7
125	-5.3	-6.4	-7.2	-6.9	-11.2	-13.0	-6.4	-4.9	-3.4
150	-5.4	-6.7	-6.7	-6.6	-15.6	-17.0	-6.1	-4.7	-3.4
175	-5.5	-6.9	-6.7	-6.7	-18.9	-20.0	-6.1	-4.7	-3.4
200	-5.5	-7.1	-6.7	-6.8	-21.7	-22.9	-6.2	-4.7	-3.5
225	-5.6	-7.3	-6.8	-6.7	-24.5	-25.8	-6.2	-4.8	-3.5
200	-5.4	-6.8	-6.3	-6.4	-22.8	-23.3	-5.8	-4.5	-3.4
175	-5.2	-6.5	-6.1	-6.2	-20.1	-20.5	-5.6	-4.4	-3.3
150	-5.1	-6.3	-6.0	-6.0	-17.3	-17.6	-5.5	-4.3	-3.3
125	-4.9	-6.0	-5.7	-5.8	-14.5	-14.8	-5.3	-4.1	-3.2
100	-4.5	-5.3	-5.3	-5.5	-11.7	-11.9	-5.1	-3.9	-3.1
75	-3.5	-4.3	-4.5	-4.8	-8.8	-9.0	-4.6	-3.7	-3.0
50	-2.1	-2.9	-3.4	-3.9	-5.9	-5.9	-3.9	-3.3	-2.9
25	-0.8	-1.5	-2.0	-2.6	-3.2	-3.1	-2.5	-2.4	-2.3
0	0.2	-0.1	-0.3	-0.6	-1.3	-0.3	-0.3	0.1	0.2



Figuur 5.12 : resultaten doorbuigingen test met caisson met beplating zonder openingen (schroef diameter 3mm)

De resultaten van tabel 5.3 en figuur 5.12 kunnen ook op een andere manier worden voorgesteld. Figuur 5.13 geeft de doorbuigingen bij respectievelijk 100kN en 225kN weer. Deze grafiek geeft aan dat de vervorming van het caisson nauwelijks nog verandert na het loslaten van de middelste schroeven. De doorbuiging in de middensectie van het

caisson (Meetpunt 4 Hout) is quasi gelijk bij 100kN en 225kN terwijl de doorbuiging in de middensectie van de onderzijde van de steun en van de ligger (Meetpunt 4 Steun en Ligger) deze van de proef met een onverstijfd caisson benaderen. Er ontstaat een opening van ongeveer 19 mm tussen het caisson en de ligger.



Figuur 5.13 : vergelijking van gemeten doorbuigingen bij 100 en 225 kN

Bovenvermelde test geeft aan dat de trekspanningen die ontstaan ter plaatse van de middelste steun belangrijk kunnen zijn. Deze trekspanningen zijn een gevolg van de compatibiliteitsreacties tussen het caisson en de balk en werden ook al aangegeven in de rekenresultaten van paragraaf 4.

In een reële situatie is er uiteraard typisch wel ook bijkomende drukcomponent in de verbinding ten gevolge van het eigengewicht van het caisson en de eventuele gevelbekleding. Deze component is in de proef niet opgenomen. Afhankelijk van het type bekleding kan deze waarde namelijk groter of kleiner zijn en bepalend of de totale reactie dan trek of druk is.

De schroefverbinding tussen steunen en caisson wordt echter principieel niet op deze trekkracht gedimensioneerd, aangezien de steunen louter op een neerwaartse kracht worden voorzien. Er wordt uitsluitend gedimensioneerd op basis van de horizontale windreactie, waarbij de schroeven in afschuiving worden belast.

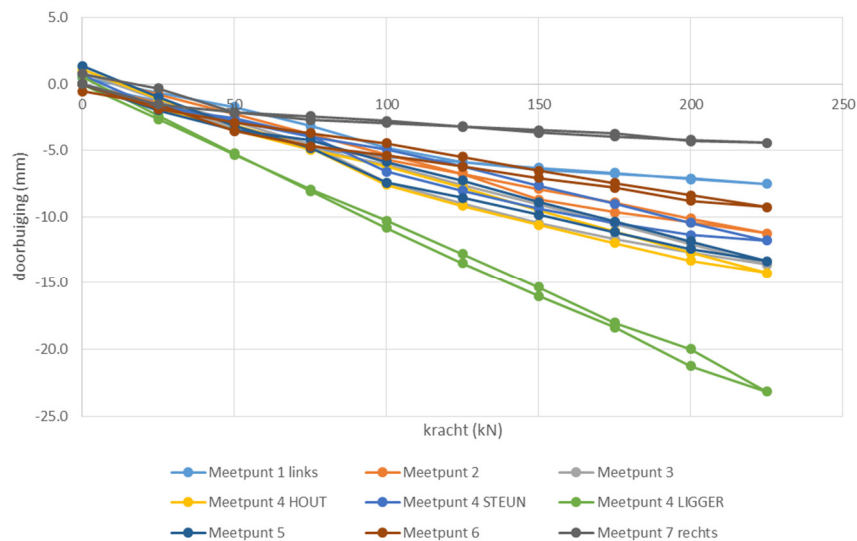
In de volgende test wordt dezelfde proefopstelling gebruikt als hierboven, weliswaar met schroeven met een diameter van 6mm. Er wordt verwacht dat het gebruik van deze schroeven niet tot uittrekken zal leiden bij een belasting van $F_v = 225\text{kN}$.

5.7 Test met een eenzijdig paneel verstijfd paneel zonder openingen (schroeven diameter 6mm)

Een test met caisson met eenzijdige OSB beplating (dikte 12mm) werd uitgevoerd tot een belasting van $F=225\text{ kN}$. In deze test werd de onderregel verbonden met de steunen via 2 schroeven van diameter 6mm (lengte > 45mm) per steun. Het doel van deze grotere schroeven is het vermijden van het uittrekken ten gevolge van een compatibiliteitsreactie tussen steun en caisson. De testopstelling is dezelfde van Figuur 5.10. De doorbuigingen werden opnieuw opgemeten door 7 meetklokken om de meter op dezelfde manier als weergegeven in Figuur 5.7. Er wordt telkens aan de onderzijde van de steun gemeten ter plaatse van de schroefverankering van het caisson aan de steun (op $l_s = 80\text{mm}$). Ter plaatse van het midden van de overspanning wordt bijkomend gemeten op de balk (meetpunt 4 ligger) en op de onderzijde van het caisson (meetpunt 4 hout). **Tijdens de proef zijn de schroeven met grotere diameter niet uitgetrokken.** De resultaten van de metingen zijn weergegeven in Tabel 5.4 en in figuur 5.14.

Tabel 5.4 : doorbuigingen HEM800 balk met caisson met beplating (schroeven diameter 6mm)

kracht					zakking (mm)				
kN	Meetpunt 1 links	Meetpunt 2	Meetpunt 3	Meetpunt 4 HOUT	Meetpunt 4 STEUN	Meetpunt 4 LIGGER	Meetpunt 5	Meetpunt 6	Meetpunt 7 rechts
positie (m)	0	1	2	3	3	3	4	5	6
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
25	-1.3	-1.4	-1.6	-1.8	-1.6	-2.6	-2.0	-1.9	-1.5
50	-3.3	-3.1	-3.3	-3.5	-2.7	-5.3	-3.5	-2.9	-2.1
75	-4.8	-4.6	-4.9	-4.9	-3.9	-7.9	-4.2	-3.7	-2.4
100	-5.5	-5.7	-6.1	-6.2	-4.9	-10.3	-5.9	-4.5	-2.8
125	-5.9	-6.8	-7.6	-7.8	-6.2	-12.8	-7.3	-5.5	-3.2
150	-6.3	-7.9	-9.1	-9.5	-7.7	-15.3	-8.9	-6.5	-3.7
175	-6.7	-8.9	-10.5	-11.1	-9.0	-18.0	-10.3	-7.4	-3.9
200	-7.2	-10.1	-12.0	-12.7	-10.5	-20.0	-11.8	-8.4	-4.2
225	-7.5	-11.2	-13.6	-14.2	-11.8	-23.2	-13.3	-9.3	-4.4
200	-7.1	-10.4	-12.7	-13.3	-11.4	-21.3	-12.4	-8.8	-4.3
175	-6.8	-9.7	-11.7	-12.0	-10.4	-18.4	-11.1	-7.8	-3.7
150	-6.4	-8.7	-10.5	-10.6	-9.4	-16.0	-9.8	-7.1	-3.5
125	-5.9	-6.8	-9.0	-9.2	-8.0	-13.5	-8.6	-6.2	-3.2
100	-4.8	-5.3	-7.4	-7.6	-6.6	-10.8	-7.4	-5.4	-2.9
75	-3.2	-3.8	-4.5	-4.8	-3.9	-8.0	-4.8	-4.7	-2.7
50	-1.7	-2.2	-2.8	-3.1	-2.6	-5.2	-3.1	-3.5	-2.1
25	-0.6	-0.8	-1.1	-1.1	-1.8	-2.4	-1.0	-1.6	-0.3
0	0.5	0.8	0.9	1.1	0.7	0.6	1.4	-0.6	0.8



Figuur 5.14 : resultaten doorbuigingen test met caisson met beplating zonder openingen (schroefdiameter 6mm)

Tabel 5.4 en figuur 5.14 geven een relevant meetresultaat weer voor deze basisopstelling met beplating zonder openingen. De vervorming van de hoofd draagstructuur wordt met zo'n 10% gereduceerd (-23.2 t.o.v. -25.6mm), terwijl de doorbuiging van het caisson (Meetpunt 4 Hout) maximaal -14.2mm bedraagt. Het caisson volgt dus duidelijk niet de vervorming van de hoofd draagstructuur. Er ontstaat onderaan een opening van ongeveer 9mm. In de test waarbij de schroefverbinding bezweek was dit nog 19mm, een belangrijk verschil.

De resultaten van de metingen bij 100kN en 225kN kunnen nu opnieuw worden vergeleken, terwijl tegelijk ook de meting bij 100kN kan vergeleken worden met deze met de schroeven van 3mm diameter (Figuur 5.15). Deze figuur

geeft duidelijk aan dat tot 100kN de vervormingen in beide testen gelijk zijn. Tussen 100 en 225kN zijn de verplaatsingen lineair m.b.t. de kracht. In het volledige verloop zijn de verplaatsingen niet volledig lineair. Zoals later zal worden aangegeven is dit gerelateerd aan het niet lineaire verloop van de kracht-verplaatsingsrelatie in de verbindingen ten gevolge van een initiële slip in de verbinding (zie 5.9).



Figuur 5.15 : vergelijking van gemeten doorbuigingen bij 100 (3mm / 6mm) en 225 kN (6mm)

Tabel 5.5 : opgemeten rekken in de steunen HEM800 balk met caisson met beplating zonder openingen

kracht kN	Meetpunt 1 links	Meetpunt 2	Meetpunt 3	rek (μ S)	Meetpunt 5	Meetpunt 6	Meetpunt 7 rechts
positie (m)	0	1	2	3	4	5	6
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-
25	-11.6	-34.1	39.2	-64.1	-17.3	-20.1	-
50	-70.5	-25.9	101.2	-64.3	-13.0	-105.4	-
75	-106.6	-1.4	172.4	-18.1	2.2	-156.8	-
100	-152.1	27.7	226.1	60.0	37.0	-126.3	-
125	-214.1	46.4	261.4	133.6	73.5	-147.4	-
150	-263.8	62.6	303.8	195.4	112.7	-139.7	-
175	-293.7	82.0	357.5	244.6	155.5	-94.1	-
200	-318.5	100.0	420.4	279.7	193.0	-62.0	-
225	-344.5	120.1	482.0	320.2	228.1	-58.3	-
200	-330.4	78.0	397.5	194.1	186.0	-77.3	-
175	-241.8	49.6	328.0	96.3	142.1	-128.5	-
150	-202.8	21.2	266.1	15.8	98.9	-167.0	-
125	-156.2	-3.3	215.7	-42.6	60.1	-171.6	-
100	-114.2	-24.6	170.0	-79.0	31.1	-143.8	-
75	-89.3	-38.1	138.4	-93.2	5.9	-88.0	-
50	-25.3	-39.1	36.0	-89.1	-4.6	-35.9	-
25	5.6	-23.3	14.6	-43.6	-6.1	-29.2	-
0	-19.9	3.6	-9.8	-4.8	4.0	-2.5	-

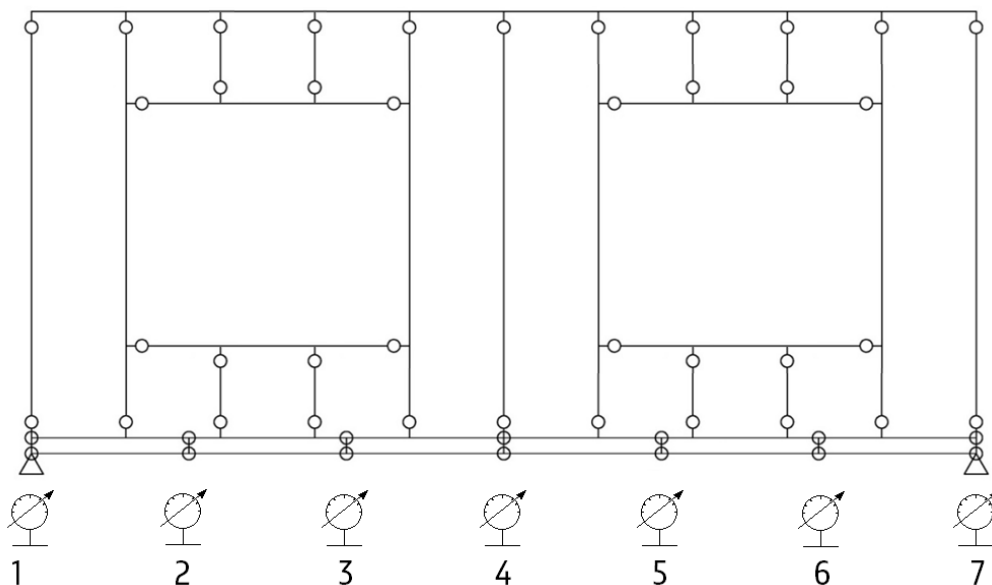
Om enigszins een inschatting te kunnen maken van de compatibiliteitskrachten werden rekmetingen uitgevoerd tijdens bovenstaande proef. De resultaten hiervan worden weergegeven in Tabel 5.5. De resultaten van deze tabel zijn echter enkel zinvol wanneer ook een directe relatie kan worden gelegd tussen de opgemeten rekwaarden en de effectieve krachten in de steunen. Hierop wordt teruggekomen in 5.10.

5.8 Test met een eenzijdig paneel verstijfd paneel met openingen (schroeven diameter 6mm)

Een test met caisson met eenzijdige OSB beplating (dikte 12mm) met openingen werd uitgevoerd tot een belasting van $F=225$ kN. In deze test werd de onderregel verbonden met de steunen via 2 schroeven van diameter 6mm (lengte > 45 mm) per steun. Voor de afmetingen van de openingen wordt verwezen naar 5.2 (grote openingen). De testopstelling is weergegeven in Figuur 5.16. De doorbuigingen werden opnieuw opgemeten door 7 meetklokken om de meter op (Figuur 5.17).



Figuur 5.16 : testopstelling met beplating met openingen

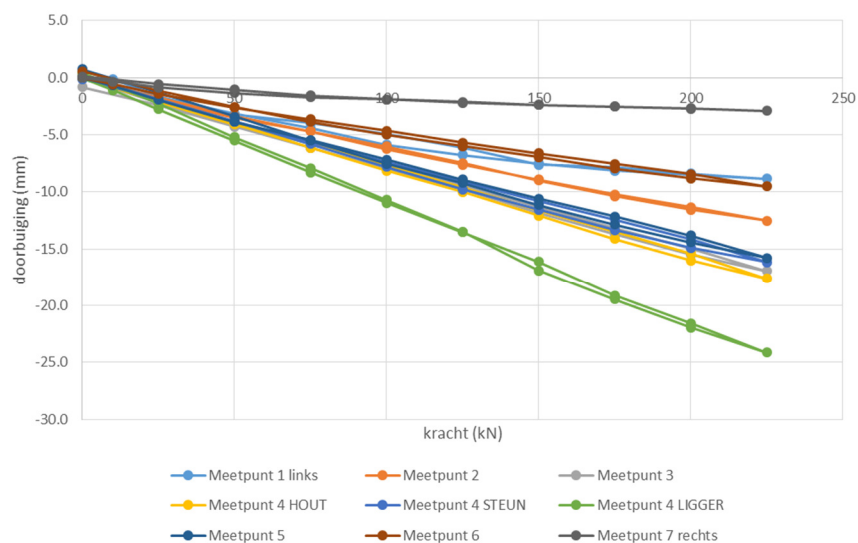


Figuur 5.17 : meetpunten doorbuiging test met beplating met openingen

Er wordt telkens aan de onderzijde van de steun gemeten ter plaatse van de schroefverankering van het caisson aan de steun (op $L_4 = 80\text{mm}$). Ter plaatse van het midden van de overspanning wordt bijkomend gemeten op de balk (meetpunt 4 ligger) en op de onderzijde van het caisson (meetpunt 4 hout). De resultaten van de metingen zijn weergegeven in Tabel 5.6 en in Figuur 5.18.

Tabel 5.6 : doorbuigingen HEM800 balk met caisson met beplating met openingen

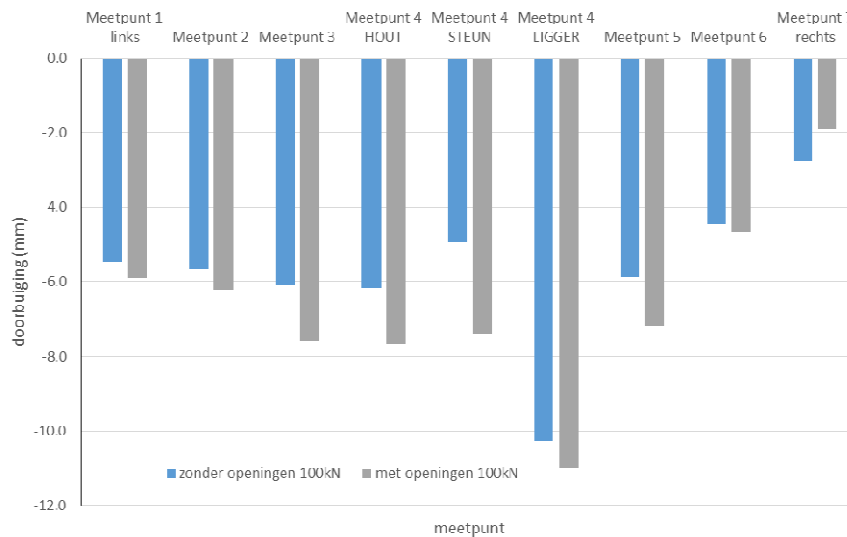
kracht					zakking (mm)				
kN	Meetpunt 1 links	Meetpunt 2	Meetpunt 3	Meetpunt 4 HOUT	Meetpunt 4 STEUN	Meetpunt 4 LIGGER	Meetpunt 5	Meetpunt 6	Meetpunt 7 rechts
positie (m)	0	1	2	3	3	3	4	5	6
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	-0.1	-0.8	-0.9	-0.9	-0.7	-1.1	-0.7	-0.6	-0.3
25	-1.7	-1.8	-2.2	-2.1	-1.9	-2.8	-2.0	-1.4	-0.9
50	-3.2	-3.4	-4.1	-4.1	-3.9	-5.5	-3.9	-2.6	-1.3
75	-4.4	-4.7	-5.8	-5.8	-5.6	-8.3	-5.5	-3.7	-1.7
100	-5.9	-6.2	-7.6	-7.7	-7.4	-11.0	-7.2	-4.7	-1.9
125	-6.8	-7.6	-9.5	-9.6	-9.1	-13.5	-8.9	-5.7	-2.2
150	-7.5	-8.9	-11.3	-11.6	-10.8	-16.1	-10.6	-6.6	-2.4
175	-8.1	-10.2	-13.2	-13.4	-12.4	-19.1	-12.2	-7.5	-2.6
200	-8.5	-11.4	-15.0	-15.4	-14.1	-21.6	-13.8	-8.5	-2.7
225	-8.9	-12.5	-16.9	-17.6	-16.2	-24.2	-15.8	-9.5	-2.9
200	-8.4	-11.6	-15.5	-16.0	-14.9	-22.0	-14.4	-8.8	-2.7
175	-7.9	-10.4	-13.7	-14.1	-13.3	-19.5	-12.9	-8.0	-2.6
150	-7.6	-9.0	-11.8	-12.1	-11.6	-16.9	-11.1	-7.0	-2.4
125	-6.1	-7.5	-9.8	-10.0	-9.8	-13.5	-9.2	-6.0	-2.1
100	-5.0	-6.1	-8.0	-8.1	-7.8	-10.7	-7.6	-5.0	-1.9
75	-4.0	-4.7	-6.1	-6.1	-5.8	-7.9	-5.5	-3.9	-1.6
50	-3.2	-3.6	-4.3	-4.0	-3.8	-5.2	-3.4	-2.6	-1.1
25	-1.7	-2.0	-2.4	-1.9	-1.9	-2.3	-1.3	-1.2	-0.6
0	0.0	0.1	-0.8	-0.1	-0.1	0.4	0.7	0.5	0.1



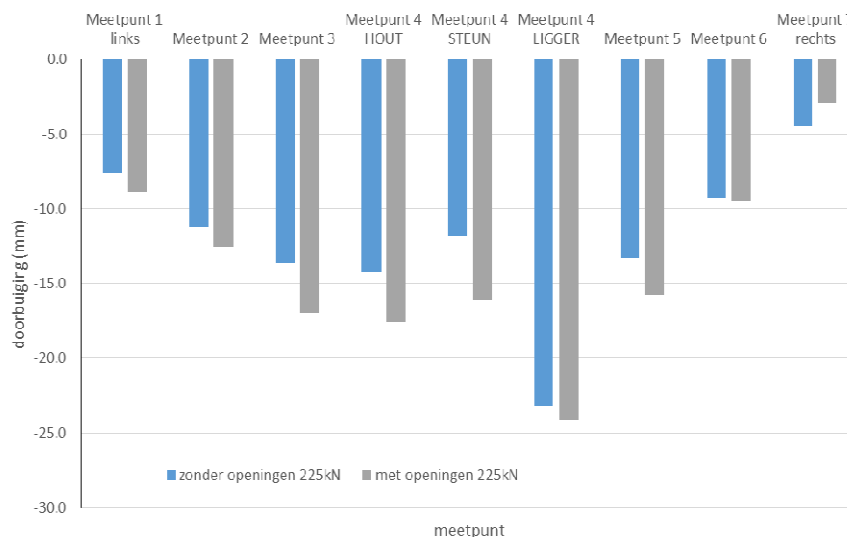
Figuur 5.18 : resultaten doorbuigingen test met caisson met beplating met openingen

Tabel 5.6 en figuur 5.18 geven een relevant meetresultaat weer voor deze basisopstelling met beplating met openingen. De vervorming van de hoofddragstructuur wordt slechts met zo'n 5% gereduceerd (-24.2 t.o.v. -25.6mm), terwijl de doorbuiging van het caisson (Meetpunt 4 Hout) maximaal -17.6mm bedraagt. Het caisson volgt dus duidelijk meer de vervorming van de hoofddragstructuur. Er ontstaat onderaan een opening van minder dan 7mm. In de test met het volledige paneel was dit nog 9mm, een reductie met ongeveer een derde.

De resultaten van de metingen met en zonder openingen kunnen nu opnieuw worden vergeleken bij 100kN (Figuur 5.19) en bij 225kN (Figuur 5.20). Er wordt een iets meer lineair gedrag vastgesteld in het volledige bereik.



Figuur 5.19 : vergelijking van gemeten doorbuigingen bij 100kN met en zonder openingen



Figuur 5.20 : vergelijking van gemeten doorbuigingen bij 225kN met en zonder openingen

Om enigszins een inschatting te kunnen maken van de compatibiliteitskrachten werden rekmetingen uitgevoerd tijdens bovenstaande proef. De resultaten hiervan worden weergegeven Tabel 5.7. De resultaten van deze tabel zijn echter enkel zinvol wanneer ook een directe relatie kan worden gelegd tussen de opgemeten rekwaarden en de effectieve krachten in de steunen. Hierop wordt teruggekomen in 5.10.

Tabel 5.7 : opgemeten rekken in de steunen HEM800 balk met caisson met beplating met openingen

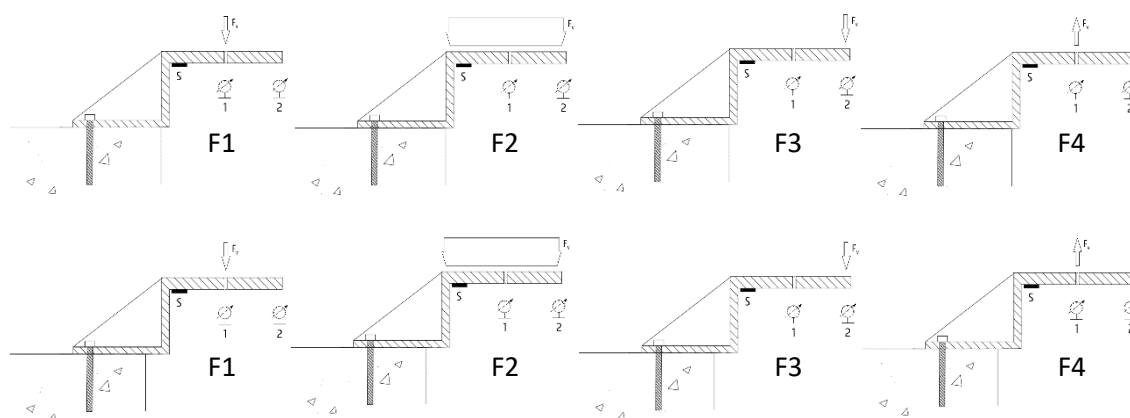
kracht				rek (μ S)			
kN	Meetpunt 1 links	Meetpunt 2	Meetpunt 3	Meetpunt 4	Meetpunt 5	Meetpunt 6	Meetpunt 7 rechts
positie (m)	0	1	2	3	4	5	6
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
25	10.9	-19.7	25.1	-109.3	-11.2	91.2	-2.4
50	-78.1	-25.6	74.9	-168.7	-9.5	102.8	-4.5
75	-126.0	-14.5	142.5	-187.5	-4.0	54.2	-6.8
100	-156.3	6.9	154.0	-181.4	8.3	14.9	-5.7
125	-175.4	22.6	177.2	-143.6	19.4	14.1	-26.4
150	-188.9	39.7	190.4	-99.9	28.8	24.5	-62.1
175	-202.3	55.3	201.9	-54.0	37.1	32.7	-98.9
200	-231.3	67.2	213.9	-9.7	44.4	40.2	-140.5
225	-264.5	76.0	227.7	27.5	53.7	49.3	-182.3
200	-224.5	57.0	212.5	-37.4	41.9	31.3	-113.5
175	-210.2	35.1	196.7	-100.0	28.4	20.3	-60.5
150	-188.2	13.9	179.0	-151.2	18.7	17.1	-23.4
125	-160.9	-3.7	148.0	-190.4	6.5	27.3	-4.3
100	-126.7	-21.5	124.8	-188.0	-4.2	65.8	-6.2
75	-79.6	-29.0	60.2	-172.4	-9.2	109.4	-3.8
50	-14.9	-27.9	26.4	-131.1	-9.3	123.1	-0.9
25	15.2	-20.4	-7.1	-81.2	-10.1	94.2	1.6
0	1.9	-7.6	-19.0	-22.4	-8.5	-3.3	9.1

5.9 Bepalen van de stijfheid van de steunen

Bij de inschatting van de stijfheid van de steunen is uitgegaan van 2 hypothesen.

- De belasting grijpt aan op L_4 (ter plaatse van de schroefverbinding)
- De vervorming wordt uitsluitend veroorzaakt door de doorbuiging van het uitkragende gedeelte

Om de correctheid van deze hypothesen na te gaan werden enkele testen uitgevoerd waarbij een enkele steun onderworpen werd aan verschillende welomschreven belastingscombinaties (Figuur 5.21).



Figuur 5.21 : Stijfheidsbepaling van een individuele steun : krachtpositie 1 t.e.m. 4 / steunpositie 1 (boven) en steunpositie 2 (onder)

De steunen worden op 2 verschillende posities geplaatst ten opzichte van de rand. Bij een eerste positie is de uitkraging beperkt tot 10mm (Steunpositie 1 / S1) terwijl bij een tweede positie de uitkraging vergroot is tot ongeveer 30mm (Steunpositie 2 / S2). Deze 2 posities zijn mogelijk gemaakt door het gebruik van sleufgaten ter plaatse van de verankering met de hoofddragstructuur.

De belasting wordt op 4 verschillende manier aangebracht.

- Krachtpositie 1 (F1) : de belasting wordt geconcentreerd aangebracht ter plaatse van de schroefverbinding (op l_4) en naar beneden gericht
- Krachtpositie 2 (F2) : de belasting wordt uniform verdeeld aangebracht over de volledige lengte van de bovenplaat en naar beneden gericht
- Krachtpositie 3 (F3) : de belasting wordt geconcentreerd aangebracht op 10mm van de tip van de bovenplaat en naar beneden gericht
- Krachtpositie 4 (F4) : de belasting wordt geconcentreerd aangebracht ter plaatse van de schroefverbinding (op l_4) en naar boven gericht

Krachtpositie 1 komt overeen met het rekenmodel terwijl krachtpositie 2 overeenkomt met de reële belastingsschikking. Indien beide overeen komen kan de eerste hypothese worden geaccepteerd. Indien bovendien ook de opgemeten verticale doorbuiging 1 ter plaatse van de schroefverbinding overeenkomt met de in 3.5 berekende waarde kan ook de tweede hypothese worden geaccepteerd. In wat volgt zal aangetoond worden dat de enkel de eerste hypothese kan worden aangenomen. Krachtpositie 3 geeft dan de relatie kracht-spanning-ervorming aan mocht de kracht op de tip van de steun aangrijpen. Uit wat volgt zal blijken dat deze aanname te nadelig is. Krachtpositie 4 komt opnieuw overeen met het rekenmodel. Ten opzichte van krachtpositie 1 zal het reële vervormingsgedrag van de steun echter verschillend zijn wanneer de vervorming niet beperkt is tot de vervorming van de bovenste plaat. Uit wat volgt zal blijken dat dit inderdaad het geval is.

Bij belastingen van 0 – 0.2 – 0.4 – 0.6 – 0.8 – 1kN worden de doorbuiging ter plaatse van de schroefverbinding (1) en de plaattip (2) gemeten alsook de rek in een rekstrook (S) onderaan de bovenplaat, nabij de hoek. Het midden van de rekstrook bevindt zich op 57 mm van de schroefverbinding. Mits aanname van zuivere buiging in één richting kan uit deze rekwaarde op eenvoudige wijze de spanning in de plaat worden berekend. Een spanningsberekening voor een uitkragende ligger laat ook toe deze waarde te correleren aan de uitgeoefende belasting.

- Buigspanning in de bovenplaat : $\sigma_s = E \cdot \varepsilon_s$

$$\sigma_s \text{ (MPa)} = 210000 \text{ (MPa)} \cdot 1E-6 \cdot \varepsilon_s \text{ (}\mu\text{S)}$$

$$\sigma_s \text{ (MPa)} = 0,21 \cdot \varepsilon_s \text{ (}\mu\text{S)}$$

- Buigspanning in de bovenplaat : $\sigma_s = \frac{6 \cdot F_v \cdot l_4}{b \cdot t_s^2} = \frac{6 \cdot 1000 \cdot F_v \text{ (kN)} \cdot 57}{100 \cdot 15^2} = 15.2 \text{ MPa per kN}$

Tabellen 5.8 t.e.m. 5.15 geven de basisresultaten (doorbuigingen 1 en 2 in mm, rek in μS) voor de acht kracht/steuncombinaties van Figuur 5.21. De rekmetingen worden gevisualiseerd in Figuur 5.22. Deze resultaten geven een lineair verband kracht-rek in het stijgende en dalende gebied aan. Duidelijk zichtbaar zijn ook dat de resultaten voor krachtpositie 1 en 2 quasi aan elkaar gelijk zijn en voor krachtpositie 4 gelijk in grootte en tegengesteld in zin aan de voorgaande waarden. De resultaten voor krachtpositie 3 geven een quasi dubbel zo grote spanning aan. Zoals verwacht hangen de rekwaarden niet af van de steuncombinatie.

Op basis van de rekmetingen van Figuur 5.22 voor krachtposities 1, 2 en 4 kan een gemiddelde rek per kN belasting worden berekend als :

- Rek in de bovenplaat : $\varepsilon_s = 70 \mu\text{S}$ per kN

Hieruit volgt onmiddellijk de spanning :

- Spanning in de bovenplaat : $\varepsilon_s = 70 \text{ E-6} / 210000 \text{ MPa}$ per kN = 14.7 MPa / kN

Dit resultaat komt zeer goed overeen met de hierboven theoretisch afgeleide waarde van 15.2 MPa / kN.

Tabel 5.8 : Metingen K1 / S1

krachtpositie 1			
steunpositie 1			
kracht	mm	mm	μS
kN	1	2	S
0	0.00	0.00	0
0.2	-0.10	-0.14	-14
0.4	-0.15	-0.22	-30
0.6	-0.21	-0.31	-42
0.8	-0.28	-0.41	-55
1	-0.33	-0.48	-68
0.8	-0.30	-0.43	-56
0.6	-0.24	-0.35	-43
0.4	-0.20	-0.30	-29
0.2	-0.15	-0.20	-14
0	-0.02	-0.05	0

Tabel 5.9 : Metingen K2 / S1

krachtpositie 2			
steunpositie 1			
kracht	mm	mm	μS
kN	1	2	S
0	0.00	0.00	0
0.2	-0.12	-0.18	-15
0.4	-0.21	-0.34	-32
0.6	-0.29	-0.45	-45
0.8	-0.37	-0.58	-60
1	-0.44	-0.70	-76
0.8	-0.40	-0.62	-61
0.6	-0.35	-0.54	-45
0.4	-0.29	-0.45	-30
0.2	-0.23	-0.35	-14
0	-0.15	-0.21	1

Tabel 5.10 : Metingen K3 / S1

krachtpositie 3			
steunpositie 1			
kracht	mm	mm	μS
kN	1	2	S
0	0.00	0.00	0
0.2	-0.11	-0.19	-32
0.4	-0.18	-0.33	-63
0.6	-0.25	-0.44	-95
0.8	-0.34	-0.58	-125
1	-0.42	-0.73	-157
0.8	-0.35	-0.60	-124
0.6	-0.29	-0.48	-98
0.4	-0.20	-0.36	-65
0.2	-0.14	-0.22	-33
0	-0.05	-0.06	0

Tabel 5.11: Metingen K4 / S1

krachtpositie 4			
steunpositie 1			
kracht	mm	mm	μS
kN	1	2	S
0	0.00	0.00	0
0.2	0.30	0.42	19
0.4	0.37	0.51	30
0.6	0.46	0.63	43
0.8	0.58	0.78	54
1	0.82	1.12	69
0.8	0.67	0.95	60
0.6	0.51	0.71	46
0.4	0.41	0.57	34
0.2	0.31	0.44	19
0	0.04	0.05	1

De interpretatie van de resultaten van de vervormingsmetingen is heel wat complexer. Figuur 5.23 toont aan dat er een belangrijke initiële slip optreedt. Deze slip is het gevolg van het ongecontroleerd handvast aandraaien van de verankering. Er is inderdaad geen voorspanning of aandraaimoment voorgeschreven. Deze slip treedt voornamelijk, maar niet uitsluitend op in het eerste deel van de grafiek tussen 0 en 0.2 kN. Dezelfde grafiek toont ook duidelijk aan dat de doorbuigingen bij krachtposities 1 en 4 in grootte niet aan elkaar gelijk zijn. Bovendien zijn ook de doorbuigingen bij steunposities 1 en 2 grondig verschillend. Dit heeft te maken met het werkelijke vervormingsgedrag van de steun, in het bijzonder de verlenging van de ankerbout. Deze ankerbout heeft weliswaar een grote sterkte maar een beperkte langse stijfheid. Bovendien treedt een zeker slip op tussen bout en beton of mortel. Deze vervormingen zijn echter zeer moeilijk te begroten.

Tabel 5.12 : Metingen K1 / S2

krachtpositie 1			
steunpositie 2			
kracht	mm	mm	μS
kN	1	2	S
0	0.00	0.00	0
0.2	-0.30	-0.45	-15
0.4	-0.43	-0.65	-30
0.6	-0.59	-0.92	-45
0.8	-0.77	-1.20	-60
1	-0.95	-1.46	-75
0.8	-0.92	-1.40	-60
0.6	-0.88	-1.32	-46
0.4	-0.83	-1.25	-31
0.2	-0.77	-1.16	-15
0	-0.32	-0.49	2

Tabel 5.13 : Metingen K2 / S2

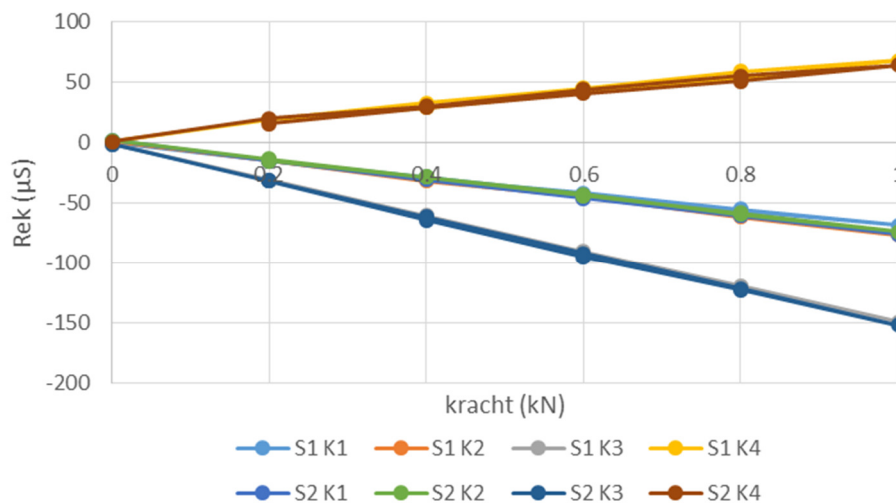
krachtpositie 2			
steunpositie 2			
kracht	mm	mm	μS
kN	1	2	S
0	0.00	0.00	0
0.2	-0.34	-0.52	-15
0.4	-0.45	-0.69	-29
0.6	-0.51	-0.79	-44
0.8	-0.56	-0.89	-58
1	-0.61	-0.95	-73
0.8	-0.56	-0.89	-59
0.6	-0.52	-0.82	-43
0.4	-0.47	-0.72	-29
0.2	-0.41	-0.62	-13
0	-0.09	-0.13	2

Tabel 5.14 : Metingen K3 / S2

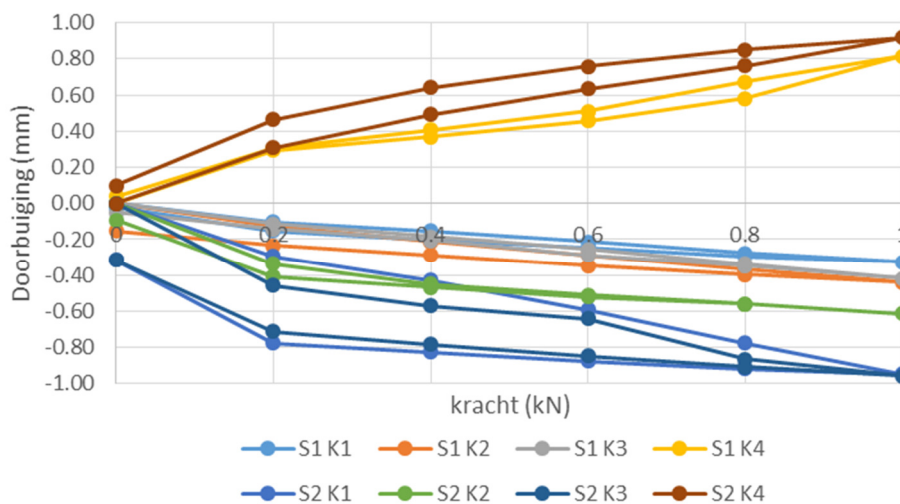
krachtpositie 3			
steunpositie 2			
kracht	mm	mm	μS
kN	1	2	S
0	0.00	0.00	0
0.2	-0.46	-0.71	-32
0.4	-0.57	-0.90	-61
0.6	-0.64	-1.03	-92
0.8	-0.87	-1.24	-121
1	-0.96	-1.55	-152
0.8	-0.91	-1.46	-122
0.6	-0.85	-1.33	-95
0.4	-0.78	-1.21	-64
0.2	-0.71	-1.07	-32
0	-0.32	-0.47	-1

Tabel 5.15 : Metingen K4 / S2

krachtpositie 4			
steunpositie 2			
kracht	mm	mm	μS
kN	1	2	S
0	0.00	0.00	0
0.2	0.31	0.44	16
0.4	0.49	0.71	29
0.6	0.64	0.90	41
0.8	0.76	1.08	51
1	0.92	1.29	64
0.8	0.85	1.21	55
0.6	0.76	1.08	44
0.4	0.64	0.92	30
0.2	0.47	0.68	20
0	0.10	0.14	1



Figuur 5.22 : Rekmetingen S voor de 8 kracht/steuncombinaties



Figuur 5.23 : Doorbuigingen t.p.v. meetpunt 1 voor de 8 kracht/steuncombinaties

De metingen van Figuur 5.23 kunnen worden omgezet naar een equivalente verticale stijfheid van de verankeringen zoals besproken in 3.5. Er worden 2 resultaten weergegeven, een eerste resultaat in het volledige bereik 0 – 1 kN en een resultaat in het bereik 0.4 – 1 kN om de initiële slip uit te sluiten. Tabel 5.16 geeft de resultaten weer.

Tabel 5.16 : Equivalente verticale stijfheden van de steunen op basis van de vervormingsmetingen

	S1	S1	S1	S1	S2	S2	S2	S2
Keq	K1	K2	K3	K4	K1	K2	K3	K4
(N/mm)	3067	2282	2394	1227	1055	1636	1044	1090
(N/mm)	3464	2676	2560	1338	1155	3680	1550	1413

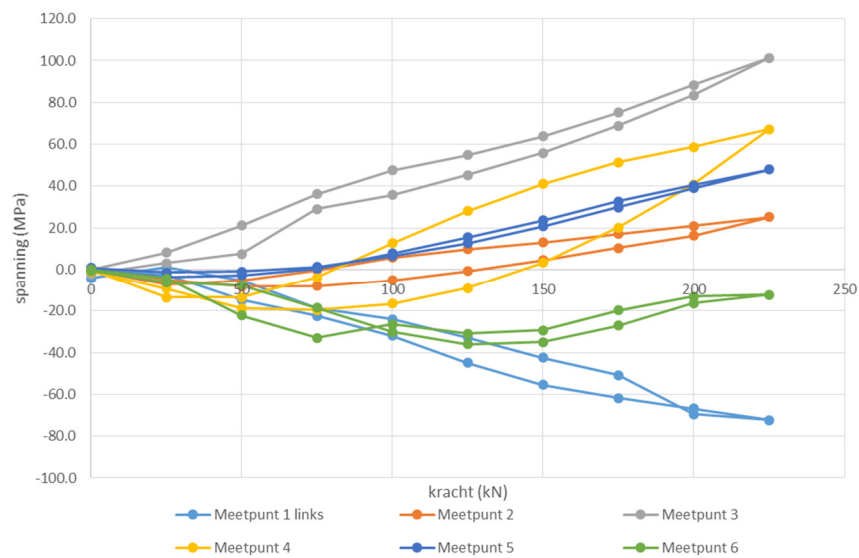
De waarden van tabel 5.16 liggen een orde van grootte lager dan de waarden berekend op basis van uitsluitend de verticale vervorming van de plaat. Hoeveel de exacte waarde van deze equivalente constante zal zijn is vooraf

moeilijk in te schatten daar veel zal afhangen van de effectieve plaatsing (aandraaien, toleranties, verschillend in trek en druk,...). Nochtans zal de stijfheid een belangrijke rol spelen in de mate waarin het caisson al dan niet de vervormingen van de hoofddragstructuur volgt.

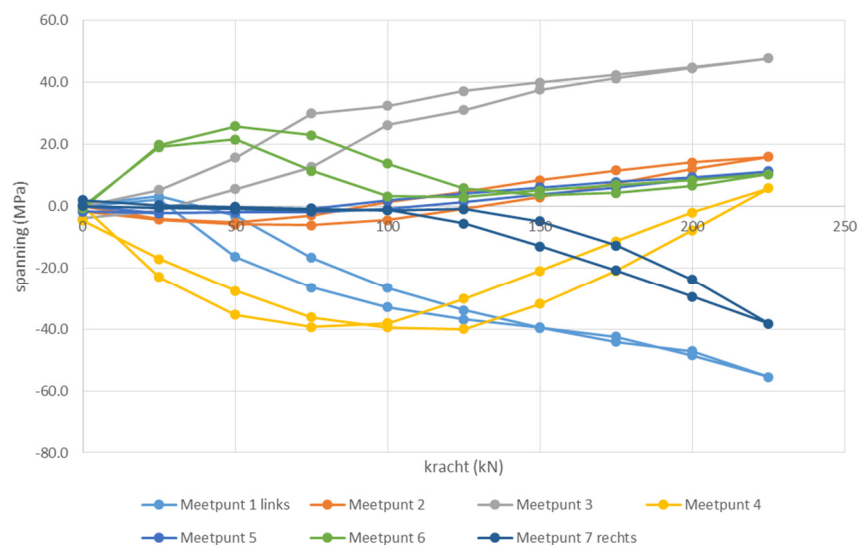
Bij de plaatsing van de caissons zal deze kleinere stijfheid in elk geval niet opgemerkt worden. De doorbuiging zal weliswaar 10x groter zijn dan de in 3.5 berekende 0.130mm, maar niet opgemerkt worden.

5.10 Interpretatie van de rekmetingen tijdens de proeven besproken in 5.7 en 5.8

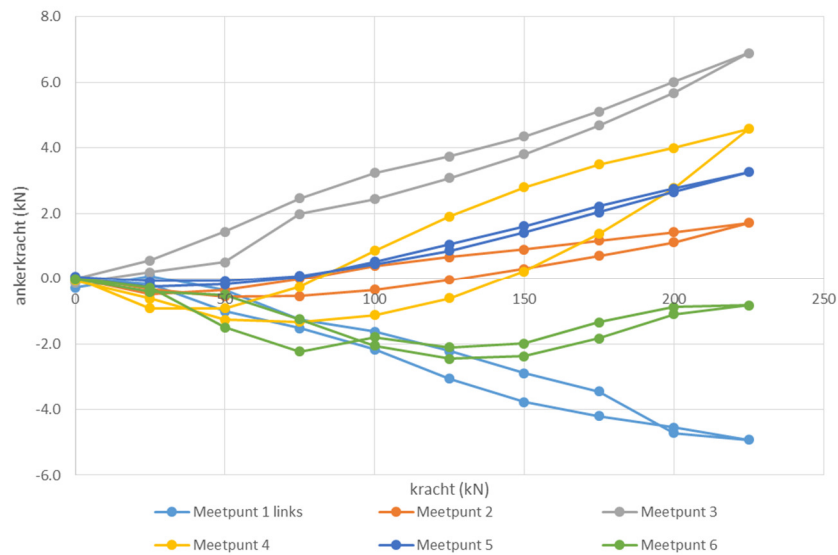
De rekmetingen van tabellen 5.5 en 5.7 worden eerst omgezet naar een buigspanning in de bovenplaat (Figuren 5.24 en 5.25 en met de omzettingfactor berekend in 5.9 ook omgezet naar een kracht in de verbinding (Figuren 5.26 en 5.27). Het is belangrijk te noteren dat de spanning in de bovenplaat groter wordt dan de weergegeven waarden die gemeten zijn in het midden van de rekstrook. Bij een aanname van zuivere buiging met een lineair momentenverloop wil dit zeggen dat de maximale spanning in de bovenplaat $80/57 = 1,4$ x de waarden weergegeven in Figuren 5.24 en 5.25 kan bereiken. Deze waarden zijn dus zeker niet verwaarloosbaar.



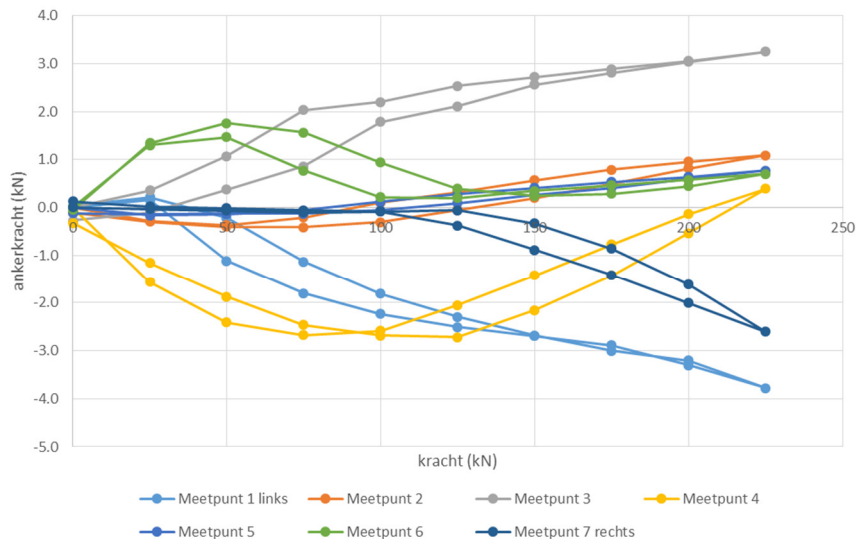
Figuur 5.24 : buigspanning onderzijde bovenplaat : caisson met beplating zonder openingen



Figuur 5.25 : buigspanning onderzijde bovenplaat : caisson met beplating met openingen



Figuur 5.26 : verticale kracht in de verankeringen : caisson met beplating zonder openingen



Figuur 5.27 : verticale kracht in de verankeringen : caisson met beplating met openingen

Figuren 5.24 t.e.m. 5.27 geven enkele belangrijke conclusies i.v.m. de krachtswerkingen in de steunpunten aan.

- De krachtswerkingen zijn niet altijd strikt lineair in functie van de belasting. In het bijzonder zal de ankerkracht voor sommige ankers eerst stijgen en daarna dalen, of zelfs van teken wisselen. Dit moeilijke gedrag kan verklaard worden door het niet-lineaire en in druk- en trek verschillend gedrag van de steunen. De onzekerheid op deze relatie, zelfs binnen de testopstelling maakt interpretatie van deze resultaten bijzonder moeilijk. Het is immers zo dat er zelfs in de testopstelling enige tolerantie is op de vorm van het caisson en de steunen. Daardoor wordt tijdens de montage het caisson met een lichte kracht tegen de steun getrokken. Dit betekent dat er in de testopstelling, maar ook in de realiteit een onbekende initiële kracht in de verbinding aanwezig is. Daardoor kan het aanvankelijke gedrag onmogelijk volledig correct voorspeld worden.
- De krachtswerkingen in de verbindingen zijn aanzienlijk. Spanningen de bovenplaat kunnen vrij grote waarden bereiken die in het geheel niet in het ontwerp zijn opgenomen.
- De krachtswerkingen verminderen gevoelig (factor 2) bij het caisson met de openingen.

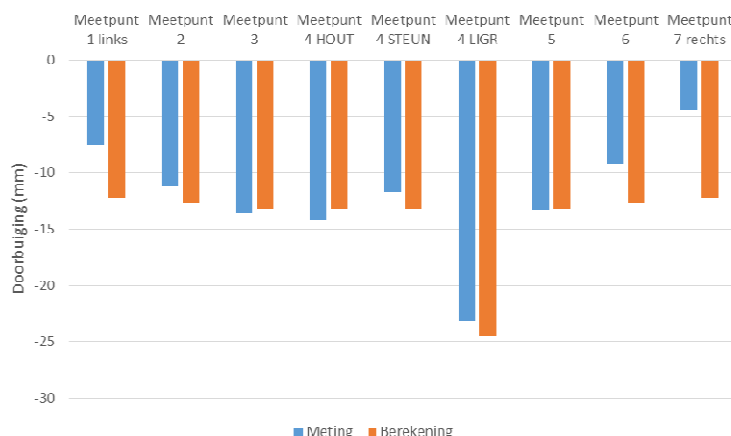
5.11 Conclusies voor het testprogramma

- Wanneer een gevel van het caisson type met puntsgewijze uitkragende steunen van het type beschreven in 3 wordt toegepast zal dit caisson de vervorming van de hoofddraagstructuur in gedeeltelijke mate volgen.
- De mate waarin het caisson de vervorming volgt hangt af van de verhouding van de stijfheid van de hoofddraagconstructie zelf, die van het caisson en die van de steunen.
- Een onverstijfd paneel volgt exact de doorbuiging van de hoofddraagstructuur
- Een verstijfd paneel zonder openingen reduceert de doorbuiging van de hoofddraagstructuur in het midden van de overspanning met ongeveer 10%. Daarbij ontstaat tussen het caisson en de hoofddraagstructuur een opening van ongeveer 9mm (1/700).
- Een verstijfd paneel met openingen reduceert de doorbuiging van de hoofddraagstructuur in het midden van de overspanning met ongeveer 5%. Daarbij ontstaat tussen het caisson en de hoofddraagstructuur een opening van iets minder dan 7mm (1/900).
- In beide gevallen zakt het caisson dus gedeeltelijk mee met de hoofddraagstructuur.
- De spanningen in de bovenplaten van de ankers en de krachten in de schroefverbindingen kunnen hierbij aanzienlijk worden in die mate dat ze de weerstand kunnen overtreffen. Dit effect komt in de huidige ontwerpmethodiek helemaal niet tot uiting.
- De verticale stijfheid van de steun is heel wat minder dan oorspronkelijk begroot. Bovendien is er een zeker initiële slip in de verbinding en reageert de verbinding niet hetzelfde in trek en druk. Wat hierbij de referentietoestand is, is in praktijk niet gekend aangezien er zich altijd toleranties zullen voordoen waardoor de schroeven steeds in meerdere of mindere mate worden aangetrokken.

6. Confrontatie berekeningen en testprogramma

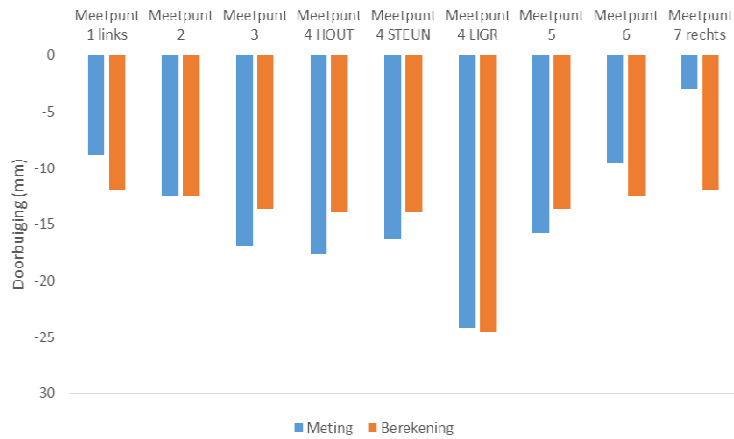
Een confrontatie tussen de berekeningen van 4 en de metingen van 5 werd uitgevoerd. Voor de overeenkomst werden de lineair elastische berekeningen bij 208.7kN van deel 4 vermenigvuldigd met 1,078 om overeen te komen met de waarden bij 225 kN van deel 5.

Gezien de stijfheid van de steunen zoals blijkt uit deel 5 afhankelijk is van de richting van de belasting en de aangelegde belasting kan geen volledige overeenkomst tussen berekening en meting geambieerd worden. Bovendien zijn er bepaalde onzekerheden i.v.m. de werkelijke eigenschappen van de stijlen, regels, beplating, vernageling, Het zou veel te ver gaan al deze invloeden proberen te kwantificeren. In wat volgt wordt voor deze parameters uitgegaan van de basiswaarden. Enkel de stijfheid van de steunen wordt gevarieerd. De beste overeenkomst voor zowel krachten als doorbuigingen werd gevonden bij een stijfheid van ongeveer 500 N/mm, een nog kleinere stijfheid dan berekend op basis van de individuele metingen op de steunen.



Figuur 6.1: confrontatie meting vs berekening : doorbuigingen zonder openingen

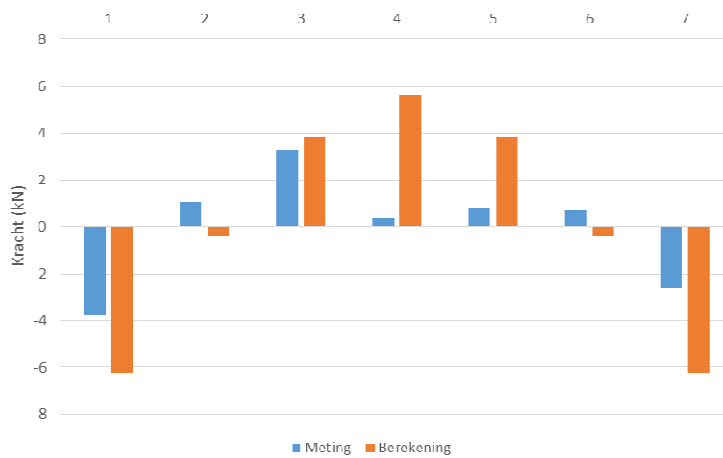
Figuren 6.1 t.e.m. 6.4 geven de resultaten weer voor de confrontaties tussen metingen en berekeningen voor de doorbuigingen en de krachten voor de gevallen met en zonder openingen.



Figuur 6.2 : confrontatie meting vs berekening : doorbuigingen met openingen



Figuur 6.3 : confrontatie meting vs berekening : krachten zonder openingen



Figuur 6.4 : confrontatie meting vs berekening : krachten met openingen

Conclusies m.b.t. de confrontatie tussen berekeningen en metingen :

- Een vergelijking tussen de metingen en de berekeningen geeft een aanvaardbare overeenkomst tussen de rekenresultaten en de metingen. Een betere overeenkomst kan moeilijk verwacht worden gezien de vereenvoudiging in de berekeningen en de hoge mate van statische onbepaaldheid van de constructie. Geen enkele van de verbindingen zijn in realiteit werkelijke scharnieren of volledige stijve verbindingen. Toch zullen zij allen een invloed hebben op de totale vervorming en de onderlinge krachten. Bovendien kunnen niet-lineaire elementen en niet buigings- of normaalkracht gebaseerde vervormingen, bijvoorbeeld schuifvervormingen moeilijk door eenvoudige software geïmplementeerd worden. Dit kan van een ontwerper dan ook niet verwacht worden.
- De inschatting van de stijfheid van de steunen blijft een kritisch punt in de berekening.

7. Algemene conclusies

In deze studie werden volgende onderzoeksvragen bekeken.

1. Verankeringen van houten gevelelementen worden individueel en per project ontworpen (en vaak gefabriceerd), ook op de werf is de installatie arbeidsintensief en bovendien is de invloed van de tolerantie zeer groot (4cm op plan, 0-7cm in realiteit). Wat zijn de eisen te stellen aan deze verankeringen, wat zijn de krachswerkingen die optreden, wat is de invloed van de toleranties, zijn er vereenvoudigde oplossingen mogelijk en wat is de invloed van deze verankeringen op de vervormingen van de prefab panelen?
2. Wat is de relatie van de vervormingen van een houten gevelement in het vlak tot de vervormingen van het structurele (beton)element waar het in verankerd is? De vraag stelt zich in het bijzonder wanneer deze vervormingen op opeenvolgende verdiepingen grondig verschillend zijn, waardoor panelen van opeenvolgende verdiepingen elkaar kunnen raken, dan wel er onaanvaardbare verticale openingen zouden kunnen ontstaan tussen de panelen.

Onderzoeksvraag 1

Allereerst werden de in Vlaanderen gangbare manier van verankering van uitkragende prefab gevelpanelen geschikt voor renovatiedoeleinden geschetst, samen met een vereenvoudigde rekenmethodiek en een daarop gebaseerde parameterstudie. Hieruit blijkt duidelijk het belang van de afstand tussen de voorzijde van de vloer en de achterzijde van het caisson. Er werd een aanvankelijke inschatting gemaakt van de verticale stijfheid van deze steunen die een belangrijke parameter zal blijken in de analyse van de vervorming van het caisson in relatie tot de hoofddragstructuur. Tenslotte werden enkele op de markt beschikbare hoekijzers toegelicht.

Er blijkt duidelijk dat met de huidig gebruikte verankeringsmiddelen de invloed van de tolerantie inderdaad groot is. Er zijn op de markt geen echte alternatieven aanwezig die volledig aan de vraag beantwoorden, al komen er een aantal wel in de buurt.

Onderzoeksvraag 2

Om aan deze vraag een antwoord te bieden is een 2D rekenmodel aangegeven. Hierin komen een groot aantal geometrische en materiaaltechnische parameters in voor. De uitgevoerde parameterstudie geeft helder aan dat alle beschouwde parameters in min of meerdere mate belangrijk zijn voor de bepaling van de mate waarin

- de doorbuiging van de draagbalk vermindert
- het caisson meebeweegt met de draagbalk
- de trek- en drukkrachten in de verbindingen toe- of afnemen

De invloed is echter niet van elke parameter even groot. In wat volgt worden de parameters met geringe invloed gescheiden van deze met een grote invloed. Onderstaande tabel geeft in het kort het belang van de onderzochte parameters weer. Uiteraard is de toepasbaarheid ervan beperkt tot het onderzochte gebied.

Kleine invloed	Middelgrote invloed	Grote invloed
Hoogte	Uitgestelde vervorming	Lengte caisson
Gamma	Beplating	Stijfheid steunen
Dikte caisson	Grote openingen	Stijfheid draagbalk
Houtkwaliteit		
Kleine openingen		

Bij overschrijden van de maximale spanning in de gebruikte steunen kan mogelijks een plastisch scharnier ontstaan. In dat geval zal de stijfheid van de verbinding tot quasi nul herleid worden. Bij voldoende eigen stijfheid van het caisson (geen zeer grote openingen) zal het caisson dan zijn vorm zo goed als behouden en de gemiddelde doorbuiging van de balk aannemen zonder noemenswaardige weerstand te bieden. Dit komt neer op ongeveer 64% van de maximale doorbuiging van het structurele element waarop het verankerd is. In de uitgevoerde parameterstudie (maximale lengte 12m) komen verticale doorbuigingen van het caisson groter 25mm zo goed als niet voor alhoewel het in uitzonderlijke omstandigheden wel mogelijk is.

Ter verificatie van het rekenmodel werden enkele testen uitgevoerd. De meest relevante conclusies hiervan (enkel geldig voor de geteste configuratie) zijn :

- Een verstijfd paneel zonder openingen reduceert de doorbuiging van de hoofddraagstructuur in het midden van de overspanning met ongeveer 10%. Daarbij ontstaat tussen het caisson en de hoofddraagstructuur een opening van ongeveer 9mm ($l/700$).
- Een verstijfd paneel met openingen reduceert de doorbuiging van de hoofddraagstructuur in het midden van de overspanning met ongeveer 5%. Daarbij ontstaat tussen het caisson en de hoofddraagstructuur een opening van iets minder dan 7mm ($l/900$).
- De spanningen in de bovenplaten van de ankers en de krachten in de schroefverbindingen kunnen hierbij aanzienlijk worden in die mate dat ze de weerstand kunnen overtreffen. Dit effect komt in de huidige ontwerpmethodiek helemaal niet tot uiting.
- De verticale stijfheid van de steun is heel wat minder dan oorspronkelijk begroot. Bovendien is er een zeker initiële slip in de verbinding en reageert de verbinding niet hetzelfde in trek en druk. Wat hierbij de referentietoestand is, is in praktijk niet gekend aangezien er zich altijd toleranties zullen voordoen waardoor de schroeven steeds in meerdere of mindere mate worden aangetrokken.

Deze laatste conclusie is bijzonder belangrijk bij een confrontatie tussen berekeningen en metingen :

- Een vergelijking tussen de metingen en de berekeningen geeft een aanvaardbare overeenkomst tussen de rekenresultaten en de metingen. Een betere overeenkomst kan moeilijk verwacht worden gezien de vereenvoudiging in de berekeningen en de hoge mate van statische onbepaaldheid van de constructie. Geen enkele van de verbindingen zijn in realiteit werkelijke scharnieren of volledige stijve verbindingen. Toch zullen zij allen een invloed hebben op de totale vervorming en de onderlinge krachten. Bovendien kunnen niet-lineaire elementen en niet buigings- of normaalkrachtgebaseerde vervormingen, bijvoorbeeld schuifvervormingen moeilijk door eenvoudige software geïmplementeerd worden. Dit kan van een ontwerper dan ook niet verwacht worden.
- De inschatting van de stijfheid van de steunen blijft een kritisch punt in de berekening.

In een algemene conclusie kan gesteld worden dat onderzoeksvragen 1 en 2 relevant zijn en dat niet zomaar een direct antwoord kan worden gegeven. De getoonde rekenmodellen kunnen een ontwerper wel hulp bieden bij het geven van een antwoord op de gestelde vragen en de conclusies kunnen hulp bieden bij de initiële inschatting van de relevantie van de vraag. De werkelijke doorbuigingen en krachtswerkingen kunnen met de rekenmodellen zoals gebruikelijk in bouwkundige toepassingen enkel benaderd worden ingeschat. Ten opzichte van de huidige situatie waarbij ze niet worden berekend is dit zeker een verbetering.