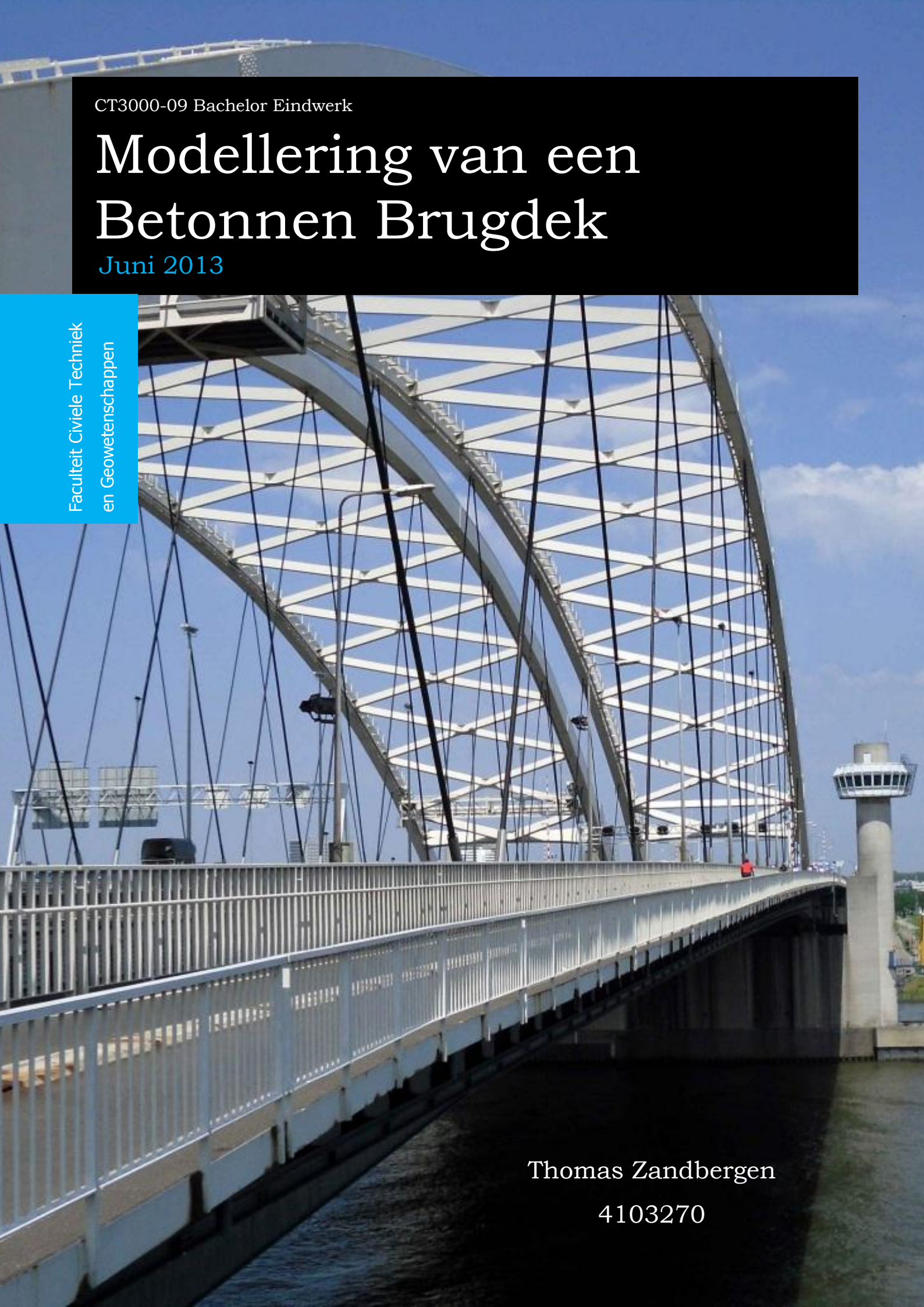
CT3000-09 Bachelor Eindwerk

Modellering van een Betonnen Brugdek

Juni 2013



Faculteit Civiele Techniek
en Geowetenschappen

Thomas Zandbergen

4103270

Modellering van een Betonnen Brugdek

Thomas Zandbergen
4103270



Eindrapportage
CT3000-09 | Bachelor Eindwerk
Bachelor Civiele Techniek, TU Delft
Periode 4 studiejaar 2012/2013
juni 2013

Begeleiders:
Dr. Ir. S.A.A.M. Fennis
Dr. Ir. P.C.J. Hoogenboom

Voorwoord

Voor u ligt het eindrapport van een onderzoek naar verschillende computermodelleringen van de Van Brienenoordbrug. Dit onderzoek is uitgevoerd in het kader van het Bachelor Eindwerk van de studie Civiele Techniek aan de Technische Universiteit Delft.

In een periode van zeven weken is er gekeken naar verschillende modelleringen van een brugdek met behulp van de modelleringsprogramma's SCIA Engineer en MatrixFrame.

Tijdens dit onderzoek werd ik begeleid door Dr. Ir. S.A.A.M. Fennis en Dr. Ir. P.C.J. Hoogenboom. Daarnaast heb ik veel gebruik gemaakt van de informatie van dhr. A. Bosman. Graag wil ik hen allen bedanken voor hun uitleg, kritieken en adviezen.

Het was voor mij een uitdagend en leerzaam project. Ik wens de lezer dan ook veel plezier toe met het lezen van dit rapport.

Delft, 14 juni 2013

Thomas Zandbergen

Samenvatting

In het Stevinlab staat een schaalmodel van de Van Brienenoordbrug. Op dit schaalmodel zijn verschillende experimenten uitgevoerd om het gedrag van het brugdek te onderzoeken.
Om een beeld te kunnen vormen van dit gedrag, zijn drie verschillende computermodellen gemaakt: een plaatmodel en een 3D model in SCIA Engineer en een raamwerkmodel in MatrixFrame. Vervolgens werd er gekeken of met deze eenvoudige modelleringen al nauwkeurige resultaten gevonden konden worden. Dit werd gedaan door de verkregen oplegreacties, veroorzaakt door twee verschillende belastingsgevallen, te vergelijken met de werkelijke experimentresultaten. Hieruit bleek het 3D model met een afwijking van 31% het meest in de buurt te komen. In het plaatmodel waren de oplegreacties wat geleidelijker verdeeld, aangezien hier alleen de buigstijfheden van de liggers en dwarsbalken werden toegepast, en er geen rekening werd gehouden met de ligging van de liggers en de dwarsbalken. Het raamwerkmodel toonde de grootste afwijkingen. De spreiding van de belasting in een vlak raamwerk bleek veel af te wijken van de verspreiding in een plaat: in het raamwerk werd een veel groter deel van de belasting overgedragen naar de buitenste liggers, terwijl in een plaatmodel het grootste deel van de belasting via de ligger direct onder de puntlast naar de opleggingen werd afgedragen. Daarnaast zorgde een raamwerkmodellering met een zekere hoogte voor onrealistische verplaatsingen, die de krachtsverdeling beïnvloedden. Dit zou waarschijnlijk verholpen kunnen worden door extra staven toe te passen, maar wegens een staaflimiet in de studentenversie van MatrixFrame was dit voor dit project niet mogelijk.
Hierna volgde een parameterstudie. Voor deze parameterstudie werd gebruik gemaakt van het 3D model. Tijdens deze parameterstudie werden de geometrische eigenschappen (de afmetingen van de liggers, dwarsbalken en plaat) gevarieerd, om te kunnen zien hoeveel invloed deze hebben op de oplegreacties en de maximale zakking. Hetzelfde werd gedaan met de druksterkte van het beton, de veerstijfheden van de opleggingen en de voorspanningen. Uit de resultaten van de parameterstudie bleken vooral de afmetingen veel invloed te hebben op het gedrag van het brugdek. De voorspanningen en de druksterktes zorgden voor geen enkele verandering in de oplegreacties.
Tenslotte werd er nog gekeken naar de afwijkingen tussen het 3D model in SCIA en de experimentresultaten. Aan de hand van de parameterstudie bleek dat deze beperkt konden worden door de dikte van de plaat toe te laten nemen. Later bleek echter dat dit weinig nut zou hebben, aangezien de afwijkingen in de experimentresultaten vele malen groter bleken te zijn dan in de modellering.

Inhoudsopgave

VOORWOORD **4**

SAMENVATTING **5**

INHOUDSOPGAVE **6**

1. INLEIDING **8**

1.1 PROBLEEMSTELLING 8
1.2 DOELSTELLING 9
1.3 AANPAK 9

2. EXPERIMENT **10**

2.1 OMSCHRIJVING PROEFOPSTELLING 10
2.2 BEKNOPTE PROEFBESCHRIJVING 13
2.3 RESULTATEN 14

3. MODELLERINGEN **19**

3.1 GLOBALE AANPAK 19

4. PLAATMODEL IN SCIA **21**

4.1 INVOER GEOMETRIE EN BELASTING 21
4.2 INVLOED VAN DE BUIGSTIJFHEDEN 21
4.3 BENADERING VAN DE WERKELIJKE SITUATIE 25
4.4 RESULTATEN 28

5. 3D MODEL IN SCIA **30**

5.1 INVOER GEOMETRIE 30
5.2 INVOER BELASTING 32
5.3 RESULTATEN 34

6. MATRIXFRAME MODEL **36**

6.1 INVOER GEOMETRIE EN BELASTING 36
6.2 RESULTATEN 42

7. VERGELIJKEN VAN DE RESULTATEN **43**

8. PARAMETERSTUDIE **47**

8.1 GEOMETRIE 47
8.1.1 Hoogte van de T-ligger 47
8.1.2 Breedte van de T-ligger 49
8.1.3 Hoogte van de dwarsbalk 50

8.1.4 Breedte van de dwarsbalk *50*
8.1.5 Dikte van de plaat *53*
8.2 BETONSOORT 53
8.3 VEERSTIJFHEID VAN DE OPLEGGINGEN 55
8.3.1 Veerstijfheid in de z-richting *55*
8.3.2 Veerstijfheid in de x- en y-richting *57*
8.4 VOORSPANNING 58
9. ADVIEZEN VOOR EEN MODELLERING IN SCIA 62
10. CONCLUSIE 64
BRONVERMELDING 65
BIJLAGEN 66
A. MEETRESULTATEN 66
B. RESULTATEN PARAMETERSTUDIE 69
C. COMPRESSION TEST OF RUBBER BEARING (BOSMAN, A.) 76

1. Inleiding

De eerste brug van spanbeton in Nederland werd gebouwd in 1951. Tegenwoordig, ruim 60 jaar later, telt ons land ongeveer 40.000 betonnen bruggen en viaducten. Men zou denken dat er in al die jaren veel kennis is opgedaan op het gebied van deze bruggen en dat het voorspellen van het gedrag van een brugdek tegenwoordig zeer gemakkelijk gaat. Dit valt echter behoorlijk tegen.
Neem bijvoorbeeld de Hollandse Brug. Deze brug, die Flevoland met Noord-Holland verbindt, heeft een brugdek bestaande uit vier T-liggers met tussenstorts. Dit type brugdek is al in de jaren vijftig ontwikkeld. Ruim vijf jaar geleden werd deze brug gesloten op advies van TNO. Volgens TNO zou de voorspanning in de voorspankabels die de tussenstorts samendrukken met 50% afgenomen zijn, waardoor de tussenstorts minder belasting aan zouden kunnen. Deze haastige beslissing leidde tot veel kritiek. Het besluit werd genomen aan de hand van onvolledige metingen en berekeningen. Volgens sommige experts zou een verdikking van het brugdek niet nodig zijn.
Hieruit komt duidelijk naar voren dat er omtrent het gedrag van een brugdek nog veel twijfel bestaat en dat het lastig is om deze nauwkeurig te modelleren. Nauwkeurige modelleringen zouden echter miljarden kunnen besparen.

1.1 Probleemstelling

Waar het tijdens de sluiting van de Hollandse Brug vooral om ging, was de sterkte van de tussenstorts. Deze tussenstorts hebben een dikte van slechts 20 cm. De vraag is hoe deze tussenstorts gemodelleerd dienen te worden. Volgens TNO zouden de tussenstorts vijf jaar geleden namelijk te zwak zijn. Zij gingen uit van een model waarbij de uiteinden van een tussenstort vrij kunnen bewegen tijdens doorbuiging. Dit model wordt nu echter in twijfel getrokken, doordat er hier op de TU Delft een rekenmodel met gewelfwerking is geïntroduceerd. Door gewelfwerking (de uiteinden van een tussenstort kunnen niet vrij bewegen bij doorbuiging) zouden de tussenstorts namelijk veel sterker zijn dan eerder werd voorspeld.

In het Stevinlab staat een schaalmodel van de Van Brienenoordbrug. Het type dek van deze brug komt overeen met het dek van de Hollandse Brug. Op dit schaalmodel worden verschillende proeven uitgevoerd om het gedrag van het brugdek te onderzoeken. Uit de proeven blijkt dat de oplegreacties al anders zijn dan verwacht. Waaraan dit precies ligt, is onbekend. Om het gedrag te verklaren, kunnen 3D modelleringen worden toegepast. Een voorbeeld hiervan is een plaatmodel in SCIA Engineer, waarvan bij dit project onder andere

gebruik gemaakt zal worden. Allereerst wordt er geprobeerd om de modelleringen zo veel mogelijk overeen te laten komen met de proefresultaten. Vervolgens wordt er gevarieerd met verschillende parameters uit de modelleringen, zoals diktes, vrijheidsgraden en sterktes. Hieruit kan dan een beeld gevormd worden in hoeverre deze parameters invloed hebben op de krachtswerking van het brugdek. Of deze aanpak in SCIA Engineer geschikt is, is onbekend. Ook is het nog onbekend of er met programma's zoals MatrixFrame, een nauwkeurigere modellering verkregen kan worden.

1.2 Doelstelling

Het doel van dit project is dan ook om te kijken of relatief eenvoudige modelleringen al een nauwkeurig beeld van de werkelijke situatie kunnen vormen. Het gaat hierbij om drie verschillende modelleringen, namelijk:

- een plaatmodel in SCIA Engineer
- een raamwerkmodel in MatrixFrame
- een 3D model in SCIA Engineer

Verder is het de bedoeling om te onderzoeken welke parameters invloed hebben op het gedrag van het brugdek en ik welke mate.

1.3 Aanpak

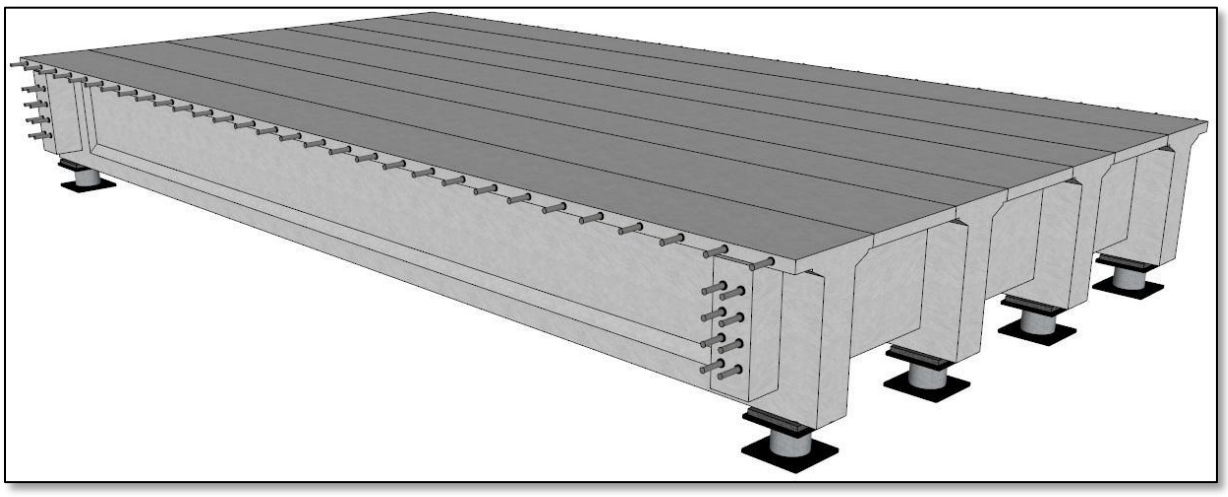
Het schaalmodel zal zowel in SCIA Engineer als in MatrixFrame gemodelleerd worden. De verdeling van de oplegreacties zullen met de proefresultaten vergeleken worden. Met behulp van deze resultaten, zal er gekeken worden naar eventuele eenvoudige aanpassingen van de modelleringen, waarmee de resultaten van deze modelleringen te verbeteren zijn. Vervolgens zou te zien kunnen zijn welke van de drie bovenstaande modelleringen het nauwkeurigste beeld van de werkelijkheid vormt.

Daarna wordt met deze modellering een parameterstudie uitgevoerd. Verschillende grootheden worden gevarieerd, waarna de resultaten vergeleken worden met de resultaten van het oorspronkelijke model. Zo moet er een beeld gevormd worden in hoeverre deze parameters invloed hebben op het gedrag van het brugdek.

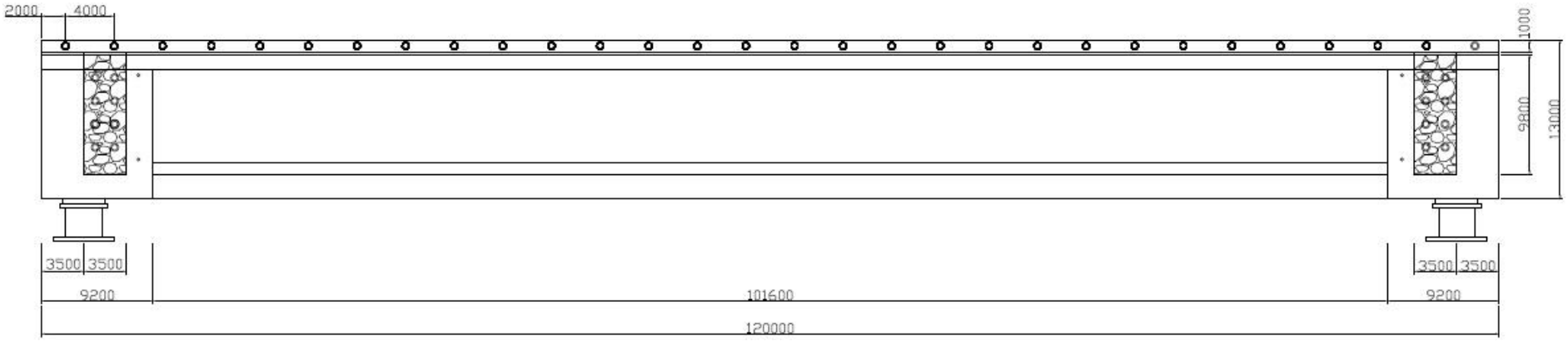
2. Experiment

2.1 Omschrijving proefopstelling

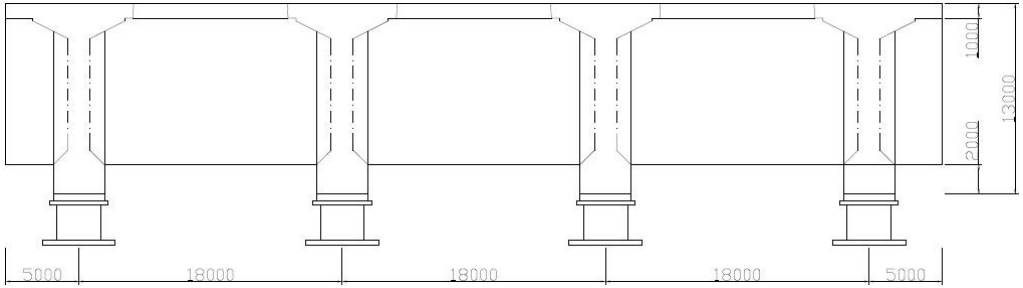
In figuur 1 is een tekening van het schaalmodel weergegeven. De oppervlakte van het brugdek bedraagt 12 bij 6,4 meter. Het is opgebouwd uit vier prefab T-liggers, met daartussen in het werk gestorte tussenstorts. Te zien is dat de T-liggers geen doorlopende doorsnede hebben. Zowel aan het begin als aan het eind van de overspanning, over een lengte van 920 millimeter, zijn de liggers breder dan de tussenliggende 10,16 meter. Ook is er te zien dat alleen de binnenste twee liggers een symmetrische doorsnede hebben; bij de buitenste twee liggers loopt het bovenste gedeelte verder naar buiten. Alle vier de liggers zijn voorgespannen met lineaire strengen. Voor de ligging en het zwaartepunt van deze strengen, zie figuur 6. Daarnaast lopen er in de breedte dertig voorspanelementen om de tussenstorts samen te drukken. De T-liggers zelf worden door twee voorgespannen dwarsbalken bijeen gehouden.
Het beton van de T-liggers en de dwarsbalken is van de betonsterkteklasse C53/65. De betonsterkteklasse van de tussenstorts is C45/55. De opleggingen bestaan uit drukdozen met een maximum van 1000 kN. Op deze drukdozen zijn speciale scharnieren bevestigd, die ervoor zorgen dat het oppervlak van de opleggingen parallel blijft aan dat van de liggers. Tussen de liggers en de opleggingen bevindt zich nog een laag teflon om te voorkomen dat er wrijving tussen de liggers en de opleggingen plaatsvindt. De vrijheden zijn niet voor alle opleggingen hetzelfde. Zo zijn sommige opleggingen vrij in x en y richting, terwijl anderen zich enkel in de y-richting kunnen verplaatsen.
In figuren 2 t/m 6 zijn alle afmetingen en vrijheidsgraden weergegeven.



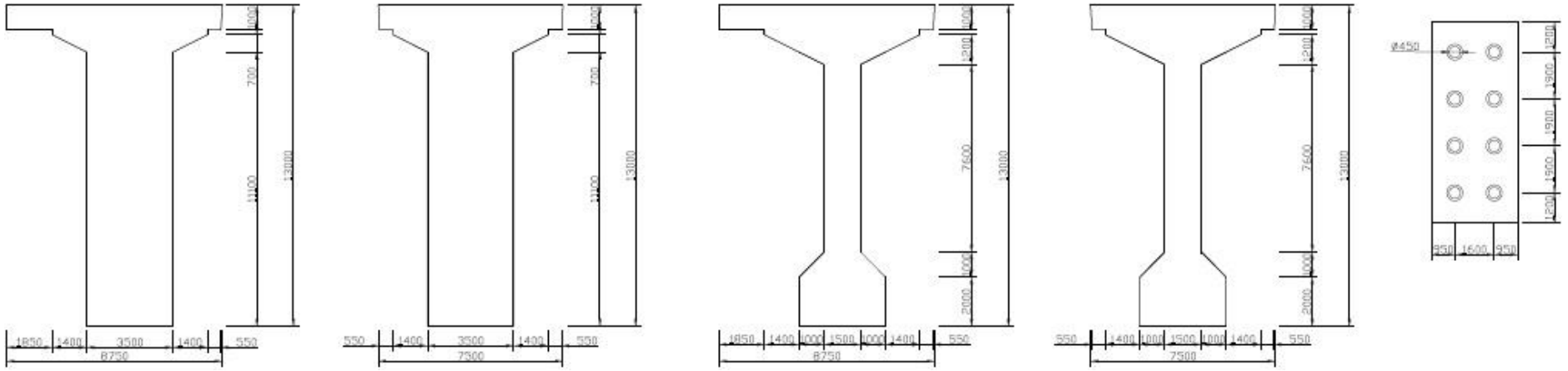
Figuur 1 *Sketch Up tekening van het schaalmodel*



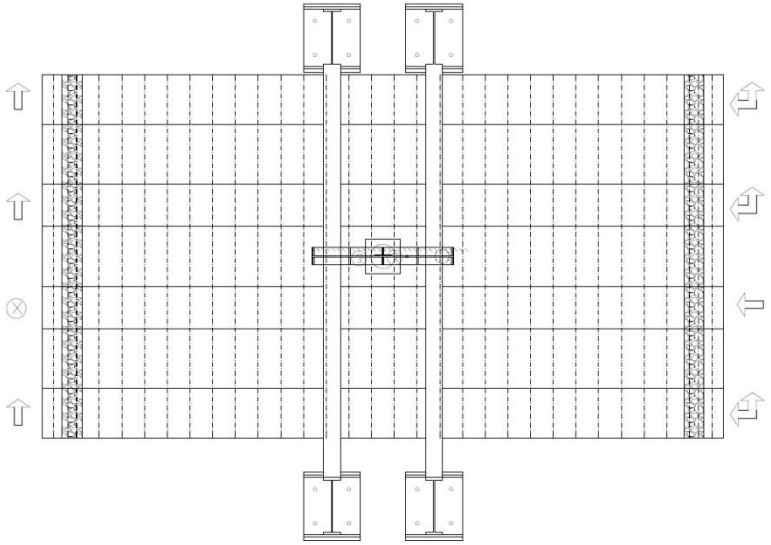
Figuur 2 *Zijaanzicht van het schaalmodel (AutoCAD, getekend door A. Bosman)* OPMERKING: *De afmetingen van de dwarsbalken kloppen hier niet; voor de exacte afmetingen, zie figuur 4*



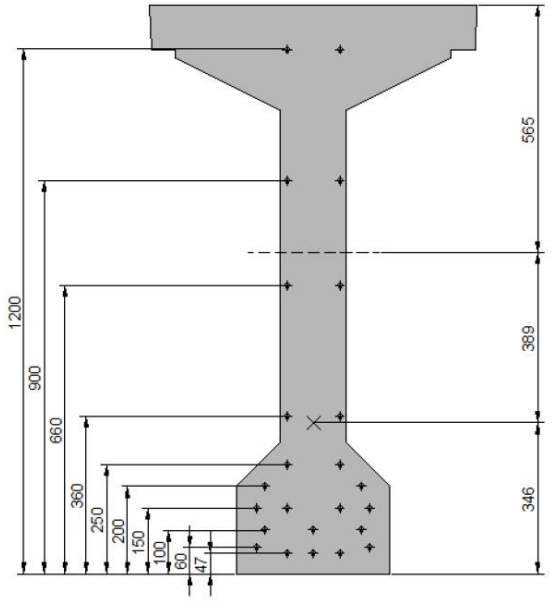
Figuur 3 *Vooraanzicht van het schaalmodel (AutoCAD, getekend door A. Bosman)*



Figuur 4 *Doorsnedes van de T-liggers en de dwarsbalken (AutoCAD)*



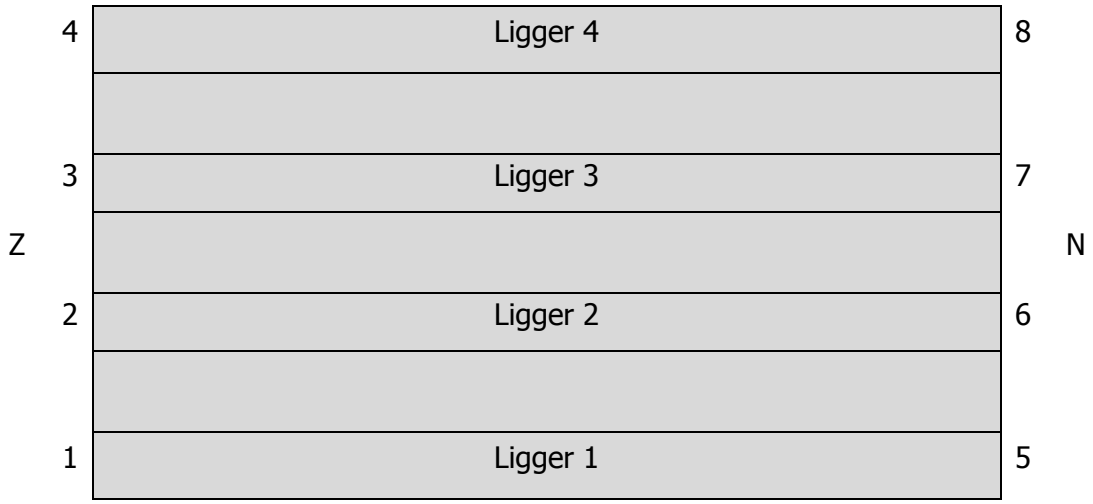
Figuur 5 *Opleggingsvrijheden (AutoCAD, getekend door A. Bosman)*



Figuur 6 *Verdeling van de strengen in de T-ligger*

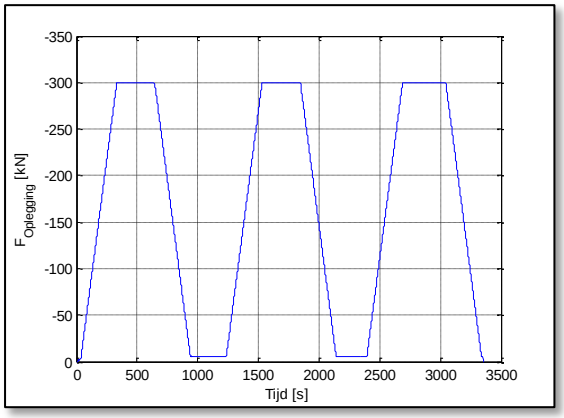
2.2 Beknopte proefbeschrijving

In dit rapport wordt er gekeken naar de gevolgen van de puntlast recht boven oplegging 6 en de puntlast in het midden van ligger 2, aangegeven met $F_{oplegging}$ en F_{ligger}. De nummering van de liggers en de opleggingen is hieronder weergegeven. Daarnaast is met N en Z de noord- en zuidzijde aangegeven.

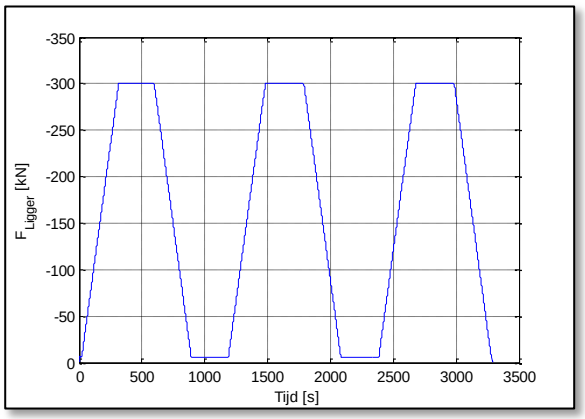


Figuur 7 *Nummering van de liggers en de opleggingen*

Tijdens de proeven in het Stevinlab liet men deze puntlasten binnen 5,5 minuut oplopen van 0 kN tot ongeveer -300 kN. Hierna bleef de puntlast voor 5 minuten constant en vervolgens liet men de puntlast weer afnemen. Dit proces werd drie keer uitgevoerd. De belastingsfases zijn weergegeven in figuur 8 en 9.



Figuur 9 *$F_{Oplegging}$ uitgezet tegen de tijd*



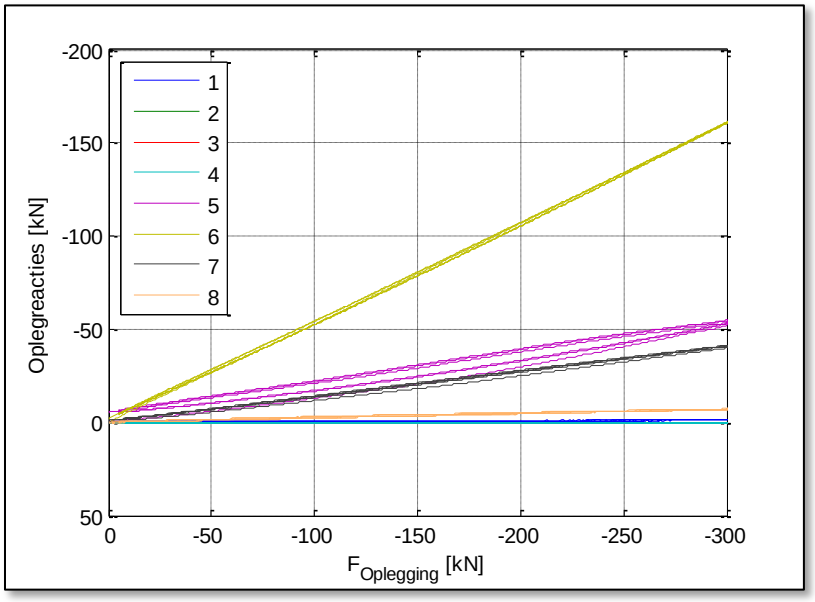
Figuur 8 *F_{Ligger} uitgezet tegen de tijd*

Tijdens dit proces werden verschillende grootheden (zoals de verplaatsing onder de puntlast, de verplaatsingen van de rubbers op de opleggingen, de buiging van de liggers en de oplegreacties) gemeten met behulp van rekstrookjes en lasers. In dit rapport zal er hoofdzakelijk aandacht worden besteed aan de oplegreacties.

2.3 Resultaten

In figuur 10 is een grove grafiek te zien van het verloop van de oplegreacties ten gevolge van de puntlast boven oplegging 6. De grafiek bestaat uit rechte lijnen. Dit betekent dat de oplegreacties lineair verlopen. Dit komt doordat men $F_{Oplegging}$ slechts tot -300 kN heeft toe laten nemen. Wanneer men deze puntlast nog verder op zou laten lopen, zou op een gegeven moment het beton gaan bezwijken, waardoor er geen sprake meer zou zijn van een lineair verloop.

Opvallend in deze grafiek is dat bij oplegging 5 wat afwijkingen te zien zijn. Halverwege de toename van $F_{Oplegging}$ verschillen de waardes van de oplegreacties. Oftewel: op de verschillende momenten dat $F_{Oplegging}$ -150 kN bedroeg, had de oplegreactie hier niet steeds dezelfde waarde. Maar bij een belasting van -300 kN komen de lijnen van oplegging 5 weer bijeen. Hier komen de oplegreacties van de verschillende tijdstippen dus meer met elkaar overeen.



Figuur 10 *De oplegreacties uitgezet tegen $F_{Oplegging}$*

Om de oplegreacties gedetailleerder te kunnen bekijken, staat op de volgende bladzijde een tabel met de waardes van de oplegreacties op bepaalde punten van de drie belastingsfases. Per belastingsfase is er gekeken naar drie verschillende momenten: het moment wanneer de puntlast tijdens het oplopen -150 kN bedroeg, het moment waarop de maximale puntlast van -300 kN is bereikt en het moment waarop de puntlast tijdens de afname -150 kN bedroeg. Daarnaast is voor iedere oplegreactie de verhouding tussen de oplegreactie en de puntlast aangegeven. Duidelijk moge zijn dat het eigengewicht niet in de metingen is opgenomen.

Tabel 1 *Oplegreacties ten gevolge van de puntlast boven oplegging 6*

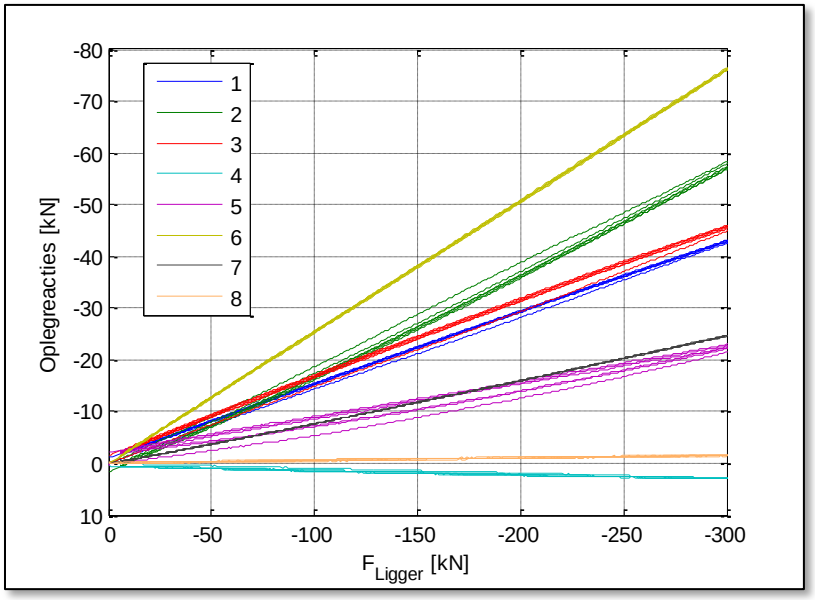
Belastingsfase 1		**Opl. 1**	**Opl. 2**	**Opl. 3**	**Opl. 4**	**Opl. 5**	**Opl. 6**	**Opl. 7**	**Opl. 8**	**Totaal**
-150,62 kN	Oplegreactie [kN]	-0,57906	0,172201	0,061288	0,041865	-20,7257	-80,0254	-18,2038	-3,708	-122,967
	Percentage van puntlast	0%	0%	0%	0%	14%	53%	12%	2%	82%
-300,05 kN	Oplegreactie [kN]	-1,15079	0,315987	0,271597	-0,00302	-51,8302	-161,356	-40,0003	-7,20223	-260,955
	Percentage van puntlast	0%	0%	0%	0%	17%	54%	13%	2%	87%
-150,35 kN	Oplegreactie [kN]	-0,71956	0,12851	0,197191	0,071066	-29,1608	-78,9628	-20,7958	-4,20002	-133,442
	Percentage van puntlast	0%	0%	0%	0%	19%	53%	14%	3%	89%

Belastingsfase 2		**Opl. 1**	**Opl. 2**	**Opl. 3**	**Opl. 4**	**Opl. 5**	**Opl. 6**	**Opl. 7**	**Opl. 8**	**Totaal**
-150,32 kN	Oplegreactie [kN]	-0,7168	0,175485	0,257676	0,043402	-24,4471	-80,8772	-20,2089	-3,54007	-129,313
	Percentage van puntlast	0%	0%	0%	0%	16%	54%	13%	2%	86%
-300,05 kN	Oplegreactie [kN]	-1,19316	0,336759	0,414088	0,013326	-52,7893	-161,158	-40,8012	-6,98915	-262,166
	Percentage van puntlast	0%	0%	0%	0%	18%	54%	14%	2%	87%
-150,40 kN	Oplegreactie [kN]	-0,78272	0,13598	0,261308	0,051988	-30,5375	-78,8664	-21,0789	-4,12443	-134,941
	Percentage van puntlast	1%	0%	0%	0%	20%	52%	14%	3%	90%

Belastingsfase 3		**Opl. 1**	**Opl. 2**	**Opl. 3**	**Opl. 4**	**Opl. 5**	**Opl. 6**	**Opl. 7**	**Opl. 8**	**Totaal**
-150,87 kN	Oplegreactie [kN]	-0,7514	0,169454	0,252536	0,071464	-25,0458	-81,0845	-20,501	-3,57979	-130,469
	Percentage van puntlast	0%	0%	0%	0%	17%	54%	14%	2%	86%
-300,04 kN	Oplegreactie [kN]	-1,25852	0,372043	0,455075	-0,01249	-53,2828	-161,04	-41,0857	-6,95584	-262,808
	Percentage van puntlast	0%	0%	0%	0%	18%	54%	14%	2%	88%
-150,61 kN	Oplegreactie [kN]	-0,77181	0,252534	0,364616	0,03326	-31,098	-78,9087	-21,3106	-4,16938	-135,608
	Percentage van puntlast	1%	0%	0%	0%	21%	52%	14%	3%	90%

Wanneer men een oog werpt op bovenstaande tabel, valt er direct iets op. Op geen enkel moment is de totale reactiekracht gelijk aan de puntlast. De som van de oplegreacties is steeds ruim 10% kleiner dan de waarde van de puntlast.
Daarnaast zijn er kleine verschillen te zien tussen de drie momenten van de belastingsfases. Tijdens het afnemen van de puntlast zijn de oplegreacties iets groter dan bij de toename van de puntlast.
Ook zijn er verschillen te zien tussen de drie belastingsfases zelf. De som van de reactiekrachten is steeds iets groter dan bij de voorgaande belastingsfase. Wel is dit verschil tussen belastingsfase 2 en 3 aanzienlijk kleiner dan tussen belastingsfase 1 en 2.
Tenslotte is de tekenverwisseling van oplegreactie 4 opmerkelijk: bij belastingsfase 1 en 3 is er (bij een puntlast van -300 kN) sprake van trekkracht, maar bij belastingsfase 2 is dit een drukkracht.

In figuur 11 is een grove grafiek te zien van het verloop van de oplegreacties ten gevolge van de puntlast op het midden van ligger 2. Het is duidelijk dat de belasting meer verspreid is dan bij het vorige belastingsgeval: de maximale oplegreactie is hier veel kleiner en de oplegreacties van oplegging 1 t/m 4 zijn niet meer verwaarloosbaar klein in verhouding tot de overige reacties.



Figuur 11 *De oplegreacties uitgezet tegen F_{Ligger}*

Ook van dit belastingsgeval zijn verschillende waardes weergegeven in een tabel.

Tabel 2 *Oplegreacties ten gevolge van de puntlast op het midden van ligger 2*

Belastingsfase 1		**Opl. 1**	**Opl. 2**	**Opl. 3**	**Opl. 4**	**Opl. 5**	**Opl. 6**	**Opl. 7**	**Opl. 8**	**Totaal**
-150,36 kN	Oplegreactie [kN]	-21,2322	-28,8322	-21,9906	1,428619	-8,90634	-38,3295	-11,7937	-0,63243	-130,288
	Percentage van puntlast	14%	19%	15%	-1%	6%	25%	8%	0%	87%
-300,30 kN	Oplegreactie [kN]	-42,5372	-58,3153	-44,8436	2,92739	-21,481	-76,4558	-24,634	-1,4426	-266,782
	Percentage van puntlast	14%	19%	15%	-1%	7%	25%	8%	0%	89%
-150,60 kN	Oplegreactie [kN]	-22,2722	-27,1937	-24,1399	1,989829	-11,9554	-38,2156	-11,7946	-0,88219	-134,464
	Percentage van puntlast	15%	18%	16%	-1%	8%	25%	8%	1%	89%

Belastingsfase 2		**Opl. 1**	**Opl. 2**	**Opl. 3**	**Opl. 4**	**Opl. 5**	**Opl. 6**	**Opl. 7**	**Opl. 8**	**Totaal**
-150,12 kN	Oplegreactie [kN]	-22,3287	-26,4006	-23,9454	1,724318	-10,326	-38,2219	-11,8664	-0,75323	-132,118
	Percentage van puntlast	15%	18%	16%	-1%	7%	25%	8%	1%	88%
-300,07 kN	Oplegreactie [kN]	-42,8549	-57,3073	-45,534	2,929372	-22,2243	-76,158	-24,6981	-1,47207	-267,319
	Percentage van puntlast	14%	19%	15%	-1%	7%	25%	8%	0%	89%
-150,49 kN	Oplegreactie [kN]	-22,4844	-26,5525	-24,5613	1,966097	-12,2649	-37,9813	-11,7952	-0,92143	-134,595
	Percentage van puntlast	15%	18%	16%	-1%	8%	25%	8%	1%	89%

Belastingsfase 3		**Opl. 1**	**Opl. 2**	**Opl. 3**	**Opl. 4**	**Opl. 5**	**Opl. 6**	**Opl. 7**	**Opl. 8**	**Totaal**
-150,12 kN	Oplegreactie [kN]	-22,5394	-25,749	-24,3047	1,757684	-10,5487	-38,1452	-11,8062	-0,82566	-132,161
	Percentage van puntlast	15%	17%	16%	-1%	7%	25%	8%	1%	88%
-300,07 kN	Oplegreactie [kN]	-43,047	-56,8456	-45,8534	2,952502	-22,3853	-76,084	-24,7245	-1,53272	-267,52
	Percentage van puntlast	14%	19%	15%	-1%	7%	25%	8%	1%	89%
-150,21 kN	Oplegreactie [kN]	-22,5961	-26,0918	-24,6823	1,91727	-12,5351	-37,804	-11,7594	-0,95232	-134,504
	Percentage van puntlast	15%	17%	16%	-1%	8%	25%	8%	1%	90%

Ook bij dit belastingsgeval valt direct op dat de som van de oplegreacties ruim 10% kleiner is dan de waarde van de puntlast. Daarnaast zijn hier ook verschillen tussen de momenten van de belastingsfases en de belastingsfases zelf. Wel zijn de verschillen bij dit belastingsgeval kleiner dan bij de puntlast boven oplegging 6.
Wat opvalt, is dat bij dit belastingsgeval de oplegreactie van oplegging 4 op elk moment een trekkracht is, in tegenstelling tot het vorige belastingsgeval.

Overige meetresultaten - waaronder de verplaatsing onder de puntlast, de verplaatsingen van de rubbers en de buiging van de liggers - zijn te vinden in de bijlage.

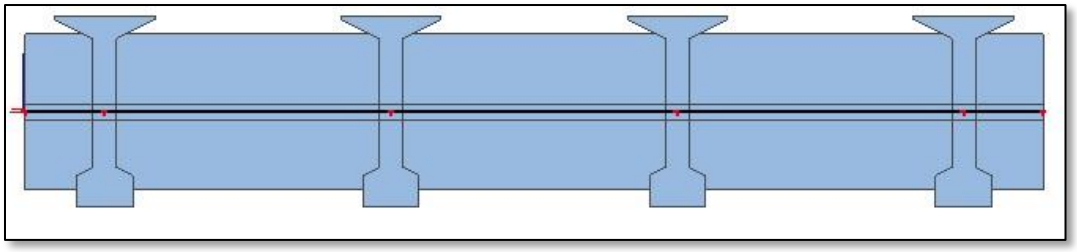
3. Modelleringen

3.1 Globale aanpak

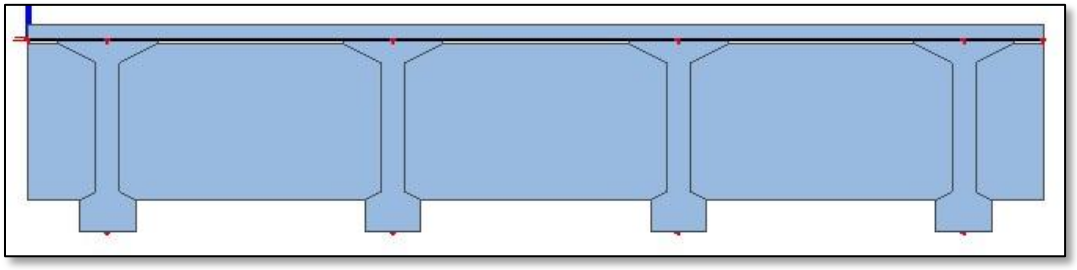
Bij zowel modelleringssoftware als tekensoftware is het de bedoeling om hetgene wat men modelleert of tekent zo nauwkeurig mogelijk met de werkelijkheid overeen te laten komen. Tussen modelleren en tekenen zit echter wel een groot verschil. Wanneer men tekent, gaat het erom dat de vormen en volumes kloppen. Maar wanneer men iets modelleert, gaat het om het gedrag, en niet om vormen en volumes. Dit betekent dat wanneer men iets modelleert, het model voor het oog niet altijd lijkt op de werkelijkheid.

In programma's als SCIA Engineer en MatrixFrame wordt er gewerkt met systeemlijnen. Systeemlijnen zijn de hartlijnen van de liggers en de platen. Het modelleren begint met het invoeren van de doorsnedes. Deze doorsnedes koppelt men later aan de systeemlijnen, zodat deze lijnen bepaalde geometrische eigenschappen krijgen. Wanneer men liggers of platen wilt verbinden, moet men rekening houden met het feit dat de systeemlijnen hartlijnen zijn. Vaak zijn platen en liggers namelijk niet via de hartlijnen met elkaar verbonden (denk bijvoorbeeld aan de liggers onder het brugdek). Als men alleen de systeemlijnen verbindt, verkrijgt men dus een onrealistische situatie (zie figuur 12). Om dit te voorkomen, maakt men gebruik van offsets. Hiermee kan de ligging van de systeemlijn ten opzichte van de doorsnede veranderd worden. Zo verkrijgt men een realistischer beeld (zie figuur 13). Wel moet er goed opgelet worden bij het plaatsen van belastingen. Zo moet men een puntlast onderin een doorsnede niet alleen invoeren als een puntlast, maar moet men ook het moment toevoegen dat wordt veroorzaakt door de excentriciteit van deze puntlast.

Om het schaalmodel van het brugdek te modelleren, moeten dus eerst de doorsnedes en materiaaleigenschappen worden ingevoerd. Om het model niet te complex te maken, is het verstandig om slechts één doorsnede te gebruiken voor de T-liggers. Daarnaast wordt het bovenste deel van de T-ligger weggelaten, omdat dit deel zich in de plaat van het plaatmodel bevindt. Vervolgens dienen de liggingen van de staven en de plaat opgegeven te worden. Hierbij dient gebruik gemaakt te worden van offsets. Als ieder element geplaatst is, kunnen deze elementen met elkaar verbonden worden. Tot slot dienen er opleggingen geplaatst te worden.



Figuur 12 *Modellering zonder offsets*



Figuur 13 *Modellering met offsets*

Na de invoer van de geometrie kunnen de belastingsgevallen ingevoerd worden. Een belastingsgeval die vaak al automatisch is aangemaakt, is het eigengewicht. Bij het modelleren van dit brugdek moeten er ook voorspanningen als belasting ingevoerd worden. Voor lineaire kabels kunnen puntlasten worden gebruikt (en eventueel een moment ten gevolge van de excentriciteit). Voorspanningen van kromlopende voorspanelementen dienen aangegeven te worden met een puntlast, een moment ten gevolge van de excentriciteit én een verdeelde belasting. Deze verdeelde belasting (ook wel "lijnlast") is te berekenen met behulp van de formule: $q_p = \frac{8Pf}{l^2}$

In het schaalmodel van de Van Brienenoordbrug komen echter geen gekromde voorspanelementen voor.
Naast deze twee belastingsgevallen kunnen er nog andere ingevoerd worden, zoals een puntlast boven een oplegging.

Wanneer al deze informatie is ingevoerd, beschikt het programma over voldoende gegevens en kunnen er berekeningen gemaakt worden.

4. Plaatmodel in SCIA

Voordat er een heel brugdekmodel wordt gemaakt, wordt er in SCIA eerst een enkele plaat gemodelleerd. Met behulp van deze plaat wordt er gekeken naar de invloed van de buigstijfheid in zowel dwars- als lengterichting. Ook wordt de invloed van de opleggingen bekeken.

4.1 Invoer geometrie en belasting

Een plaat kan ingevoerd worden via het menu "2D-element". Vervolgens wordt er gevraagd naar de afmetingen van de plaat. Hier is gekozen voor een lengte van 12 m, een breedte van 6,4 m en een dikte van 0,3 m. De dikte komt niet overeen met de werkelijke dikte van het schaalmodel. Deze waarde is hier niet van belang, aangezien er nu gekeken wordt naar het globale gedrag van de plaat en niet naar exacte waardes van bepaalde grootheden. Er is grofweg gekozen voor een dikte van 0,3 meter, omdat er in werkelijkheid zich nog liggers onder het brugdek bevinden.
Na de invoer van de plaat worden 9 interne knopen aangemaakt. Hiervan zijn er 8 nodig om de opleggingen te plaatsen (waarvan één oplegging belast wordt met een puntlast) en 1 knoop dient voor het aanbrengen van een puntlast op het midden van ligger 2.
Via "modelgegevens > steunpunt" kunnen de opleggingen ingevoerd worden. In het steunpuntmenu dienen de vrijheidsgraden ingevoerd te worden. Er zijn twee verschillende types vrijheidsgraden: de X, Y en Z en de Rx, Ry en Rz. De Rx, Ry en Rz staan voor de vrijheid van rotatie in drie verschillende richtingen. Aangezien alle opleggingen kunnen scharnieren, worden deze alle drie ingesteld op "vrij". X, Y en Z staan voor de vrijheid van verplaatsing in drie verschillende richtingen. Voor elke oplegging geldt dat Z vast is; de vrijheden van de overige richtingen zijn weergegeven in figuur 5.
Tenslotte worden er twee belastingsgevallen aangemaakt: één met een puntlast van -300 kN boven oplegging 6 en één met een puntlast van -300 kN op het midden van ligger 2.

4.2 Invloed van de buigstijfheden

Nu alles is ingevuld, kan er gekeken worden naar de buigstijfheid. In SCIA kan men kiezen voor een isotrope of een orthotrope modellering van de plaat. Bij een isotrope modellering zijn de eigenschappen van de plaat in dwars- en lengterichting hetzelfde. Bij een orthotrope modellering verschillen deze.
Om een beeld te kunnen vormen van de invloed van de buigstijfheden in de dwars- en lengterichting, is er eerst een berekening uitgevoerd met een isotrope plaat. Volgens SCIA is de buigstijfheid in beide richtingen standaard gelijk aan 85,078 MNm.

Vervolgens zijn er berekeningen gemaakt met een orthotrope plaat. Wanneer men kiest voor een orthotrope plaat, dient er in SCIA een stijfheidsmatrix ingevuld te worden. Deze matrix luidt: $S_k = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 & 0 & 0 \\ D_{21} & D_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_{33} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D_{55} \end{bmatrix}$

waarin:

D_{11} = buigstijfheid in lengterichting

D_{12} = buigstijfheid in dwarsrichting

D_{22} = stijfheid t.b.v. dwarscontractie

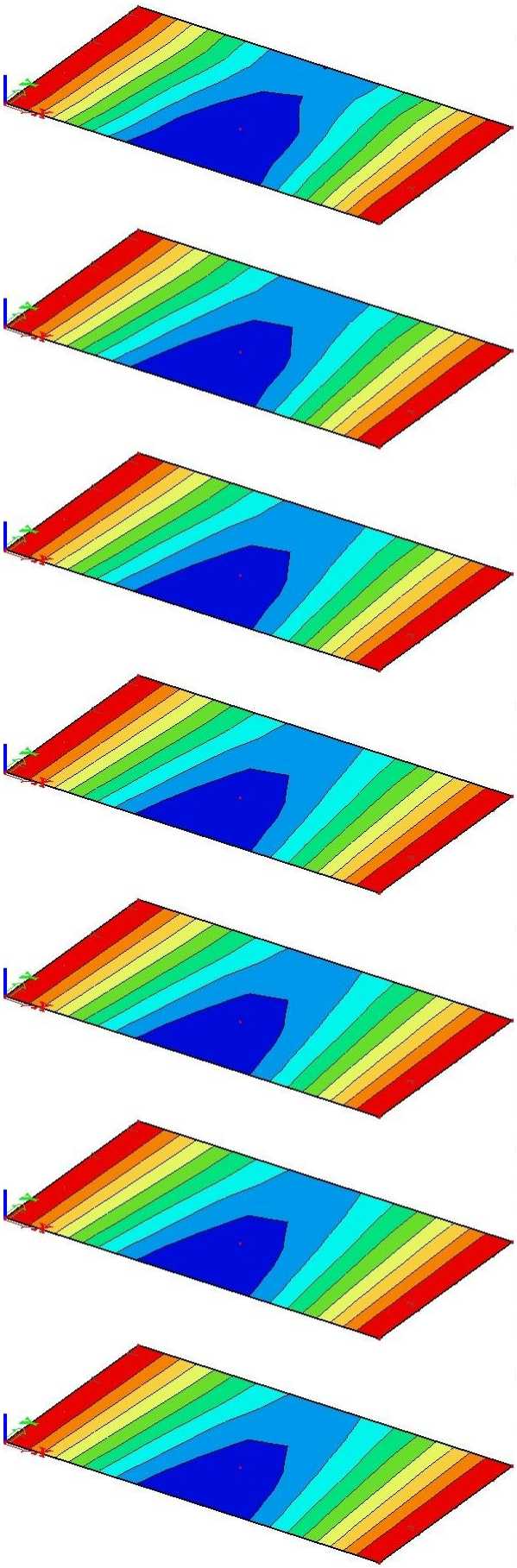
D_{33} = stijfheid t.b.v. wringing

D_{44} = stijfheid t.b.v. dwarskrachtvervorming

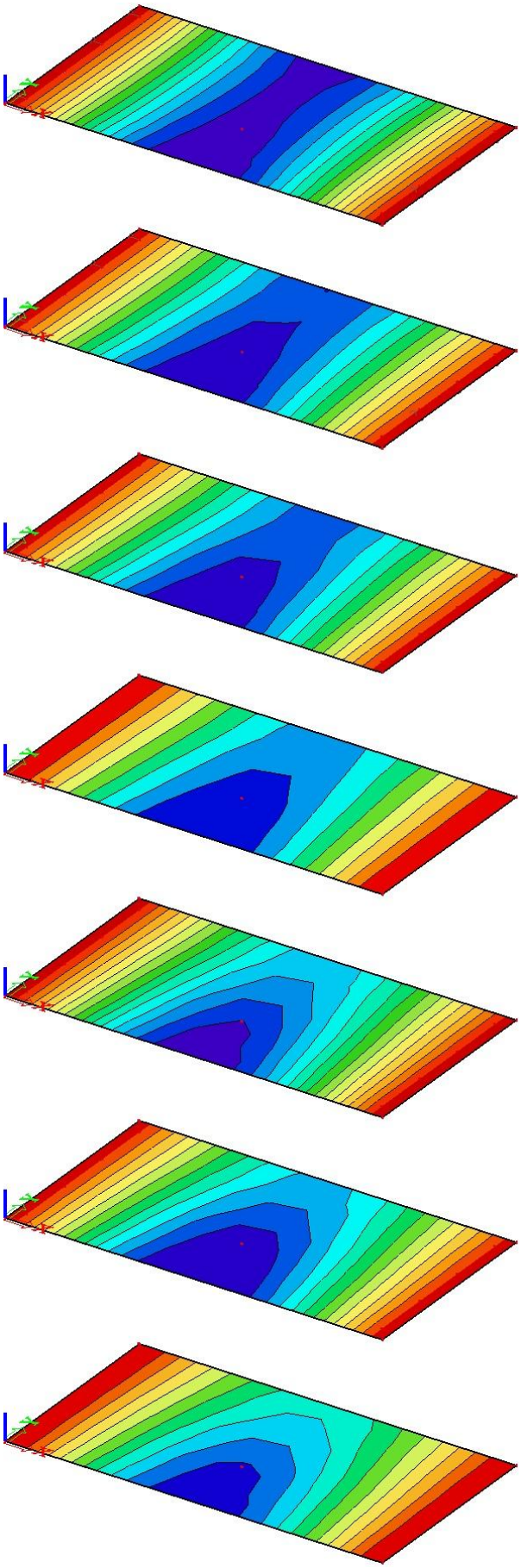
D_{55} = stijfheid t.b.v. dwarskrachtvervorming

Bij de isotrope modellering bedroegen D_{11} en D_{22} dus 85,078 MNm. Bij de orthotrope modellering is eerst D_{22} gevarieerd van 25% van deze waarde tot 175% van deze waarde, in stappen van 25%. Tijdens het variëren van D_{22} is D_{11} constant gehouden op 85,078 MNm. Vervolgens is D_{11} op dezelfde wijze gevarieerd bij een constante waarde van D_{22}.

Voor de berekeningen is gebruik gemaakt van de puntlast op het midden van ligger 2. Er is gekeken naar de vervormingen bij de verschillende situaties en naar de verdeling van de oplegreacties. De vervormingen zijn weergegeven in figuur 14 en 15. De oplegreacties zijn weergegeven in tabel 3 en 4.



Figuur 14 *Vervormingen bij een variërende buigstijfheid in dwarsrichting*



Figuur 15 *Vervormingen bij een variërende buigstijfheid in lengterichting*

Tabel 3 *Oplegreacties [kN] bij een variërende buigstijfheid in dwarsrichting*

	Opl. 1	Opl. 2	Opl. 3	Opl. 4	Opl. 5	Opl. 6	Opl. 7	Opl. 8
25%	-71,6	-34,44	-16,4	-27,57	-71,34	-35,17	-15,56	-27,92
50%	-71,31	-28,23	-29,64	-20,83	-71,22	-28,55	-29,23	-21
75%	-70,63	-26,37	-35,36	-17,64	-70,65	-26,45	-35,15	-17,75
100%	-69,68	-25,89	-38,55	-15,67	-69,98	-25,82	-38,44	-15,78
125%	-69,2	-25,91	-40,57	-14,32	-69,34	-25,74	-40,51	-14,4
150%	-68,58	-26,14	-41,97	-13,32	-68,76	-25,91	-41,93	-13,4
175%	-68,02	-26,46	-42,98	-12,53	-68,24	-26,18	-42,96	-12,63

Tabel 4 *Oplegreacties [kN] bij een variërende buigstijfheid in lengterichting*

	Opl. 1	Opl. 2	Opl. 3	Opl. 4	Opl. 5	Opl. 6	Opl. 7	Opl. 8
25%	-133,09	+37,1	+25,02	-79,04	-133,64	+37,71	+25,55	-79,62
50%	-89,75	-5,9	-18,95	-35,4	-90,07	-5,51	-18,76	-35,66
75%	-76,46	-19,18	-32,26	-22,1	-76,64	-18,98	-32,13	-22,25
100%	-69,68	-25,89	-38,55	-15,67	-69,98	-25,82	-38,44	-15,78
125%	-65,91	-30,07	-42,11	-11,91	-65,95	-30,08	-41,99	-11,97
150%	-63,22	-33	-44,31	-9,47	-63,22	-33,08	-44,2	-9,5
175%	-61,26	-35,23	-45,76	-7,76	-61,21	-35,36	-45,65	-7,77

In figuur 14 en 15 zijn de modelleringen gerangschikt van een kleine naar een grote buigstijfheid.

In figuur 14 is te zien dat wanneer de buigstijfheid in de dwarsrichting toeneemt van 25 % naar 175%, de veranderingen qua vervorming gering zijn. Men ziet het donkerblauwe gedeelte (het gebied waar de maximale vervorming optreedt) slechts een klein beetje afnemen. Het totale verschil in de maximale zakking bedraagt slechts 1,1 mm.

In de oplegreacties zijn de verschillen wat duidelijker. In de opleggingen 1,2,4,5,6 en 8 ziet men, naarmate de buigstijfheid in de dwarsrichting toeneemt, de drukkrachten licht afnemen. Daarentegen nemen de drukkrachten in oplegging 3 en 7 juist sterk toe.

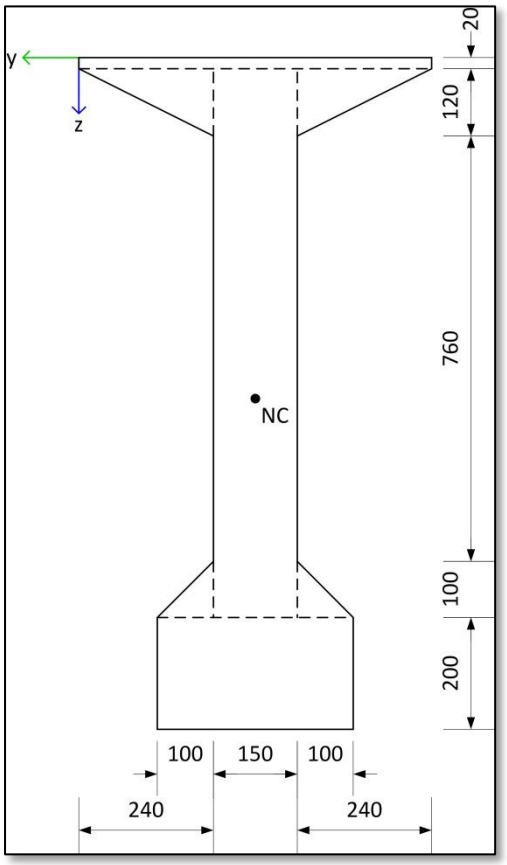
Uit figuur 15 blijkt dat wanneer de buigstijfheid in de lengterichting toeneemt van 25% naar 175%, de vervormingen meer verschillen. Het totale verschil in de maximale zakking bedraagt 66,5 mm. Ook de plaats van de maximale vervormingen ziet men veranderen. Bij een lage buigstijfheid treedt er over de gehele breedte een flinke zakking op. Naarmate de buigstijfheid toeneemt, verplaatst deze zakking zich meer naar buiten, in de richting van de puntlast.

Ook in de oplegreacties zijn flinke veranderingen te zien. Terwijl de drukkrachten in de buitenste opleggingen (1,4,5 en 8) flink afnemen, vinden er in de opleggingen 2,3,6 en 7

tekenwisselingen plaats: de trekkrachten veranderen in drukkrachten.
Van alle bovenstaande resultaten komt de verdeling van de oplegreacties uit de onderste rij van tabel 4 (waar de buigstijfheid in de lengterichting 1,75 keer zo groot is als de buigstijfheid in de dwarsrichting), het meest overeen met de werkelijke situatie. Oftewel: in de werkelijke situatie is de buigstijfheid in lengterichting groter dan in de dwarsrichting. Dit resultaat was natuurlijk voorspelbaar, omdat de plaat in lengterichting wordt ondersteund door vier T-liggers.

4.3 Benadering van de werkelijke situatie

Tot nu toe is er alleen gekeken naar de buigstijfheden van een willekeurige, enkele plaat. Het is echter ook mogelijk om de buigstijfheden zodanig aan te passen, dat de plaat zich gedraagt als een plaat met ribben. Hiervoor dienen de traagheidsmomenten van de plaat en de liggers berekend te worden.
Er wordt begonnen met de traagheidsmomenten van de liggers. Om deze te kunnen berekenen, wordt de doorsnede eerst opgedeeld in rechthoekige en driehoekige oppervlaktes. Vervolgens dient het normaalkrachtencentrum bepaalt te worden. Hiervoor gelden de volgende formules:



Figuur 16 *De doorsnede van de T-ligger is opgedeeld in rechthoekige en driehoekige oppervlaktes*

$$y_{NC} = \frac{ES_y}{EA}$$

$$z_{NC} = \frac{ES_z}{EA}$$

Aangezien er sprake is van een symmetrische doorsnede, bevindt het normaalkrachtencentrum zich in het midden van de doorsnede, op 315 mm vanaf de uiterste linker vezel. De waarde van y_{NC} is dus al bekend zonder de formule toe te passen. Voor z_{NC} dient er wel een berekening uitgevoerd te worden. In de formule vallen echter de E-moduli tegen elkaar weg, omdat het slechts gaat om één materiaal. Zo volgt voor z_{NC}:

$$z_{NC}$$

$$= \frac{630 \cdot 20 \cdot 10 + 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot 240 \cdot 120 \cdot 60 + 980 \cdot 150 \cdot 510 + 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot 100 \cdot 100 \cdot 966{,}67 + 200 \cdot 350 \cdot 1100}{630 \cdot 20 + 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot 240 \cdot 120 + 980 \cdot 150 + 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot 100 \cdot 100 + 200 \cdot 350}$$

$$= 609{,}13\ mm$$

Nu kunnen de traagheidsmomenten berekend worden. Voor I_{yy} volgt:

$$I_{yy} = \frac{1}{12} \cdot 630^3 \cdot 20 + 2 \cdot \frac{1}{36} \cdot 240^3 \cdot 120 + 2 \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot 240 \cdot 120 \cdot (160 - y_{NC})^2\right) + \frac{1}{12} \cdot 150^3 \cdot 980$$
$$+ 2 \cdot \left(\frac{1}{36} \cdot 100^3 \cdot 100 + \frac{1}{2} \cdot 100 \cdot 100 \cdot (206{,}67 - y_{NC})^2\right) + \frac{1}{12} \cdot 350^3 \cdot 200$$
$$= 2313950000\ mm^4$$

Voor I_{zz} volgt:

$$I_{zz} = \frac{1}{12} \cdot 630 \cdot 20^3 + 630 \cdot 20 \cdot (10 - z_{NC})^2 + 2 \cdot \left(\frac{1}{36} \cdot 240 \cdot 120^3 + \frac{1}{2} \cdot 240 \cdot 120 \cdot (60 - z_{NC})^2\right)$$
$$+ \frac{1}{12} \cdot 150 \cdot 980^3 + (150 \cdot 980) \cdot (510 - z_{NC})^2 +$$
$$2 \cdot \left(\frac{1}{36} \cdot 100 \cdot 100^3 + \frac{1}{2} \cdot 100 \cdot 100 \cdot (966{,}67 - z_{NC})^2\right) + \frac{1}{12} \cdot 350 \cdot 200^3 + 350 \cdot 200$$
$$\cdot (1100 - z_{NC})^2 = 4{,}4824 \cdot 10^{10}\ mm^4$$

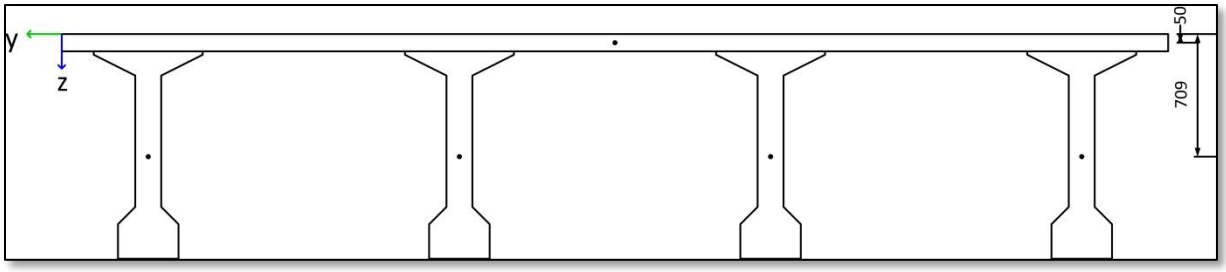
Om de totale buigstijfheid in dwars- en lengterichting te bepalen is alleen I_{zz} van belang. Ook moet het traagheidsmoment voor de plaat zelf nog berekend worden. In lengterichting bedraagt deze:

$I_{zz} = \frac{1}{12} \cdot 6{,}4 \cdot 0{,}1^3 = 5{,}3333 \cdot 10^{-4}\ m^4$

In dwarsrichting bedraagt deze:

$I_{zz} = \frac{1}{12} \cdot 12 \cdot 0{,}1^3 = 0{,}001\ m^4$

Door het toepassen van de stelling van Steiner kan de totale buigstijfheid gevonden worden. Hiervoor moet eerst het normaalkrachtencentrum van de liggers en de plaat samen berekend worden. Net als bij de liggers ligt y_{NC} in het midden van het geheel (in de lengterichting 3,2 m vanaf de uiterste linker vezel; in dwarsrichting 6 m vanaf de uiterste linker vezel). De waarde van z_{NC} kan berekend worden met dezelfde formule die gebruikt is voor de doorsnede van de ligger. Echter gaat het nu wél om twee verschillende materialen. De liggers zijn van de betonsterkteklasse C53/65, met een elasticiteitsmodulus van



Figuur 17 *Ligging van de normaalkrachtencentra ten opzichte van de bovenste vezel (lengterichting)*

E = 3,85·10^4 MPa. De plaat is van de betonsterkteklasse C45/55, met een elasticiteitsmodulus van E = 3,63·10^4 MPa. Invullen van deze gegevens leidt tot:

$$z_{NC} = \frac{3{,}63 \cdot 10^4 \cdot 6{,}4 \cdot 0{,}1 \cdot 0{,}05 + 4 \cdot 3{,}85 \cdot 10^4 \cdot 0{,}2684 \cdot 0{,}70913}{3{,}63 \cdot 10^4 \cdot 6{,}4 \cdot 0{,}1 + 4 \cdot 3{,}85 \cdot 10^4 \cdot 0{,}2684} = 0{,}47196\, m$$

Voor de buigstijfheid in lengterichting geldt zo:

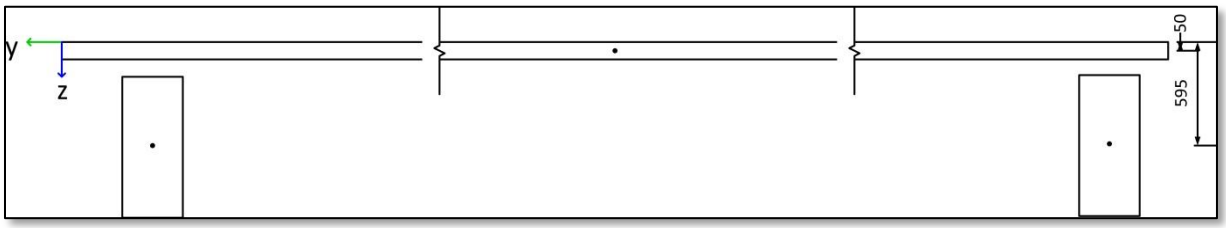
$$EI_{zz} = 3{,}63 \cdot 10^4 \cdot (5{,}3333 \cdot 10^{-4} + 6{,}4 \cdot 0{,}1 \cdot (0{,}05 - z_{NC})^2) + 4 \cdot 3{,}85 \cdot 10^4 \cdot (0{,}044824 + 0{,}2684 \cdot (0{,}70913 - z_{NC})^2) = 13383\, MNm^2$$

In SCIA wordt de eenheid MNm gebruikt; de waarde dient dus nog gedeeld te worden door de breedte:

$$EI_{zz} = \frac{13383}{6{,}4} = 2091{,}1\, MNm$$

Voor de buigstijfheid in de dwarsrichting geldt:

$$EI_{zz} = \frac{3{,}63 \cdot 10^4 \cdot 0{,}001}{12} = 3{,}025\, MNm$$



Figuur 18 *Ligging van de normaalkrachtencentra ten opzichte van de bovenste vezel (dwarsrichting)*

Dit is echter zonder dwarsbalken. Om de buigstijfheid mét dwarsbalken te bepalen, dienen weer dezelfde stappen doorlopen te worden. Men begint met de afzonderlijke traagheidsmomenten:

$$I_{zz}\,(plaat) = 0{,}001\,m^4$$

$$I_{zz}\,(dwarsbalk) = \frac{1}{12} \cdot 0{,}35 \cdot 0{,}81^3 = 0{,}01550\,m^4$$

De dwarsbalken zijn gemaakt van hetzelfde beton als de liggers. Voor het normaalkrachtencentrum volgt:

$$z_{NC} = \frac{3{,}63 \cdot 10^4 \cdot 12 \cdot 0{,}1 \cdot 0{,}05 + 2 \cdot 3{,}85 \cdot 10^4 \cdot 0{,}35 \cdot 0{,}81 \cdot 0{,}595}{3{,}63 \cdot 10^4 \cdot 12 \cdot 0{,}1 + 2 \cdot 3{,}85 \cdot 10^4 \cdot 0{,}35 \cdot 0{,}81} = 0{,}27841\,m$$

Hiermee volgt voor de buigstijfheid:

$$EI_{zz} = \frac{3{,}63 \cdot 10^4 \cdot (0{,}001 + 12 \cdot 0{,}1 \cdot (0{,}05 - z_{NC})^2) + 2 \cdot 3{,}85 \cdot 10^4 \cdot (0{,}01550 + 0{,}35 \cdot 0{,}81 \cdot (0{,}595 - z_{Nc})^2)}{12}$$

$$= 474{,}20\,MNm$$

In SCIA zijn deze verschillende waardes in ingevuld. Zo verkreeg men drie verschillende situaties, namelijk:

- een plaat met buigstijfheden exclusief liggers en dwarsbalken
- een plaat met buigstijfheden inclusief liggers en exclusief dwarsbalken
- een plaat met buigstijfheden inclusief liggers en dwarsbalken

Voor al deze situaties zijn de oplegreacties ten gevolge van een puntlast van -300 kN op het midden van ligger 2 bekeken. De resultaten zijn hieronder weergegeven.

4.4 Resultaten

Tabel 5 *Oplegreacties [kN] tgv een puntlast van -300 kN op het midden van ligger 2 (SCIA plaatmodel), met daaronder het percentage van de puntlast*

	Opl. 1	**Opl. 2**	**Opl. 3**	**Opl. 4**	**Opl. 5**	**Opl. 6**	**Opl. 7**	**Opl. 8**
Situatie 1	-71,09	-24,8	-37,14	-16,96	-71,05	-24,91	-37	-17,04
	24%	8%	12%	6%	24%	8%	12%	6%
Situatie 2	-12,27	-119,14	-24,94	6,34	-11,11	-121,95	-22,76	5,82
	4%	40%	8%	-2%	4%	41%	8%	-2%
Situatie 3	-55,48	-50,14	-33,28	-11,1	-55,25	-50,48	-33,29	-10,98
	18%	17%	11%	4%	18%	17%	11%	4%

In de tabel is duidelijk te zien dat situatie 3 het meest overeen komt met de werkelijke situatie en dat situatie 1 daar juist het meest van afwijkt. Daarnaast zijn de resultaten van situatie 3 nauwkeuriger dan de resultaten uit tabel 4, aangezien nu de werkelijke stijfheden benaderd zijn.

Opmerking: Wanneer men enkel de buigstijfheden van de plaat met een dikte van 300 mm aanpast aan de buigstijfheden van een plaat met een dikte van 100 mm, zal er in SCIA een foutmelding optreden. Om deze foutmelding te voorkomen, dienen eerst de overige waarden in de stijfheidsmatrix aangepast te worden. Hiervoor is er in SCIA een plaat van 100 mm dikte aangemaakt, waarvan de waardes uit de stijfheidsmatrix gekopieerd zijn naar die van de plaat van 300 mm.

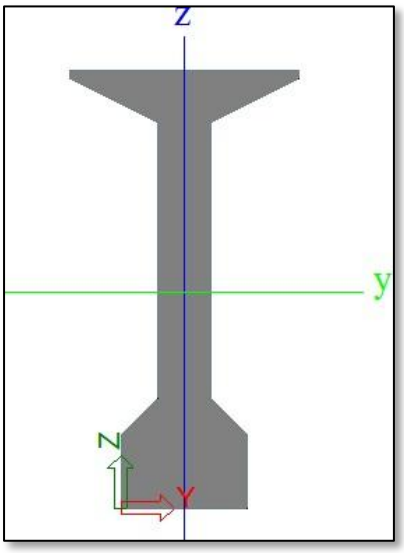
5. 3D model in SCIA

5.1 Invoer geometrie

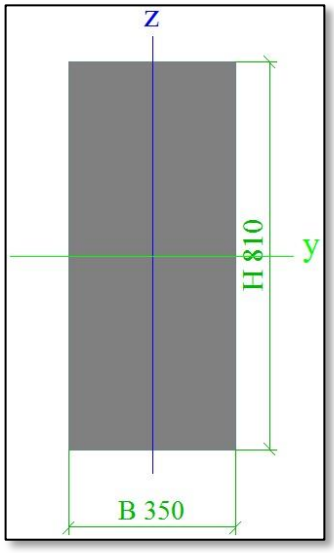
De eerste stap van een 3D modellering in SCIA Engineer bestaat uit het invoeren van de doorsnedes van de T-liggers en de dwarsbalken. Om het model wat te vereenvoudigen wordt er voor de T-liggers slechts één doorsnede gebruikt (de meest rechtse doorsnede van de T-liggers uit figuur 4). Omdat het in dit model gaat om een doorlopende plaat ondersteund door liggers, zijn de bovenste delen van de doorsnedes weggelaten. Dit beton bevindt zich namelijk in de plaat.

Naast de maten van de doorsnede, dient ook een betonsterkteklasse opgegeven te worden. Aangezien er in SCIA Engineer niet gekozen kan worden voor C53/65 (de werkelijke betonsterkteklasse van de liggers en de dwarsbalken), wordt hier gekozen voor C55/67.

Na het invullen van deze gegevens, berekent het programma zelf al het oppervlak van de doorsnede, samen met de traagheidsmomenten en de weerstandsmomenten. Deze waardes zijn hieronder voor beide doorsnedes weergegeven.



Figuur 20 *Doorsnede T-ligger*



Figuur 19 *Doorsnede dwarsbalk*

Tabel 6 *Doorsnede-grootheden T-ligger*

A	$2{,}6840 \cdot 10^{-1}$ m^2
I_t	$2{,}8905 \cdot 10^{-3}$ m^4
I_y	$4{,}4824 \cdot 10^{-2}$ m^4
I_z	$2{,}3139 \cdot 10^{-3}$ m^4
W_{ely}	$7{,}3587 \cdot 10^{-2}$ m^3
W_{elz}	$7{,}3459 \cdot 10^{-3}$ m^3

Tabel 7 *Doorsnede-grootheden dwarsbalk*

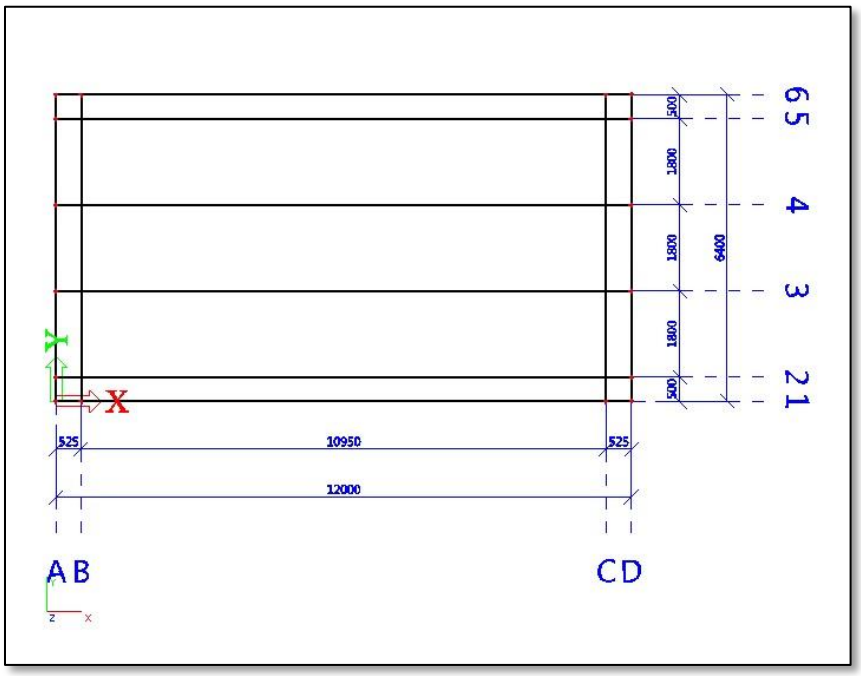
A	$2{,}8350 \cdot 10^{-1}$ m^2
I_t	$8{,}3201 \cdot 10^{-3}$ m^4
I_y	$1{,}5500 \cdot 10^{-2}$ m^4
I_z	$2{,}8941 \cdot 10^{-3}$ m^4
W_{ely}	$3{,}8273 \cdot 10^{-2}$ m^3
W_{elz}	$1{,}6538 \cdot 10^{-2}$ m^3

Nu de doorsnedes zijn ingevoerd, kunnen de liggers en dwarsbalken in het model geplaatst worden. Het is handig om gebruik te maken van een lijnrooster; hierdoor blijft het model overzichtelijk en zijn de liggers en dwarsbalken sneller te plaatsen. Met dit lijnrooster zijn namelijk van tevoren al punten aangegeven, waardoor deze niet voor elke balk of ligger afzonderlijk ingevuld dienen te worden. De liggers en dwarsbalken kunnen nu ingevoerd worden door simpelweg via de optie "1D element" de begin- en eindpunten van de liggers en

dwarsbalken te verbinden. De verkregen lijnen vormen de hartlijnen van de 1D elementen. Ervan uitgaande dat het midden van de plaat zich bevindt op z=0, kunnen de offsets van de 1D elementen worden aangegeven. Dit kan door direct de afstand tussen het midden van de doorsnede tot de z-as aan te geven, of door ervoor te kiezen dat de 1D elementen aan de bovenzijde worden uitgelijnd en vervolgens de resterende afstand tot de z-as aan te geven. In dit model is gekozen voor de laatste manier. De bijbehorende offsets bedragen e_z = -50 mm voor de T-liggers en e_z = -140 mm voor de dwarsbalken.

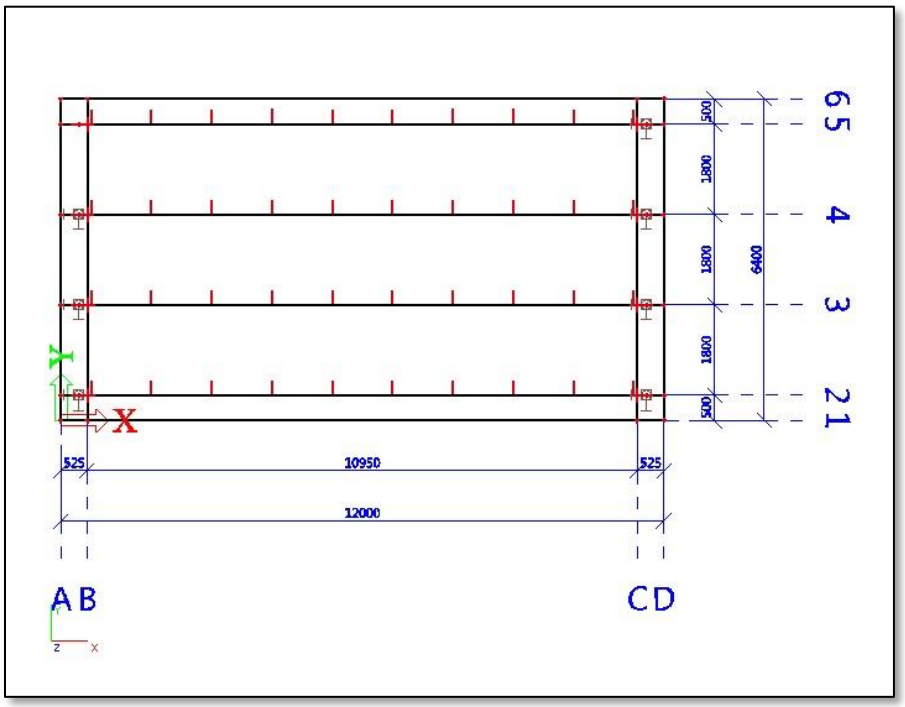
Na de invoer van de 1D elementen kan de plaat ingevoerd worden. Hiervoor dient geen aparte doorsnede aangemaakt te worden. In het menu "2D Element - Plaat" kan de dikte worden aangegeven. De dikte van de plaat in dit model bedraagt 100 mm. Daarnaast dient er een sterkteklasse aangegeven te worden. Voor de plaat is dit C45/55. Tenslotte dient er aangegeven te worden of de plaat isotroop of orthotroop gemodelleerd moet worden. Bij een isotrope modellering wordt de plaat gezien als een "normale plaat". Dit houdt in dat de balken die zich onder de plaat bevinden, geen invloed hebben op de stijfheid en het eigengewicht van de plaat. Wanneer men kiest voor een orthotrope modellering, worden deze eigenschappen juist wél gekoppeld aan de plaat (oftewel: de balken worden gezien als ribben). De vraag is welke modellering het meest overeenkomt met de resultaten van het experiment. Om deze vraag te kunnen beantwoorden, zullen beide modelleringen worden behandeld.

Nu de eigenschappen van de plaat zijn ingevoerd kan, op dezelfde wijze als de 1D elementen, de ligging van de plaat aangegeven worden.



Figuur 21 *De systeemlijnen van de ingevoerde plaat en 1D elementen*

Wanneer eenmaal alle elementen zijn ingevoerd, dienen deze met elkaar verbonden te worden. Om de dwarsbalken met de T-liggers te verbinden kan geklikt worden op de knopen waar de systeemlijnen elkaar kruisen. Vervolgens kan gekozen worden voor een kruisende momentvaste verbinding. In de tekening wordt deze verbinding ook met een kruisje weergegeven.
De plaat is met de liggers te verbinden met behulp van vier interne lijnen. Dit zijn in feite hulplijnen in de plaat. De interne lijnen moeten op dezelfde plaats getekend worden als de systeemlijnen van de liggers. Vervolgens kunnen deze met de functie "constructie entiteiten verbinden" verbonden worden.
Tenslotte dienen er nog steunpunten geplaatst te worden. Hiervoor dienen allereerst coördinaten opgegeven te worden. Hier maakt SCIA dan een knoop van op de liggers. In deze knoop kan vervolgens een steunpunt geplaatst worden. De vrijheden van de opleggingen kunnen op dezelfde wijze als bij het plaatmodel ingevoerd worden.



Figuur 22 *De systeemlijnen inclusief de verbindingen en de opleggingen*

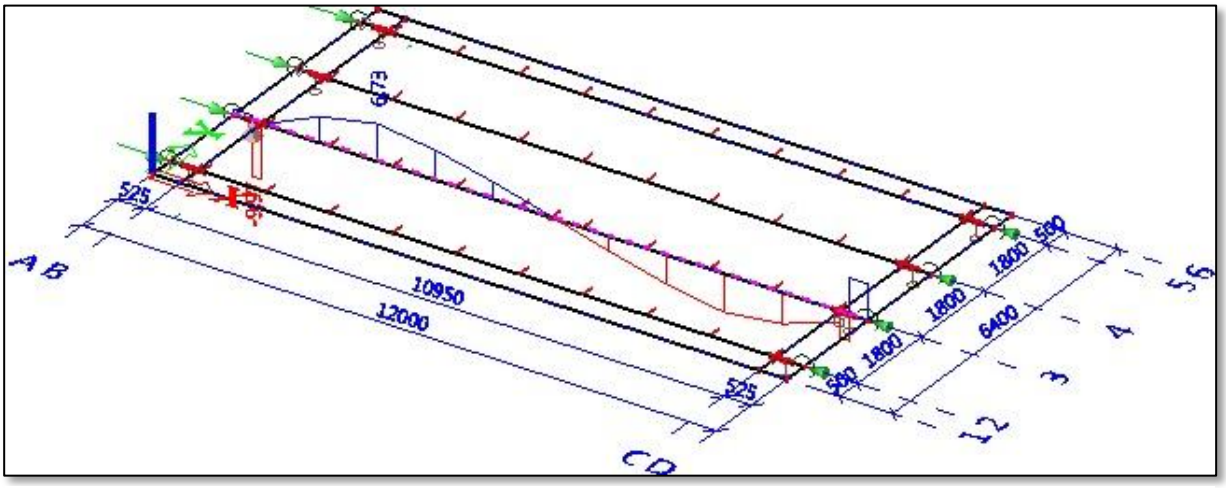
5.2 Invoer belasting

Nu de gehele geometrie van het schaalmodel is ingevoerd, inclusief de verbindingen en de opleggingen, kunnen de belastingsgevallen aangemaakt worden. SCIA Engineer maakt standaard het eerste belastingsgeval BG1 aan. Dit belastingsgeval bedraagt het eigengewicht. Naast het eigengewicht dienen de voorspanningen ingevoerd te worden. Allereerst de voorspanningen in de plaat. Deze bedragen 2,5 Nmm^{-2}. De hart op hart afstand

tussen de voorspanelementen bedraagt 400 mm en de dikte van de plaat bedraagt 100 mm. De voorspankracht van één voorspanelement bedraagt zo

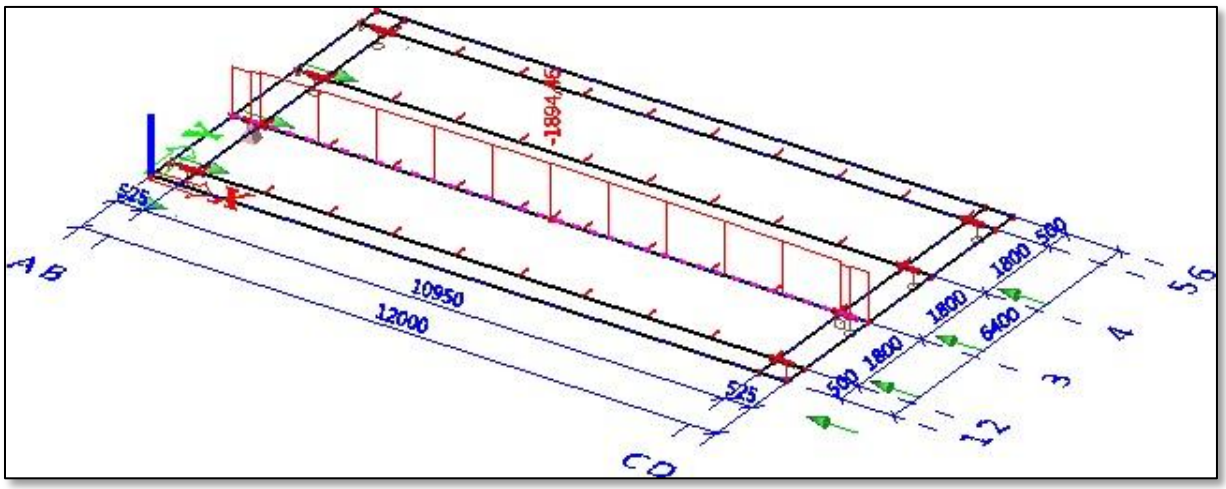
$F_p = 400 \cdot 100 \cdot 2{,}5 = 100000\ N = 100\ kN$

De totale voorspanning in de plaat is dus te modelleren als 28 puntlasten van 100 kN en 2 puntlasten van 50 kN. De twee puntlasten van 50 kN bevinden zich aan de uiteinden van het schaalmodel, waar het oppervlak beton slechts 200 · 100 = 20000 mm^2 bedraagt.
De voorspanningen in de dwarsbalken zijn even groot als die in de plaat. De totale voorspankracht bedraagt dus $F_p = 350 \cdot 810 \cdot 2{,}5 = 708750\ N = 708{,}75\ kN$, verdeeld over acht voorspanelementen. De totale voorspanning in de dwarsbalken dient dus gemodelleerd te worden als een puntlast van 708,75 kN.
Tenslotte de voorspanning in de T-liggers. De totale voorspankracht bedraagt P_m = 4951 kN, verdeeld over 24 strengen. In tegenstelling tot de dwarsbalken en de plaat, valt het zwaartepunt van de voorspanelementen hier niet samen met het zwaartepunt van de doorsnede. Het zwaartepunt van de strengen bevindt zich namelijk 389 mm onder het zwaartepunt van de doorsnede. Door deze excentriciteit ontstaat er een moment van $4951 \cdot 0{,}389 = 1925{,}9\ kNm$. De voorspanning in de dwarsliggers moet dus niet alleen aangegeven worden met een puntlast van 4951 kN, maar ook met een moment van 1925,9 kNm. Bij het plaatsen hiervan moet men echter goed opletten. De knoop waar de belasting aan dient te grijpen, maakt namelijk deel uit van zowel de liggers als de plaat. Wanneer men hier simpelweg de belasting op die knoop plaatst, is dus niet direct duidelijk waarop de belasting werkt. Dit is te controleren door te kijken naar het moment in de ligger. Deze is in figuur 23 weergegeven. Uit deze momentenlijn valt duidelijk af te leiden dat de momenten niet aangrijpen op de ligger. Men zou hier namelijk een constant moment verwachten die trek in de bovenvezel veroorzaakt. Daarnaast zal dit moment veel groter moeten zijn dan de hier zichtbare waarde van 6,73 kNm.



Figuur 23 *M_x in een T-ligger ten gevolge van momenten in de knopen*

De belasting dient dus op een andere manier aangebracht te worden.
Naast de optie om een belasting op een knoop aan te laten grijpen, kan er in een geavanceerder menu gekozen worden voor een belasting op de staaf. Hier dient men eerst in te vullen waar de belasting precies aangrijpt. In deze modellering is dat aan het begin en aan het eind van de staaf. Vervolgens kan er een excentriciteit ingevoerd worden. Kortom: het is nu niet nodig om extra momenten toe te voegen, want SCIA berekent deze nu zelf.
De momentenlijn van deze belasting is hieronder weergegeven.



Figuur 24 *M_x in een T-ligger ten gevolge van puntlasten op de staafuiteinden*

Te zien is dat deze situatie wel klopt: er is sprake van een constant moment met de juiste orde van grootte.
Na het invoeren van de voorspanningen dienen er nog twee belastingsgevallen aangemaakt te worden voor de puntlasten boven steunpunt 6 en op ligger 2, de plaatsen die tijdens de proeven zijn belast.
Tenslotte kunnen er nog belastingcombinaties gevormd worden. Zo kan de voorspanning bijvoorbeeld gecombineerd worden met de puntlast op het midden van ligger 2.

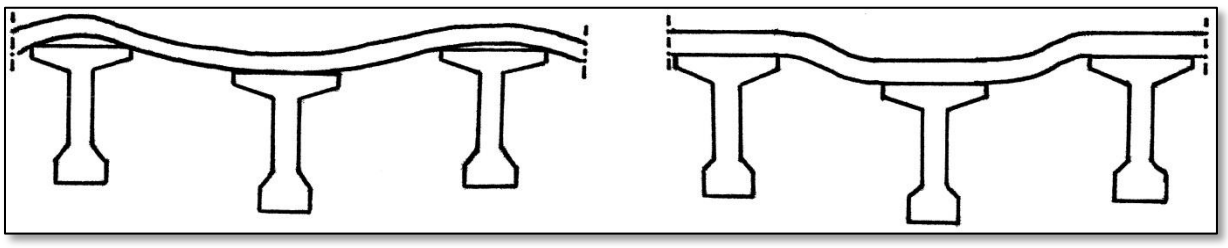
5.3 Resultaten

In onderstaande tabel zijn de resultaten van de berekeningen weergegeven. In de tabel staan de oplegreacties ten gevolge van de puntlast op het midden van ligger 2. Voor de puntlast op oplegging 6 zijn geen oplegreacties gegeven. In SCIA volgt uit deze puntlast slechts één oplegreactie van -300 kN in oplegging 6. Er treedt in het model dus geen verdeling op. Een mogelijke oorzaak hiervan is dat SCIA de spreiding van de belasting in de verticale richting (dus over de dikte van de plaat) niet berekent. Er kan namelijk niet aangegeven worden dat de puntlast op de plaat aangrijpt; de puntlast staat slechts op de knoop van de plaat en de oplegging. In tegenstelling tot bij de staven, is er voor een 2D-

element geen geavanceerd menu om de puntlast daadwerkelijk op de plaat te plaatsen. Kortom: de dikte van de plaat wordt in SCIA alleen gebruikt voor de stijfheidsmatrix en wordt niet meegenomen in de verdeling van de belasting in verticale richting.
In de tabel zijn de oplegreacties van zowel de isotrope als orthotrope modellering weergegeven. Van deze modelleringen lijkt de verdeling van de orthotrope modellering meer op de verdeling van de werkelijke situatie. Bij een isotrope modellering zijn de oplegreacties in oplegging 2 en 6 groter (en de oplegreacties van oplegging 1,3,5 en 7 kleiner) dan in werkelijkheid. Dit komt doordat bij een isotrope modellering, een groot deel van de belasting direct via de onderliggende ligger wordt afgedragen. Bij een orthotrope modellering is de plaat - zowel in lengterichting als dwarsrichting - stijver. De plaat zit nu immers vast aan de liggers. Hierdoor wordt er meer belasting naar de liggers naast ligger 2 afgedragen.
Uit deze modelleringen blijkt dus dat het brugdek beter te modelleren is als een plaat met ribben (orthotroop) dan als een losse plaat op liggers (isotroop).

Tabel 8 *Oplegreacties [kN] ten gevolge van een puntlast van -300 kN op het midden van ligger 2 (SCIA 3D model), met daaronder het percentage van de puntlast*

	Opl. 1	**Opl. 2**	**Opl. 3**	**Opl. 4**	**Opl. 5**	**Opl. 6**	**Opl. 7**	**Opl. 8**
Isotroop	-24,83	-93,45	-38,63	6,91	-21,15	-93,78	-48,95	13,89
	8%	31%	13%	-2%	7%	31%	16%	-5%
Orthotroop	-29,01	-86,24	-40,55	5,8	-25,64	-86,55	-49,92	12,11
	10%	29%	14%	-2%	9%	29%	17%	-4%



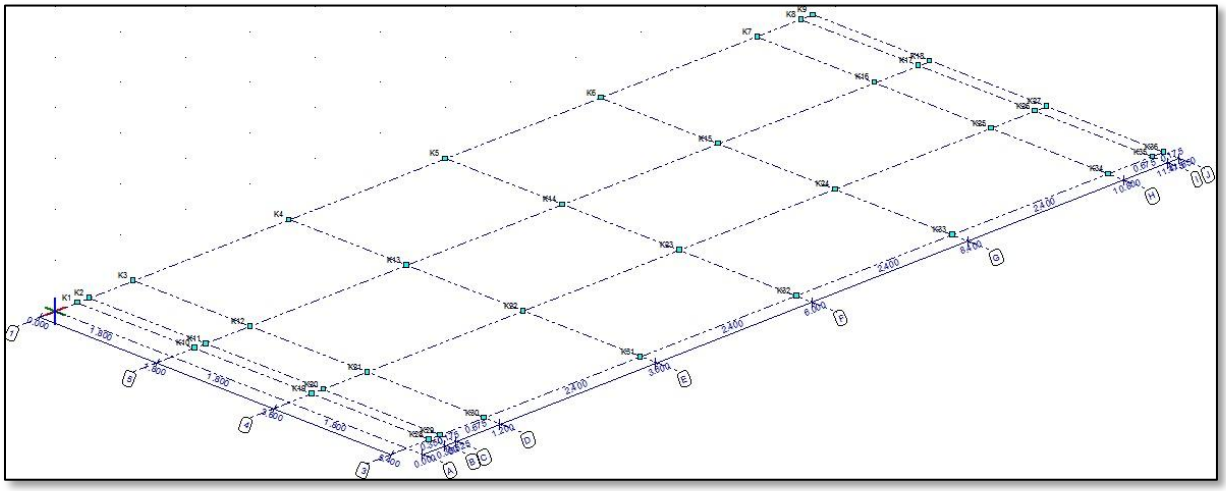
Figuur 25 *Het verschil tussen een isotrope (links) en een orthotrope (rechts) modellering*

6. MatrixFrame model

Naast SCIA Engineer zijn er talloze andere modelleringsprogramma's voor constructies. Één daarvan is het vakwerkprogramma "MatrixFrame". Hiermee is ook een modellering van het brugdek gemaakt. In dit hoofdstuk zal verteld worden hoe dit is gedaan en wat de bijbehorende resultaten zijn.

6.1 Invoer geometrie en belasting

Net als in SCIA Engineer wordt er begonnen met het aangeven van knooppunten. Echter hier zijn dit er meer. Dit komt doordat (in de studentenversie) geen 2D element ingevoerd kan worden, waardoor de plaat gemodelleerd dient te worden als een aantal balken.
Om het dek te kunnen modelleren als 5 losse balken, zijn er in totaal 36 knopen nodig. Deze zijn hieronder weergegeven.



Figuur 26 *Alle benodigde knooppunten in MatrixFrame*

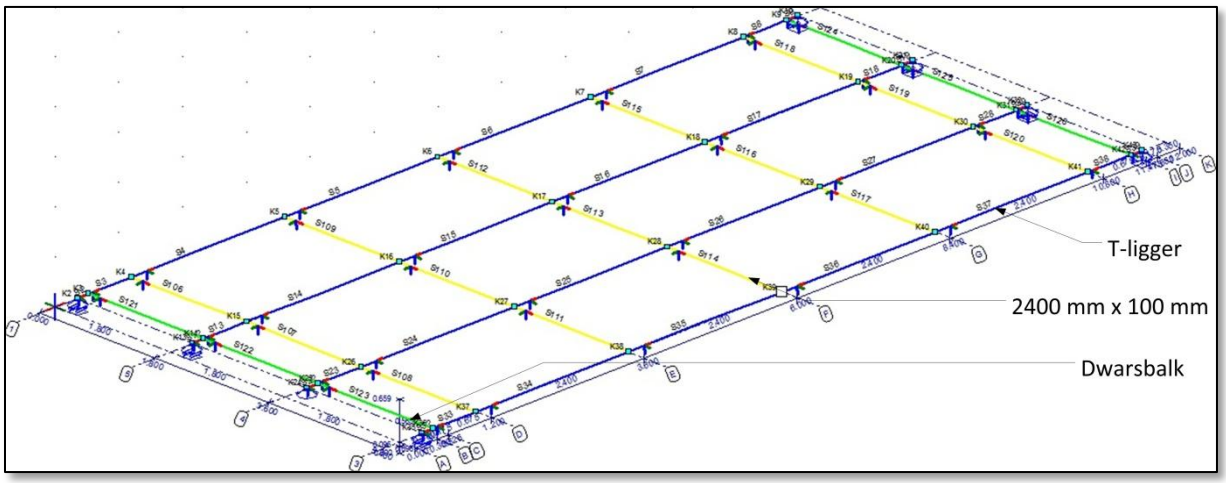
Nadat de knooppunten ingevoerd zijn, dienen deze verbonden te worden door staafelementen. Vervolgens moeten er aan deze staafelementen eigenschappen toegekend worden. Dit wordt gedaan via het "Profiel" menu. Voor de dwarsbalken en het dek wordt er gekozen voor een rechthoekig profiel. Hiervan kunnen direct de hoogte- en breedtematen opgegeven worden. Voor de dwarsbalken bedragen deze (zoals bekend) 810 bij 350 mm; voor het dek gelden de maten 100 bij 2400 mm (12.000 mm / 5). Het programma rekent vervolgens zelf de bijbehorende doorsnedegrootheden uit.
Aangezien er in (de studentenversie van) MatrixFrame geen excentriciteiten toegekend kunnen worden, dient de automatisch berekende waarde voor I_{zz} handmatig aangepast te worden. Hiervoor gebruikt men de stelling van Steiner. Deze stelling is eerder toegepast in 4.3. Zo volgt voor de traagheidsmomenten:

- Dwarsbalk: $0{,}01550 + 0{,}35 \cdot 0{,}81 \cdot (0{,}595 - 0{,}27841)^2 = 0{,}04391\ \mathrm{m}^4$
- Plaat (opgedeeld in 5 balken): $0{,}0002 + 0{,}24 \cdot (0{,}05 - 0{,}27841)^2 = 0{,}01272\ \mathrm{m}^4$

Tenslotte dient er nog een materiaalsoort gekozen te worden. Voor de dwarsbalken gebruikt men C53/65, voor het dek kiest men C45/55.
Voor het profiel van de T-liggers kunnen er geen maten ingevoerd worden, omdat dit geen standaard profiel is. Ook kan er in het menu "Aangepast profiel" (in tegenstelling tot SCIA) geen profiel getekend worden. Hier moeten de doorsnedegrootheden handmatig ingevoerd worden. Deze waardes zijn eerder in dit rapport al berekend en zijn terug te vinden in tabel 6. Omdat ook hier de stelling van Steiner toegepast dient te worden, geldt alleen voor I_{zz} een andere waarde dan in tabel 6, namelijk:

- T-ligger: $0{,}044824 + 0{,}2684 \cdot (0{,}70913 - 0{,}47196)^2 = 0{,}05992\ m^4$

Na deze invoer dient er gekozen te worden voor het materiaal C53/65.
Nu alle staven zijn ingevoerd, kunnen de opleggingen geplaatst worden. Alle opleggingen zijn scharnierend. Oplegging 1,3 en 4 zijn vrij in de y-richting, oplegging 5,7 en 8 zijn vrij in de x- en y-richting, oplegging 6 is vrij in de x-richting en oplegging 2 is vast. In figuur 27 is te zien hoe het model er uiteindelijk uitziet.



Figuur 27 *Constructieafbeelding van het MatrixFrame model*

Nu moet alleen nog de belasting geplaatst worden: één puntlast op het midden van ligger 2 en één puntlast boven oplegging 6. Vervolgens dient men de constructie te controleren op geometrie. Wanneer alles klopt, kunnen de oplegreacties berekend worden.
De resultaten zijn in de volgende tabel weergegeven. Oplegreacties ten gevolge van de puntlast boven oplegging 6 zijn niet weergegeven: deze puntlast zorgt, net als in de SCIA modellen, slechts voor één oplegreactie in oplegging 6.
Er is direct te zien dat dit model veel afwijkt van de experimentresultaten. Niet de

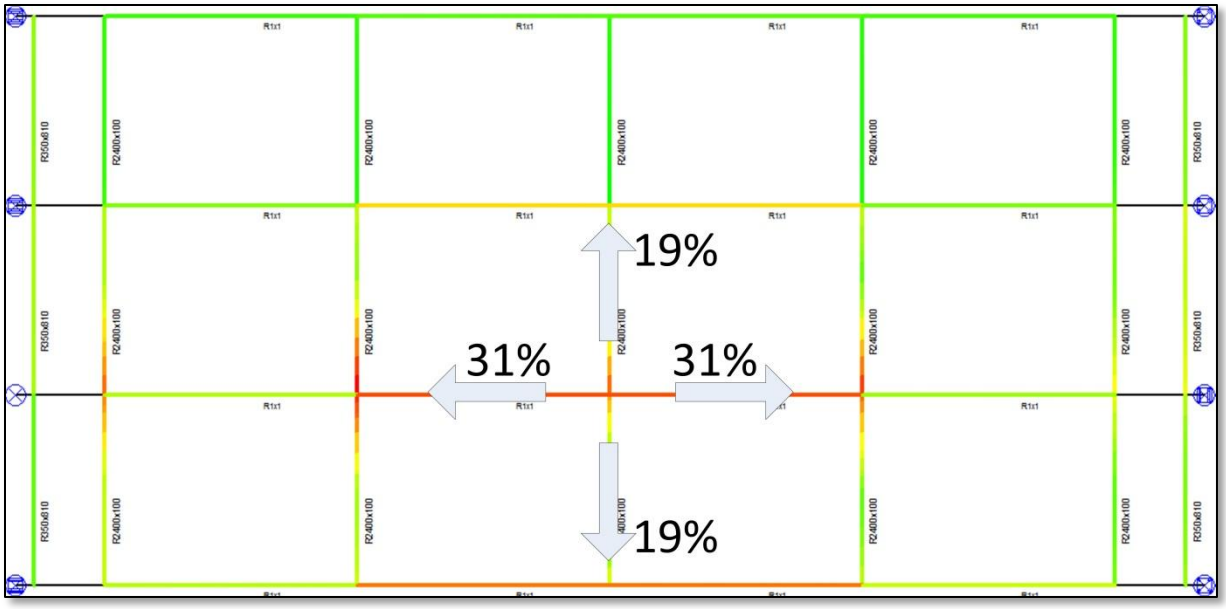
oplegreacties van ligger 2 zijn het grootst, maar van ligger 1 en 3. De oplegreacties in oplegging 1 en 5 zijn zelfs ruim twee keer zo groot als die in oplegging 2 en 4.

Tabel 9 *Oplegreacties [kN] tgv een puntlast van -300 kN op het midden van ligger 2 (MatrixFrame model), met daaronder het percentage van de puntlast*

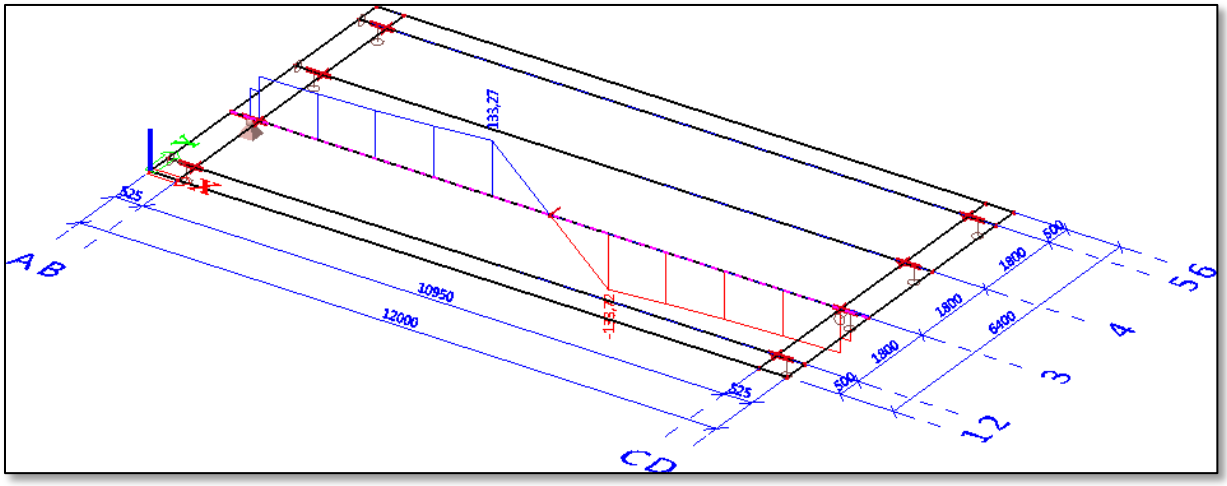
Opl. 1	Opl. 2	Opl. 3	Opl. 4	Opl. 5	Opl. 6	Opl. 7	Opl. 8
-67,46	-29,76	-38,1	-14,68	-67,46	-29,76	-38,1	-14,68
22%	10%	13%	5%	22%	10%	13%	5%

De afwijkingen worden duidelijk wanneer men het MatrixFrame model vergelijkt met het SCIA 3D model. Hiervoor kijkt men naar de dwarskracht in de liggers. In MatrixFrame bedraagt de dwarskracht in ligger 2 93,94 kN (aan beide kanten van de puntlast). In de balk die dient als modellering van een deel van de plaat, bevindt zich een dwarskracht van 56,28 kN. Dit betekent dat 62% van de puntlast wordt afgedragen door de ligger.
Volgens SCIA is de dwarskracht in de ligger echter veel groter. Deze bedraagt 133,27 kN. Zo wordt ruim 88% van de puntlast door de ligger afgedragen.
Hieruit blijkt dat de lastspreidingen van deze modellen afwijken. Dit komt doordat in SCIA gebruik gemaakt is van een plaat, terwijl deze in MatrixFrame gemodelleerd is als vijf balken van 2,4 m breed. Doordat deze vijf balken onderling niet verbonden zijn (behalve door de vier T-liggers), kunnen deze delen van de plaat geen lasten aan elkaar overdragen.
In SCIA kan dit wel. Uit het verloop van de dwarskrachtenlijn in SCIA blijkt ook dat de plaat over de lengte van de ligger belasting afdraagt naar de ligger: de maximale waarde van de dwarskracht bevindt zich immers ruim een meter vanaf de puntlast.
Om te kijken of het onderling verbinden van de vijf balken invloed heeft op de resultaten van het MatrixFrame model, worden extra staven toegepast. In figuur 30 wordt dit aangepaste model getoond. In het figuur zijn de afmetingen van de doorsnedes van de balken weergegeven. Deze afmetingen zijn zo gekozen dat het oppervlak van het beton binnen één raster, overeenkomt met de oppervlakte van het raster. (Het oppervlak van het raster bedraagt hier $1{,}8 \cdot 1{,}2 = 2{,}16\ m^2$; voor het oppervlak van de balken in het raster geldt: $0{,}9 \cdot 1{,}2 + 2 \cdot 1/2 \cdot 1{,}8 \cdot 0{,}6 = 2{,}16\ m^2$)

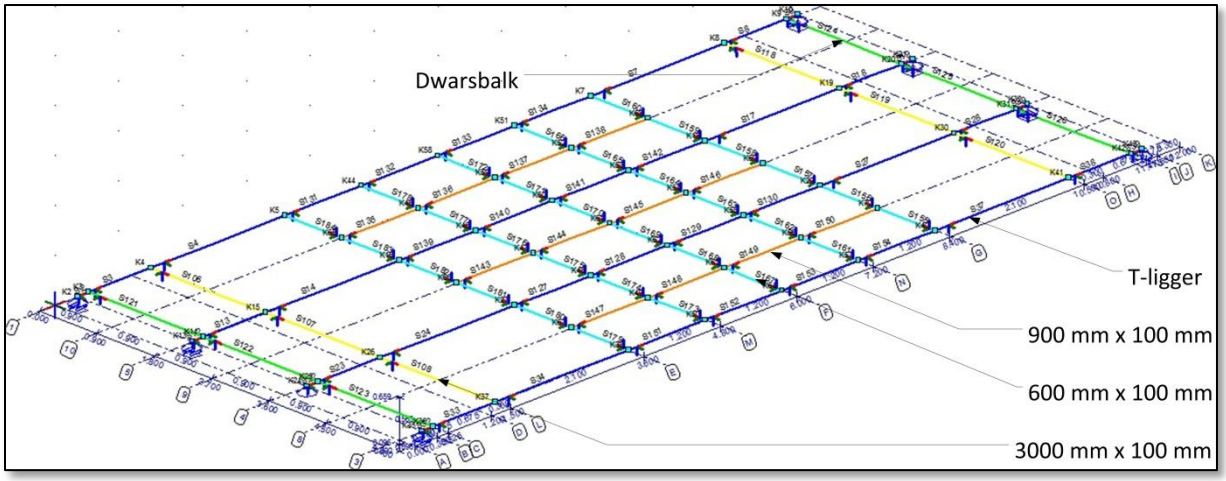
In tabel 10 zijn de resultaten van het aangepaste model weergegeven. Hieruit blijkt dat het toepassen van extra staven op deze wijze nauwelijks voor verandering in de krachtsverdeling zorgt.



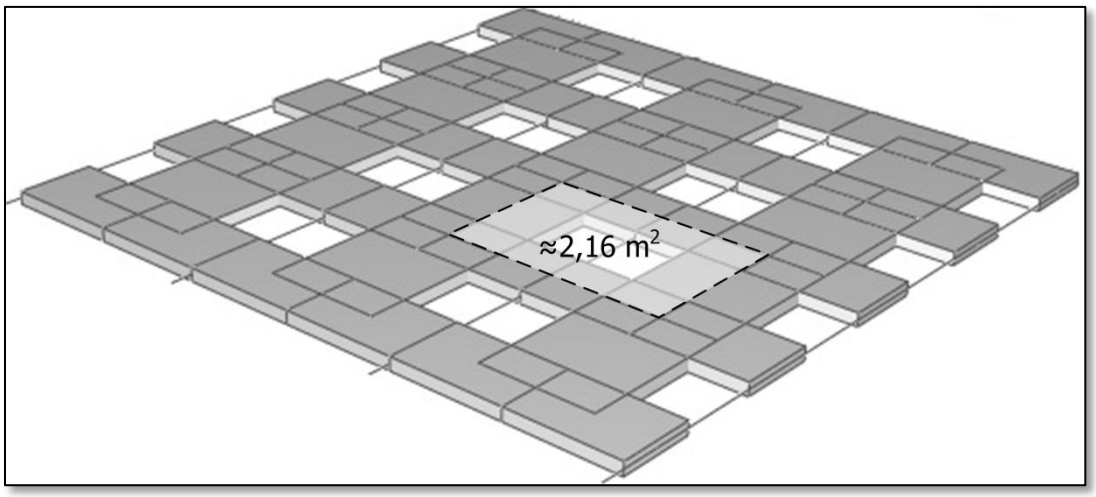
Figuur 28 *Verdeling van de puntlast volgens het MatrixFrame model*



Figuur 29 *Dwarskrachtenlijn van ligger 2 in SCIA (3D)*



Figuur 30 *Constructieafbeelding van het MatrixFrame model met extra staven*



Figuur 31 *Het oppervlak van de betonnen balken komt overeen met die van het raster*

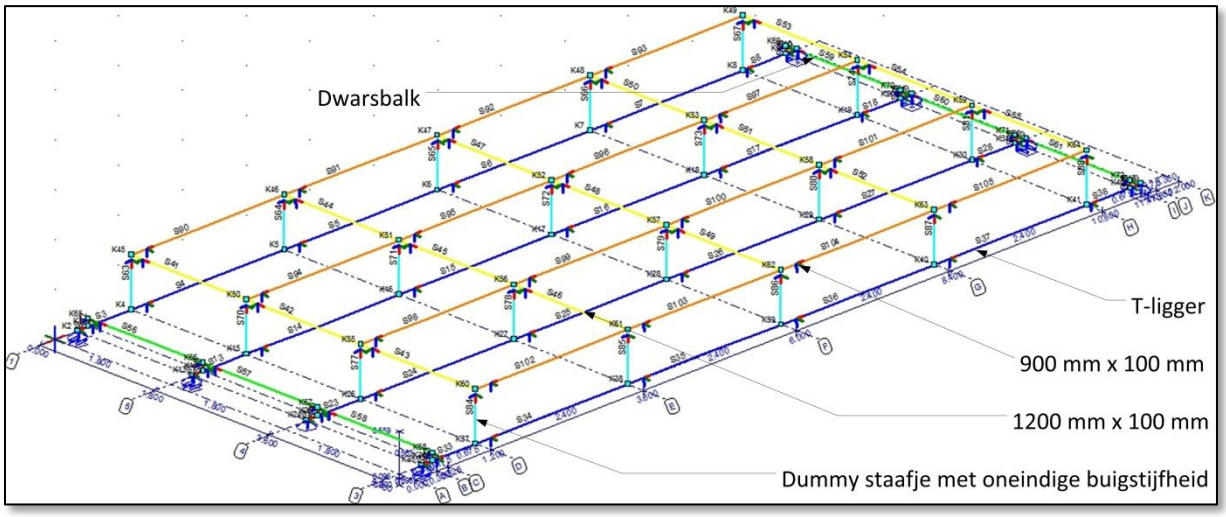
Tabel 10 *Oplegreacties [kN] tgv een puntlast van -300 kN op het midden van ligger 2 (MatrixFrame model met extra staven), met daaronder het percentage van de puntlast*

Opl. 1	Opl. 2	Opl. 3	Opl. 4	Opl. 5	Opl. 6	Opl. 7	Opl. 8
-66,57	-31,17	-37,94	-14,31	-66,57	-31,17	-37,94	-14,31
22%	10%	13%	5%	22%	10%	13%	5%

Aangezien deze modellering in MatrixFrame tot flink afwijkende resultaten leidt, wordt er een andere aanpak in het programma geprobeerd. Hier wordt er geen stelling van Steiner toegepast.

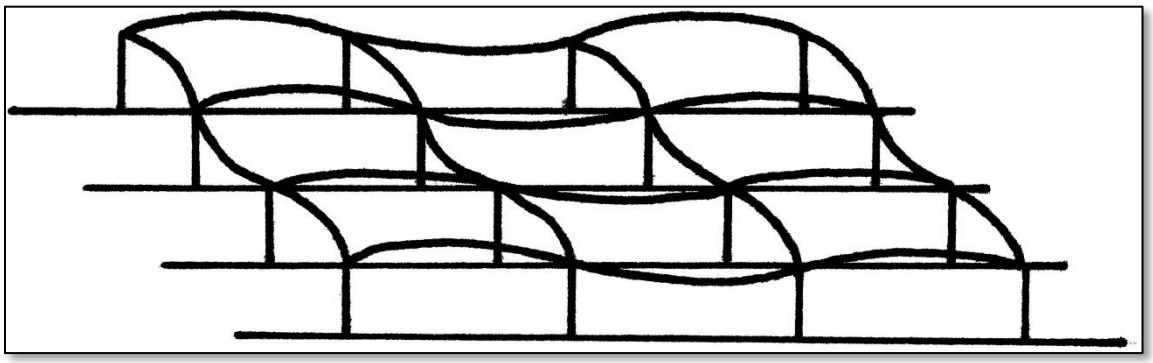
Excentriciteiten zijn in modelleringsprogramma's eigenlijk niets meer dan oneindig stijve staafjes. Om zelf in MatrixFrame excentriciteiten toe te voegen, zou men dus ook knopen in verschillende x-y-vlakken kunnen plaatsen en deze vervolgens verbinden met oneindig stijve staafjes. Dit kan door voor deze staven via het menu "Aangepast profiel" zeer grote waardes in te vullen voor de E-modulus en het traagheidsmoment I_{zz}.

Hieronder is een afbeelding van dit model weergegeven.



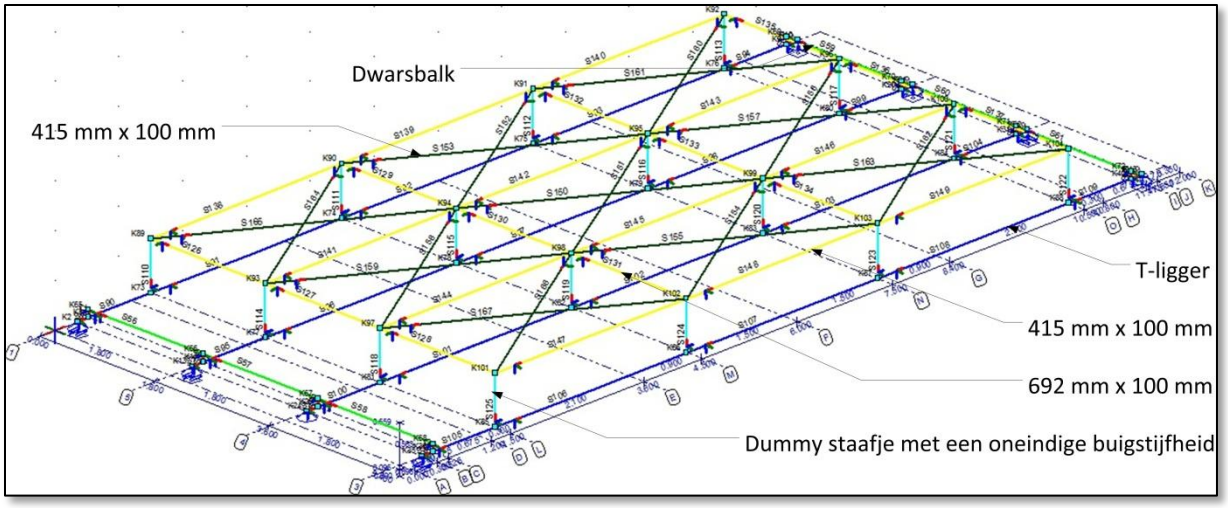
Figuur 32 *De MatrixFrame modellering met dummystaafjes*

Uit de berekeningen van deze modellering volgen echter vreemde resultaten: zo is er bijvoorbeeld een verschil van ruim 44 kN in oplegging 2 en 6, terwijl men hier waardes zou verwachten die ongeveer gelijk zijn aan elkaar. Ook geeft MatrixFrame waarschuwingen over instabiliteit van het systeem. Deze waarschuwingen blijken voort te komen uit vervormingen die plaatsvinden in de balken die voor het brugdek gebruikt zijn.



Figuur 33 *Schets van de vervormingen die optreden in het derde MatrixFrame model*

Om deze vervormingen te voorkomen, dient men kruisende staven toe te voegen. Hierdoor worden de balken bijeen gehouden. Wanneer men met dit model een berekening uitvoert, volgen er geen waarschuwingen meer. Daarnaast volgt er een verdeling van de oplegreacties die veel meer overeenkomt met de experimentresultaten dan de vorige drie MatrixFrame modelleringen. Duidelijk is dat van de vier beschreven modelleringen in MatrixFrame, deze uiteindelijk de beste resultaten levert.



Figuur 34 *De MatrixFrame modellering met dummy staafjes en kruisende staven*

6.2 Resultaten

Net als in SCIA geeft MatrixFrame ten gevolge van een puntlast van -300 kN op oplegging 6, slechts één oplegreactie. Hiervan zijn dan ook geen resultaten in een tabel weergegeven. In de tabel hieronder zijn de oplegreacties ten gevolge van een puntlast van -300 kN op het midden van ligger 2 weergegeven, samen met de percentages van de puntlast.

Tabel 11 *Oplegreacties [kN] van het laatste MatrixFrame model ten gevolge van een puntlast op het midden van ligger 2, met daaronder de percentages van de puntlast*

Opl. 1	Opl. 2	Opl. 3	Opl. 4	Opl. 5	Opl. 6	Opl. 7	Opl. 8
-24,79	-87,26	-54,10	16,16	-34,08	-66,55	-61,68	12,30
8%	29%	18%	-5%	11%	22%	21%	-4%

7. Vergelijken van de resultaten

Hieronder zijn nogmaals de resultaten van de drie verschillende modelleringen gegeven. De experimentresultaten zijn de gemiddelde waardes van de drie belastingsfases bij een belasting van -300 kN. In de eerste rij staan de oplegreacties in kN, in de tweede rij staat het percentage van de puntlast (let op: bij de experimentresultaten is de som van de percentages kleiner dan 100%, omdat de som van de oplegreacties kleiner is dan de puntlast die erop stond).
Daarnaast staat er bij elk type modellering een afwijkingspercentage. Dit percentage is berekend door alle absolute waardes van de verschillen in de verdeling van de oplegreacties in de werkelijkheid en in de modellering bij elkaar op te tellen.
In H9 worden de afwijkingen grondiger bekeken.

Tabel 12

Experimentresultaten							
Opl. 1	**Opl. 2**	**Opl. 3**	**Opl. 4**	**Opl. 5**	**Opl. 6**	**Opl. 7**	**Opl. 8**
-42,81	-57,49	-45,41	2,94	-22,03	-76,23	-24,69	-1,48
16%	22%	17%	-1%	8%	29%	9%	1%

Tabel 13

Plaatmodel in SCIA Engineer							
Opl. 1	**Opl. 2**	**Opl. 3**	**Opl. 4**	**Opl. 5**	**Opl. 6**	**Opl. 7**	**Opl. 8**
-55,48	-50,14	-33,28	-11,1	-55,25	-50,48	-33,29	-10,98
18%	17%	11%	4%	18%	17%	11%	4%
						Afwijking: 45%	

Tabel 14

3D model in SCIA Engineer							
Opl. 1	**Opl. 2**	**Opl. 3**	**Opl. 4**	**Opl. 5**	**Opl. 6**	**Opl. 7**	**Opl. 8**
-29,01	-86,24	-40,55	5,8	-25,64	-86,55	-49,92	12,11
10%	29%	14%	-2%	9%	29%	17%	-4%
						Afwijking: 31%	

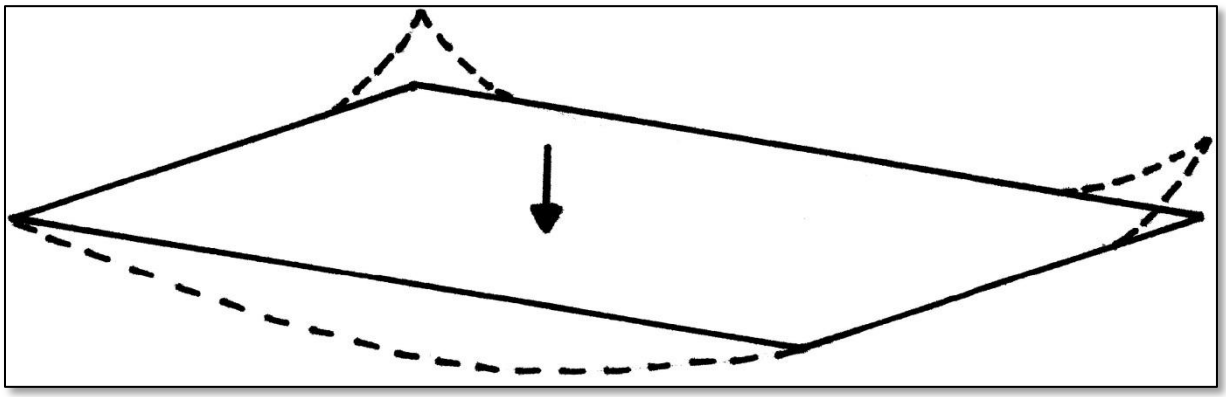
Tabel 15

MatrixFrame model							
Opl. 1	**Opl. 2**	**Opl. 3**	**Opl. 4**	**Opl. 5**	**Opl. 6**	**Opl. 7**	**Opl. 8**
-24,79	-87,26	-54,10	16,16	-34,08	-66,55	-61,68	12,30
8%	29%	18%	-5%	11%	22%	21%	-4%
						Afwijking: 46%	

Uit de resultaten blijkt dat de verdeling van de oplegreacties verkregen met het 3D model in

SCIA het meest overeenkomt met de werkelijke verdeling. Het MatrixFrame model wijkt het meeste af. Tussen deze twee modelleringen zijn twee duidelijke verschillen zichtbaar. Allereerst blijkt de trekkracht in oplegging 4 in het 3D model, ruim tweeënhalf keer zo klein te zijn als de trekkracht in MatrixFrame. Daarnaast valt het op dat er in MatrixFrame een verschil van 20 kN te zien is tussen de oplegreacties van oplegging 2 en 6, terwijl deze in SCIA vrijwel gelijk zijn aan elkaar.

Een mogelijke verklaring van het eerste verschil betreft de opbuiging. Stel dat er zich onder ligger 4 geen opleggingen bevinden. In figuur 35 is deze situatie schematisch weergegeven. Door de verplaatsing tussen oplegging 2 en 6, veroorzaakt door de puntlast op het midden van ligger 2, zou de plaat (en de uiteinden van ligger 4) hier opbuigen: de hoeken komen omhoog. Maar omdat zich daar in werkelijkheid opleggingen bevinden, wordt deze opbuiging verhinderd. Hierdoor ontstaan er trekkrachten in oplegging 4 en 8.
Wanneer men in SCIA oplegging 4 en 8 verwijdert, geeft het programma een verplaatsing van 0,1 mm in de noordelijke hoek en vrijwel geen verplaatsing in de zuidhoek. In MatrixFrame volgt uit dezelfde situatie een verplaatsing van 0,1 mm in de zuidhoek, maar vrijwel geen verplaatsing in de noordhoek . Dit verklaart waarom in MatrixFrame de trekkracht in oplegging 4 groter is dan die in oplegging 8, terwijl in het 3D model precies het tegenovergestelde gebeurt. Wat echter nog niet duidelijk is, is waarom in MatrixFrame de som van beide trekkrachten groter is dan in SCIA.



Figuur 35 *Schematische weergave van de opbuiging*

Deze verschillen worden duidelijker wanneer men kijkt naar de vervormingen in SCIA en in MatrixFrame. In MatrixFrame is eigenlijk maar één duidelijke vervorming te zien. Deze vervorming vindt plaats in de staaf waar de puntlast op staat. Aangezien de verticale staafjes die deze staaf verbinden met ligger 2 zich op 1,5 m vanaf de puntlast bevinden, vervormt de ligger veel minder dan dat deze in werkelijkheid zou doen. In SCIA vervormt deze ligger wel op realistische wijze. Daarnaast is in SCIA ook te zien dat het brugdek over een groot gebied

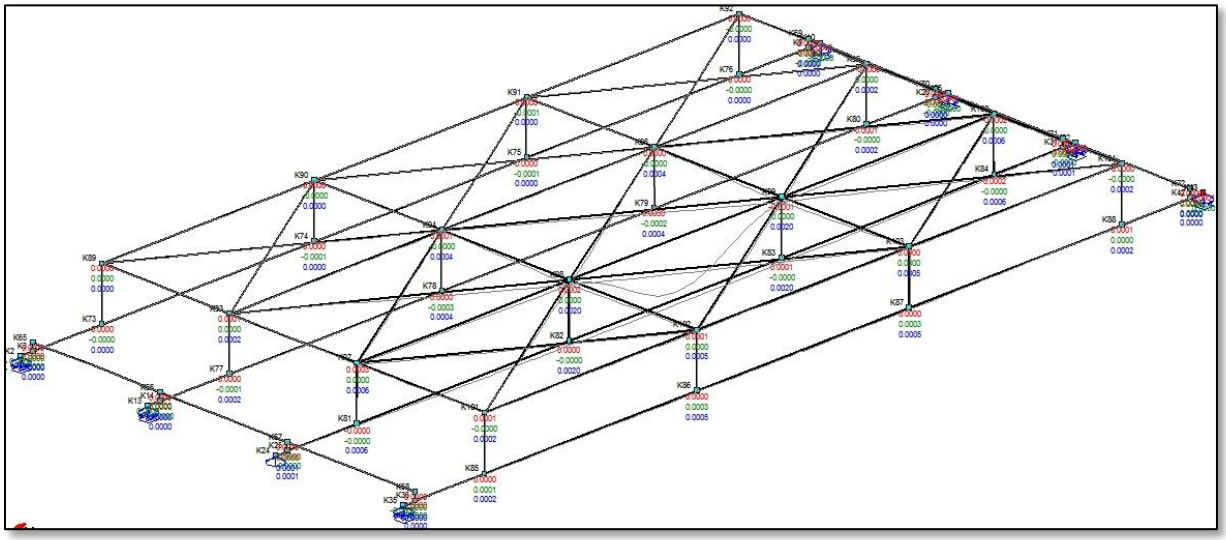
vervormt, terwijl de vervorming in MatrixFrame zeer lokaal is.
Tenslotte zijn er nog verschillen zichtbaar in de verplaatsingen van de opleggingen. Deze zijn hieronder weergegeven.

Tabel 16 *Verplaatsing van de opleggingen in x-richting [mm] (oftewel richting het noorden)*

	Opl. 1	Opl. 2	Opl. 3	Opl. 4	Opl. 5	Opl. 6	Opl. 7	Opl. 8
SCIA (3D)	0	0	0	0	-0,2	-0,2	-0,1	-0,1
MatrixFrame	0	0	0	0	0,1	0,2	0,1	0

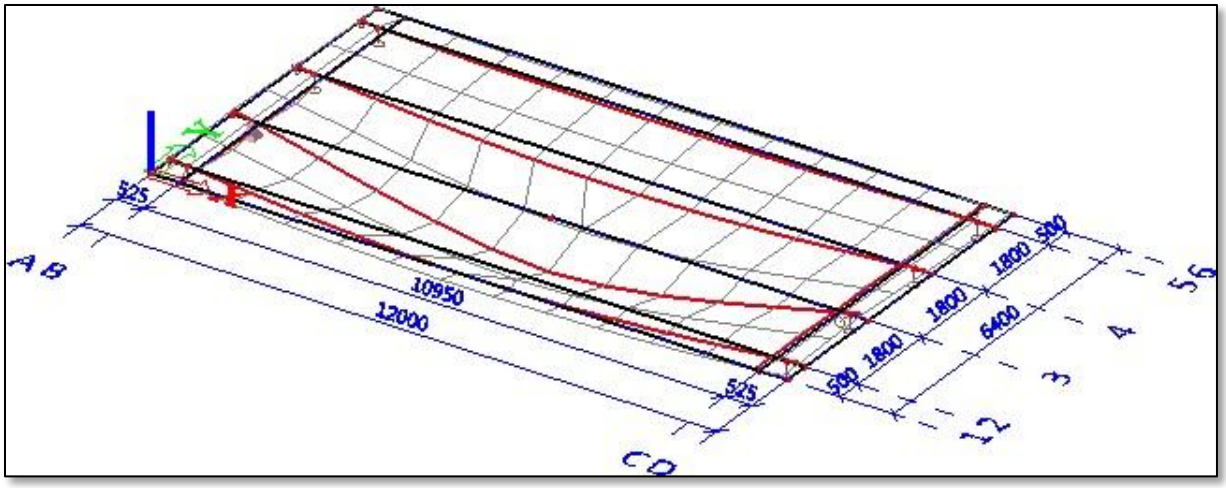
Opmerkelijk zijn hier de tekenverschillen. Terwijl in SCIA de opleggingen naar binnen schuiven, schuiven die in Matrix Frame juist naar buiten. Dit zorgt ervoor dat in MatrixFrame de oplegreacties minder symmetrisch zijn.

Al met al komt het er op neer dat de modellering van het brugdek in MatrixFrame vrij onbetrouwbaar is. Ook al lijken de oplegreacties in de buurt te komen van de werkelijke situatie, de verplaatsingen blijven zeer afwijkend. En juist deze verplaatsingen kunnen de verdeling van de oplegreacties beïnvloeden.



Figuur 36 *Vervormingen in het MatrixFrame model tgv een puntlast van -300 kN op het midden van ligger 2*

Opmerking: Het plaatsen van extra dummy staafjes, waarvan één direct onder de puntlast, zal mogelijk leiden tot een verbetering. Hierdoor zal de ligger meer doorbuigen en de balk erboven minder, oftewel: de vervormingen worden realistischer. Wegens een limiet aan staafelementen in deze versie van MatrixFrame, is dit hier niet toegepast.



Figuur 37 *Vervormingen in het SCIA 3D model tgv een puntlast van -300 kN op het midden van ligger 2*

De verschillen tussen de resultaten uit het 3D model in SCIA en het plaatmodel in SCIA zijn minder groot. In de resultaten van het 3D model zijn duidelijke extremen te zien, zoals de drukkrachten in oplegging 2 en 6 en de trekkrachten in oplegging 4 en 8. In het plaatmodel is dit niet het geval; de waardes liggen hier niet zo ver uit elkaar. Het verschil tussen de grootste en kleinste waarde bedraagt hier slechts 44,5 kN, terwijl dit in het 3D model 98,66 kN bedraagt. Dit komt doordat het plaatmodel zowel in x- als in y-richting een constante buigstijfheid heeft. Deze waardes zijn dan wel benaderd met de traagheidsmomenten van de dwarsbalken, de liggers en de plaat, maar er is niet aangegeven wáár deze zich bevinden. Hierdoor wordt er geen onderscheid gemaakt tussen delen van de plaat met liggers of zonder. Dit zorgt ervoor dat de waardes van de oplegreacties dicht bij elkaar komen te liggen.

8. Parameterstudie

In dit hoofdstuk worden verschillende parameters die invloed zouden kunnen hebben op de verdeling van de oplegreacties gevarieerd. Ook wordt er gekeken naar de invloed op de maximale verticale verplaatsing van het brugdek.
De gekozen parameters zijn:

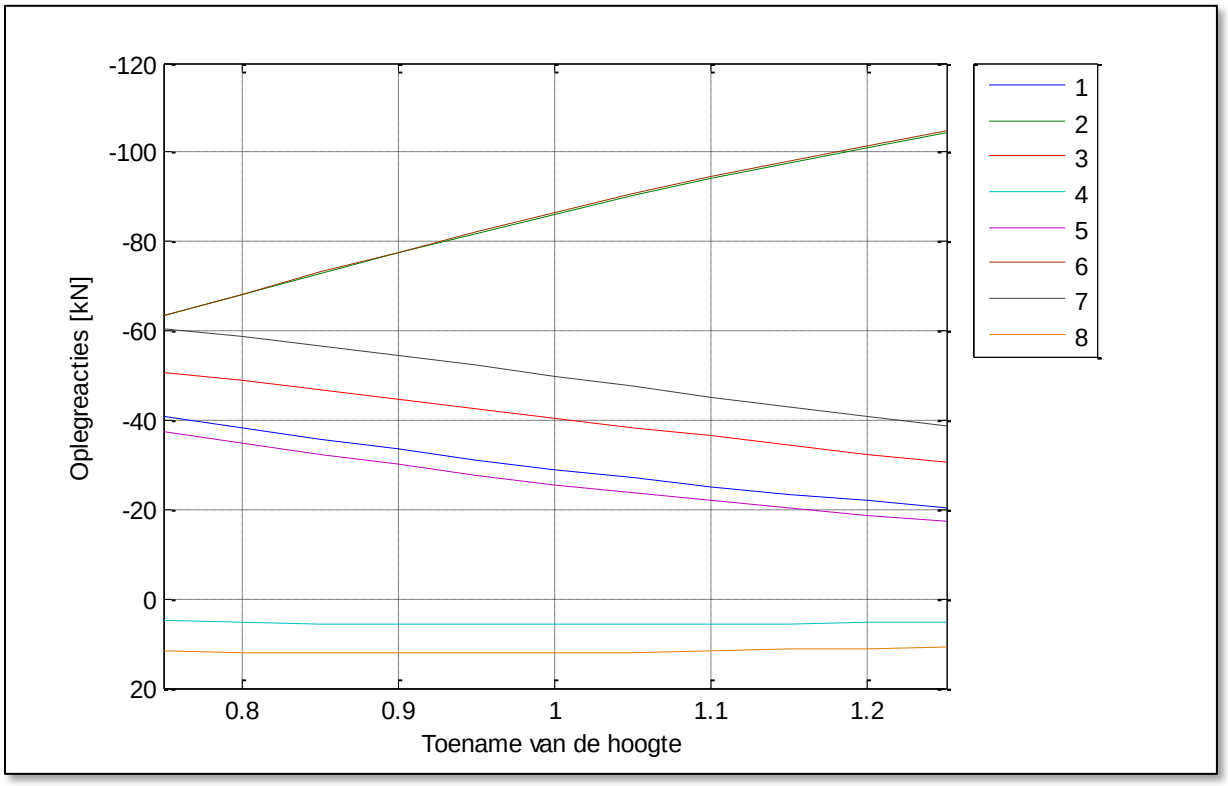
- Geometrie:
    - Hoogte van de T-ligger
    - Breedte van de T-ligger
    - Hoogte van de dwarsbalk
    - Breedte van de dwarsbalk
    - Dikte van de plaat
- Betonsoort:
    - Kubusdruksterkte van de T-ligger
    - Kubusdruksterkte van de dwarsbalk
    - Kubusdruksterkte van de plaat
- Veerstijfheid van de opleggingen:
    - Veerstijfheid in de z-richting
    - Veerstijfheid in de x- en y-richting
- Voorspanning

Voor deze parameterstudie is gebruik gemaakt van het 3D model in SCIA Engineer. De berekeningen zijn (op één uitzondering bij de veerstijfheid in de z-richting na) gemaakt aan de hand van de puntlast van -300 kN op het midden van ligger 2.

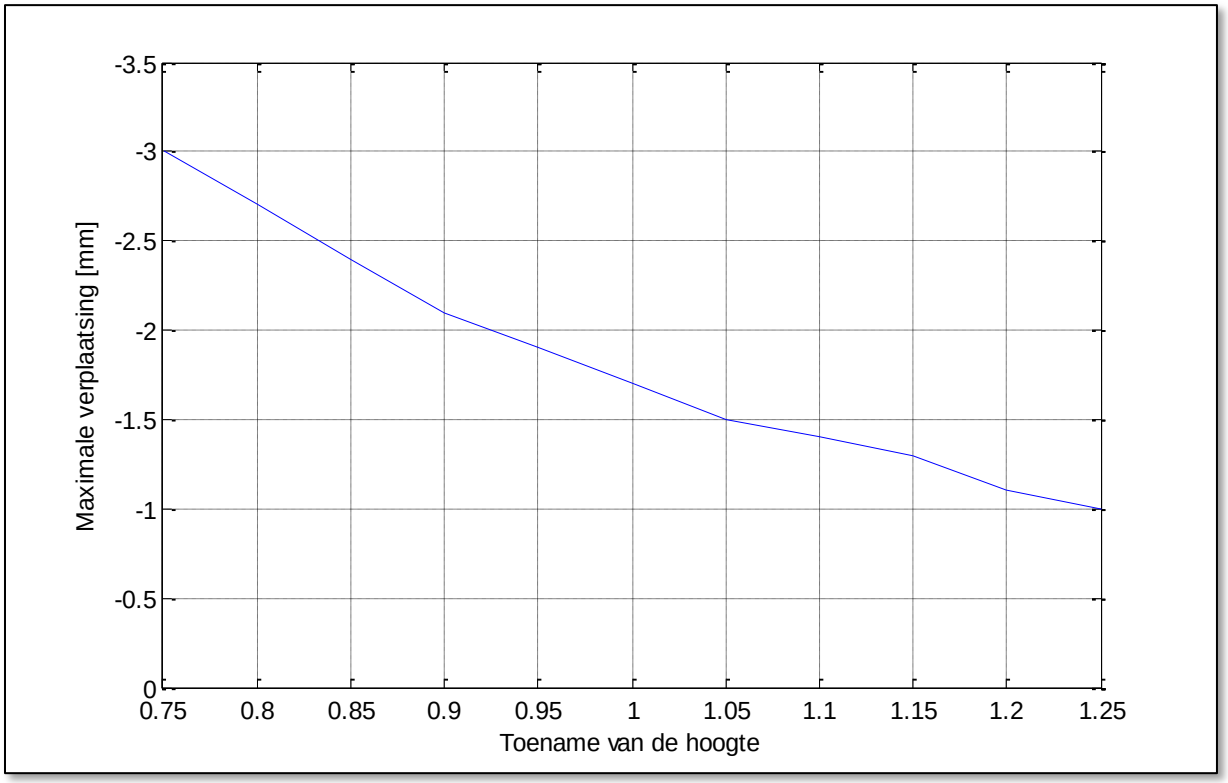
8.1 Geometrie

8.1.1 Hoogte van de T-ligger

Allereerst is de hoogte van de T-liggers gevarieerd. De oorspronkelijke hoogte van de liggers in het 3D model bedraagt 1200 mm. Deze waarde is gevarieerd van 75% tot 125% van de originele waarde, in stappen van 5%. De resultaten zijn in figuur 41 en 42 weergegeven. Het is duidelijk te zien dat wanneer de hoogte toeneemt, de oplegreacties in oplegging 2 en 6 toenemen. Daarentegen nemen de overige drukkrachten, verdeeld over oplegging 1, 3, 5 en 7, af. De trekkrachten aan de westzijde van het brugdek blijven vrijwel constant. Daarnaast is te zien dat een grotere hoogte van de T-liggers zorgt voor een kleinere verplaatsing van het brugdek in z-richting.

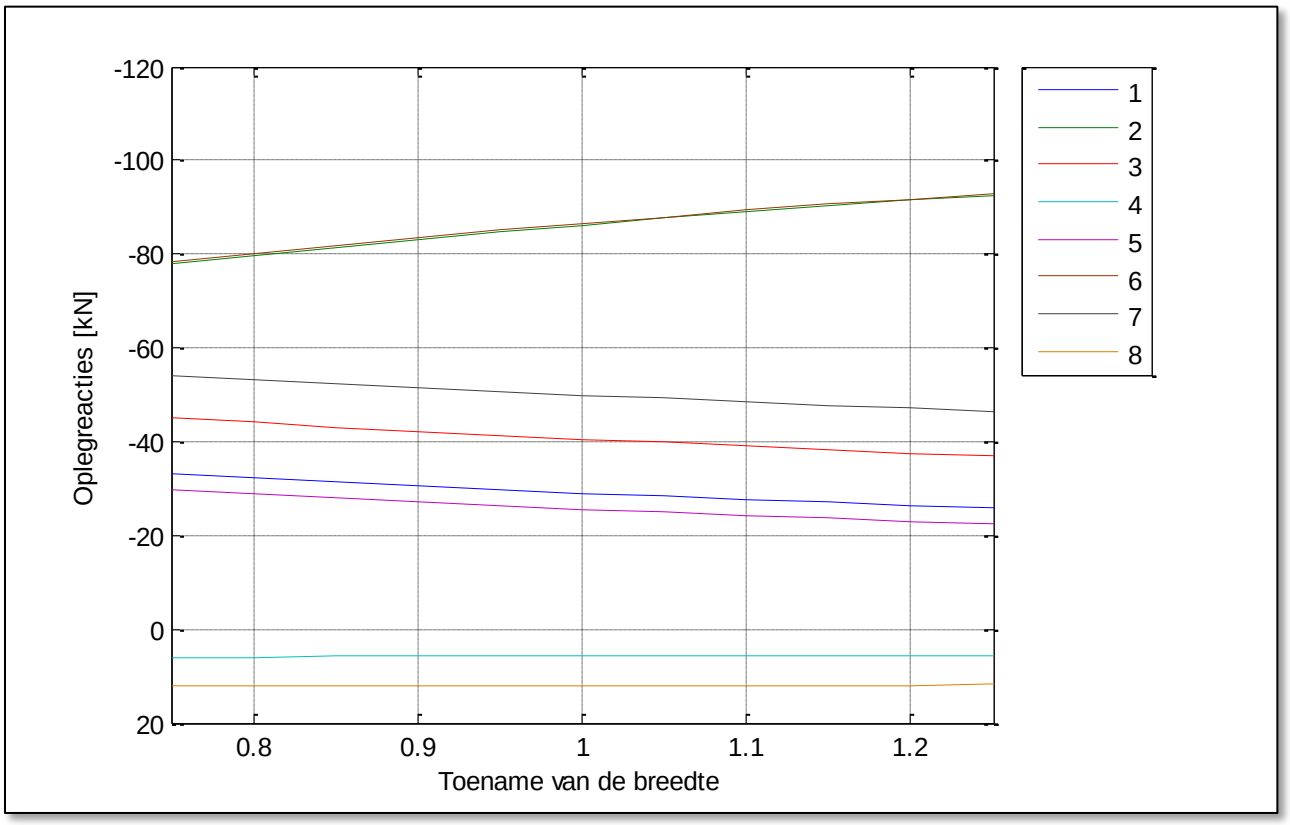


Figuur 38 *De oplegreacties als functie van de hoogte van de T-liggers*

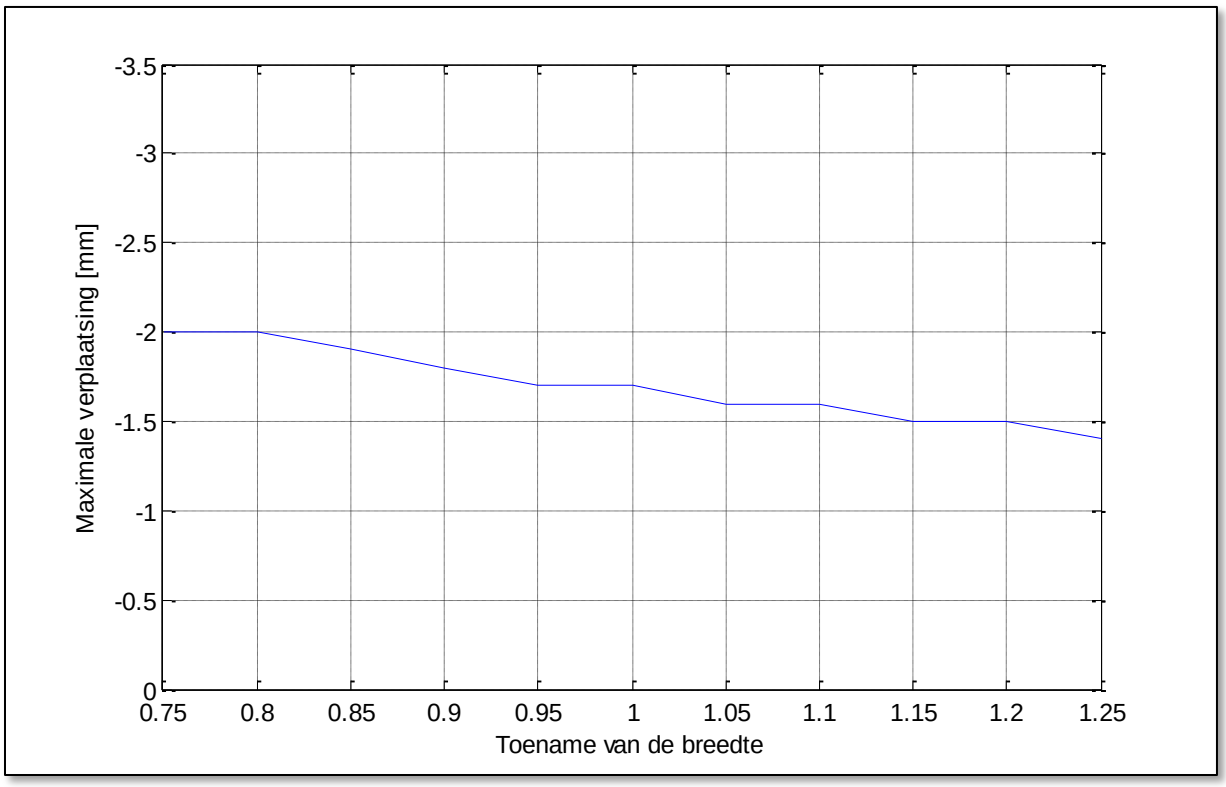


Figuur 39 *De maximale verplaatsing in z-richting als functie van de hoogte van de T-liggers*

8.1.2 Breedte van de T-ligger



Figuur 40 *De oplegreacties als functie van de breedte van de T-liggers*



Figuur 41 *De maximale verplaatsing in z-richting als functie van de breedte van de T-liggers*

Hierboven zijn de resultaten weergegeven ten gevolge van de variërende breedte van de T-liggers. Ook deze grootheid is opgelopen van 75% tot 125% van de oorspronkelijke waarde. De resultaten lijken sterk op die van de variërende hoogte, echter in mindere mate. Zo nemen de oplegreacties in oplegging 2 en 6 toe, maar bedraagt het totale verschil ongeveer 10 kN in plaats van 40 kN. Ook de afname van de overige drukkrachten is wat geringer. De trekkrachten verlopen, net als in de vorige situatie, vrijwel constant.
De maximale verplaatsing in de z-richting neemt af met 0,6 mm.

8.1.3 Hoogte van de dwarsbalk

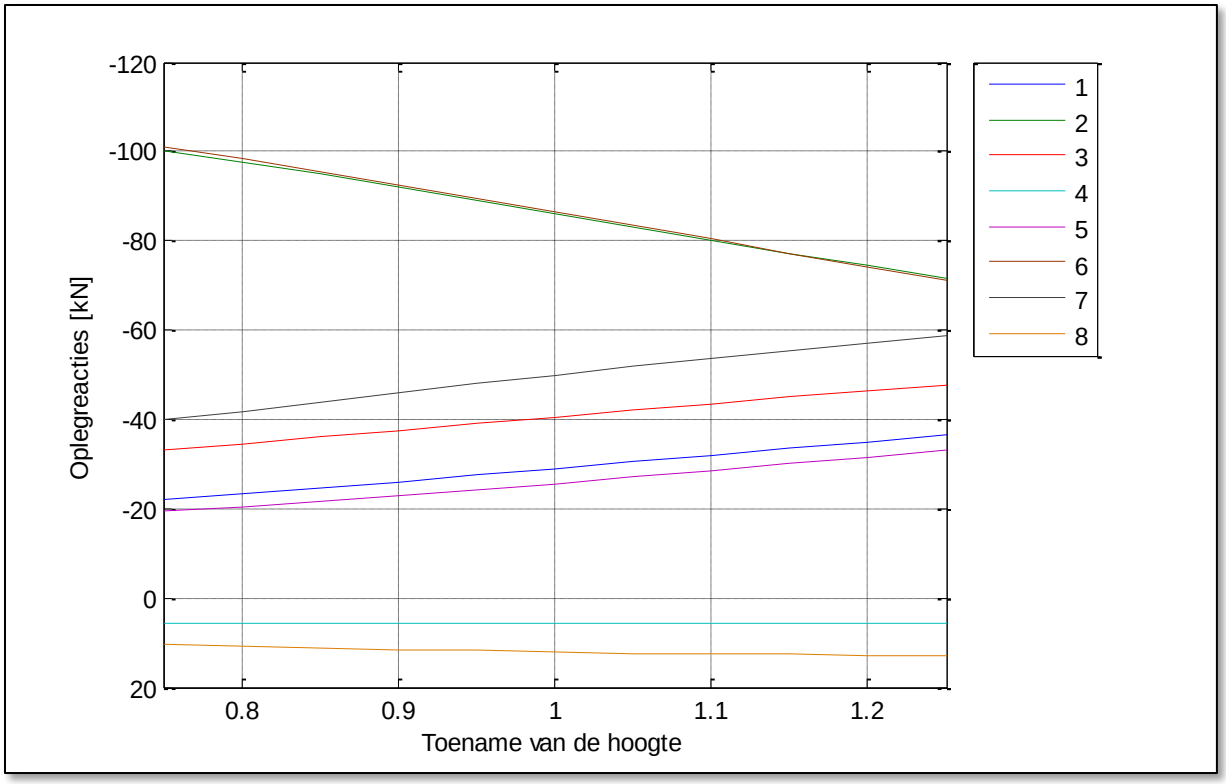
De oorspronkelijke hoogte van de dwarsbalken bedraagt 810 mm. Deze waarde is gevarieerd van 607,5 mm tot 1012 mm, in stappen van 40,5 mm. De resultaten zijn hieronder weergegeven.
Te zien is dat een toenemende hoogte van de dwarsbalken andere gevolgen voor de verdeling van de oplegreacties heeft dan een toenemende hoogte van de T-liggers. Nu nemen de oplegreacties in oplegging 2 en 6 juist af, terwijl de overige drukkrachten toenemen. Dit komt doordat de dwarsbalken meer belasting af kunnen dragen naar de liggers naast ligger 2 en is helemaal goed te zien in tabel 17, waarin de oplegreacties zijn gegeven van het 3D model zonder dwarsbalken. In de oplegreacties van ligger 4 zijn er geen grote veranderingen te zien; die nemen slechts licht af.
Uit figuur 45 blijkt dat de hoogte van de dwarsbalken nauwelijks invloed heeft op de maximale verticale verplaatsing van het brugdek. Dit is niet zo vreemd, aangezien de maximale verplaatsing zich in het midden van de lengtedoorsnede bevindt.

8.1.4 Breedte van de dwarsbalk

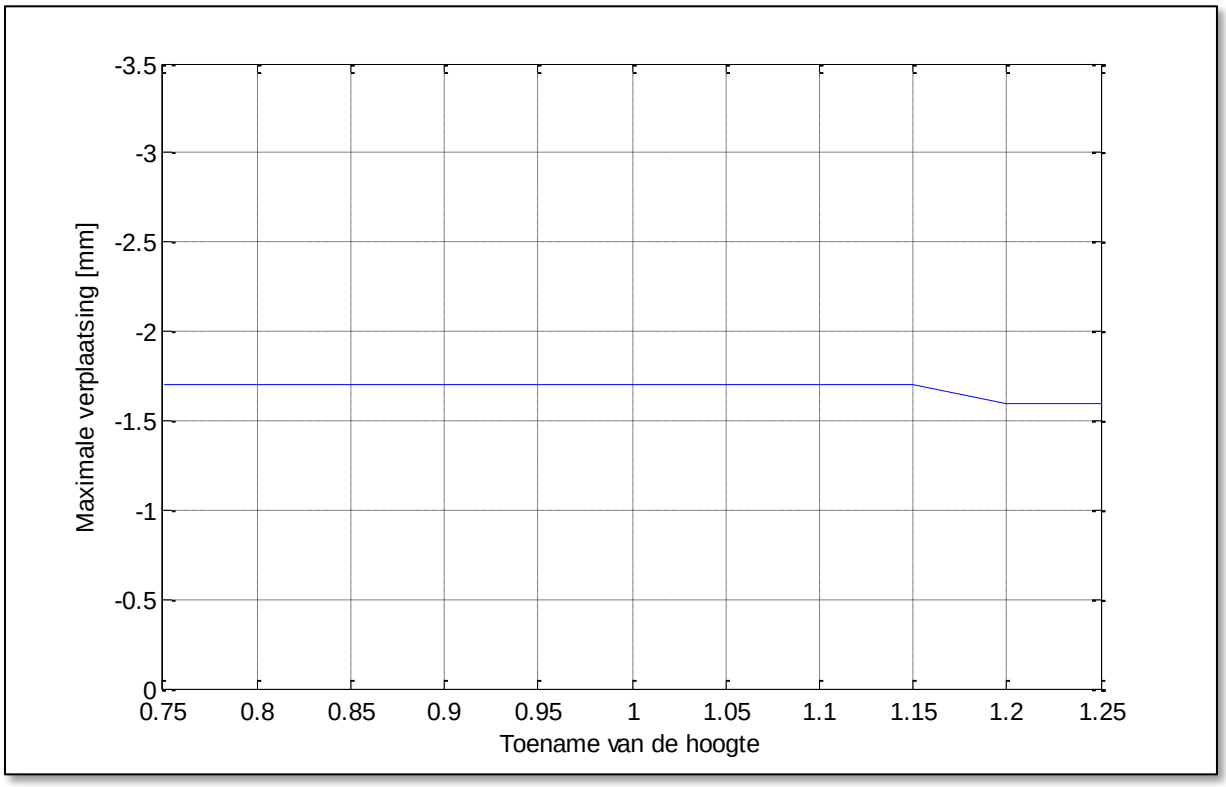
De oorspronkelijke breedte van de dwarsbalken bedraagt 350 mm. Deze waarde is gevarieerd van 262,5 mm tot 437,5 mm, in stappen van 17,5 mm. De resultaten zijn weergegeven in figuur 47 en 48.
De breedte van de dwarsbalken blijkt veel minder invloed te hebben dan de hoogte ervan. De oplegreacties in oplegging 2 en 6 dalen nog geen 5 kN en er is nauwelijks een verandering zichtbaar in de overige oplegreacties.
Ook de maximale verticale verplaatsing van het brugdek wordt door de toenemende breedte van de dwarsbalken vrijwel niet beïnvloed.

Tabel 17 *Oplegreacties van een 3D model zonder dwarsbalken*

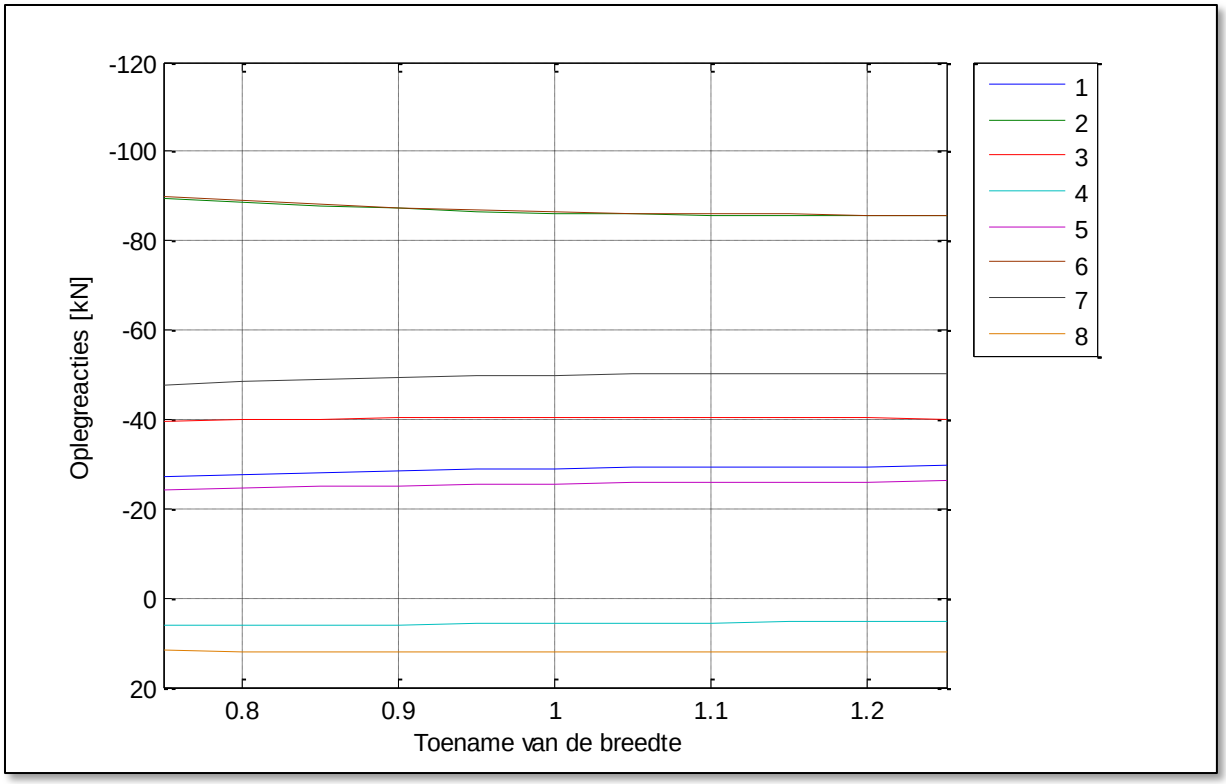
Opl. 1	Opl. 2	Opl. 3	Opl. 4	Opl. 5	Opl. 6	Opl. 7	Opl. 8
-9,18	-126,47	-19,56	5,21	-9,36	-126	-19,86	5,23
3%	42%	7%	-2%	3%	42%	7%	-2%



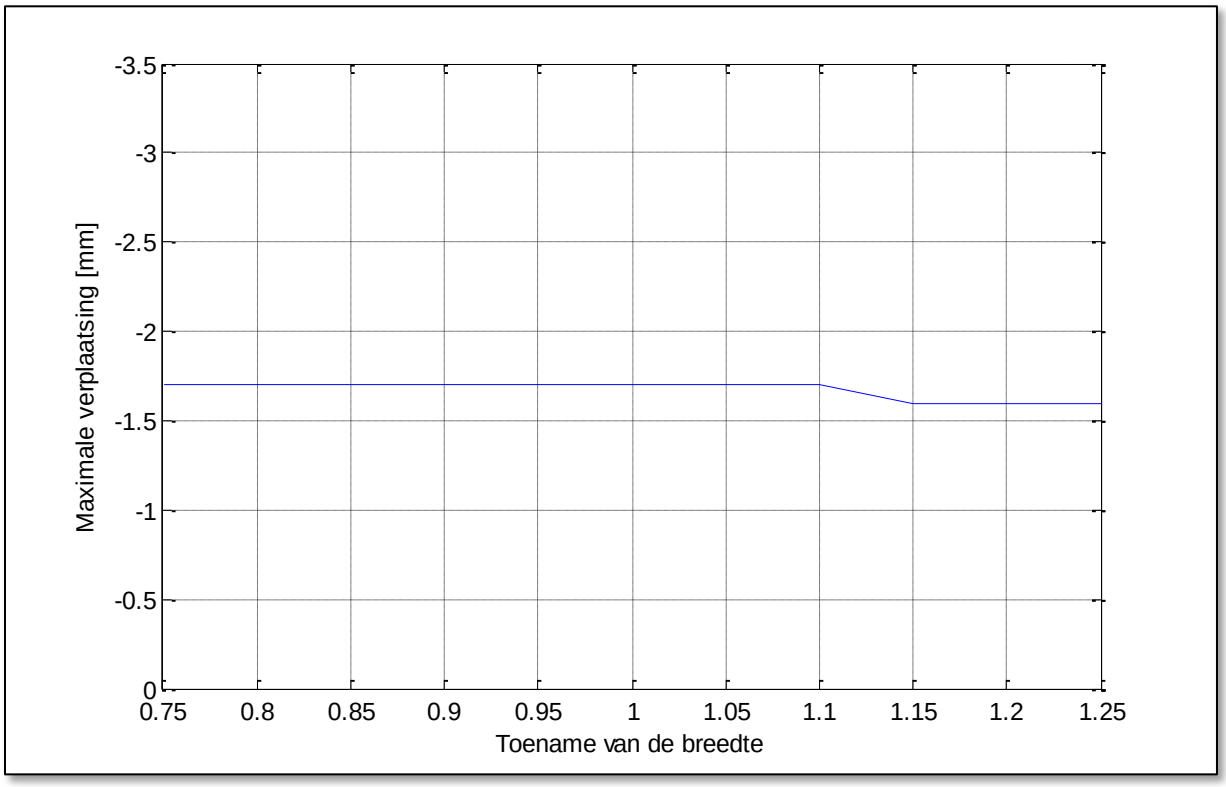
Figuur 42 *De oplegreacties als functie van de hoogte van de dwarsbalken*



Figuur 43 *De maximale verplaatsing in z-richting als functie van de hoogte van de dwarsbalken*



Figuur 44 *De oplegreacties als functie van de breedte van de dwarsbalken*



Figuur 45 *De maximale verplaatsing in z-richting als functie van de breedte van de dwarsbalken*

8.1.5 Dikte van de plaat

De dikte van de plaat in het schaalmodel bedraagt 100 mm. Deze waarde is in SCIA Engineer gevarieerd van 75 mm tot 125 mm, in stappen 5 mm. De resultaten zijn in de grafieken op de volgende pagina weergegeven.

Het krachtsverloop ten gevolge van een toenemende dikte van de plaat zit tussen die van een toenemende hoogte en breedte van de dwarsbalken in. Er gebeurt dan ook vrijwel hetzelfde: door de toenemende dikte wordt een groter deel van de puntlast afgedragen naar de liggers naast ligger 2.

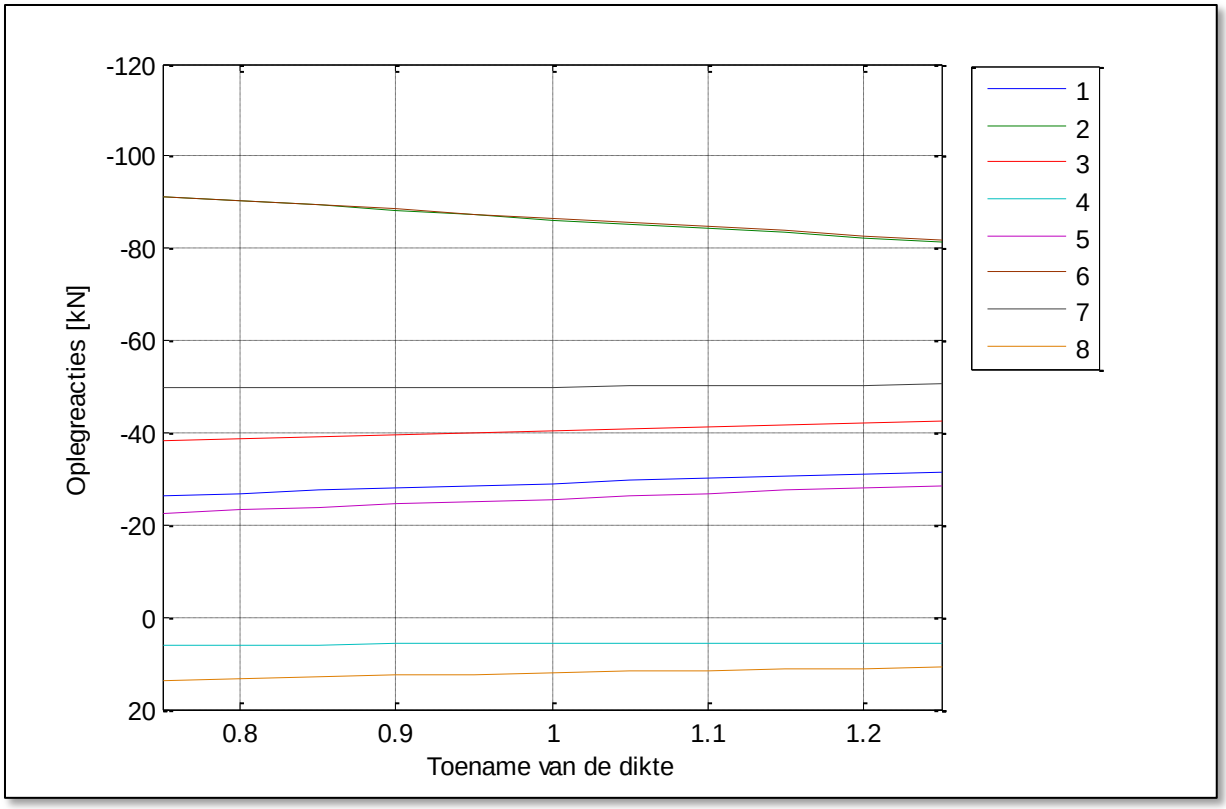
In de gevolgen op het gebied van de verticale verplaatsing zit echter wel een groot verschil: de dikte van de plaat blijkt hierop meer invloed te hebben dan de hoogte of breedte van de dwarsbalken. Dit komt doordat de plaat zich wél onder de puntlast bevindt.

8.2 Betonsoort

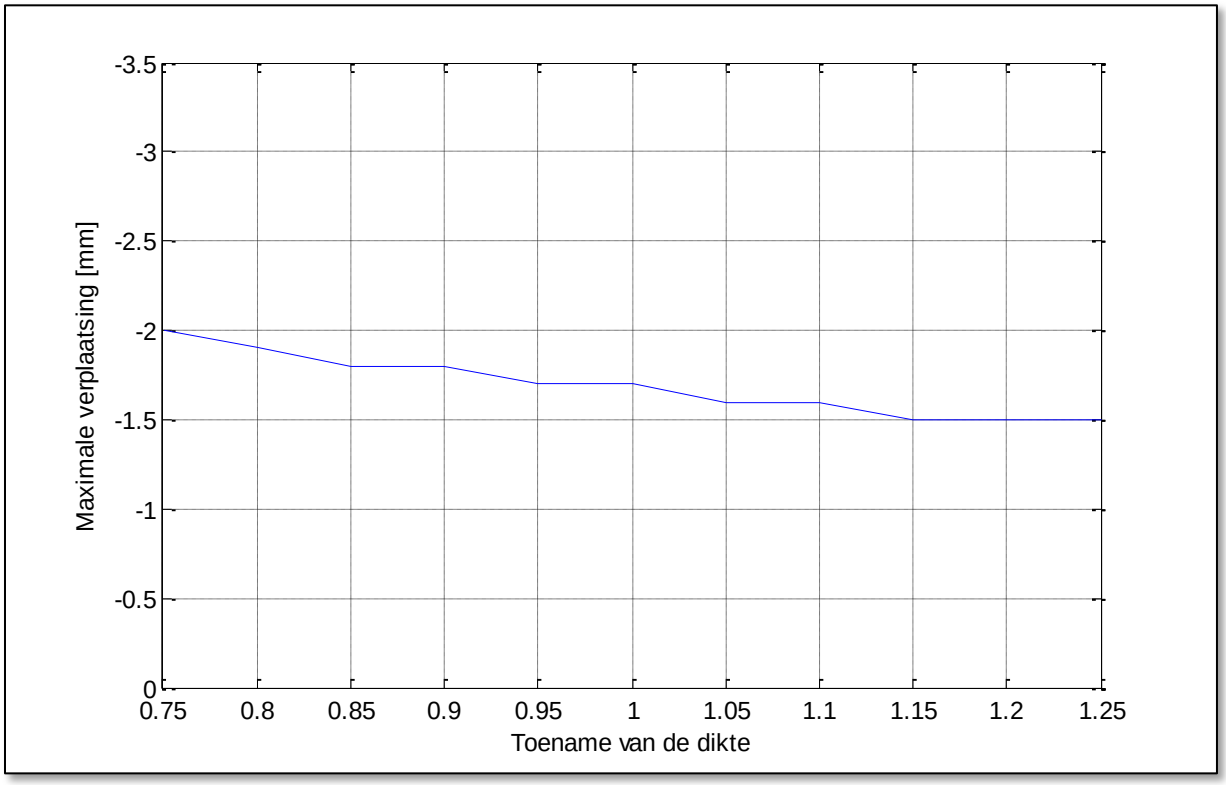
Voor het schaalmodel is gebruik gemaakt van twee betonsterkteklassen: C53/65 voor de T-liggers en de dwarsbalken en C45/55 voor de plaat. Deze betonsterkteklassen hebben verschillende waardes voor onder andere de elasticiteitsmodulus en de druksterkte. Wat er gebeurt wanneer men de elasticiteitsmodulus (en daarmee dus de buigstijfheid) aanpast, is eerder in dit rapport al besproken in 4.2. Daarom is hier alleen de druksterkte gevarieerd.

De gemiddelde druksterkte van betonklasse C45/55 bedraagt 55 N/mm^2, die van C53/65 bedraagt 61 N/mm^2. Beide waardes zijn gevarieerd van 75% tot 125%.

De resultaten zijn echter niet in een grafiek weergegeven. De waardes die eruit volgen, zijn namelijk allemaal gelijk aan elkaar, zowel voor de verdeling van de oplegreacties als voor de maximale verticale verplaatsing. Hieruit blijkt dat de druksterkte van de T-liggers, dwarsbalken en plaat geen invloed heeft op de verdeling van de oplegreacties en de maximale zakking.



Figuur 46 *De oplegreacties als functie van de dikte van de plaat*



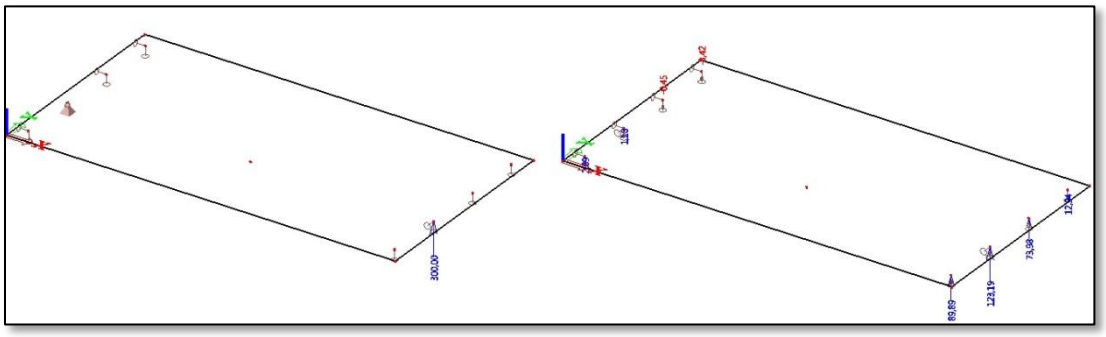
Figuur 47 *De maximale verplaatsing in z-richting als functie van de dikte van de plaat*

8.3 Veerstijfheid van de opleggingen

8.3.1 Veerstijfheid in de z-richting

Tot nu toe is er aangenomen dat alle opleggingen niet in verticale richting kunnen verplaatsen; ze zijn gemodelleerd als vast. In de realiteit is dit natuurlijk onjuist. Het schaalmodel bevindt zich op rubbers. Deze rubbers kunnen vervormen, waardoor er verplaatsingen in de z-richting optreden.

Een manier om met deze verplaatsingen rekening te houden, is door de opleggingen verend te maken in de z-richting. Hieronder staat een afbeelding van een modellering met een puntlast van -300 kN op oplegging 2. Links is er gebruik gemaakt van vaste opleggingen en rechts is een veerstijfheid van 50 kN/mm toegepast. Het verschil is direct te zien.

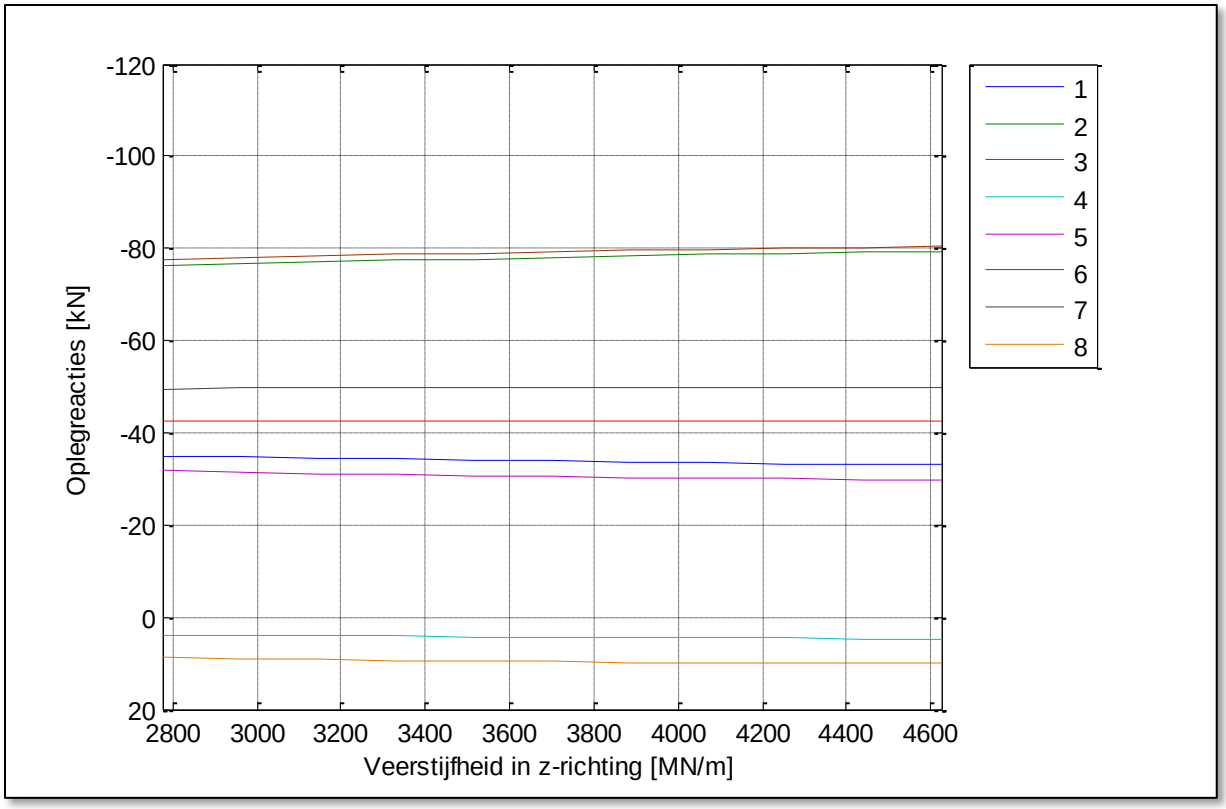


Figuur 48 *Het verschil tussen een modellering met vaste (links) en verende (rechts) opleggingen*

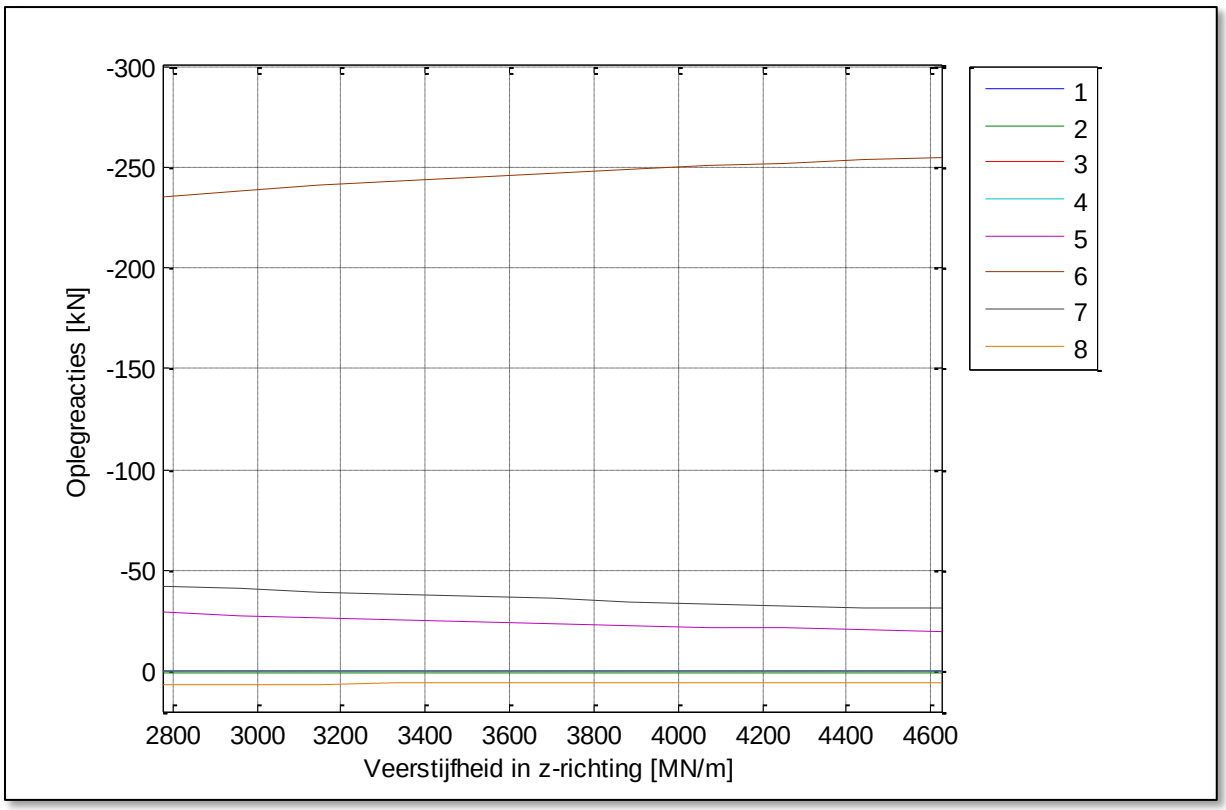
Om een beeld te krijgen van de invloed van deze verende opleggingen, zijn in SCIA berekeningen gemaakt met verschillende veerstijfheden. Er is begonnen met een veerstijfheid van 3700 kN/mm, een gemiddelde waarde afkomstig uit de experimentresultaten (zie bijlage C). Deze waarde is gevarieerd van 75% tot 125%. Er zijn berekeningen gemaakt voor de puntlast op het midden van ligger 2 en voor de puntlast op oplegging 6. De resultaten zijn op de volgende pagina te zien.

Uit de eerste grafiek blijkt dat de veerstijfheid nauwelijks invloed heeft op de oplegreacties ten gevolge van een puntlast op het midden van ligger 2. De oplegreacties van oplegging 2 en 6 nemen iets toe, terwijl de drukkrachten in oplegging 1 en 5 iets afnemen. De overige reacties blijven vrijwel constant.

De oplegreactie van oplegging 6 ten gevolge van een puntlast op oplegging 6 neemt toe. Daarentegen nemen de overige reacties af. Deze situatie is voorspelbaar, aangezien eerder uit de modelleringen bleek dat bij vaste opleggingen de oplegreactie van oplegging 6 -300 kN bedroeg, en de overige gelijk waren aan 0 kN. Van de verplaatsingen zijn geen grafieken weergegeven; deze worden niet beïnvloed door de veerstijfheden.



Figuur 49 *De oplegreacties als functie van de veerstijfheid in z-richting (ten gevolge van een puntlast op het midden van ligger 2)*



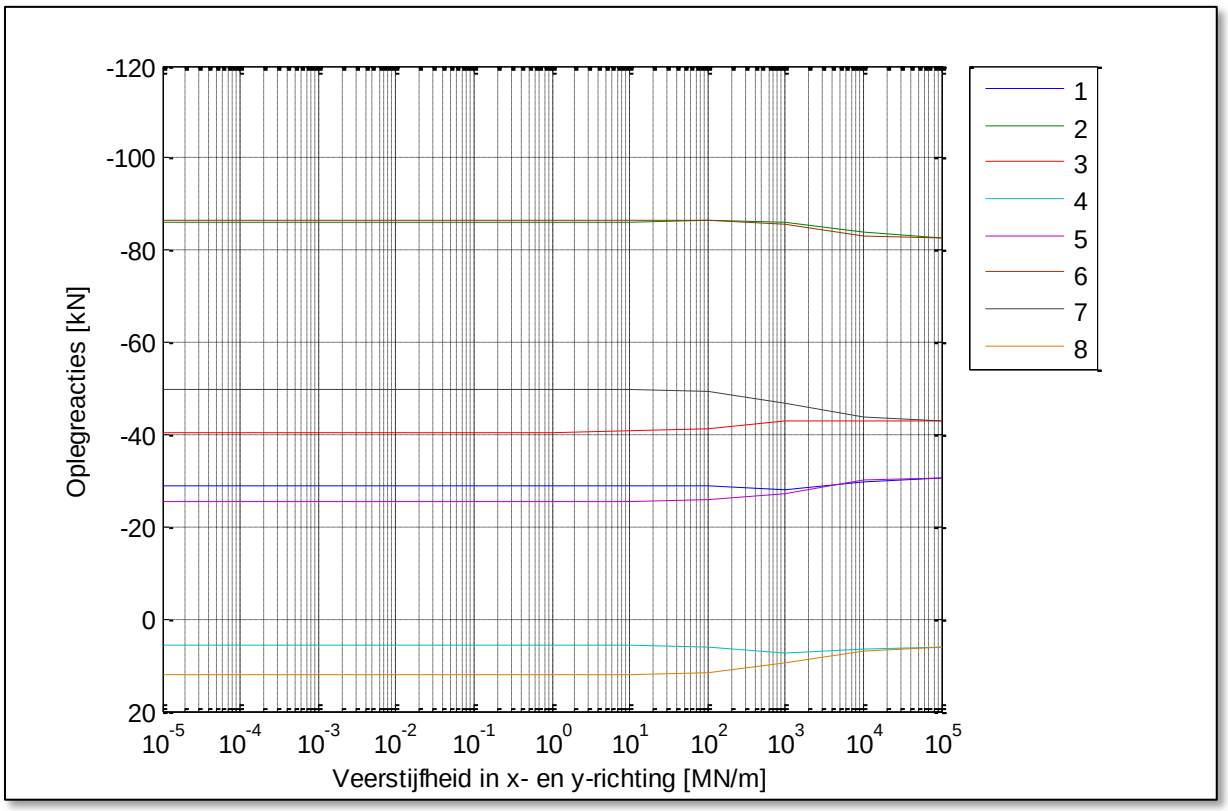
Figuur 50 *De oplegreacties als functie van de veerstijfheid in z-richting (ten gevolge van een puntlast boven oplegging 6)*

8.3.2 Veerstijfheid in de x- en y-richting

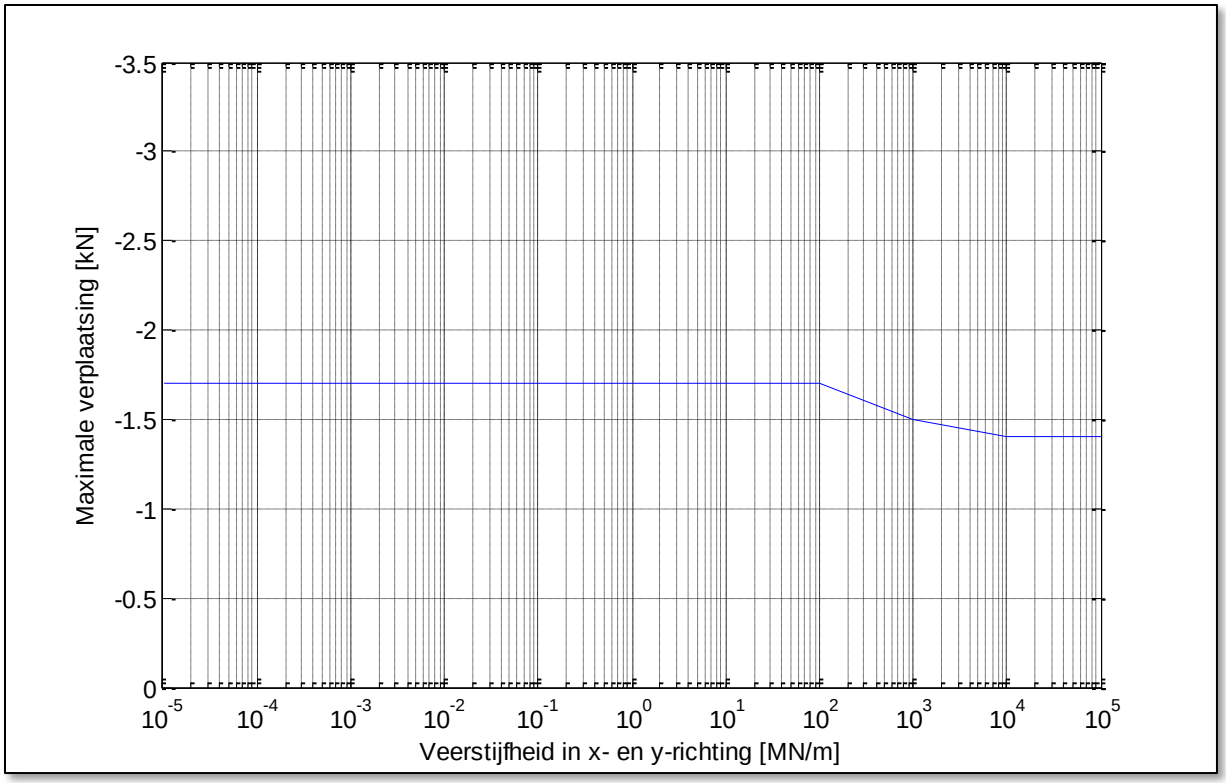
Naast een veerstijfheid in de z-richting, kunnen er in de x- en y-richting ook veerstijfheden worden toegepast. In de werkelijkheid zijn de opleggingen in deze richtingen nooit 100% vrij. Er treedt altijd wel wrijving op, ook al wordt er teflon toegepast. Om een beeld te krijgen van de invloed van deze veerstijfheden, zijn er hiervoor verschillende waardes ingevuld. Er is gebruik gemaakt van een logaritmische schaal, om te kunnen zien vanaf welke orde de wrijving daadwerkelijk invloed heeft op de verdeling van de oplegreacties en de verticale verplaatsing.

Uit de eerste grafiek blijkt dat er pas iets in de oplegreacties verandert, wanneer deze in de buurt van de 100 kN/mm komt. Vanaf daar dalen de drukkrachten in oplegging 2 en 6. Daarnaast komen de overige oplegreacties van de opleggingen per ligger, steeds meer bij elkaar in de buurt. In de buurt van 100.000 kN/mm zijn er nog maar vier verschillende waardes van oplegreacties te zien: de oplegreacties van de opleggingen die dezelfde ligger ondersteunen, zijn gelijk aan elkaar. Dit komt doordat het verschil in de opleggingen verdwijnt: alle opleggingen veranderen in vaste scharnieren, waardoor aan beide kanten dezelfde reacties optreden.

Ook aan de maximale verticale verplaatsing is te zien dat de veerstijfheden alleen tussen 100 kN/mm en 100.000 kN/mm voor veranderingen zorgen; alle waardes buiten dit interval zijn constant.



Figuur 51 *De oplegreacties als functie van de veerstijfheid in x- en y-richting*



Figuur 52 *De maximale verplaatsing in z-richting als functie van de veerstijfheid in x- en y-richting*

8.4 Voorspanning

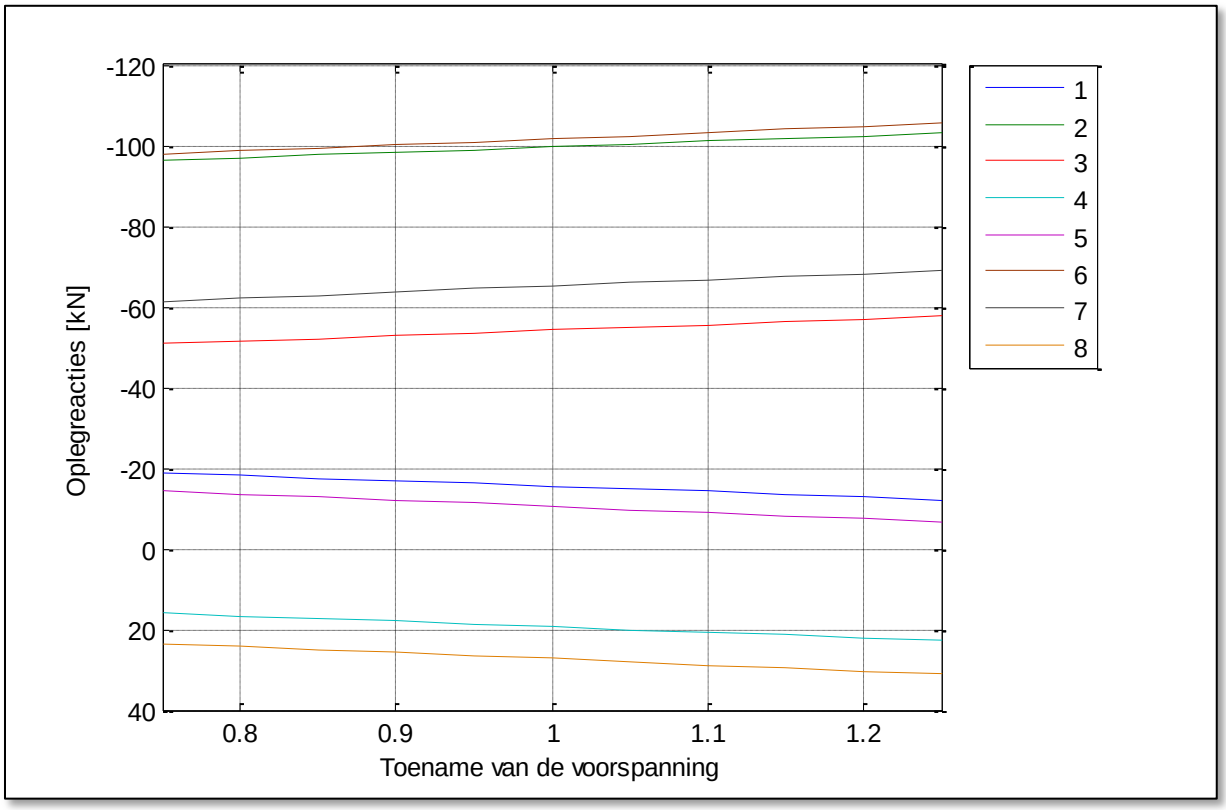
Tenslotte is er gekeken naar de invloed van de voorspanningen. Deze zijn, in de plaat, dwarsbalken en T-liggers samen, gevarieerd van 75% tot 125% van de oorspronkelijke waardes (deze zijn in 5.2 aan bod gekomen).

In de eerste grafiek zijn de resultaten weergegeven van een toenemende voorspanning in combinatie met een puntlast op het midden van ligger 2. De daaropvolgende grafiek geeft de resultaten van enkel de toenemende voorspanningen.

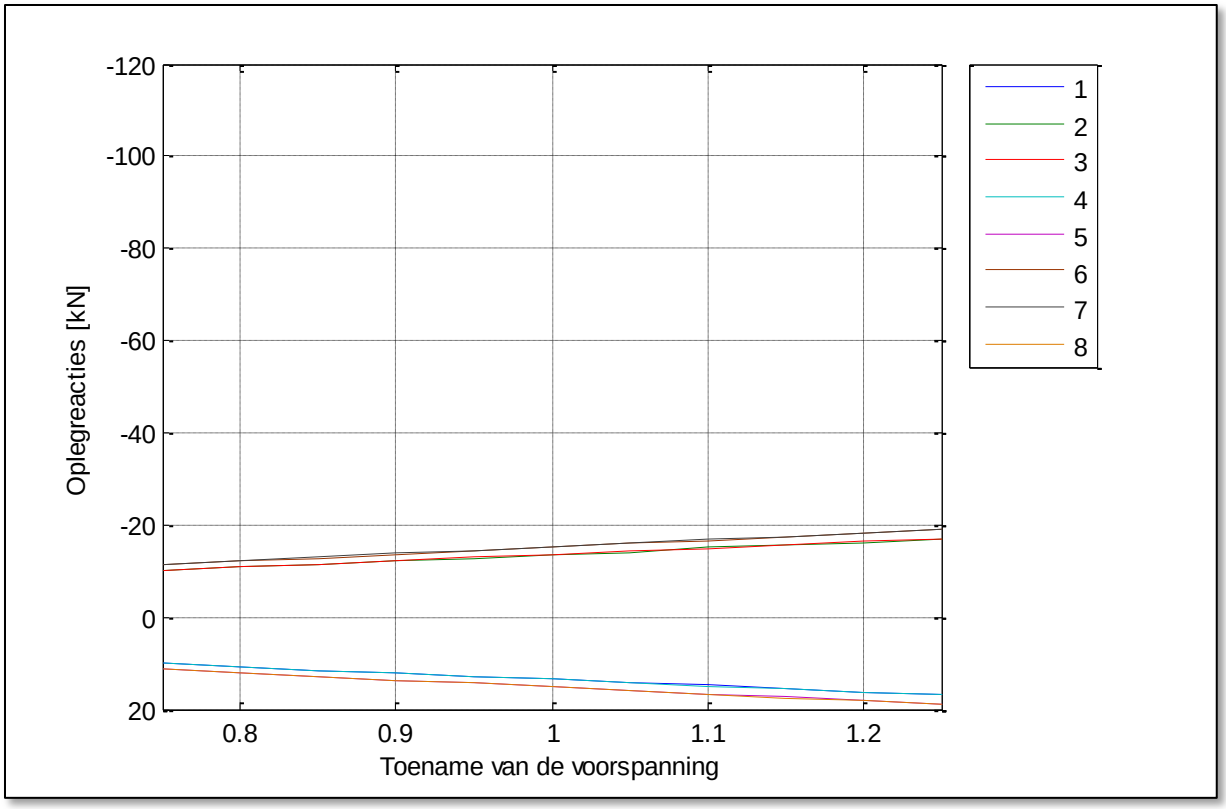
In de experimentresultaten zijn de waardes ten gevolge van de voorspanningen, niet meegenomen in de waardes van de oplegreacties. Na het spannen van de voorspanelementen, werden alle drukdozen weer gelijkgesteld aan 0 kN. Hierna werd pas de puntlast op de ligger geplaatst.

Wanneer men dus de waardes uit de tweede grafiek van de waardes uit de eerste grafiek aftrekt, krijgt men de waardes die de drukdozen aan zouden moeten geven. Deze resultaten zijn in figuur 55 weergegeven. In deze grafiek zijn echter alleen horizontale lijnen zichtbaar. Hieruit blijkt dat de voorspanning geen invloed heeft op de verdeling van de puntlast over de opleggingen. Voor de verticale verplaatsingen is dit wel het geval. In figuur 56 zijn deze verplaatsingen ten gevolge van de voorspanningen en een puntlast op ligger 2,

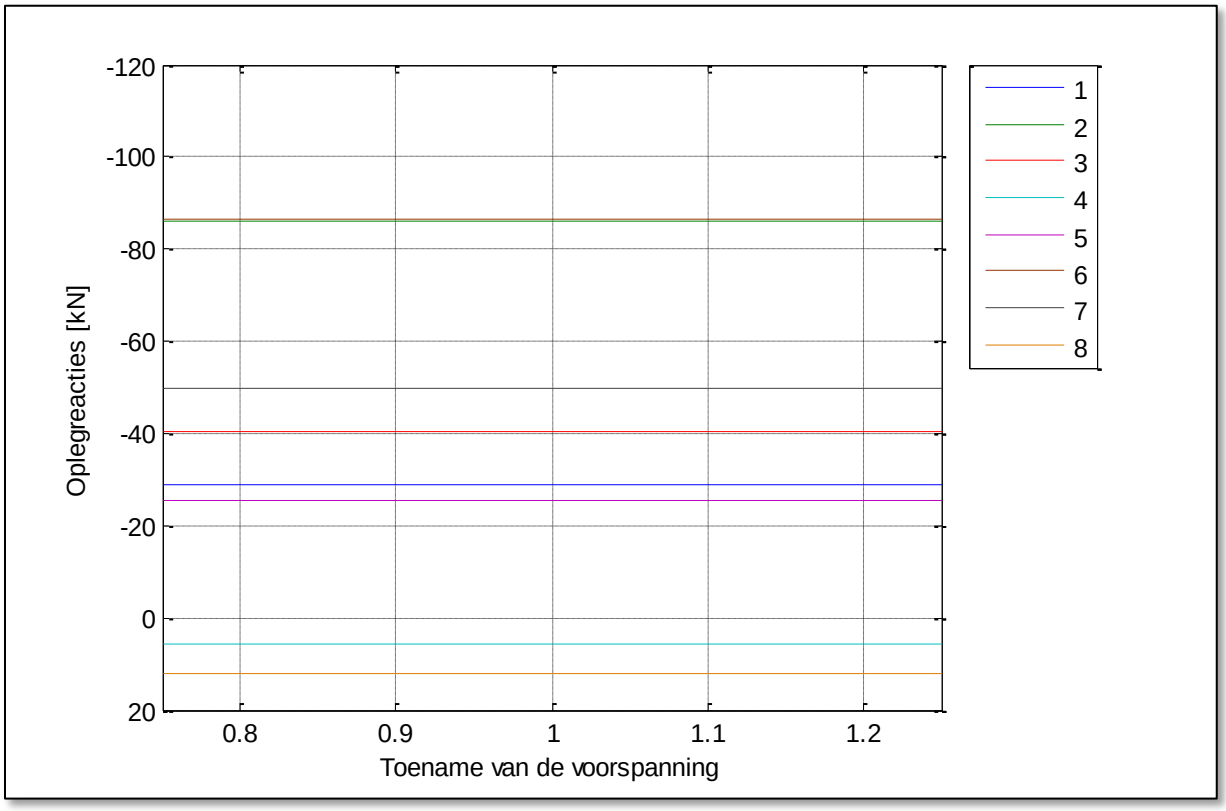
weergegeven. De rode lijn staat voor de verplaatsing in de positieve z-richting in het midden van de plaat; de blauwe lijn geeft de zakking van de randen van de plaat weer.
De verplaatsing in het midden van het brugdek ten gevolge van de puntlast zelf bedraagt -1,7 mm. In combinatie met de oorspronkelijke waardes van de voorspanningen bedraagt deze 14,9 mm. Zonder de puntlast bedraagt de verplaatsing ten gevolge van de voorspanningen 15,1 mm.



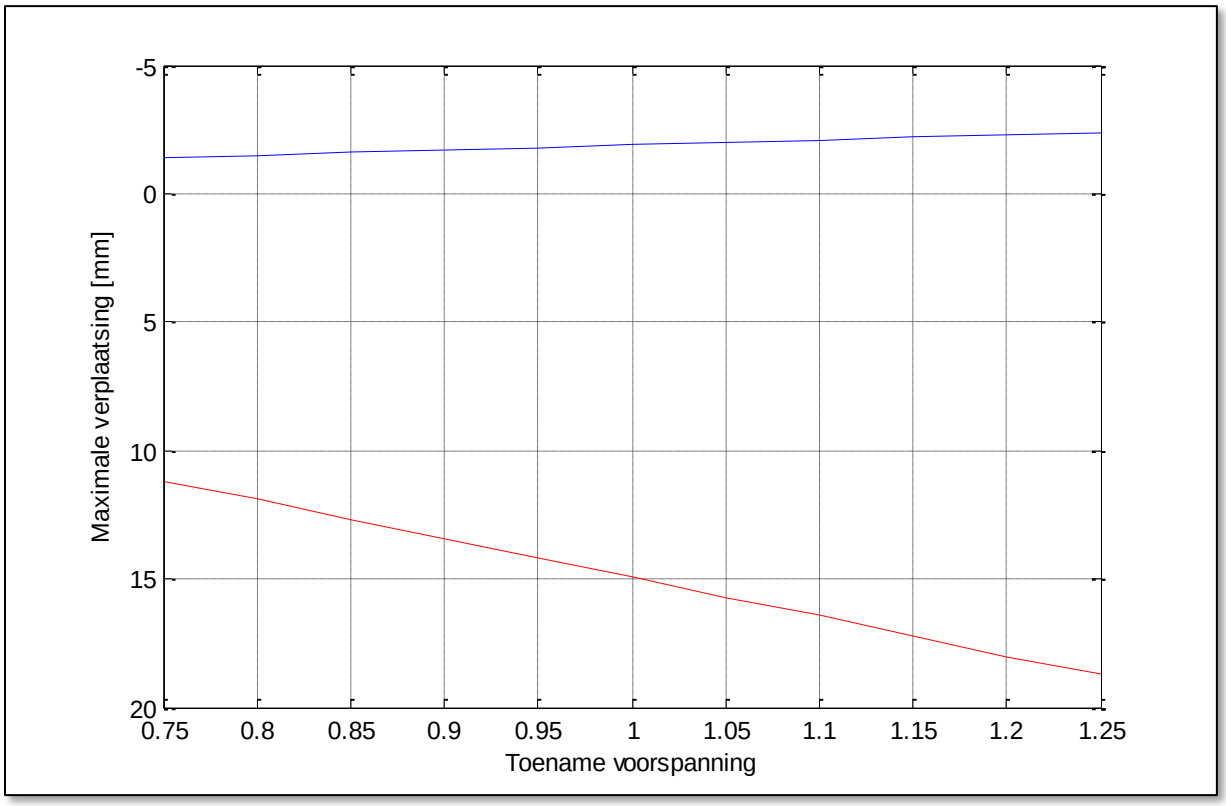
Figuur 53 *Oplegreacties als functie van de voorspanning (ten gevolge van de voorspanning en een puntlast op het midden van ligger 2)*



Figuur 54 *Oplegreacties als functie van de voorspanning alleen*



Figuur 55 *Een combinatie van figuur 53 en 54*



Figuur 56 *De maximale verplaatsing in z-richting als functie van de voorspanning (ten gevolge van de voorspanning en een puntlast op het midden van ligger 2)*

9. Adviezen voor een modellering in SCIA

In hoofdstuk 7 is er gesproken over afwijkingen tussen de drie verschillende modelleringen en de experimentresultaten. Deze afwijkingen werden berekend door alle absolute waardes van de verschillen in de verdeling van de oplegreacties in de werkelijkheid en in de modellering bij elkaar op te tellen. In dit hoofdstuk zal er gekeken worden naar de afwijkingen in de experimentresultaten zelf en naar de afwijkingen per oplegging tussen de experimentresultaten en het 3D model in SCIA. Aan de hand van de resultaten van de parameterstudie zal advies worden gegeven voor een goede modellering van het brugdek in SCIA Engineer.

Allereerst worden de verschillen per oplegging bekeken. In de onderstaande tabel zijn deze weergegeven. In de eerste rij staan de oplegreacties ten gevolge van een puntlast van -300 kN op het midden van ligger 2 volgens de experimentresultaten. Daaronder bevinden zich de oplegreacties die volgen uit het 3D model in SCIA. De laatste rij geeft de afwijking weer. Deze afwijking is berekend door de oplegreacties uit het SCIA model uit te drukken in percentages van de oplegreacties van de experimentresultaten. Voor oplegging 1 geldt bijvoorbeeld:

$$\left(\frac{-29{,}01}{-42{,}81}\right) \cdot 100 \approx 68\% \rightarrow Afwijking\ bedraagt: |100\% - 68\%| = 32\%$$

Tabel 18 *Afwijkingen van de modellering in SCIA ten opzichte van de experimentresultaten*

	Opl. 1	**Opl. 2**	**Opl. 3**	**Opl. 4**	**Opl. 5**	**Opl. 6**	**Opl. 7**	**Opl. 8**
Experiment	-42,81	-57,49	-45,41	2,94	-22,03	-76,23	-24,69	-1,48
SCIA (3D)	-29,01	-86,24	-40,55	5,8	-25,64	-86,55	-49,92	12,11
Afwijking	32%	50%	11%	97%	16%	14%	102%	918%

Te zien is dat de drukkrachten in oplegging 2 en 6 in de modellering groter zijn dan in de experimentresultaten. Daarnaast zijn de drukkrachten in oplegging 1 en 3 lager dan in de experimentresultaten. Om de afwijkingen in oplegging 1, 2, 3, en 6 te verkleinen, kunnen er drie methoden toegepast worden. Allereerst kunnen de afmetingen van de doorsnede van de T-liggers verkleind worden. Daarnaast kunnen de afmetingen van de doorsnede van de dwarsbalken vergroot worden. Tenslotte is er de mogelijkheid om de plaat te verdikken. Al deze aanpassingen zorgen ervoor dat de drukkrachten in oplegging 2 en 6 afnemen, terwijl deze in oplegging 1 en 3 toenemen. Echter neemt tijdens het verkleinen van de doorsnede van de liggers of het vergroten van de doorsnede van de dwarsbalken, de trekkracht in oplegging 8 toe, waardoor deze waarde nog meer af gaat wijken. Het is hier dus het

verstandigste om de plaat te verdikken, aangezien dan de afwijking in oplegging 8 ook afneemt.
Toch zitten hier ook enkele nadelen aan. Zo zullen bij het verdikken van de plaat, ook de drukkrachten in oplegging 5 en 7 toenemen. Aangezien deze waardes al groter zijn dan in de experimentresultaten, zal dit voor grotere afwijkingen in oplegging 5 en 7 zorgen. De trekkracht in oplegging 4 verandert nauwelijks, waardoor de afwijking hier constant blijft. Het verdikken van de plaat lijkt zo op een iteratief proces: men moet de dikte zodanig kiezen dat de afname van de afwijkingen in oplegging 1, 2, 3, 6 en 8, groter is dan de toename van de afwijkingen in oplegging 5 en 7. Aangezien de afwijking in oplegging 7 al erg hoog is, zal deze ingreep slechts voor een kleine correctie kunnen zorgen.

Wanneer men een puntlast op het midden van een ligger plaatst, zouden de oplegreacties aan beide zijden van de ligger gelijk aan elkaar moeten zijn. In de experimentresultaten is dit echter niet het geval. In de onderstaande tabel zijn de afwijkingen (voor zowel de experimentresultaten als de resultaten uit het SCIA model) weergegeven tussen de oplegreacties aan de noord- en zuidkant van de liggers. Deze afwijkingen zijn berekend door de oplegreacties behorend bij één ligger van elkaar af te trekken.

Tabel 19 *Afwijkingen tussen de oplegreacties per ligger*

	Oplegging 1 en 5	**Oplegging 2 en 6**	**Oplegging 3 en 7**	**Oplegging 4 en 8**
Experiment	20,78 kN	18,74 kN	20,72 kN	4,42 kN
SCIA (3D)	3,37 kN	0,31 kN	9,37 kN	6,31 kN

De waardes in de onderste rij ziet men grafisch terug in figuur 51 (de verschillen tussen de lijnen in het linkerdeel van de grafiek zijn gelijk aan de afwijkingen). Hieruit blijkt dat deze waardes direct het maximale verschil tussen de opleggingen in SCIA vormen: wanneer men de veerstijfheid in x- en y-richting aanpast, kan het verschil in het model alleen nog maar afnemen. Uit deze tabel valt dus te concluderen dat het aanpassen van het 3D model in SCIA weinig nut heeft, aangezien de afwijkingen in de experimentresultaten zelf al vele malen groter zijn.

10. Conclusie

Uiteindelijk blijkt het benaderen van het gedrag van een betonnen brugdek met relatief eenvoudige modelleringen in programma's als MatrixFrame en SCIA Engineer, niet zo eenvoudig. Elke kleine afwijking in een modellering kan tot grote verschillen in de oplegreacties leiden.

Zo zorgt de constante verdeling van de buigstijfheid in het plaatmodel voor een geleidelijke verdeling van de belasting. Hierdoor worden met name de drukkrachten in oplegging 2 en 6 aanzienlijk kleiner dan dat ze in werkelijkheid zijn.

In MatrixFrame blijken de staven die dienst doen als plaat, zich anders te gedragen dan een werkelijke plaat. In een modellering in één vlak dragen de staven relatief veel belasting af in zijwaartse richting, terwijl het percentage dat de plaat in werkelijkheid naar buiten afdraagt veel geringer is. Daarnaast komen in een modellering met een zekere hoogte onrealistische verplaatsingen voor, die leiden tot afwijkingen in de oplegreacties. Dit is waarschijnlijk te verhelpen door extra staafelementen te plaatsen. Helaas was dit gedurende het project niet mogelijk, wegens het staaflimiet in de toegepaste MatrixFrame versie.

In het 3D model gaat het om het gebrek aan spreiding over de hoogte. Normaal gesproken spreidt een puntlast zich ook uit over de dikte van de plaat en de hoogte van de T-ligger. Aangezien dit in SCIA Engineer niet gebeurt, treedt er bij een puntlast boven op een oplegging, slechts één oplegreactie op.

Kortom: er moet met veel verschillende parameters rekening gehouden worden. Wanneer men eenmaal een beeld heeft van hoe deze parameters de krachtsverdeling van het brugdek beïnvloeden, kan men het model aanpassen. Zo kunnen de afwijkingen in het 3D model van SCIA beperkt worden door de dikte van de plaat aan te passen. In dit project bleek dit echter weinig nut te hebben, aangezien de afwijkingen in de experimentresultaten vele malen groter bleken te zijn dan die in de modellering.

Bronvermelding

Boeken / Dictaten:

Braam, C.R. & Walraven, J.C. (2012) *Prestressed Concrete* Delft: TU Delft

Vugts, M.W.J. (2012) *Experimental determination of bearing capacity transversely prestressed concrete deck slabs* Delft: TU Delft

Walraven, J.C. (2011) *Dictaat CT2052/3150: Gewapend Beton* Delft: TU Delft

Artikelen:

Velzen, T. van (21 december 2012) Versterkend rekenen: Betonnen bruggen door gewelfwerking bestand tegen meer belasting *De Ingenieur (20), p. 32-35*

Websites:

Matrix CAE bv (2002) *Gebruikershandleiding MatrixFrame 2.0* Geraadpleegd op 15 mei 2013, http://mech025.citg.tudelft.nl/TUD_CT/CT2031/oefening/matrix/files/Gebruikershandleiding.pdf

Nemetschek Scia nv (2011) *Advanced Expert Training: Voorspanning (Prefab)* Geraadpleegd op 30 april 2013, http://downloads.scia-online.com/support/SciaEngineer/Manuals/2011/Training%20Manuals/Pre-stressed%20Concrete/Pre-tensioned%20Concrete/[Dut]Pre-tensioned%20Concrete%202011.0%20v1.pdf

Nemetschek Scia nv (2012) *Scia Engineer 2012 Manual* Geraadpleegd op 31 april 2013, http://nemetschek-scia.com/nl/support/downloads

Willemsen, Frans (z.d.) *Bouw van de 1e betonnen brug 1951-1953* Geraadpleegd op 24 april 2013, http://www.pannerden.info/index.php/verleden/geschiedenis/338-bouw-van-de-1e-betonnen-brug-1951-1953

Foto omslag:

Ray1900, 15 september 2011 (www.straatkaart.nl)

Bijlagen

A. Meetresultaten

Tabel 20 *Verplaatsingen van de rubbers tgv een puntlast op oplegging 6 in mm*

Belastingsfase 1

	Opl. 1	Opl. 2	Opl. 3	Opl. 4	Opl. 5	Opl. 6	Opl. 7	Opl. 8
-150,62 kN	0,010566	-0,00032	-0,00016	-0,0006	0,193671	0,205967	0,152751	0,047398
-300,05 kN	0,010323	0,001515	0,01059	0,004215	0,377914	0,438279	0,283463	0,126194
-150,35 kN	0,005602	0,000136	0,005375	0,00666	0,28295	0,306985	0,199302	0,037033

Belastingsfase 2

	Opl. 1	Opl. 2	Opl. 3	Opl. 4	Opl. 5	Opl. 6	Opl. 7	Opl. 8
-150,32 kN	0,006219	0,000015	0,010515	0,000377	0,246669	0,25453	0,173588	0,026118
-300,05 kN	0,011013	0,000516	0,016103	0,015284	0,409164	0,42702	0,288793	0,089621
-150,40 kN	0,00527	-8,8E-05	0,014207	0,009501	0,293506	0,303719	0,193726	0,03566

Belastingsfase 3

	Opl. 1	Opl. 2	Opl. 3	Opl. 4	Opl. 5	Opl. 6	Opl. 7	Opl. 8
-150,87 kN	0,010397	0,002214	0,010502	0,004593	0,257235	0,264726	0,174004	0,031794
-300,04 kN	0,0105	-0,00031	0,015973	0,009984	0,420097	0,436929	0,288883	0,0945
-150,61 kN	0,005438	-0,00064	0,015613	0,010674	0,293704	0,306531	0,197242	0,042557

Tabel 21 *Verplaatsingen van de rubbers tgv van een puntlast op het midden van ligger 2 in mm*

Belastingsfase 1

	Opl. 1	Opl. 2	Opl. 3	Opl. 4	Opl. 5	Opl. 6	Opl. 7	Opl. 8
-150,36 kN	0,109927	0,042829	0,059376	-0,0048	0,174292	0,04727	0,052962	-0,00031
-300,30 kN	0,224789	0,138248	0,118795	-0,02508	0,278607	0,187791	0,15268	0,02135
-150,60 kN	0,130316	0,080027	0,07632	-0,00441	0,179993	0,097988	0,074673	0,000121

Belastingsfase 2

	Opl. 1	Opl. 2	Opl. 3	Opl. 4	Opl. 5	Opl. 6	Opl. 7	Opl. 8
-150,12 kN	0,115314	0,069644	0,059925	0,010754	0,169861	0,047336	0,064188	0,037076
-300,07 kN	0,224802	0,154592	0,119662	0,000575	0,280164	0,188133	0,153982	0,036955
-150,49 kN	0,141218	0,079861	0,07664	0,000464	0,174959	0,108458	0,080215	0,011791

Belastingsfase 3

	Opl. 1	Opl. 2	Opl. 3	Opl. 4	Opl. 5	Opl. 6	Opl. 7	Opl. 8
-150,12 kN	0,115345	0,090517	0,059889	0,017492	0,173306	0,052698	0,063832	0,03767
-300,07 kN	0,219171	0,159627	0,124615	0,003458	0,280381	0,188281	0,153525	0,031443
-150,21 kN	0,142008	0,085055	0,081539	0,005436	0,175312	0,108621	0,079905	0,008696

Tabel 22 *Buiging van de liggers tgv een puntlast boven oplegging 6*

Belastingsfase 1

	Ligger 1	Ligger 2	Ligger 3	Ligger 4
-150,62 kN	-0,04899	-0,00135	-0,1617	-0,00115
-300,05 kN	-0,10239	0,026669	-0,15413	0,043302
-150,35 kN	-0,07772	-0,02817	-0,16714	0,050992

Belastingsfase 2

	Ligger 1	Ligger 2	Ligger 3	Ligger 4
-150,32 kN	-0,07695	-0,05393	-0,16472	0,025714
-300,05 kN	-0,10512	-0,08008	-0,14154	0,022453
-150,40 kN	-0,07917	-0,10355	-0,14098	0,081458

Belastingsfase 3

	Ligger 1	Ligger 2	Ligger 3	Ligger 4
-150,87 kN	-0,07868	-0,05244	-0,16651	0,052657
-300,04 kN	-0,10381	-0,10607	-0,14053	0,026604
-150,61 kN	-0,08087	-0,1021	-0,14516	0,080645

Tabel 23 *Buiging van de liggers tgv een puntlast op het midden van ligger 2*

Belastingsfase 1

	Ligger 1	Ligger 2	Ligger 3	Ligger 4
-150,36 kN	-0,17788	-0,86968	-0,3529	-0,2061
-300,30 kN	-0,82076	-1,96176	-0,42967	-0,36597
-150,60 kN	-0,20032	-1,12301	-0,37987	-0,18112

Belastingsfase 2

	Ligger 1	Ligger 2	Ligger 3	Ligger 4
-150,12 kN	-0,14985	-0,85866	-0,40439	-0,25658
-300,07 kN	-0,8455	-2,14498	-0,45591	-0,33669
-150,49 kN	-0,19785	-1,01706	-0,42946	-0,17855

Belastingsfase 3

	Ligger 1	Ligger 2	Ligger 3	Ligger 4
-150,12 kN	-0,17337	-0,83471	-0,37755	-0,25692
-300,07 kN	-0,86093	-2,16887	-0,45512	-0,33815
-150,21 kN	-0,19978	-0,99069	-0,42995	-0,18415

Tabel 24 *Verplaatsing onder de puntlast boven oplegging 6 in mm*

Belastingsfase 1	
-150,62 kN	-4,187919
-300,05 kN	-5,374045
-150,35 kN	-4,465673
Belastingsfase 2	
-150,32 kN	-4,322809
-300,05 kN	-5,416315
-150,40 kN	-4,489474
Belastingsfase 3	
-150,87 kN	-4,360351
-300,04 kN	-5,43344
-150,61 kN	-4,506299

Tabel 25 *Verplaatsing onder de puntlast op het midden van ligger 2*

Belastingsfase 1	
-150,36 kN	-3,509737
-300,30 kN	-5,240059
-150,60 kN	-3,761117
Belastingsfase 2	
-150,12 kN	-3,611889
-300,07 kN	-5,279327
-150,49 kN	-3,775293
Belastingsfase 3	
-150,12 kN	-3,626374
-300,07 kN	-5,294747
-150,21 kN	-3,789232

Opmerking: Halverwege het project bleken van deze meetresultaten alleen de oplegreacties daadwerkelijk te kloppen. Om deze reden zijn de overige waardes niet in dit rapport aan bod gekomen.

B. Resultaten parameterstudie

Tabel 26 *Oplegreacties [kN] en maximale verticale verplaatsing [mm] ten gevolge van een variërende hoogte van de T-liggers*

	1	2	3	4	5	6	7	8	Max. vert. verpl.
75%	-40,9	-63,27	-50,6	4,77	-37,56	-63,51	-60,44	11,52	-3
80%	-38,3	-68,1	-48,8	5,2	-34,93	-68,32	-58,67	11,92	-2,7
85%	-35,79	-72,87	-46,85	5,51	-32,4	-73,08	-56,68	12,16	-2,4
90%	-33,4	-77,5	-44,79	5,69	-30,01	-77,73	-54,51	12,26	-2,1
95%	-31,14	-81,97	-42,68	5,79	-27,75	-82,23	-52,24	12,23	-1,9
100%	-29,01	-86,24	-40,55	5,8	-25,64	-86,55	-49,92	12,11	-1,7
105%	-27,01	-90,3	-38,44	5,76	-23,67	-90,66	-47,58	11,91	-1,5
110%	-25,15	-94,14	-36,37	5,66	-21,85	-94,54	-45,27	11,66	-1,4
115%	-23,43	-97,74	-34,36	5,53	-20,15	-98,2	-43	11,36	-1,3
120%	-21,83	-101,11	-32,43	5,37	-18,59	-101,64	-40,81	11,04	-1,1
125%	-20,35	-104,26	-30,58	5,19	-17,16	-104,84	-38,69	10,69	-1

Tabel 27 *Oplegreacties [kN] en maximale verticale verplaatsing [mm] ten gevolge van een variërende breedte van de T-liggers*

	1	2	3	4	5	6	7	8	Max. vert. verpl.
75%	-33,1	-77,83	-44,98	5,92	-29,88	-78,21	-53,98	12,07	-2
80%	-32,18	-79,71	-44,03	5,92	-28,92	-80,07	-53,12	12,11	-2
85%	-31,31	-81,48	-43,11	5,9	-28,02	-81,83	-52,29	12,13	-1,9
90%	-30,49	-83,16	-42,23	5,88	-27,17	-83,49	-51,47	12,14	-1,8
95%	-29,73	-84,74	-41,37	5,84	-26,38	-85,06	-50,68	12,13	-1,7
100%	-29,01	-86,24	-40,55	5,8	-25,64	-86,55	-49,92	12,11	-1,7
105%	-28,33	-87,67	-39,77	5,76	-24,94	-87,96	-49,18	12,08	-1,6
110%	-27,69	-89,02	-39,01	5,71	-24,28	-89,3	-48,46	12,04	-1,6
115%	-27,08	-90,3	-38,28	5,66	-23,66	-90,57	-47,76	11,99	-1,5
120%	-26,51	-91,52	-37,58	5,61	-23,07	-91,77	-47,09	11,94	-1,5
125%	-25,97	-92,68	-36,91	5,56	-22,52	-92,92	-46,44	11,88	-1,4

Tabel 28 *Oplegreacties [kN] en maximale verticale verplaatsing [mm] ten gevolge van een variërende hoogte van de dwarsbalken*

	1	2	3	4	5	6	7	8	Max. vert. verpl.
75%	-22,13	-100,33	-33,03	5,5	-19,29	-101,04	-39,95	10,28	-1,7
80%	-23,38	-97,75	-34,45	5,58	-20,41	-98,4	-41,89	10,7	-1,7
85%	-24,72	-94,99	-35,95	5,66	-21,62	-95,57	-43,9	11,1	-1,7
90%	-26,09	-92,16	-37,46	5,72	-22,89	-92,67	-45,91	11,47	-1,7
95%	-27,53	-89,23	-39,02	5,77	-24,24	-89,63	-47,93	11,81	-1,7
100%	-29,01	-86,24	-40,55	5,8	-25,64	-86,55	-49,92	12,11	-1,7
105%	-30,5	-83,25	-42,06	5,81	-27,07	-83,44	-51,85	12,36	-1,7
110%	-32	-80,25	-43,53	5,78	-28,53	-80,34	-53,7	12,57	-1,7
115%	-33,51	-77,28	-44,94	5,73	-30	-77,25	-55,47	12,72	-1,7
120%	-35,02	-74,35	-46,27	5,64	-31,47	-74,21	-57,13	12,82	-1,6
125%	-36,51	-71,48	-47,53	5,52	-32,95	-71,22	-58,69	12,86	-1,6

Tabel 29 *Oplegreacties [kN] en maximale verticale verplaatsing [mm] ten gevolge van een variërende breedte van de dwarsbalken*

	1	2	3	4	5	6	7	8	Max. vert. verpl.
75%	-27,27	-89,39	-39,5	6,16	-24,15	-89,81	-47,82	11,79	-1,7
80%	-27,72	-88,53	-39,86	6,11	-24,53	-88,94	-48,43	11,9	-1,7
85%	-28,14	-87,76	-40,15	6,05	-24,89	-88,14	-48,96	11,99	-1,7
90%	-28,47	-87,15	-40,35	5,98	-25,18	-87,51	-49,37	12,05	-1,7
95%	-28,77	-86,63	-40,49	5,9	-25,44	-86,96	-49,7	12,09	-1,7
100%	-29,01	-86,24	-40,55	5,8	-25,64	-86,55	-49,92	12,11	-1,7
105%	-29,19	-85,96	-40,55	5,7	-25,8	-86,24	-50,06	12,1	-1,7
110%	-29,33	-85,78	-40,49	5,6	-25,93	-86,04	-50,12	12,08	-1,7
115%	-29,42	-85,7	-40,37	5,48	-26,01	-85,93	-50,1	12,04	-1,6
120%	-29,49	-85,63	-40,25	5,37	-26,09	-85,84	-50,08	12	-1,6
125%	-29,53	-85,63	-40,09	5,26	-26,14	-85,8	-50,01	11,95	-1,6

Tabel 30 *Oplegreacties [kN] en maximale verticale verplaatsing [mm] ten gevolge van een variërende plaatdikte*

	1	2	3	4	5	6	7	8	Max. vert. verpl.
75%	-26,34	-91,37	-38,36	6,07	-22,5	-91,28	-49,82	13,61	-2
80%	-26,88	-90,34	-38,78	6	-23,14	-90,36	-49,76	13,26	-1,9
85%	-27,42	-89,31	-39,21	5,94	-23,78	-89,42	-49,75	12,94	-1,8
90%	-27,96	-88,28	-39,66	5,89	-24,41	-88,46	-49,78	12,65	-1,8
95%	-28,48	-87,25	-40,11	5,84	-25,03	-87,5	-49,84	12,37	-1,7
100%	-29,01	-86,24	-40,55	5,8	-25,64	-86,55	-49,92	12,11	-1,7
105%	-29,52	-85,25	-40,99	5,76	-26,24	-85,61	-50,01	11,86	-1,6
110%	-30,02	-84,28	-41,41	5,72	-26,83	-84,68	-50,1	11,61	-1,6
115%	-30,53	-83,3	-41,85	5,68	-27,43	-83,73	-50,23	11,38	-1,5
120%	-31,04	-82,32	-42,29	5,64	-28,02	-82,77	-50,37	11,16	-1,5
125%	-31,54	-81,36	-42,71	5,6	-28,6	-81,83	-50,52	10,95	-1,5

Tabel 31 *Oplegreacties [kN] en maximale verticale verplaatsing [mm] ten gevolge van een variërende druksterkte van de T-liggers*

	1	2	3	4	5	6	7	8	Max. vert. verpl.
75%	-29,01	-86,24	-40,55	5,8	-25,64	-86,55	-49,92	12,11	-1,7
80%	-29,01	-86,24	-40,55	5,8	-25,64	-86,55	-49,92	12,11	-1,7
85%	-29,01	-86,24	-40,55	5,8	-25,64	-86,55	-49,92	12,11	-1,7
90%	-29,01	-86,24	-40,55	5,8	-25,64	-86,55	-49,92	12,11	-1,7
95%	-29,01	-86,24	-40,55	5,8	-25,64	-86,55	-49,92	12,11	-1,7
100%	-29,01	-86,24	-40,55	5,8	-25,64	-86,55	-49,92	12,11	-1,7
105%	-29,01	-86,24	-40,55	5,8	-25,64	-86,55	-49,92	12,11	-1,7
110%	-29,01	-86,24	-40,55	5,8	-25,64	-86,55	-49,92	12,11	-1,7
115%	-29,01	-86,24	-40,55	5,8	-25,64	-86,55	-49,92	12,11	-1,7
120%	-29,01	-86,24	-40,55	5,8	-25,64	-86,55	-49,92	12,11	-1,7
125%	-29,01	-86,24	-40,55	5,8	-25,64	-86,55	-49,92	12,11	-1,7

Tabel 32 *Oplegreacties [kN] en maximale verticale verplaatsing [mm] ten gevolge van een variërende druksterkte van de dwarsbalken*

	1	2	3	4	5	6	7	8	Max. vert. verpl.
75%	-29,01	-86,24	-40,55	5,8	-25,64	-86,55	-49,92	12,11	-1,7
80%	-29,01	-86,24	-40,55	5,8	-25,64	-86,55	-49,92	12,11	-1,7
85%	-29,01	-86,24	-40,55	5,8	-25,64	-86,55	-49,92	12,11	-1,7
90%	-29,01	-86,24	-40,55	5,8	-25,64	-86,55	-49,92	12,11	-1,7
95%	-29,01	-86,24	-40,55	5,8	-25,64	-86,55	-49,92	12,11	-1,7
100%	-29,01	-86,24	-40,55	5,8	-25,64	-86,55	-49,92	12,11	-1,7
105%	-29,01	-86,24	-40,55	5,8	-25,64	-86,55	-49,92	12,11	-1,7
110%	-29,01	-86,24	-40,55	5,8	-25,64	-86,55	-49,92	12,11	-1,7
115%	-29,01	-86,24	-40,55	5,8	-25,64	-86,55	-49,92	12,11	-1,7
120%	-29,01	-86,24	-40,55	5,8	-25,64	-86,55	-49,92	12,11	-1,7
125%	-29,01	-86,24	-40,55	5,8	-25,64	-86,55	-49,92	12,11	-1,7

Tabel 33 *Oplegreacties [kN] en maximale verticale verplaatsing [mm] ten gevolge van een variërende druksterkte van de plaat*

	1	2	3	4	5	6	7	8	Max. vert. verpl.
75%	-29,01	-86,24	-40,55	5,8	-25,64	-86,55	-49,92	12,11	-1,7
80%	-29,01	-86,24	-40,55	5,8	-25,64	-86,55	-49,92	12,11	-1,7
85%	-29,01	-86,24	-40,55	5,8	-25,64	-86,55	-49,92	12,11	-1,7
90%	-29,01	-86,24	-40,55	5,8	-25,64	-86,55	-49,92	12,11	-1,7
95%	-29,01	-86,24	-40,55	5,8	-25,64	-86,55	-49,92	12,11	-1,7
100%	-29,01	-86,24	-40,55	5,8	-25,64	-86,55	-49,92	12,11	-1,7
105%	-29,01	-86,24	-40,55	5,8	-25,64	-86,55	-49,92	12,11	-1,7
110%	-29,01	-86,24	-40,55	5,8	-25,64	-86,55	-49,92	12,11	-1,7
115%	-29,01	-86,24	-40,55	5,8	-25,64	-86,55	-49,92	12,11	-1,7
120%	-29,01	-86,24	-40,55	5,8	-25,64	-86,55	-49,92	12,11	-1,7
125%	-29,01	-86,24	-40,55	5,8	-25,64	-86,55	-49,92	12,11	-1,7

Tabel 34 *Oplegreacties [kN] en maximale verticale verplaatsing [mm] ten gevolge van een variërende veerstijfheid in z-richting (ten gevolge van een puntlast van -300 kN op het midden van ligger 2)*

	1	2	3	4	5	6	7	8	Max. vert. verpl.
2775 MN/m	-35,05	-76,13	-42,67	3,84	-31,78	-77,53	-49,54	8,85	-1,7
2960 MN/m	-34,76	-76,58	-42,65	3,98	-31,47	-77,95	-49,63	9,05	-1,7
3145 MN/m	-34,49	-76,99	-42,62	4,1	-31,19	-78,33	-49,7	9,22	-1,7
3330 MN/m	-34,25	-77,36	-42,59	4,2	-30,94	-78,68	-49,76	9,38	-1,7
3515 MN/m	-34,03	-77,71	-42,56	4,3	-30,71	-78,99	-49,81	9,52	-1,7
3700 MN/m	-33,83	-78,03	-42,53	4,38	-30,5	-79,29	-49,86	9,65	-1,7
3885 MN/m	-33,64	-78,32	-42,49	4,46	-30,31	-79,56	-49,9	9,76	-1,7
4070 MN/m	-33,47	-78,6	-42,46	4,53	-30,13	-79,81	-49,93	9,87	-1,7
4255 MN/m	-33,31	-78,85	-42,43	4,59	-29,97	-80,04	-49,96	9,96	-1,7
4440 MN/m	-33,16	-79,09	-42,39	4,65	-29,81	-80,26	-49,98	10,05	-1,7
4625 MN/m	-33,02	-79,32	-42,36	4,7	-29,67	-80,46	-50	10,13	-1,7

Tabel 35 *Oplegreacties [kN] en maximale verticale verplaatsing [mm] ten gevolge van een variërende veerstijfheid in z-richting (ten gevolge van een puntlast van -300 kN boven oplegging 6)*

	1	2	3	4	5	6	7	8	Max. vert. verpl.
2775 MN/m	-0,36	0,66	-0,22	-0,08	-29,05	-235,38	-42,09	6,53	-0,1
2960 MN/m	-0,35	0,65	-0,23	-0,07	-27,76	-238,06	-40,63	6,45	-0,1
3145 MN/m	-0,34	0,63	-0,23	-0,07	-26,58	-240,51	-39,26	6,35	-0,1
3330 MN/m	-0,33	0,62	-0,23	-0,06	-25,5	-242,78	-37,98	6,25	-0,1
3515 MN/m	-0,31	0,6	-0,23	-0,06	-24,5	-244,87	-36,77	6,15	-0,1
3700 MN/m	-0,31	0,59	-0,23	-0,05	-23,59	-246,82	-35,63	6,04	-0,1
3885 MN/m	-0,3	0,57	-0,23	-0,05	-22,73	-248,63	-34,56	5,93	-0,1
4070 MN/m	-0,29	0,56	-0,23	-0,05	-21,94	-250,32	-33,55	5,82	-0,1
4255 MN/m	-0,28	0,55	-0,23	-0,04	-21,21	-251,91	-32,6	5,71	-0,1
4440 MN/m	-0,27	0,53	-0,22	-0,04	-20,52	-253,39	-31,7	5,6	-0,1
4625 MN/m	-0,26	0,52	-0,22	-0,04	-19,87	-254,79	-30,84	5,5	-0,1

Tabel 36 *Oplegreacties [kN] en maximale verticale verplaatsing [mm] ten gevolge van een variërende veerstijfheid in x- en y-richting*

	1	2	3	4	5	6	7	8	Max. vert. verpl.
10^{-5} MN/m	-29,01	-86,24	-40,55	5,8	-25,64	-86,55	-49,92	12,11	-1,7
10^{-4} MN/m	-29,01	-86,24	-40,55	5,8	-25,64	-86,55	-49,92	12,11	-1,7
10^{-3} MN/m	-29,01	-86,24	-40,55	5,8	-25,64	-86,55	-49,92	12,11	-1,7
10^{-2} MN/m	-29,01	-86,24	-40,55	5,8	-25,64	-86,55	-49,92	12,11	-1,7
10^{-1} MN/m	-29,01	-86,24	-40,55	5,8	-25,64	-86,55	-49,92	12,11	-1,7
10^{0} MN/m	-29,01	-86,24	-40,55	5,8	-25,64	-86,55	-49,92	12,11	-1,7
10^{1} MN/m	-29,01	-86,24	-40,55	5,8	-25,64	-86,55	-49,92	12,11	-1,7
10^{2} MN/m	-29,01	-86,24	-40,55	5,8	-25,64	-86,55	-49,92	12,11	-1,7
10^{3} MN/m	-29,01	-86,24	-40,55	5,8	-25,64	-86,55	-49,92	12,11	-1,7
10^{4} MN/m	-29,01	-86,24	-40,55	5,8	-25,64	-86,55	-49,92	12,11	-1,7
10^{5} MN/m	-29,01	-86,24	-40,55	5,8	-25,64	-86,55	-49,92	12,11	-1,7

Tabel 37 *Oplegreacties [kN] en maximale verticale verplaatsing [mm] ten gevolge van variërende voorspanningen (in combinatie met een puntlast van -300 kN op het midden van ligger 2)*

	1	2	3	4	5	6	7	8	Max. vert. verpl.
75%	-18,88	-96,32	-50,76	15,97	-14,28	-97,88	-61,35	23,51	11,2 | -1,4
80%	-18,21	-97	-51,44	16,65	-13,52	-98,63	-62,11	24,27	11,9 | -1,5
85%	-17,53	-97,67	-52,13	17,33	-12,76	-99,39	-62,88	25,03	12,7 | -1,6
90%	-16,86	-98,34	-52,81	18	-12,01	-100,14	-63,64	25,79	13,4 | -1,7
95%	-16,18	-99,01	-53,49	18,68	-11,25	-100,9	-64,4	26,55	14,2 | -1,8
100%	-15,51	-99,68	-54,17	19,36	-10,49	-101,65	-65,16	27,31	14,9 | -1,9
105%	-14,83	-100,36	-54,85	20,04	-9,73	-102,41	-65,93	28,07	15,7 | -2,0
110%	-14,16	-101,3	-55,53	20,71	-8,98	-103,16	-66,69	28,83	16,4 | -2,1
115%	-13,48	-101,7	-56,21	21,39	-8,22	-103,92	-67,45	29,59	17,2 | -2,2
120%	-12,81	-102,37	-56,89	22,07	-7,46	-104,67	-68,21	30,35	18,0 | -2,3
125%	-12,13	-103,04	-57,57	22,75	-6,71	-105,43	-68,97	31,11	18,7 | -2,4

Tabel 38 *Oplegreacties [kN] ten gevolge van variërende voorspanningen*

	1	2	3	4	5	6	7	8
75%	10,13	-10,08	-10,21	10,17	11,36	-11,33	-11,43	11,4
80%	10,8	-10,76	-10,89	10,85	12,12	-12,08	-12,19	12,16
85%	11,48	-11,43	-11,58	11,53	12,88	-12,84	-12,96	12,92
90%	12,15	-12,1	-12,26	12,2	13,63	-13,59	-13,72	13,68
95%	12,83	-12,77	-12,94	12,88	14,39	-14,35	-14,48	14,44
100%	13,5	-13,44	-13,62	13,56	15,15	-15,1	-15,24	15,2
105%	14,18	-14,12	-14,3	14,24	15,91	-15,86	-16,01	15,96
110%	14,85	-15,06	-14,98	14,91	16,66	-16,61	-16,77	16,72
115%	15,53	-15,46	-15,66	15,59	17,42	-17,37	-17,53	17,48
120%	16,2	-16,13	-16,34	16,27	18,18	-18,12	-18,29	18,24
125%	16,88	-16,8	-17,02	16,95	18,93	-18,88	-19,05	19

C. Compression test of rubber bearing (Bosman, A.)

10-06-2012

Compression Test of Rubber Bearing

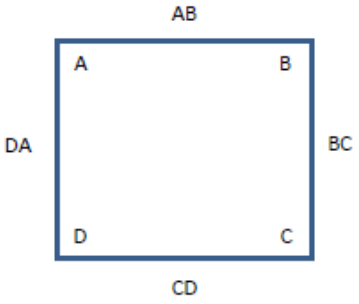
1. **Introduction:**

Three rubber bearing pads have been tested according to EN 1337-3. The rubber pads have been proposed to be used as bearing pads for girder supports in the punching shear tests on 1:2 scale model bridge in the concrete lab, CITG TU Delft.

2. **Material:**

The material consists of alternating four layers of rubber and three layers of steel.

3. **Specimen sizes:**



Specimen Length	AB (mm)		BC (mm)		CD (mm)		DA (mm)	
	Untested	Tested	Untested	Tested	Untested	Tested	Untested	Tested
1	348	348	280	280	351	350	280	280
2	350	350	280	280	350	350	279	279
3	351	352	280	280	351	352	280	280

Specimen thickness		A (mm)		B (mm)		C (mm)		D (mm)	
	Wt (kg)	Untested	Tested	Untested	Tested	Untested	Tested	Untested	Tested
1	15.86	45.52	45.51	45.34	45.34	45.46	45.47	45.92	45.69
2	16.45	44.48	44.49	44.93	45.73	45.17	45.00	44.73	44.65
3	15.01	44.72	44.59	44.29	44.43	44.63	44.99	44.95	44.94

Temperature: 22 – 23 deg C

4. **Loading Scheme (Level 2 EN 1337-3):**

1. Maximum/full load (1100 kN) applied and sustained for 1 minute @ 8 kN/s . Unloading.
2. Reloading in 6 increments @ 8 kN/s. Unloading.
3. Reloading @ 8 kN/s, sustained at 1100 kN for 1 hour. Unloading.

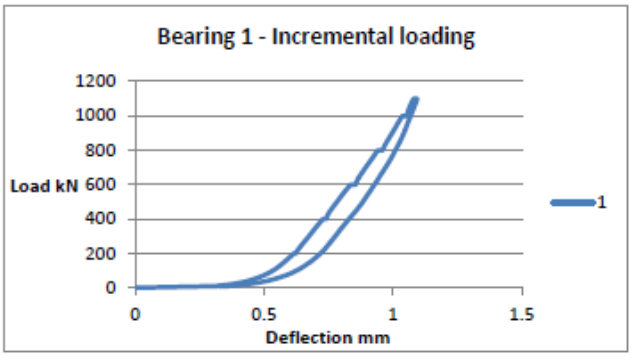
Note:

Specimen 1 was also subjected to sustained load of 81 kN (approximate weight of specimen on one support) for 24 hours.

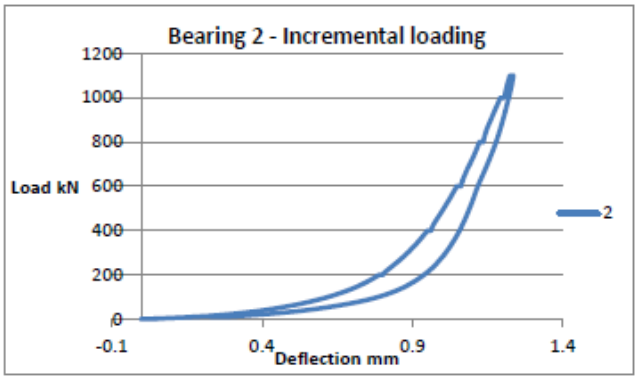


5. **Load – Deflection curves of individual specimens:**

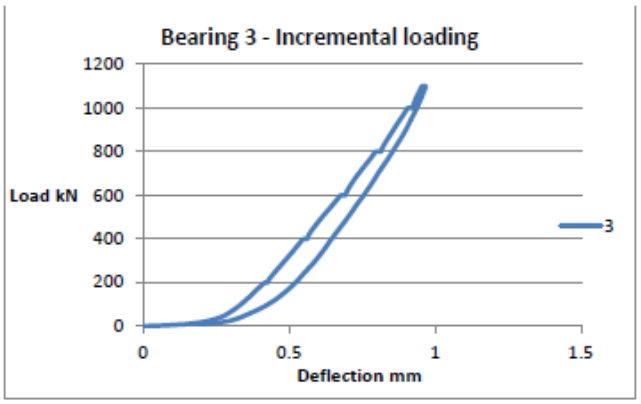
a. **Specimen 1:** Full load applied at 8 kN/s, sustained for a minute, then removed. Incremental loading applied, sustained for a minute and then unloaded. Specimen was reloaded again, 1100 kN sustained for an hour and then unloaded.



b. **Specimen 2:** Full load applied at 8 kN/s, sustained for a minute, then removed. Incremental loading applied, sustained for a minute and then removed.

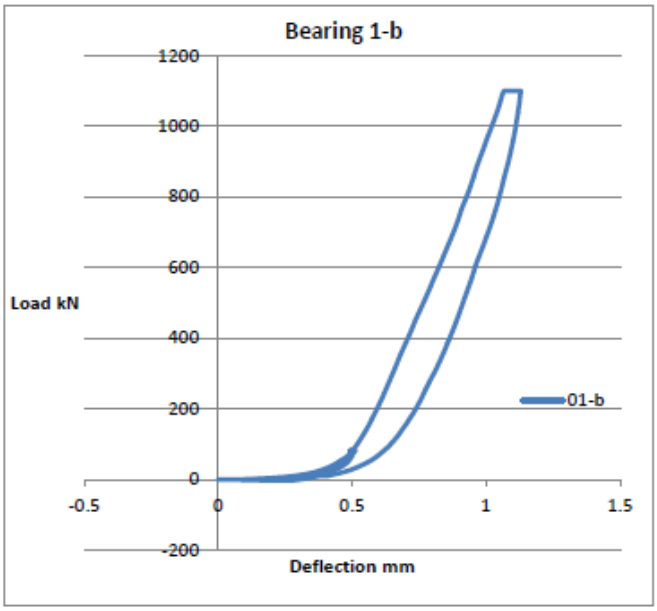


c. **Specimen 3:** Full load applied at 8 kN/s, sustained for a minute, then removed. Incremental loading applied, sustained for a minute and then removed. Full load applied again at 3kN/s and sustained for an hour, then removed.



*Temperature = 24.5 deg C

d. **Specimen 1-b:** A load of 57 kN (girder self-weight) applied @ 8 kN/s, sustained for two hours, then increased to 81 kN (girder + slab + cross beam) at the same rate and sustained for 24 hours. 1100 kN applied again at 8 kN/s and sustained for an hour, then unloaded.



6. **Test Data:**

Specimen	1	2	3
T_o (mm)	45.56	44.82	44.65
V_{z2} (mm)	1.0849	1.2347	0.884
V_{z1} (mm)	0.929	0.981	0.681
ε_c	0.0238	0.0275	0.0198
C_c (kN/mm)	4701	2889	3611
Visual Inspection after test	Satisfactory	Satisfactory	Satisfactory

Where,

Compressive strain, $\varepsilon_c = \frac{V_{z2}}{T_o}$

Compressive stiffness, $C_c = \frac{F_{z2} - F_{z1}}{V_{z2} - V_{z1}}$

F_{z2} = Full Load (kN)

F_{z1} = 1/3 of full load (kN)

T_o = Average initial thickness (mm)

V_{z2} = Average deflection corresponding to F_{z2} (1100 kN)

V_{z1} = Average deflection corresponding to F_{z1} (≈367 kN)

NOTE: No visible distortion or cracks observed. Load- Deflection curves for full load are attached in appendix. Steel lines/impression were observed during loading stage when specimens were loaded to the full load (1100 kN). Specimens came back to their original shape when unloaded.



(a) Specimen at loaded stage



(b) Specimen at unloaded stage

7. Complete loading history:

