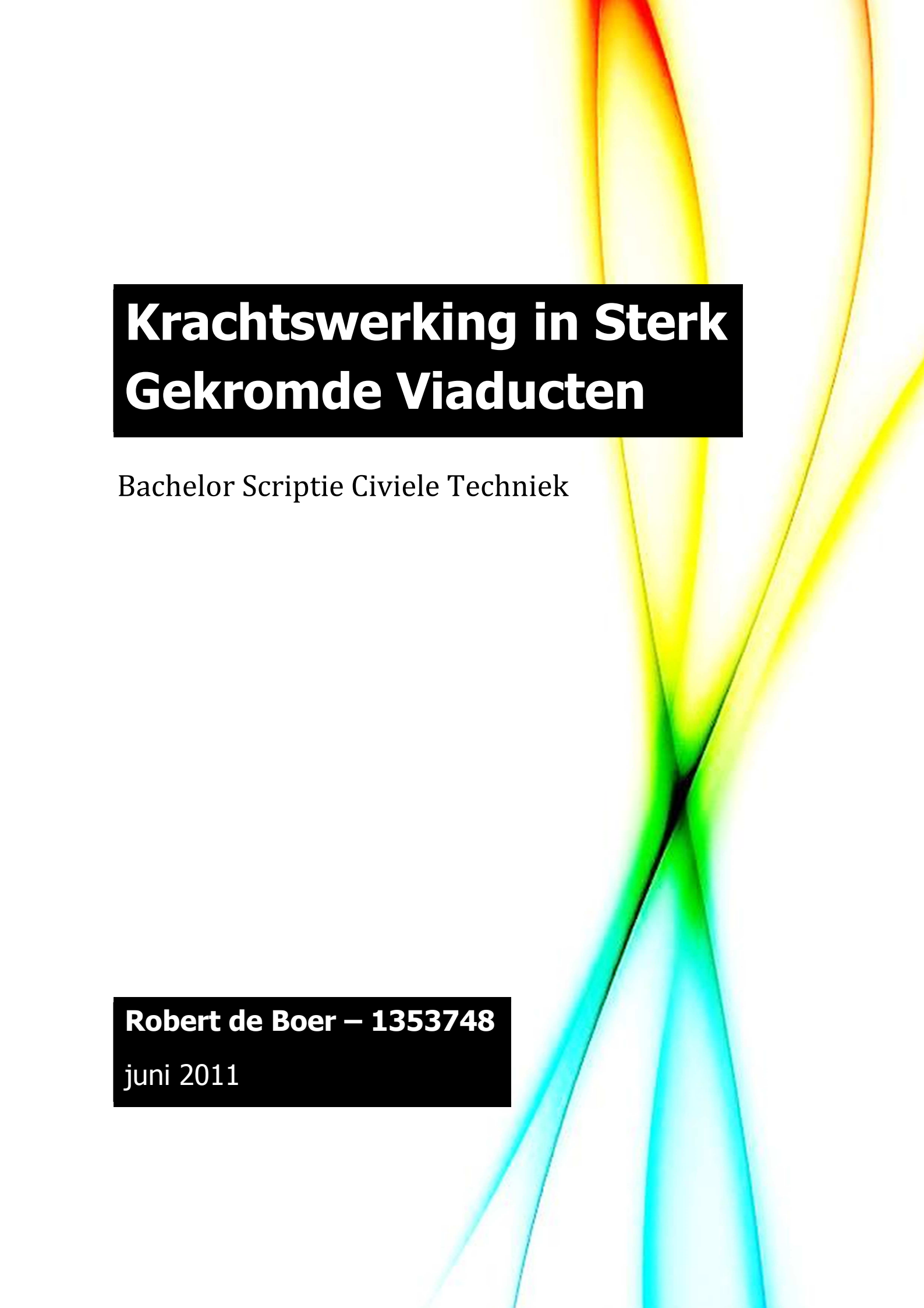




Krachtenwerking in Sterk Gekromde Viaducten

Bachelor Scriptie Civiele Techniek

Robert de Boer – 1353748

juni 2011

Krachtenwerking in Sterk Gekromde Viaducten

Robert de Boer – 1353748

(robertdboer@hotmail.com)



Eindrapportage
CT3000 – Bachelor Eindwerk
Bachelor Civiele Techniek, TU Delft
Periode 4 studiejaar 2010/2011
juni 2011

Begeleiders:

Dr. Ir. P.C.J. Hoogenboom

Dr. Ir. S.A.A.M. Fennis

Voorwoord

Voor u ligt het eindrapport van een onderzoek naar de krachtswerking in gekromde viaducten, uitgevoerd in het kader van het Bachelor Eindwerk van de studie Civiele Techniek aan de Technische Universiteit Delft. Dit zelfstandig onderzoek is uitgevoerd in de vierde periode van het studiejaar 2010/2011 en heeft ongeveer een periode van negen weken in beslag genomen.

Het project betrof het onderzoek naar de geschiktheid van de procedure om een gekromd viaduct met een kleine kromtestraal te ontwerpen met behulp van het software programma Scia Engineer. Tijdens het project werd ik begeleid door mijn directe begeleiders, Dr. Ir. P.C.J. Hoogenboom en Dr. Ir. S.A.A.M. Fennis. Voor deze begeleiding wil ik graag mijn dank uitbrengen.

Ik wens de lezer veel plezier toe tijdens het lezen van dit rapport.

Delft, 24 juni 2011

Robert de Boer

Inhoud

Voorwoord	3
Inhoud.....	5
Inleiding.....	9
Probleemstelling.....	9
Doelstelling	10
Projectomschrijving	10
Ontwerp viaductsegment	13
Inleiding.....	13
Functioneel ontwerp.....	13
Constructief ontwerp.....	14
Globale dimensionering	14
Profiel	15
Dwarsdoorsnede.....	17
Model.....	20
Creëren model	20
Assenstelsel	20
Enkele doorsnede.....	21
Samengestelde doorsnede.....	22
Invoer geometrie	23
Modeleigenschappen	25
Doorsnede eigenschappen volgens Eindige-Elementen Methode (EEM) Scia.....	25
Doorsnede eigenschappen volgens fabrikant.....	27
Handberekening doorsnede eigenschappen.....	27
Vergelijking eigenschappen.....	30
Belastingen.....	31
Eigen gewicht.....	31

Verkeersbelasting.....	31
Belastingcombinaties	32
Onderzoek: ‘Benadering van een kromme’	34
Inleiding.....	34
Gehele doorsnede viaduct.....	34
Enkele ligger viaduct.....	38
Gekromde liggers.....	41
Samengestelde doorsnede.....	42
Enkele doorsnede	44
Analyse	46
Onderzoek: ‘Gedraaid assenstelsel’	49
Inleiding.....	49
Gedraaid assenstelsel	49
Resultaten.....	50
Analyse	51
Maatgevende model t.b.v. dimensionering.....	52
Geheel	52
Enkel ligger	53
Analyse	53
Dimensionering	54
Inleiding.....	54
Enkele zwaarbelaste ligger	54
Voorspanning	54
Afschuifwapening (beugels)	61
Discussie.....	66
Detailtering.....	69
Voorspanning dekking controle.....	69
Discussie.....	71

Situatie: Enkele ligger tijdens aanleg.....	73
Conclusies en aanbevelingen.....	78
Bronnen	81
Evaluatie.....	82
Bijlage 1: Lijst met Figuren	84

Inleiding

Het woord viaduct is een moderne afleiding van de Latijnse woorden “via” en “ducere”, welke respectievelijk “weg” en “leiden” betekenen. Volgens de letterlijke betekenis leidt een viaduct dus een weg van het ene punt naar het andere. In de praktijk is een viaduct een brug voor verkeer die twee punten van gelijke hoogte verbindt. Viaducten worden toegepast bij kruisingen van water-, spoor- of autowegen. In Nederland zijn dit vrijwel altijd ongelijkvloerse kruisingen zoals gezegd met kruisende water-, spoor- of autowegen. Op deze kruisingen worden dan viaducten aangelegd in het wegennet, die tegenwoordig steeds vaker gekromd uitgevoerd worden. De viaducten worden voornamelijk vanwege esthetische redenen gekromd uitgevoerd.

Bij gekromde viaducten wordt vaak gebruik gemaakt van prefab elementen, zoals T-liggers of kokerliggers. Sinds midden jaren '80, toen de kokerliggers voor het eerst gemaakt werden zijn de toepassingen in allerlei vormen snel gegroeid. Sinds een aantal jaren zijn deze liggers ook gekromd uitgevoerd, en kunnen dus in een gekromd viaduct worden gebruikt. Tot nu toe is de kleinste kromtestraal van een gekromd viaduct 100 m.

Probleemstelling

Het probleem met gekromde liggers in vergelijking met rechte liggers is het torsiemoment dat optreedt in de liggers ten gevolge van de excentriciteit. Dit torsiemoment is groter dan bij een viaduct gebouwd met rechte elementen, omdat de excentriciteit groter is. Het torsiemoment zorgt ervoor dat de constructie ‘wil gaan’ roteren, en de constructie moet uiteraard daar weerstand tegen kunnen bieden, en dat zorgt voor bepaalde eigenschappen specifiek voor een gekromd viaduct.

De krachtwerking van gekromde liggers ten opzichte van rechte liggers is wezenlijk anders. Om deze krachtwerking te berekenen worden gekromde viaducten vaak met een 3D raamwerkprogramma ontworpen en berekend. Een voorbeeld van zo'n programma is het programma Scia Engineer, waar bij dit project gebruik van gemaakt zal worden. Het gekromde element wordt in zo'n softwareprogramma, zoals bijvoorbeeld Scia Engineer, opgedeeld in een bepaald maar onbekend aantal rechte elementen om zo tot een benadering van het gekromde element te komen. Met een eindige elementen berekening wordt vervolgens de krachtwerking in de gekromde ligger berekend. De hoeveelheid rechte elementen waarin het viaduct wordt

opgedeeld om een gekromd viaduct correct te benaderen is onbekend. Ook onbekend is dus het aantal rechte elementen dat nodig is voor een voldoende nauwkeurige berekening van krachtsverdeling in het viaduct (buigmoment, wringmoment, vervorming en dwarskracht) voor een bepaald ontwerp van een viaduct. Bij de benadering van het gekromde viaduct is dus altijd een minimaal aantal rechte elementen nodig voor een nauwkeurige berekening. Dit aantal is onbekend. Hiernaast is het onbekend of een bepaalde procedure voor het ontwerp met behulp van het softwareprogramma Scia Engineer geschikt is voor een gekromd viaduct.

Doelstelling

Een gekromd viaduct zal met behulp van Scia Engineer bekeken worden. Dit gekromde viaduct zal benaderd worden met een aantal rechte elementen. Wanneer dat punt wordt bereikt, dan is bekend hoeveel rechte elementen een gekromd viaduct (met een bepaalde kromtestraal) benaderen voor een nauwkeurige berekening.

Wanneer bekend is hoeveel elementen nodig zijn voor een nauwkeurige berekening van het viaduct, kan voor andere viaducten met een andere kromtestraal hetzelfde stappenplan gevolgd worden om tot een aantal rechte elementen te komen. Dit is dan een soort richtlijn die betrekking heeft op het aantal rechte elementen dat een viaduct met een bepaalde kromtestraal nodig heeft om tot een nauwkeurige berekening te komen ten aanzien van buig-, wringmoment en vervorming.

Daarnaast is de bedoeling dat het viaduct in zijn geheel en als losse (bijvoorbeeld zwaarbelast, of tijdens het plaatsen) ligger goed gemodelleerd wordt in het programma Scia Engineer. Daarvoor moet een goede aanpak worden bedacht, en omdat de kromtestraal veel kleiner is dan normaal is voor gekromde viaducten, is dit erg interessant. Dat is mede het doel van dit project.

Daarnaast is het de bedoeling het ontworpen viaduct te dimensioneren en te kijken naar een paar aparte gevallen zoals de aanleg van een losse ligger en de uittrekking van de voorspankabels. Op deze manier kan er uiteindelijk gezegd worden of de procedure die gevolgd is om de sterk gekromde ligger te ontwerpen en te onderzoeken onder meer met Scia Engineer een geschikte is.

Projectomschrijving

Allereerst wordt een viaduct ontworpen. Eigenlijk is dit niet het hele viaduct, maar alleen een segment van het viaduct, namelijk één overspanning die gemodelleerd moet worden. Dit

segment wordt zeer gekromd uitgevoerd, en wordt gemodelleerd als één ligger en als het totale viaduct (een aantal liggers met dwarsvoorspanning naast elkaar). Allereerst moet gekeken worden naar de toepassing van verschillende liggers en de geschiktheid voor dit bepaalde geval. Een keuze voor een profiel moet gemaakt worden voor het te ontwerpen viaduct. Het ontwerp van het viaduct dat vervolgens gemaakt moet worden is globaal, en omdat het wordt gemaakt om in het programma Scia Engineer te modelleren zullen details niet besproken worden.

Nadat het ontwerp is gemaakt zal het in het softwareprogramma Scia Engineer gemodelleerd moeten worden. Zoals gezegd gebeurt dit als gehele viaduct en als één ligger van de brug. Daarvoor wordt de doorsnede van de SKK-ligger ingevoerd in het programma. Voor de totale brug zal voor een samengestelde doorsnede worden gekozen bestaande uit meerdere SKK-liggers die ter plaatse van de bovenlaag met elkaar verbonden zijn. Op deze manier kunnen de liggers niet verplaatsen ten opzichte van elkaar, en daarmee wordt de dwarsvoorspanning en afwerklaag die normaal in dit viaduct geplaatst wordt gesimuleerd.

Vervolgens worden de belastingen bepaald en op het model geplaatst. Een aantal belastingsgevallen zijn ingevoerd, maar vooral interessant is een zware last (bijvoorbeeld een rij vrachtwagens) excentrisch op het viaduct.

Als voorgaande bekend is, is het tijd voor het onderzoek. De ligger zal trapsgewijs opgedeeld worden in steeds kortere rechte elementen om zo een gekromd viaduct te benaderen. Te beginnen met twee rechte elementen, en vervolgens zal het aantal elementen telkens verdubbeld worden. Daarmee wordt de lengte van de elementen steeds gehalveerd. Er wordt geprobeerd de nauwkeurigheid van de berekening steeds te vergroten zodat een goede benadering wordt bereikt. Als het aantal (rechte) elementen toeneemt komt men op een punt terecht waarbij de nauwkeurigheid niet meer dan bijvoorbeeld 1% toeneemt ten aanzien van de vorige stap, terwijl wel het aantal liggers is verdubbeld. Dit wordt gedaan met één bepaald ontwerp van een viaduct met één kromtestraal, dus niet met verschillende overspanningen en kromtestralen. Dit onderzoek zou de basis kunnen vormen voor andere onderzoeken naar minimale aantallen rechte elementen en goede modelleermethoden.

Na het modelleren wordt het viaduct gedimensioneerd op voorspanning en afschuifwapening. Tevens wordt de detaillering bepaald die speciaal voor een gekromde ligger geldt, zoals wapening voor het voorkomen van het uittrekken van de voorspanning. Op deze manier is te zeggen of de procedure die gevolgd wordt geschikt is voor het ontwerp van een gekromd viaduct met het softwareprogramma Scia. Dit onderzoek baseert zich op één bepaald ontwerp

(met een bepaalde overspanning en een bepaalde kromtestraal) dus er is iets te zeggen over de procedure die gevolgd is , maar niet voor een gekromd viaduct in het algemeen. Deze procedure kan voor een ander ontwerp als uitgangspunt dienen, maar meer onderzoek naar gekromde viaducten is nodig om een richtlijn op te kunnen stellen.

Bij dit project is vooral gebruik gemaakt van de stof van de volgende collegevakken: CT3041, CT3150, CT2052. Verder is er veel gewerkt met het uitgebreide softwareprogramma Scia Engineer, waar nog geen ervaring mee was opgedaan voor de start dit project.

Ontwerp viaductsegment

Inleiding

Na het eerste ontwerp voor een totaal viaduct gemaakt te hebben, werd duidelijk dat mijn uitgangspunt voor het ontwerp van het viaduct verkeerd was. Er was een geheel viaduct ontworpen met een met een relatief kleine boogstraal voor bijvoorbeeld een autosnelweg, maar dit was niet de bedoeling. De bedoeling was dat er één segment werd ontworpen van een viaduct met een erg kleine boogstraal, nog veel kleiner dan de eerder gekozen boogstraal van 185 meter. De ontwerpsnelheid van deze ligger is in principe niet belangrijk, maar zou gesteld kunnen worden op ongeveer 20-30 km/u. Dit zou dan een viaduct kunnen zijn op een woonerf of een fietsbrug bijvoorbeeld. De verslaggeving van dit ontwerp volgt in dit hoofdstuk.

Functioneel ontwerp

Het viaduct bestaat zoals gezegd uit één viaductsegment, in plaat van meerdere segmenten die samen een brug vormen. Er wordt dus gekeken naar een deel van een fictieve brug, omdat het op deze manier alleen maar in SCIA Engineer gemodelleerd kan worden. Het wordt dus gemodelleerd als een statisch bepaalde gekromde ligger op twee steunpunten. De kromming is nog veel extremer dan bij het eerste ontwerp. Het deel moet opnieuw ontworpen worden, en er moeten variabelen gekozen worden. Deze variabelen zijn de kromtestraal, de netto lengte (overspanning) van de ligger en de booglengte van de ligger (daarvan afhankelijk is de excentriciteit die de ligger in het midden heeft ten gevolge van de kromming).

Allereerst moet de kromtestraal van het segment gekozen worden. Deze kromming moet zeer sterk zijn, zodat er een flinke excentriciteit in het midden van de ligger ontstaat. Voor de kromtestraal R van de hartlijn van het viaduct wordt een waarde van 25 meter gekozen. Deze is veel kleiner dan de eerst gekozen waarde van 185 meter. De meest gebogen viaducten hebben tegenwoordig een kromtestraal van 100m, veel groter dan de gekozen 25 meter in dit ontwerp. Voor de netto overspanning van het segment, de lengte van begin van de boog tot het eind van de boog, wordt een waarde van 25 meter gekozen, zodat de hoekverdraaiing α van de boog uitkomt op 60° . Dit is zo omdat er met behulp van goniometrie een driehoek getekend kan worden, met de straal, de overspanning en de straal als zijden. Alle zijden van dit driehoekje zijn 25 meter lang, zodat er een gelijkzijdige driehoek ontstaat met drie hoeken van 60° .

De booglengte (langs de boog) L kan m.b.v. de straal en de netto overspanning berekend worden.

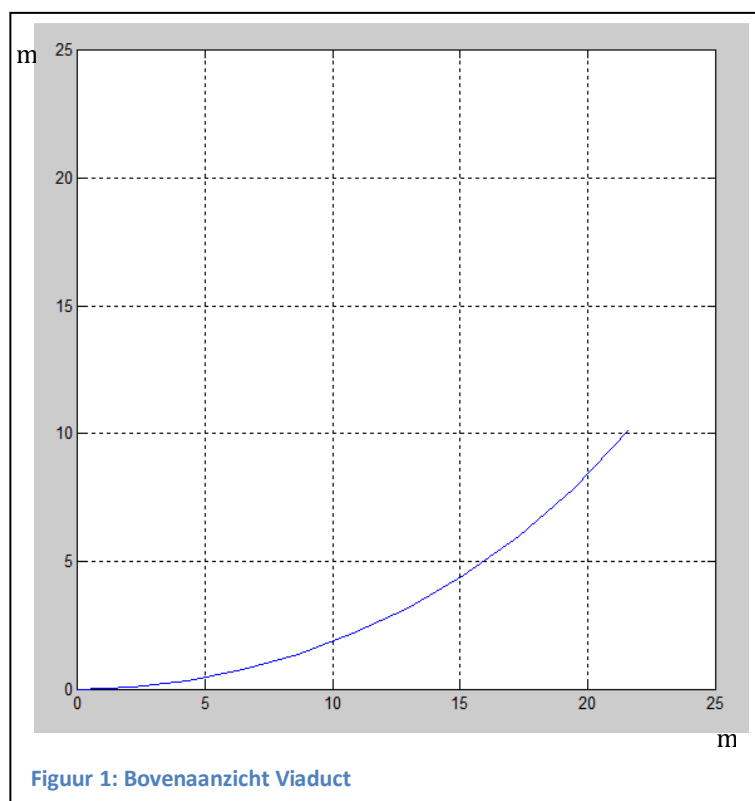
$$L = \frac{2\pi \cdot R \cdot a}{360} = \frac{2\pi \cdot 25 \cdot 60}{360} \approx 26m$$

Wat verder nog belangrijk is voor het functioneel ontwerp, is de excentriciteit die in het midden van de ligger is ontstaan door de kromming van de ligger. Deze excentriciteit volgt direct uit de andere variabelen, en heeft een waarde van 3,35 meter. Dus, $\varepsilon = 3,35$ meter, dat betekent dat in het midden van de overspanning de hartlijn van de kromming op een afstand van de 3,35 meter van de hartlijn van de overspanning ligt.

Constructief ontwerp

Globale dimensionering

De globale dimensionering is eigenlijk in vorige paragraaf besproken. De overspanning is 25 meter, de hoekverdraaiing $\alpha = 60^\circ$ en de booglengte is 26 meter. Een bovenaanzicht, gemaakt met Matlab, van de hartlijn van het viaduct is te zien in Figuur 1. Deze figuur is alleen gemaakt ter illustratie van de kromming. In deze figuur is de sterke kromming te zien, de eenheden op de assen zijn in meter.



De minimale breedte van het viaduct is de breedte die nodig is op het viaduct om het bepaalde aantal rijstroken te kunnen realiseren. Dit viaduct heeft 1 normale rijstrook en een rijstrook die kan dienen als vluchtstrook, in totaal dus 2 rijstroken. Een rijstrookbreedte wordt op 3,50 meter gesteld, de breedte van de vluchtstrook op 3,45 meter¹. Met toevoeging van een kantstrook van 0,8 meter aan beide kanten (bij de breedte van de kantstrook zit de kantstreep inbegrepen en bij de breedte van de vluchtstrook zit de kantstreep inbegrepen) wordt de minimale breedte B van het viaduct:

$$B_{\min} = 3,5 + 3,45 + 0,8 + 0,8 = 8,55m$$

Profiel

Voor het profiel moet er een keuze worden gemaakt tussen de mogelijke profielen, zoals T-liggers, omgekeerde T-liggers (ook wel railbalkconstructies genoemd) en kokerliggers. Als profiel wordt gekozen een voorgespannen kokerligger, een SKK-ligger van het merk Spanbeton. Gekozen is voor een kokerligger omdat deze variant van zichzelf een grote stijfheid heeft als het gaat om torsie. Dat is van toepassing omdat de liggers bij plaatsing van het viaduct één voor één worden geplaatst terwijl ze gelijk te maken krijgen met een wringend moment ten gevolge van het eigen gewicht door de kromming van de ligger. Dit is een groot voordeel ten opzichte van T-liggers of omgekeerde T-liggers, die pas een goede torsiestijfheid hebben wanneer ze zijn verbonden door een druklaag. Ook kunnen deze liggers gemakkelijk lang, en gekromd uitgevoerd kunnen worden. Deze kokerliggers worden door het bedrijf Spanbeton prefab geproduceerd.

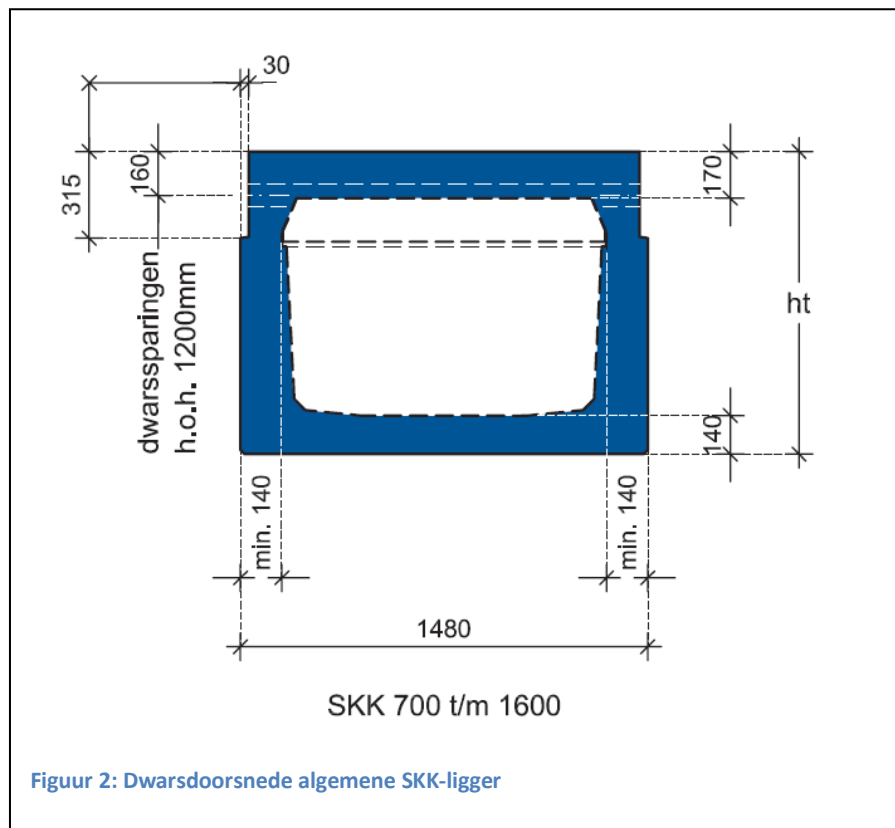
De SKK kokerliggers zijn voorgespannen liggers, die ter plekke aan elkaar worden gestort en voorzien van voorspanning in de dwarsrichting. Daar wordt vervolgens nog een dunne laag overheen gelegd, alvorens het asfalt wordt aangebracht. De bovenbouw (asfalt) heeft een gewicht van 25 kN/m³. Dit resulteert met een asfaltlaag van 0,07m in een belasting van 1,75 kN/m². Omdat dit in vergelijking met het eigengewicht van de liggers en de variabele belasting een kleine belasting is, en omdat deze als vlaklast moeilijk in het model op een ligger kan worden geplaatst wordt in dit onderzoek dus wordt verder niet besproken.

De SKK liggers worden naast elkaar geplaatst en verzorgen op deze manier de benodigde breedte van het viaduct. De SKK liggers worden gekromd geprefabriceerd. De liggers zullen naast elkaar komen te liggen, en daarom zal de kromtestraal van elke ligger variëren ongeveer

¹ Bron: Hansen, 2006, p.70

21 tot 29 meter. Voor het model in dit onderzoek krijgt de hartlijn van het viaduct een kromtestraal van 25 meter. Doordat er een doorsnede aan de hartlijn wordt toegekend verwerkt Scia Engineer de verschillende kromtestralen van de onderlinge liggers automatisch. De hartlijn in het model van een enkele ligger (uit het midden van de totale doorsnede) krijgt een kromtestraal van 27,5 meter, zijnde de tweede ligger vanaf de rechterkant van de doorsnede.

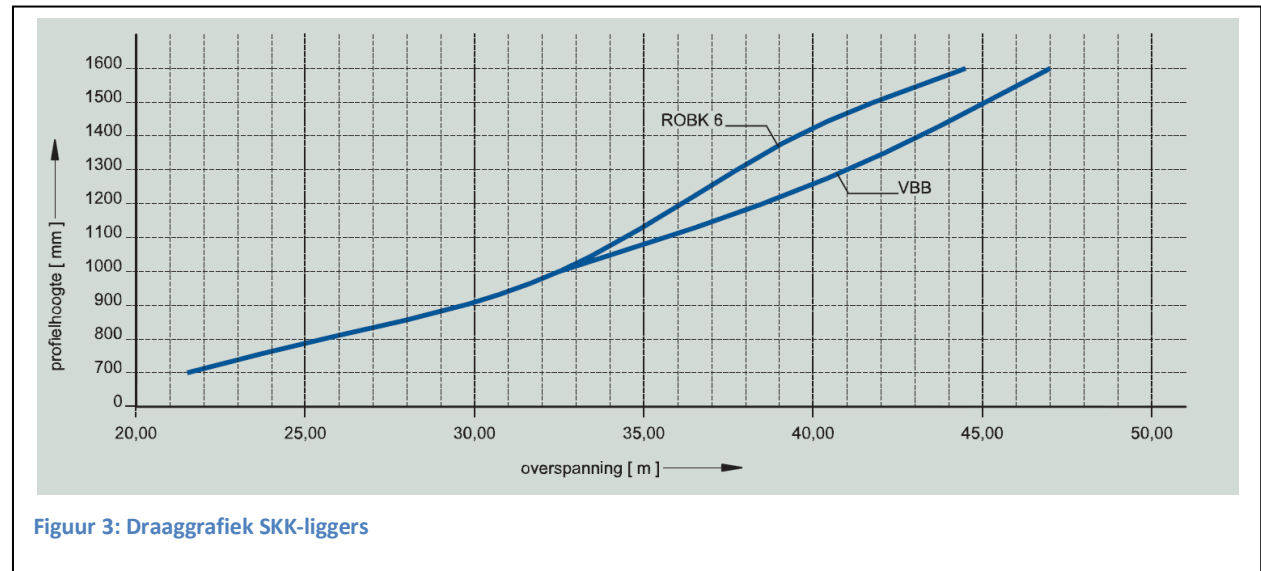
In onderstaande Figuur 2 is een doorsnede te zien van het profiel. Deze doorsnede is de algemene doorsnede van een SKK ligger, de hoogte varieert per ligger. De breedte van elke SKK-ligger is daarentegen wel hetzelfde, namelijk 1480 mm. Inclusief voegen liggen de liggers h.o.h. 1500 mm van elkaar.



In dit figuur is te zien dat de hoogte van het profiel niet vastligt, deze verschilt namelijk per kunstwerk en hangt af van de overspanning en de verkeersbelasting. De fabrikant van de SKK-liggers, Spanbeton, heeft voor de keuze van het profiel een gemakkelijk te hanteren vuistregel opgesteld. Deze is verwerkt in een grafiek waar je de benodigde profielhoogte kunt aflezen. De grafiek geeft het verband aan tussen de maximale overspanning en de profielhoogte onder VBB-

belasting (Dit is verkeersbelasting klasse 60 volgens NEN 6723). Een afbeelding van de draaggrafiek is te zien in Figuur 3.

Zoals te zien in de grafiek is bij een overspanning van 25 meter een profielhoogte nodig van 800mm. Er wordt dus gekozen voor een profiel SKK-800.

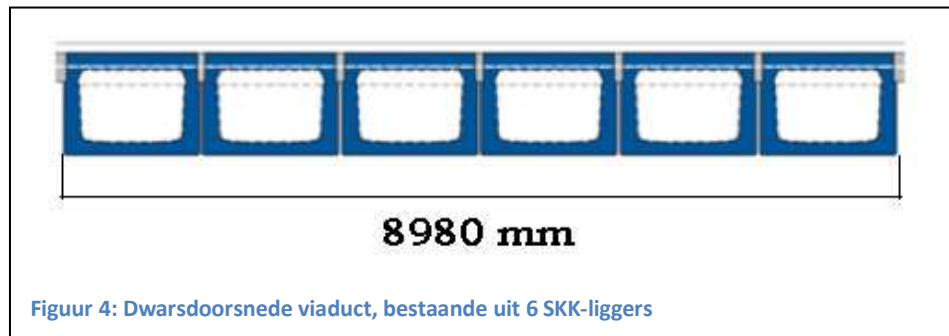


Dwarsdoorsnede

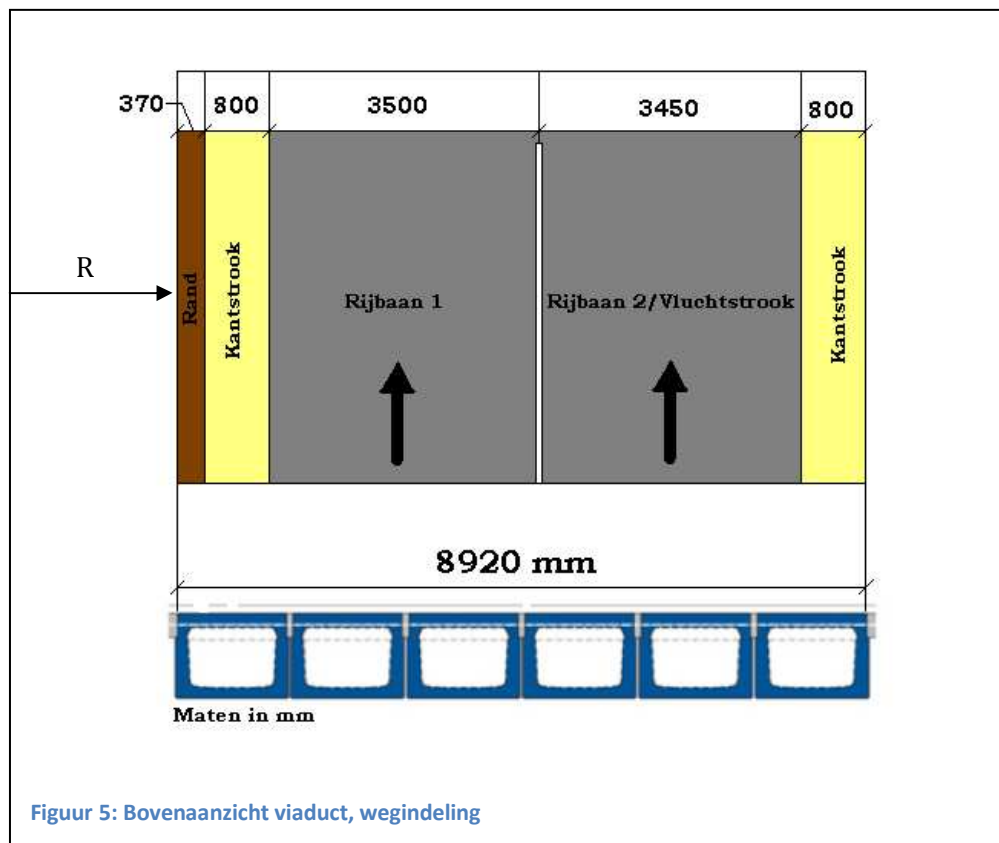
Om de totale minimale breedte van 8,5 meter te bereiken, zijn er zes SKK liggers van 1500 mm nodig. De totale breedte van het viaduct wordt dan 9,0 meter.

$$B_{\min} = 6 * 1500 = 9000 \text{ mm} = 9,0 \text{ m}$$

De totale dwarsdoorsnede van het viaduct zal er dan als volgt uitzien, dit is te zien in Figuur 4. Deze figuur houdt geen rekening met details aan de randen en afwerking, en gaat alleen uit van de 6 naast elkaar geplaatste liggers. De breedte aan de basis van de doorsnede van het viaduct is zoals te zien in het figuur 8,98 meter. Dit is geen 9,0 meter, en dit komt omdat de liggers 1480 mm breed zijn, en h.o.h. 1500 mm uit elkaar liggen. Tussen de liggers zit dus steeds 20 mm ruimte. Deze ruimte zit niet aan het uiteinde waar het viaduct ophoudt, dus komt de totale breedte op 8,98 meter. Zoals gezegd wordt in de doorsnede de bovenbouw (druklaag van beton en asfalt) verder in dit onderzoek niet beschouwd.



Omdat er bij het ontwerp van het viaduct voorlopig geen details zoals randafwerkingen worden beschouwd, is er op de bovenkant van het viaduct een vrije ruimte van 8,92 m voor het aanleggen van de weg en kantstroken aan beide kanten. Dit komt omdat er aan beide kanten 30 mm vanaf gaat vanwege de doorsnede van de SKK-liggers. Dit, en het bovenaanzicht van het viaduct zijn te zien in Figuur 5 (Bovenaanzicht) waarin de verdeling van het wegdek te zien is. Hierin zijn eigenlijk alleen de verdeling van de rijbanen en de afstanden belangrijk met het oog op modelleren van belasting in Scia in een later stadium.



In deze figuur is niet te zien hoe de kromming van het viaduct loopt, maar het middelpunt van de kromming ligt links van de figuur. De kromming is dus op die manier zodat de 2e rijbaan, oftewel de extra rijbaan, het meest bijdraagt aan de excentriciteit van de belasting ten opzichte van de centrale lijn/overspanning. Dus de rijbaan 1 ligt dicht bij het middelpunt van de kromming en de rijbaan 2 volgt als het ware de buitenbocht. Op deze manier is het zeer ongunstig als bijvoorbeeld de rijbaan 2 vol staat met vrachtwagens en zal dit een groot torsiemoment opleveren. Dit geval zal dan ook als maatgevende belastinggeval onderzocht worden, omdat dit een interessante situatie is.

Model

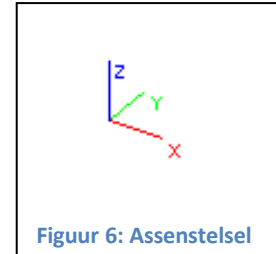
Nu het ontwerp gemaakt is kan er met Scia Engineer gewerkt gaan worden. Het ontwerp moet namelijk gemodelleerd worden in dit softwareprogramma. In dit hoofdstuk zal worden uitgelegd hoe dit model in dit programma wordt gemodelleerd. Eerst zal het maken van dit model kort besproken worden, met alle onderdelen die belangrijk zijn. Daarna zullen de modeleigenschappen, en met name de doorsnede eigenschappen van het model aan bod komen. Als laatste zullen de belastingen die op het viaduct werken en die essentieel zijn voor een berekening van het model worden besproken.

Creëren model

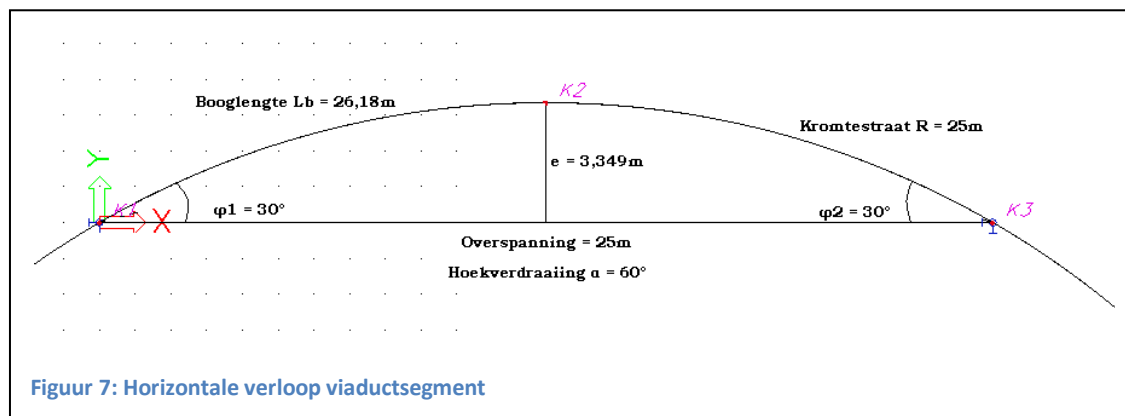
Het maken van een model in Scia Engineer was uitdagend. Hier zal uitgelegd worden hoe het model is gemaakt.

Assenstelsel

Als eerste stap in Scia Engineer moet er bedacht worden hoe het gekromde viaduct, wat door de kromming een constructie in een 2D vlak is, in het assenstelsel geplaatst wordt. De constructie moet ingevoerd worden in een 3D-ruimte. Het assenstelsel in het programma ziet er dan als volgt uit, zoals te zien in Figuur 6. Het viaduct moet gemaakt worden in het xy-vlak, waarbij de netto overspanning van 25 meter ligt in de x-richting. De kromming en excentriciteit liggen dus in de y-richting van het assenstelsel.



Figuur 6: Assenstelsel



Figuur 7: Horizontale verloop viaductsegment

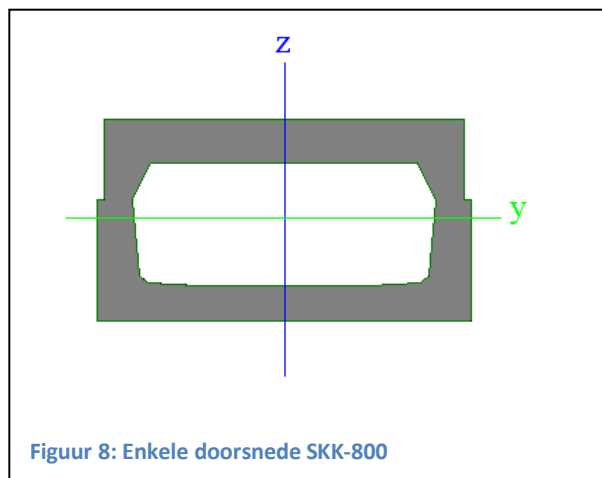
Om de constructie gemakkelijk in te voeren zijn er een aantal hulplijnen getekend in het aangenomen assenstelsel. Een bovenaanzicht van het assenstelsel met hulplijnen is te zien in Figuur 7.

In dit figuur is te zien welke kromming het viaduct moet volgen, om de overspanning van 25 meter van K1 tot K3 te maken. Daarvoor is de cirkel met een straal van 25 meter als hulplijn getekend. Ook is een cirkelboog hulplijn getekend, die op bovenstaande afbeelding niet zichtbaar is omdat deze gelijk loopt met de hulpcirkel.

Te zien is dat de totale hoekverdraaiing ten gevolge van de kromming 60° is, en dat dus beide beginhoeken 30° zijn. Door de kromming ontstaat er een excentriciteit in het midden van de overspanning $e = 3,349$ meter. De z-as van het assenstelsel is in Figuur 7, omdat het een bovenaanzicht is, loodrecht op het vlak van de tekening.

Enkele doorsnede

Voordat er in Scia Engineer een constructie of überhaupt een ligger ingevoerd kan worden, moet(en) er eerst één of meerdere doorsnede(n) worden geformuleerd. Aangezien er in dit



onderzoek twee verschillende modellen gemaakt worden, één van een enkele ligger en één van het gehele viaductsegment, zullen er ook twee doorsneden moeten komen. Eerst zal de enkele doorsnede ingevoerd worden.

Ondanks dat er veel doorsneden in de bibliotheek van Scia Engineer staan, staat de specifieke doorsnede van de SKK-ligger er

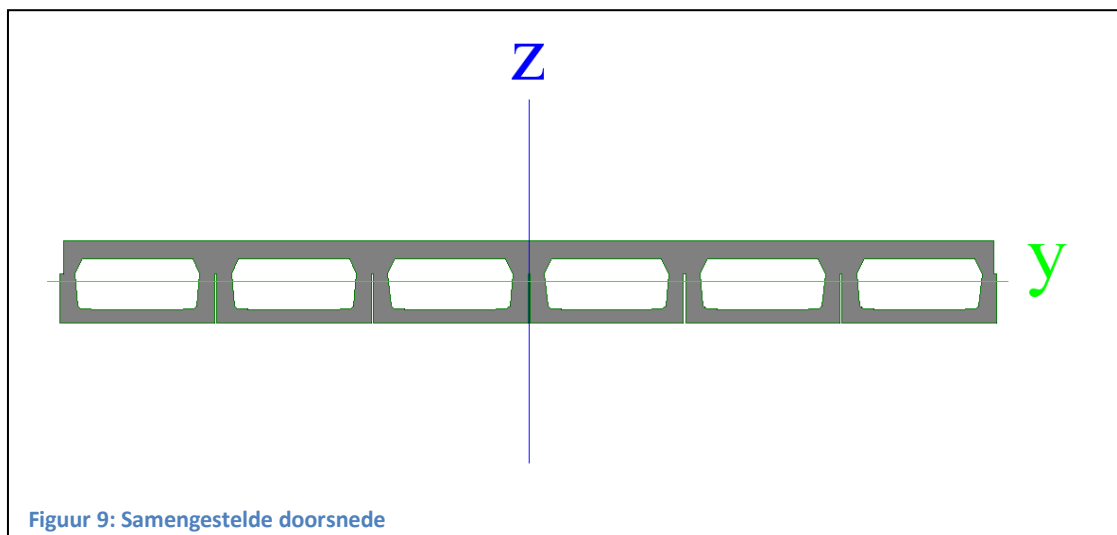
niet in. De doorsnede moet zelf met de hand worden ingevoerd. Dit kan met behulp van de doorsnede bewerker. Hier kunnen zelf doorsnedes worden gemaakt. Dat is op de volgende manier gedaan. Eerst is er een veelhoek getekend met de coördinaten van de buitenrand van de doorsnede van een SKK-800 ligger. Daarna is er een veelhoek opening getekend die de uitsparing van de doorsnede van de SKK-800 zo goed mogelijk benaderd. Daarna zijn aan deze doorsnede de juiste eigenschappen verbonden, zoals de betonkwaliteit C53/65. De doorsnede eigenschappen worden later in dit hoofdstuk besproken. Een afbeelding hoe de doorsnede uiteindelijk gemodelleerd is in Scia, is te zien in Figuur 8.

Samengestelde doorsnede

Als tweede wordt er gekeken naar het totale viaductsegment. Deze heeft natuurlijk een andere doorsnede dan een enkele ligger. Er zijn twee manieren om het onderzoek te doen met een geheel viaduct.

Men kan de zes liggers apart als enkele doorsneden invoeren met daartussen op plekken van interne knopen bepaalde andere staven of liggers die de samenhang verzorgen en de dwarsvoorspanning simuleren. Als alle interne knopen van de zes liggers verbonden zijn, dan ontstaat er een raamwerk van liggers. Het probleem is dat aan het raamwerk doorsneden moeten worden toegewezen, ook voor de tussenliggers. Dit is moeilijk omdat het onbekend is welke eigenschappen de tussenschotten hebben, omdat de ligger in werkelijkheid in principe als één geheel functioneert.

Een andere manier is om een samengestelde doorsnede te maken, die staat voor een totaal viaduct bestaande uit de zes liggers. Op deze manier hoeft men als het ware één ligger in te voeren met die samengestelde doorsnede om het hele viaduct te modelleren. De samengestelde doorsnede heeft gelijk de juiste eigenschappen van het viaduct, ervan uitgaande dat het werkelijke viaduct als geheel functioneert. Door de liggers aan elkaar vast te maken wordt de invloed van dwarsvoorspanning en de afwerklaag benaderd, want door dwarsvoorspanning kunnen losse liggers ook niet ten opzichte van elkaar verplaatsen.



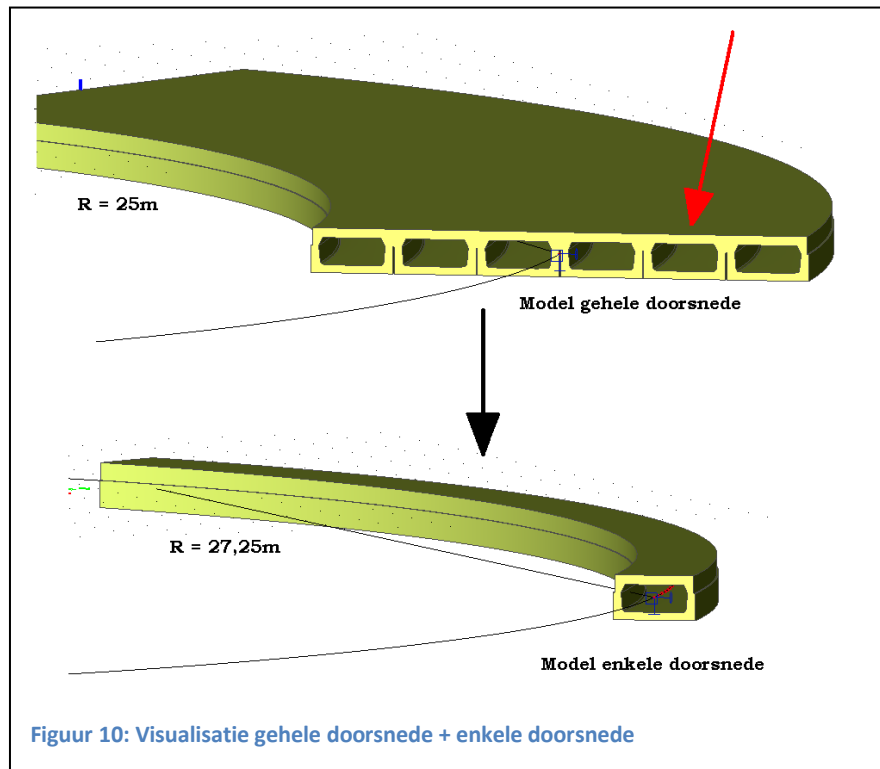
Er is gekozen een samengestelde doorsnede te maken (tweede manier), omdat dit makkelijker te realiseren is. Ook is de benadering van een werkelijk viaduct met dwarsvoorspanning realistisch, doordat de liggers aan elkaar vast zitten. Om de samengestelde doorsnede te maken, is de enkele doorsnede gebruikt. In de doorsnede bewerker is de enkele doorsnede 6 keer

gekopieerd, met een h.o.h. afstand van 1500 mm, zoals ze in werkelijkheid ook liggen. Daarna is er een nieuwe veelhoek om deze 6 liggers getekend, met tussen elke ligger een ruimte van 20 mm breed. Vervolgens zijn de 6 losse doorsneden weer verwijderd. De ruimte tussen de liggers bevindt zich alleen over de onderste 485 mm tot de plek waar de liggers in werkelijkheid d.m.v. dwarsvoorspanning verbonden zijn. Op deze manier zitten de liggers aan de bovenkant aan elkaar vast, maar zijn ze aan de onderkant niet verbonden. In Figuur 9 is de doorsnede te zien. Goed te zien zijn de tussen ruimtes tussen de liggers. Ook deze doorsnede heeft weer kwaliteit C53/65. De doorsnede eigenschappen komen later in dit hoofdstuk, in de paragraaf 'Modeleigenschappen' aan bod.

Invoer geometrie

Als de doorsneden geformuleerd zijn kan de geometrie ingevoerd worden, met behulp van de hulplijnen die al te zien waren in Figuur 7. Een doorsnede wordt gekozen, waarna een staaf geplaatst kan worden. Voor een gekromd viaduct kan de staaf toegewezen worden aan een lijn, bijvoorbeeld de hulplijn van de cirkelboog. Op deze manier ontstaat een perfect gekromde staaf. De doorsneden kunnen te allen tijde veranderd worden, zodat men kan switchen tussen een enkele ligger en een samengestelde ligger.

Voor een enkele staaf is echter wel uitgegaan van een staaf met een hartlijn op een bepaalde afstand van de hartlijn van de gehele doorsnede. De enkele ligger die het zwaarst belast wordt is de ligger ter plaatse van het midden van de 2^e rijbaan als hier een rij vrachtwagens op staat. Dit is de tweede ligger van de doorsnede vanaf de rechterkant. Deze ligger zal apart worden gemodelleerd. De afmetingen van de overspanning en de booglengte zullen dus ook veranderen, namelijk groter worden. Het centrum van de doorsnede van de enkele doorsnede heeft een afstand van 2,25 meter vanaf het oude centrum. Daarom heeft de kromming een kromtestraal die 2,25 meter groter is, namelijk 27,25 meter. De netto overspanning is dus ook 27,25 meter. In figuur ? is een visualisatie te zien van de beide modellen, en te zien is hoe de enkele ligger uit het gehele viaduct volgt.



Het is echter de bedoeling van dit onderzoek om een gekromd viaduct te benaderen met rechte elementen in plaats van een perfecte kromme. De hulplijn cirkelboog kan met de aanpikmodus verdeeld worden in 2, 4, 8, 16, 32 enz delen. Een staaf kan dan als nieuwe polylijn ingevoerd worden, door deze punten op de cirkelboog aan te klikken.

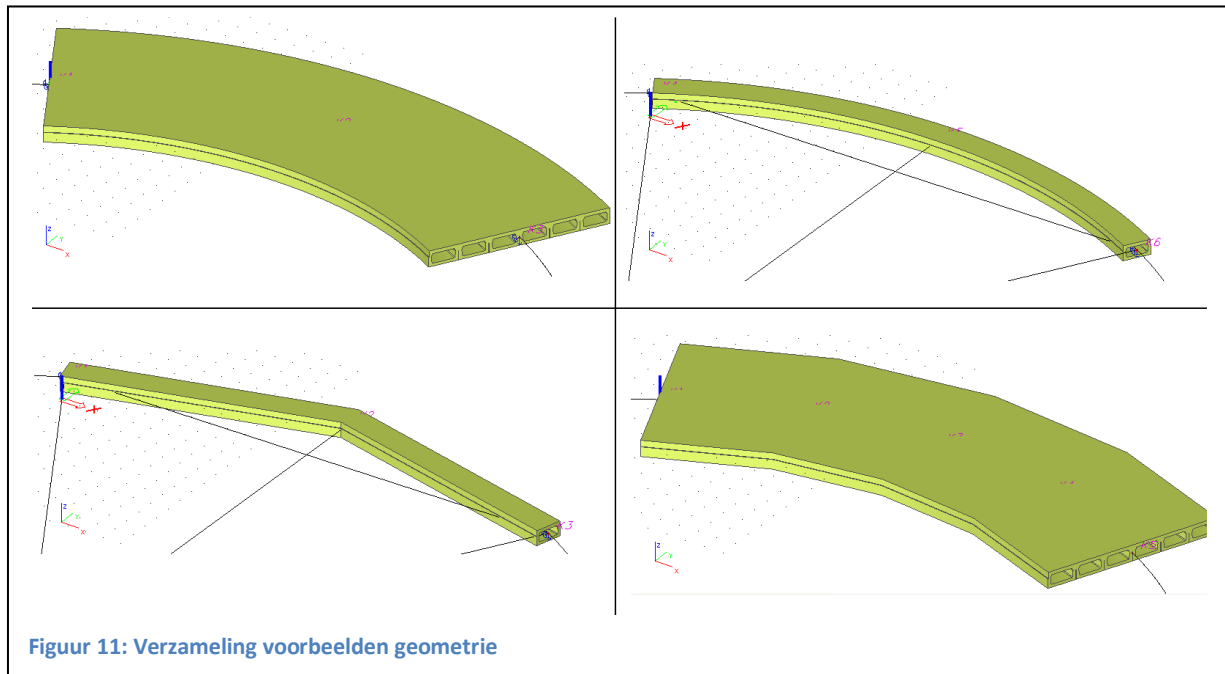
Voor de opleggingen is het vereist dat er minstens zes vrijheidsgraden verhinderd worden. Dus voor de twee opleggingen is het er de keuze tussen drie rotatie vrijheidsgraden en drie translatie vrijheidsgraden.

Voor oplegging 1 (in het nulpunt) is gekozen alle translatie vrijheidsgraden te verhinderen, en de rotatievrijheid rond x-as is ook verhinderd. In werkelijkheid wordt de rotatie rond de x-as ook verhinderd, omdat de ligger op een oplegblok ligt. Draaien om zijn eigen as is dan bij de opleggingen onmogelijk, daarom is de aanname dat bij de opleggingen rotatie om de x-as verhinderd wordt gedaan.

Voor oplegging 2 is gekozen om alleen translatie vrijheid in x richting open te houden, en ook rotatievrijheid rond de x-as is verhinderd. Op deze manier kan de rotatie rond de x-as, die door de excentriciteit van de kromming wil plaatsvinden, verhinderd door beide opleggingen en wordt het torsiemoment M_x verdeeld over beide opleggingen.

Een afbeelding met een aantal voorbeelden van het gegenereerde model is hieronder in Figuur 11 te zien. In dit figuur zijn opgenomen een geheel gekromd viaduct, een enkele gekromde

ligger, een viaductligger bestaande uit 2 rechte elementen en een geheel viaduct bestaande uit 4 rechte elementen.



Modeleigenschappen

Doorsnede eigenschappen volgens Eindige-Elementen Methode (EEM) Scia

De volgende waarden van de eigenschappen van de doorsnede kunnen automatisch worden afgelezen. Alleen de waardes van A_y , A_z en I_t worden door een EEM-berekening bepaald en moeten vervolgens met de hand aan de eigenschappen worden toegevoegd.

Enkele doorsnede

De doorsnede die is ingevoerd in het programma Scia Engineer, zoals reeds besproken heeft natuurlijk ook eigenschappen. Deze eigenschappen worden in Scia Engineer keurig berekend. In onderstaande tabel zijn de eigenschappen weergegeven die door het programma zijn berekend.

$A \text{ [m}^2\text{]}$	$6,0230 \cdot 10^{-1}$	$W_{el,y} \text{ [m}^3\text{]}$	$1,2527 \cdot 10^{-1}$
$A_y \text{ [m}^2\text{]}$	$4,204054 \cdot 10^{-1}$	$W_{el,z} \text{ [m}^3\text{]}$	$1,9450 \cdot 10^{-1}$
$A_z \text{ [m}^2\text{]}$	$2,493522 \cdot 10^{-1}$	$W_{pl,y} \text{ [m}^3\text{]}$	$1,6417 \cdot 10^{-1}$
$I_{yy} \text{ [m}^4\text{]}$	$5,0844 \cdot 10^{-2}$	$W_{pl,z} \text{ [m}^3\text{]}$	$2,6242 \cdot 10^{-1}$

$I_{zz} [\text{m}^4]$	$1,4393 \cdot 10^{-1}$	$Y_c [\text{mm}]$	740
$I_t [\text{m}^4]$	$1,215631 \cdot 10^{-1}$	$Z_c [\text{mm}]$	406

Tabel 1: Doorsnede eigenschappen enkele doorsnede, berekend door Scia Engineer (netgrootte 10mm)

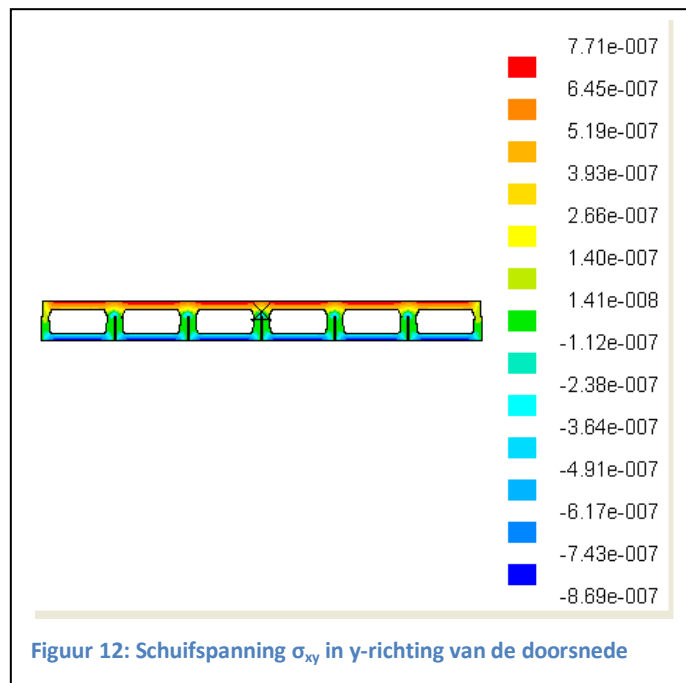
Samengestelde doorsnede

Ook voor de samengestelde doorsnede voert het programma een dergelijke berekening uit. De resultaten zijn te zien in onderstaande tabel.

$A [\text{m}^2]$	3,7398	$W_{el,y} [\text{m}^3]$	$7,5613 \cdot 10^{-1}$
$A_y [\text{m}^2]$	2,759972	$W_{el,z} [\text{m}^3]$	5,6005
$A_z [\text{m}^2]$	1,581935	$W_{pl,y} [\text{m}^3]$	1,0119
$I_{yy} [\text{m}^4]$	$3,1293 \cdot 10^{-1}$	$W_{pl,z} [\text{m}^3]$	8,3584
$I_{zz} [\text{m}^4]$	$2,5146 \cdot 10^1$	$Y_c [\text{mm}]$	4490
$I_t [\text{m}^4]$	$8,084371 \cdot 10^{-1}$	$Z_c [\text{mm}]$	414

Tabel 2: Doorsnede eigenschappen samengestelde doorsnede, berekend door Scia Engineer (netgrootte 10mm)

Ook voert het programma een EEM berekening uit onder invloed van een torsiemoment van 1 Nm, een standaard waarde. Uit de uitkomst van deze EEM-berekening kunnen de waarden A_y , A_z en I_t worden afgelezen. Deze moeten vervolgens wel met de hand aan de resterende doorsnede eigenschappen worden toegevoegd. Verder tekent het programma afbeeldingen van bijvoorbeeld schuifspanningen. Een afbeelding van de schuifspanning σ_{xy} in y-richting is te zien in Figuur 12. In deze figuur is goed te zien dat er

Figuur 12: Schuifspanning σ_{xy} in y-richting van de doorsnede

volgens de benadering met de samengestelde ligger schuifspanning in de y-richting mogelijk is tussen de liggers, dat betekent dat er interactie tussen de liggers plaatsvindt.

Doorsnede eigenschappen volgens fabrikant

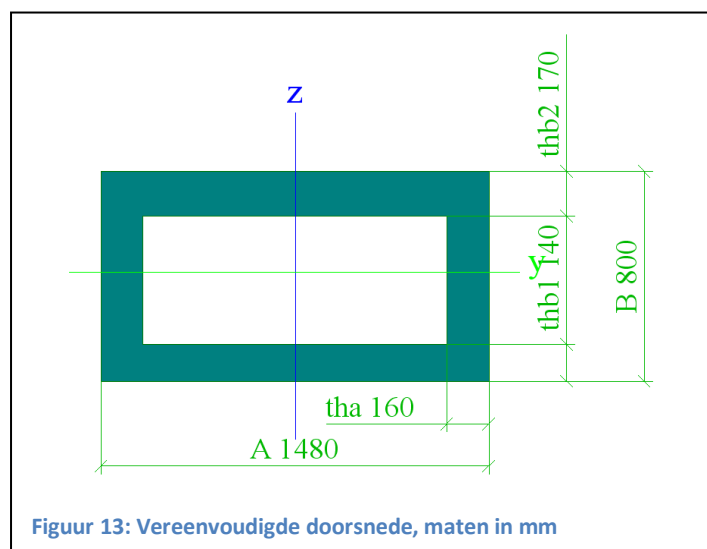
Ook de fabrikant van de SKK-kokerliggers, Spanbeton, heeft op hun website een lijst staan met eigenschappen die hun verschillende liggers hebben. Ook voor de SKK-800 is dit het geval. Het zijn niet alle eigenschappen die Scia Engineer ook berekend, maar slechts enkele grootheden. Te zien is dat de resultaten van de EEM-berekening in Tabel 1 in vergelijking met de resultaten in Tabel 3 (fabrieksgegevens) nog best verschillen. De procentuele afwijking is te zien in de 2^e kolom van Tabel 3

		Afwijking met Scia berekening
A [m²]	$6,24 \cdot 10^{-1}$	3,6%
I_b [m⁴]	$5,3 \cdot 10^{-2}$	4,1%
W'_b [m³] (incl druklaag)	$1,36 \cdot 10^{-1}$	nvt
W_b [m³]	$1,31 \cdot 10^{-1}$	4,4%
cY [mm]	740	0%
cZ [mm]	406	-2,0%

Tabel 3: Fabrieksgegevens SKK-800

Handberekening doorsnede eigenschappen

Als laatste kan er natuurlijk ook nog met de hand een berekening worden gemaakt om de doorsnede eigenschappen van zowel de kokerligger als van de samengestelde doorsnede.



Daarom wordt eerst van de ingewikkelde doorsnede van een SKK-800 ligger een vereenvoudigde doorsnede gemaakt. Deze doorsnede en afmetingen zijn gepresenteerd in het Figuur 13. Vervolgens zijn de eigenschappen van deze vereenvoudigde doorsnede te vertalen naar de eigenschappen van een samengestelde doorsnede.

Oppervlaktes (A , A_y , A_z)

Het oppervlakte A is de totale oppervlakte van de doorsnede. Het oppervlak van de vereenvoudigde doorsnede is in dit geval $1480 \cdot 800 - 1160 \cdot 490 = 0,6156 \text{ m}^2$. Voor de totale doorsnede wordt eenvoudig deze oppervlakte vermenigvuldigd met zes. Voor de totale doorsnede bedraagt het totale oppervlak $6 \cdot 0,6156 = 3,6936 \text{ m}^2$.

Het oppervlak A_y is het effectieve oppervlak voor het opnemen van dwarskracht in de y -richting van de doorsnede. Er wordt aangenomen dat voor de berekening van A_y alleen de flenzen (dus de boven- en onderkant van de koker) meewerken aan het afdragen van de dwarskracht in de y -richting. Hieruit volgt een waarde van A_y voor de enkele koker van $0,4588 \text{ m}^2$. De totale doorsnede heeft een A_y van $6 \cdot 0,4588 = 2,7528 \text{ m}^2$.

Hetzelfde geldt voor het oppervlak A_z , ware het niet dat dit het oppervlak is dat verantwoordelijk is voor het opnemen van dwarskracht in de z -richting van de doorsnede. Alleen de lijven werken dus mee aan het afdragen van dwarskracht. Een enkele doorsnede heeft een waarde A_z van $0,256 \text{ m}^2$. De totale samengestelde doorsnede heeft een A_z van $6 \cdot 0,256 = 1,536 \text{ m}^2$.

Traagheidsmomenten (I_y , I_z , I_t)

Het traagheidsmoment I_y om de y -as is te berekenen met behulp van de standaard formule voor rechthoekige doorsneden. Deze formule is hieronder te zien. Deze formule moet dan vervolgens nog aangepast worden voor de kokerdoorsnede.

$$I_y = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3$$

Omdat de doorsnede symmetrisch is, kun je het traagheidsmoment berekenen door de I_y van de 'massieve' doorsnede te berekenen en daar de I_y van de open ruimte in het midden vanaf te trekken. De formule die dan ontstaat is de volgende.

$$I_y = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3 - \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3$$

De uitkomst van deze bovenstaande formule is $0,0518$. Voor de totale doorsnede geldt dan een waarde van I_y van $6 \cdot 0,0518 = 0,311 \text{ m}^2$.

Voor het traagheidsmoment om de z -as I_z geldt eigenlijk hetzelfde verhaal, behalve dat de as een kwartslag gedraaid is. De breedte en de hoogte zijn dus omgedraaid. Verder moet voor elke afzonderlijke I_z van elke doorsnede de regel van Steiner worden toegepast voor dat ze opgeteld worden. De algemene I_z voor elke doorsnede staat hieronder weergegeven.

$$\overline{I_z} = \frac{1}{12} \cdot h \cdot b^3 - \frac{1}{12} \cdot h \cdot b^3$$

Uit de formule komt dat I_z voor de enkele doorsnede 0,152 is. Vervolgens moet de regel van Steiner worden toegepast. De verschuivingsregel van Steiner:

$$I_z = \sum \overline{I_z} + a_{yc}^2 \cdot A$$

Waarin a_{yc} = de afstand van het zwaartepunt van de doorsnede tot het zwaartepunt van de gehele doorsnede.

$$I_z = (2 \cdot 0,152 + 0,75^2 \cdot 2 \cdot 0,6156) + (2 \cdot 0,152 + 2,25^2 \cdot 2 \cdot 0,6156) + (2 \cdot 0,152 + 3,75^2 \cdot 2 \cdot 0,6156)$$

De uitkomst van deze vergelijking is 26,063. Het traagheidsmoment I_z is dus 26,063 m⁴.

Het torsie traagheidsmoment is te berekenen met behulp van de benaderingsformule van Bredt. Deze formule geldt normaal gesproken voor dunwandige doorsneden. In deze formule wordt namelijk uitgegaan van een constante wringschuifspanning in de wanden van de doorsnede, terwijl deze bij dikwandige doorsneden zoals onze betonnen kokerligger varieert over de dikte

van de flens of het lijf. De formule² is is volgt:

$$I_t = \frac{4 \cdot A_m^2}{\sum \frac{s_i}{h_i}}$$

waarin A_m = het binnenoppervlak tussen de hartlijnen van de wanden doorsnede

s_i = de hoogte van het profiel

h_i = de wanddikte van het kokerprofiel

Voor de enkele doorsnede is de uitkomst van de formule, $I_t = 0,142$ m⁴. Voor de totale doorsnede geldt $I_t = 0,852$ m⁴.

Yc, Zc

De Y_c en de Z_c zijn de y-coördinaten respectievelijk z-coördinaten van de doorsnede. Deze zijn te berekenen met de volgende formules.

² Bron: Hoogenboom, P.C.J. (2007). "Aantekeningen over wringing", http://www.mechanics.citg.tudelft.nl/~pierre/1TM5_aantekeningen.pdf

$$y_c = \frac{S_y}{A} \quad \text{en} \quad z_c = \frac{S_y}{A}$$

De y_c heeft een waarde van 4490 mm, omdat de doorsnede volledig symmetrisch is in de y-richting.

De z_c volgt uit de formule is heeft een waarde van 413,8 = ongeveer 414 mm.

$W_{el,y}$, $W_{el,z}$

Het weerstandsmoment voor buiging rond de y-as en de z-as worden berekend volgens de volgende formules.

$$W_{el,y} = \frac{I_z}{y_c} \quad \text{en} \quad W_{el,z} = \frac{I_y}{z_c}$$

$W_{el,y}$ volgt uit en bovenstaande formule en is gelijk aan $7,5121 \cdot 10^{-1} \text{ m}^3$. $W_{el,z}$ is gelijk aan 5,8047.

Vergelijking eigenschappen

Als de resultaten van de handberekening en de EEM-berekening bekend zijn, zijn deze te vergelijken. Deze vergelijking is puur en alleen om te kijken hoe dicht je met een simpele handberekening in de buurt kan komen van een EEM-berekening van een softwareprogramma.

EEM-berekening		Handberekening	
A [m²]	3,7398	A [m²]	3,6936
A_y [m²]	2,759972	A_y [m²]	2,7528
A_z [m²]	1,581935	A_z [m²]	1,536
I_y [m⁴]	$3,1293 \cdot 10^{-1}$	I_y [m⁴]	$3,11 \cdot 10^{-1}$
I_z [m⁴]	$2,5146 \cdot 10^1$	I_z [m⁴]	$2,6063 \cdot 10^1$
I_t [m⁴]	$8,084371 \cdot 10^{-1}$	I_t [m⁴]	$8,5196 \cdot 10^{-1}$
W_{el,y} [m³]	$7,5613 \cdot 10^{-1}$	W_{el,y} [m³]	$7,5121 \cdot 10^{-1}$
W_{el,z} [m³]	5,6005	W_{el,z} [m³]	5,8047
W_{pl,y} [m³]	1,0119	W_{pl,y} [m³]	x
W_{pl,z} [m³]	8,3584	W_{pl,z} [m³]	x
Y_c [mm]	4490	Y_c [mm]	4490
Z_c [mm]	414	Z_c [mm]	414

Tabel 4: Vergelijking doorsnede eigenschappen

De resultaten tussen de EEM resultaten uit Scia Engineer komen zo te zien redelijk goed overeen met de resultaten uit een handberekening. Met een simpele berekening komt men dus nog goed in de buurt van de correcte resultaten van ingewikkelde doorsneden. Een verklaring dat er toch nog verschillen zijn is dat er gebruik is gemaakt bij de handberekening van een vereenvoudigde doorsnede ipv een ingewikkelde doorsnede in Scia Engineer. Verder is er bij de handberekening een vereenvoudiging gemaakt voor de totale doorsnede, namelijk is de enkele doorsnede met zes vermenigvuldigd. Dat is niet correct, omdat de totale doorsnede een massieve doorsnede is. De resultaten die het programma heeft berekend met EEM-berekening zijn de beste resultaten, en deze zullen dan ook in het complete onderzoek en project maatgevend zijn.

Ook aan te merken is dat de gegevens van de fabrikant afwijken tot 4% van de berekende gegevens van de EEM berekening in Scia. Dit is opvallend, maar kan worden verklaard door de eventueel andere doorsnede (de doorsnede is in Scia 'nagetekend' van de fabrikant), doordat bijvoorbeeld de fabrikant de eigenschappen op een andere manier berekend of doordat zij de waarden afrond.

Belastingen

De belastingen die op het model werken zijn natuurlijk uiterst belangrijk voor een goed onderzoek. Hier zullen de belastingen worden besproken en geformuleerd die in het model van belang zijn.

Eigen gewicht

Aanwezig is, zoals bij elke constructie, het eigen gewicht van de constructie. Dit eigen gewicht wordt door het programma Scia Engineer voor beide doorsneden automatisch berekend en hoeft niet eens aan de constructie worden toegevoegd. Het eigen gewicht is aanwezig in alle fasen van het viaduct aanwezig, al vanaf de aanleg. Het eigen gewicht zorgt voor een buigend moment om de y-as van de constructie. Daarnaast zorgt de kromming en dus de excentriciteit ten opzichte van de zuivere overspanning voor een torsiemoment (moment om de x-as). Door dit torsiemoment zal de ligger willen roteren om de eigen as, een probleem dat zich vooral voor zal doen tijdens de bouw.

Verkeersbelasting

Voor de simulatie van de verkeersbelasting is uitgegaan van enkel de verticale krachten die door het verkeer op de weg werken. Deze belastinggevallen zijn allen variabele belasting.

De verkeersbelasting relevant is gesimuleerd door een rij vrachtwagens te bekijken. De aanname is dat zo'n rij vrachtwagens representatief is voor het maximale gewicht op een rijbaan. Het gewicht van de vrachtwagens wordt vervolgens gedimensioneerd tot een lijnlast volgens een simpele berekening (NEN 6723: VBB 1995). Een vrachtwagen van 15 meter lang (met 5 assen) en 2,5 meter breed is over het algemeen 50 ton zwaar. Deze 50 ton is equivalent aan 500 kN. De lijnlast wordt dan $500/15 = 33,33 \text{ kN/m}$ (-33,33 kN/m in het model, met een – teken in z-richting ten teken dat de kracht naar beneden wijst). Deze lijnlast kan worden geplaatst midden op rijbaan 1 of op de rijbaan 2 of op beide rijbanen. Omdat het niet realistisch is dat het hele viaduct vol staat met vrachtwagens en omdat een rij vrachtwagens op de rechter rijbaan (rijbaan 2) heel interessant is, zal er in het programma gekeken worden naar de lijnlast op de 2^e rijbaan. De lijnlast wordt dan op het viaduct (samengestelde doorsnede) geplaatst met een excentriciteit in de y-richting van 1,935 meter voor de 2^e rijbaan, en met een excentriciteit in de y-richting van -1,54 meter voor de 1^e rijbaan (Zie Figuur 5).

Het model van een enkele doorsnede heeft andere afmetingen, dit is uitgelegd in 'Invoer geometrie' (zie Figuur 10: Visualisatie gehele doorsnede + enkele doorsnede). Er wordt uitgegaan van een hartlijn van de ligger met een kromtestraal van 27,25 meter. Deze zwaarbelaste ligger ligt onder de tweede rijbaan. Op het enkele liggermodel wordt een maximale lijnbelasting aangenomen van de helft van een rij vrachtwagens, dus 16,67 kN/m.

Er is behalve het eigen gewicht geen permanente belasting op het viaduct aanwezig.

Belastingcombinaties

Voor de belastingcombinaties is uitgegaan van de UGT (uiterste grens toestand). Daar komen de belastingfactoren bij kijken, namelijk $\gamma_G = 1,2$ voor permanente belasting en $\gamma_Q = 1,5$ voor variabele belasting.

Geheel

Voor het gehele viaduct zijn de volgende belasting combinaties gemaakt in het programma.

UGT 1

- Eigen gewicht
- Variabel, vrachtwagens 2^e rijbaan
- Variabel, vrachtwagens 1^e rijbaan

UGT 2

- Eigen gewicht

UGT 3

- Eigen gewicht
- Variabel, vrachtwagens 2^e rijbaan

UGT 4

- Eigengewicht
- Variabel, vrachtwagens 1^e rijbaan

Zoals gezegd zal voor dit onderzoek waarschijnlijk belastingcombinatie UGT 3 het meest interessant en realistisch zijn.

Enkele ligger

Voor de enkele ligger zijn er slechts twee belastingcombinaties.

UGT 1

- Eigen gewicht

UGT 2

- Eigen gewicht
- Variabel, lijnlast van 16,67 kN/m op de ligger

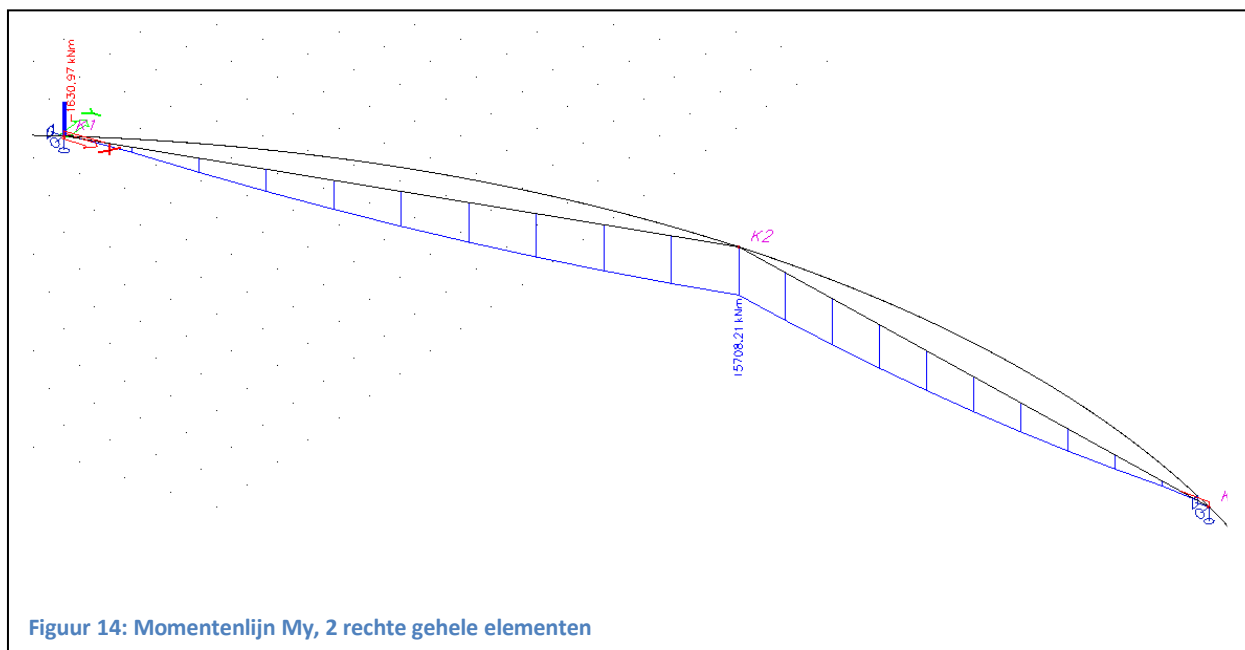
Onderzoek: 'Benadering van een kromme'

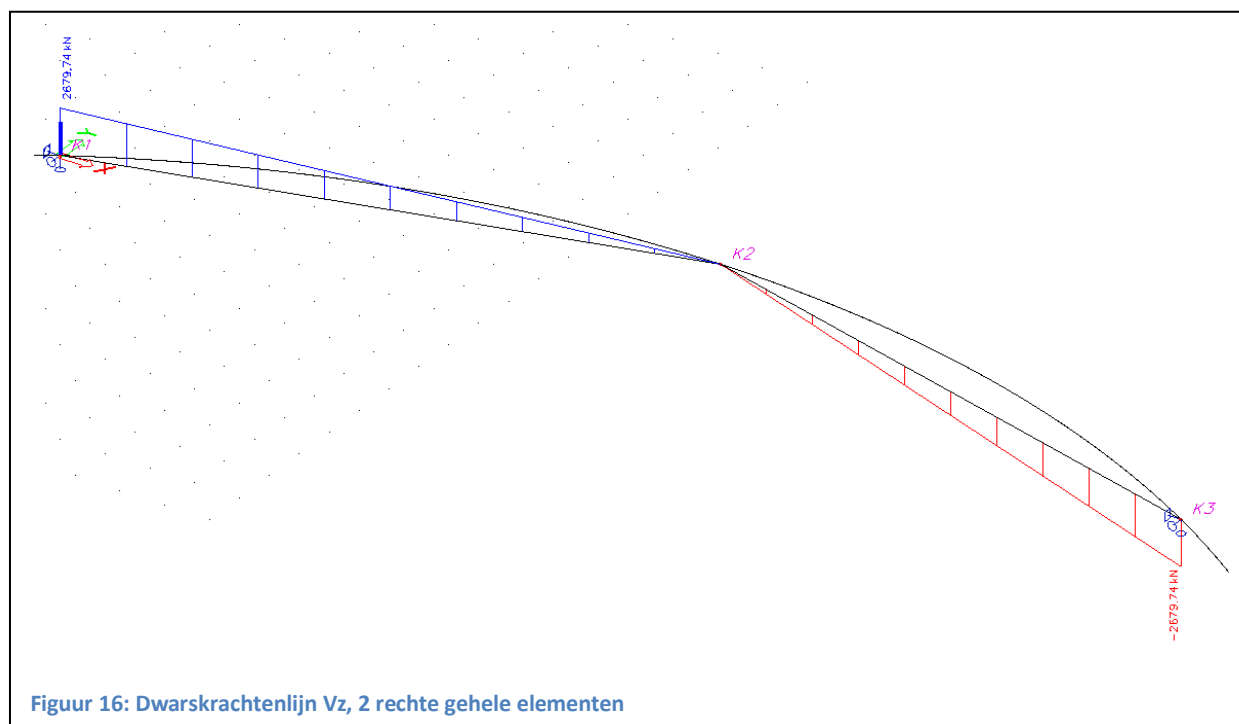
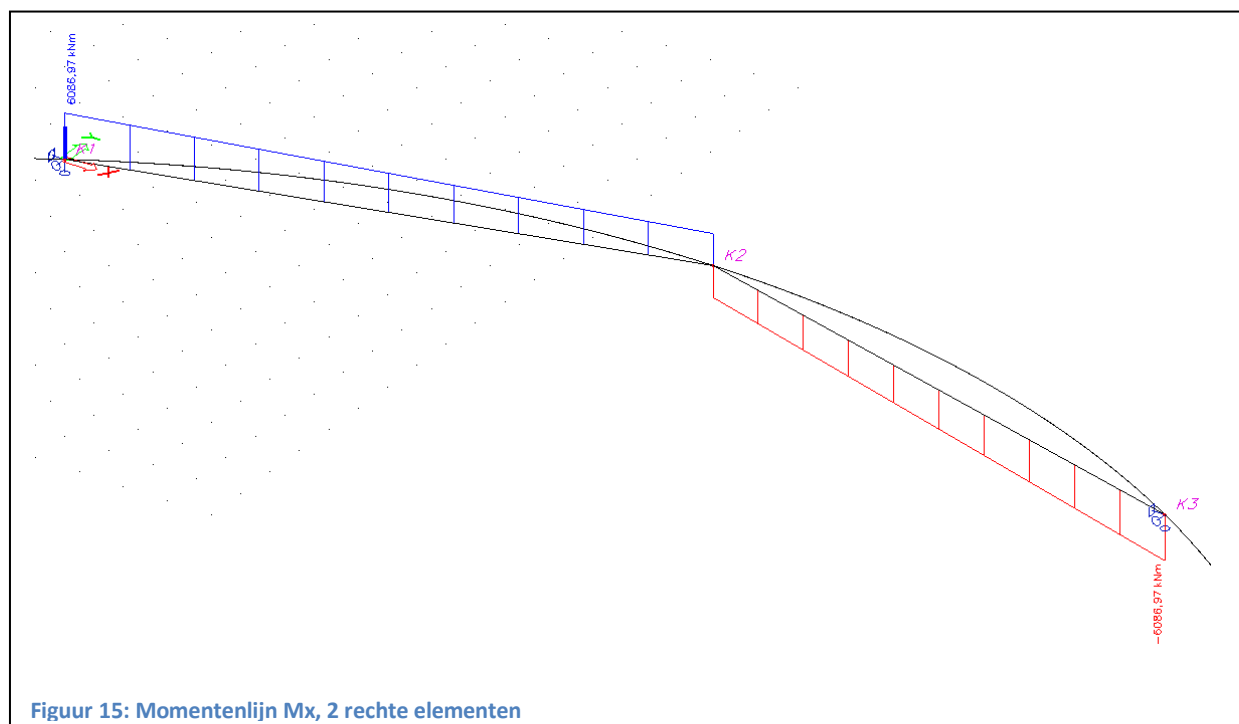
Inleiding

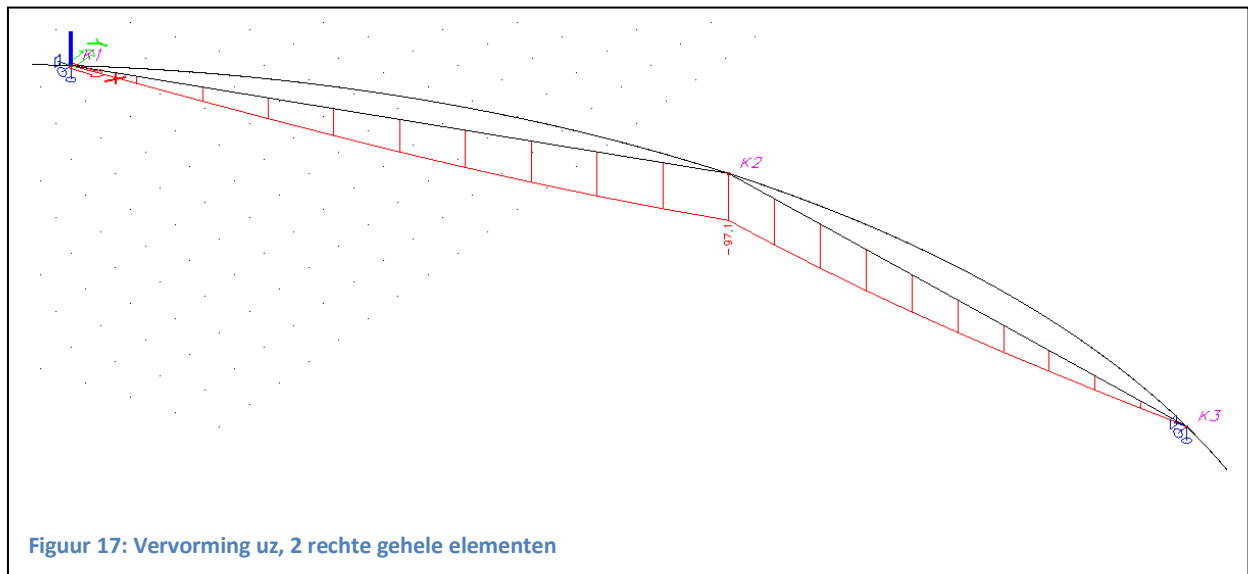
Na veel voorbereidingen voor het model in het softwareprogramma Scia Engineer kan het onderzoek uitgevoerd worden. In dit hoofdstuk zullen van alle categorieën voor de relevante belastinggevallen de resultaten van M_y en M_x worden geplaatst en later besproken. De benadering met rechte liggers komt als eerste aan bod en voor de volledigheid worden deze resultaten ook nog vergeleken met de resultaten van een gekromd ingevoerde ligger in het programma. Alle momenten in dit hoofdstuk zijn in kNm, alle dwarskrachten in kN en alle vervormingen in mm.

Gehele doorsnede viaduct

Bij deze resultaten is steeds uitgegaan van belastingcombinatie UGT 3.

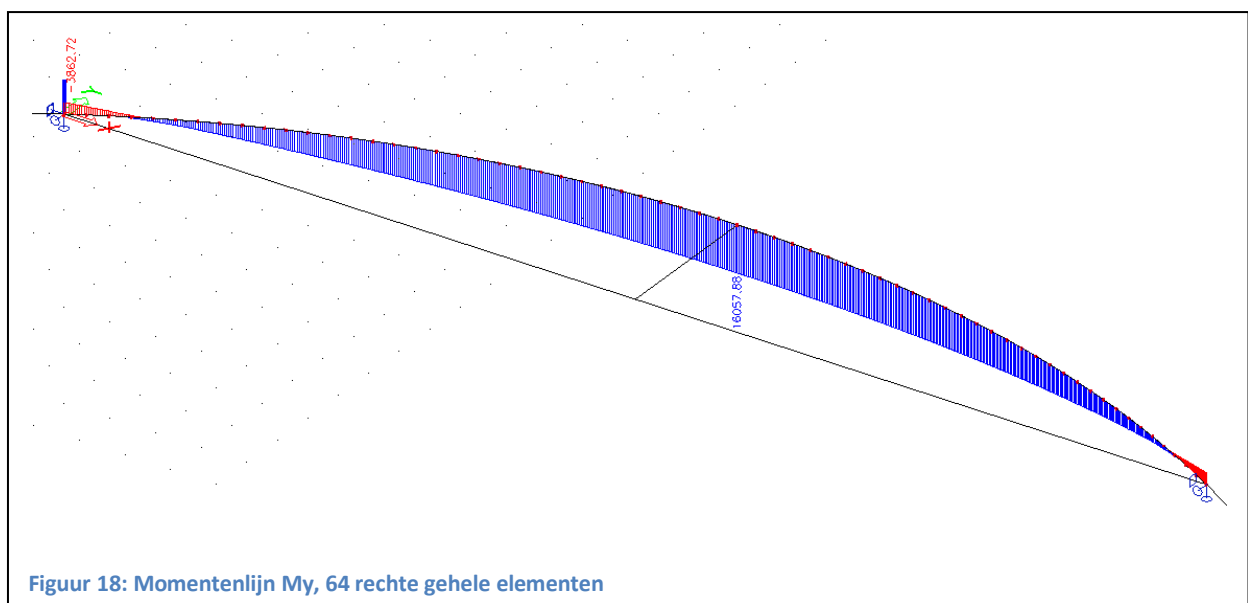


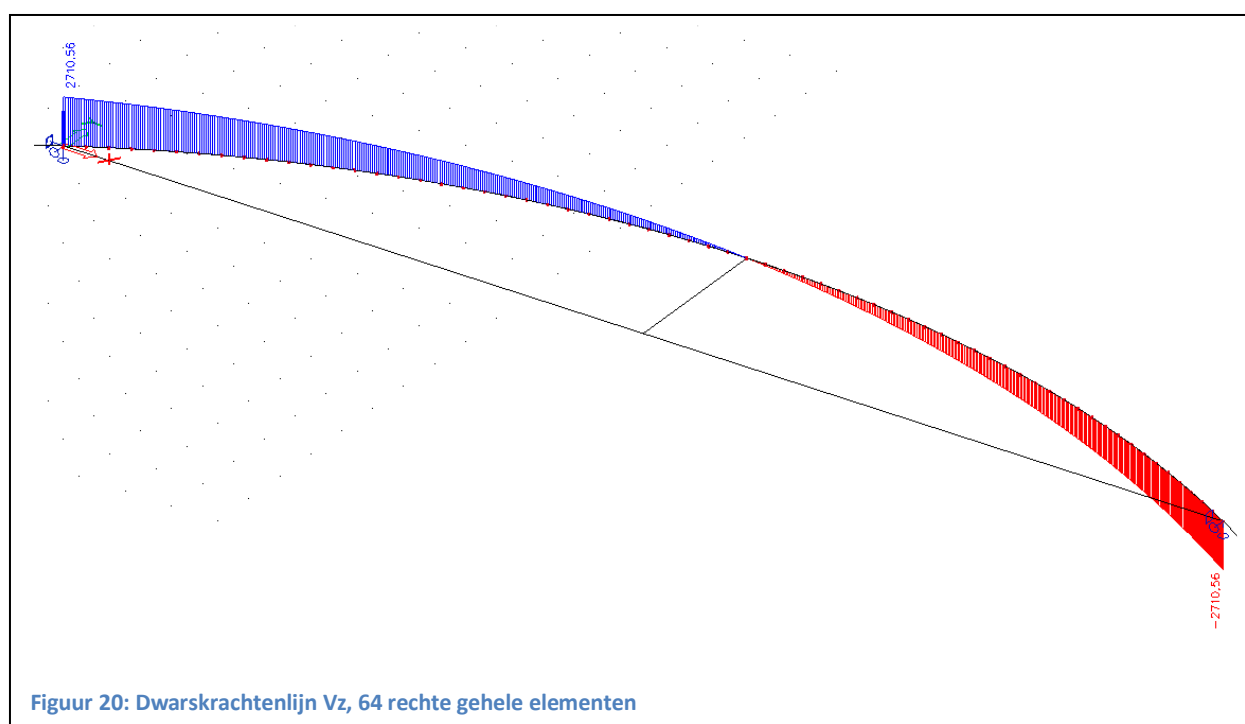
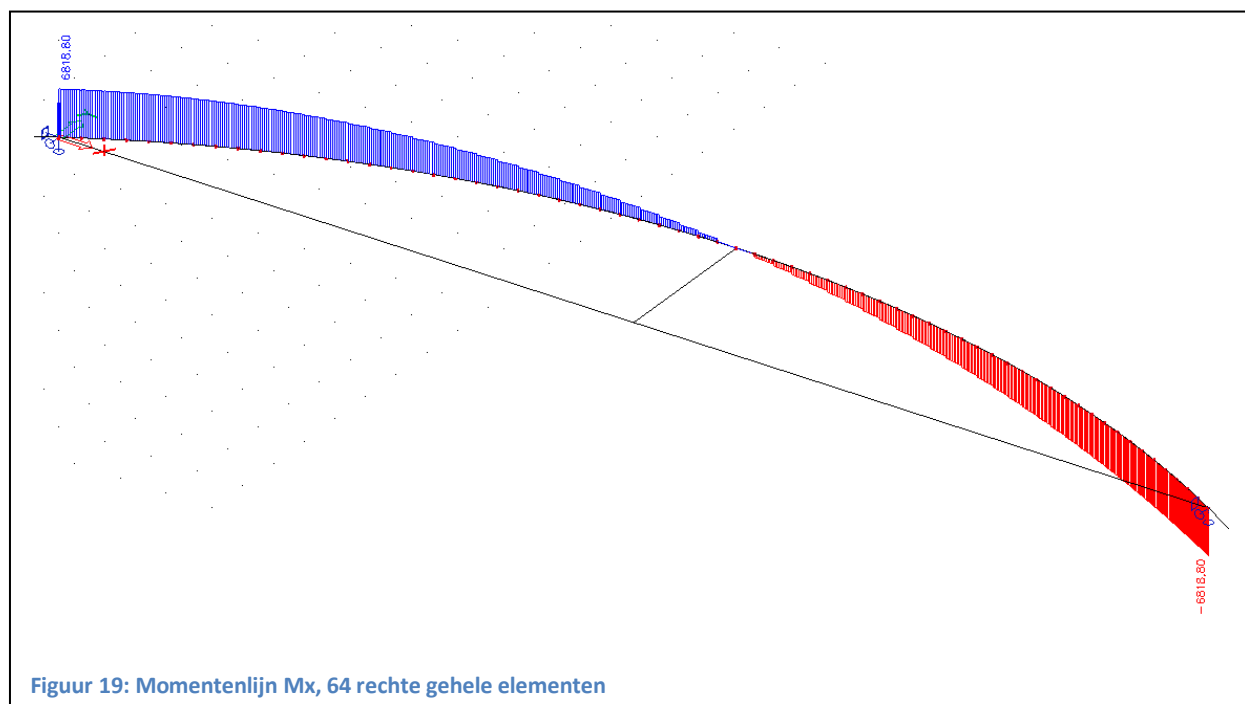


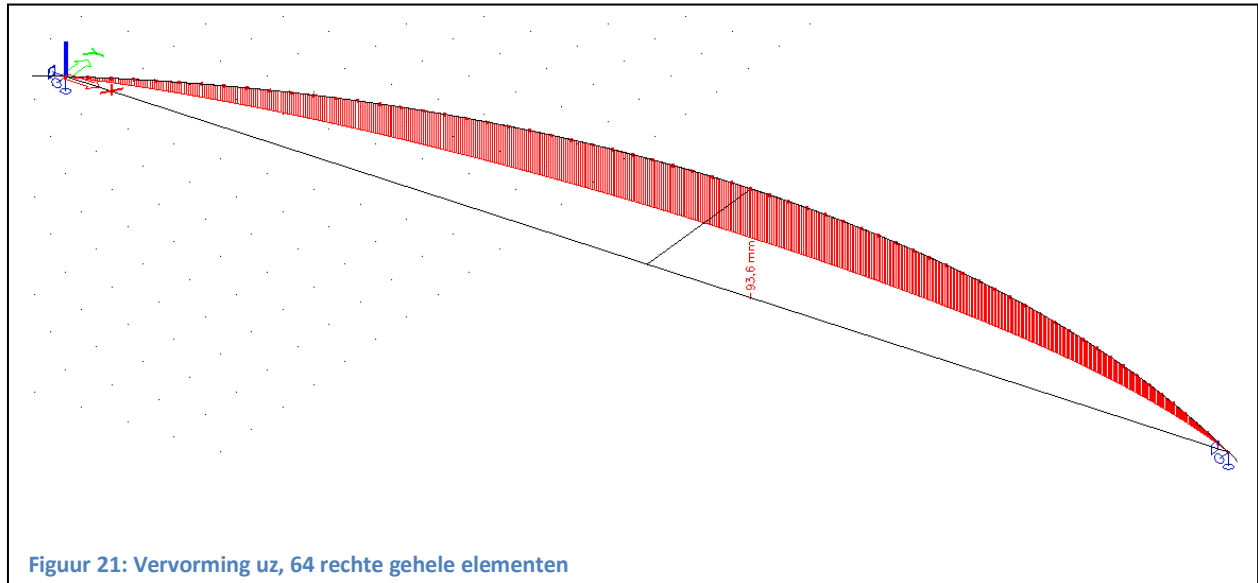


De lijnen in bovenstaande afbeeldingen zien er goed uit, er zijn geen vreemde zaken aan te zien. Ook de waardes zijn redelijk te noemen. Het enige dat opvalt aan de momentenlijn M_y is dat er in de inklemming een moment is, terwijl het moment rotatie om de y-as vrij moet zijn. Dit kan met het assenstelsel en de plaatsing van de opleggingen te maken hebben, maar of dit van belang is zal aan bod komen in het volgende hoofdstuk.

Van de resterende resultaten (van 4 t/m 64 rechte elementen) zal ik alleen nog de afbeeldingen met 64 rechte elementen laten zien. Alle resultaten die belangrijk zijn zullen uiteindelijk nog wel in een tabel worden gezet.







Ook aan deze lijnen is eigenlijk niet zoveel bijzonders te zien, behalve dat de momentenlijn van M_x een stuk geleidelijker verloopt. Dat komt natuurlijk omdat er een flinke meshverkleining heeft plaatsgevonden (64x ipv 2x). De waarden kloppen allemaal.

In eerste instantie was er een probleem met de vervorming van de constructie. Deze vervorming bleek heel erg groot te zijn, wanneer een berekening was uitgevoerd. Deze vervorming u_z had toen een waarde met orde grootte 10^{12} mm, en dat kan natuurlijk niet kloppen. Ook de momenten en dwarskracht waren iets anders dan ze zouden moeten zijn. Uiteindelijk is dit probleem opgelost. De fout was dat de doorsnede eigenschappen I_t , de A_y en de A_z niet met de hand waren ingevoerd. Daardoor waren de vervormingen zo zeer groot.

Hier volgt een tabel met alle gegevens op een rij. Dit gaat dus alleen om de benadering van een geheel viaduct (dus met samengestelde doorsnede) met behulp van rechte elementen, met de belastingcombinatie UGT 3. De onderstaande Tabel 5 geeft de resultaten weer. Deze resultaten zullen in de paragraaf conclusie in dit hoofdstuk besproken worden.

	2x	4x	8x	16x	32x	64x
M_y [kNm]	15708,21	15971,08	16035,76	16051,86	16055,89	16057,88
M_x [kNm]	6086,97	6885,13	6943,51	6891,69	6846,34	6818,80
V_z [kN]	2679,74	2702,86	2708,66	2710,11	2710,48	2710,56
u_z [mm]	97,1	94,5	93,9	93,7	93,7	93,6

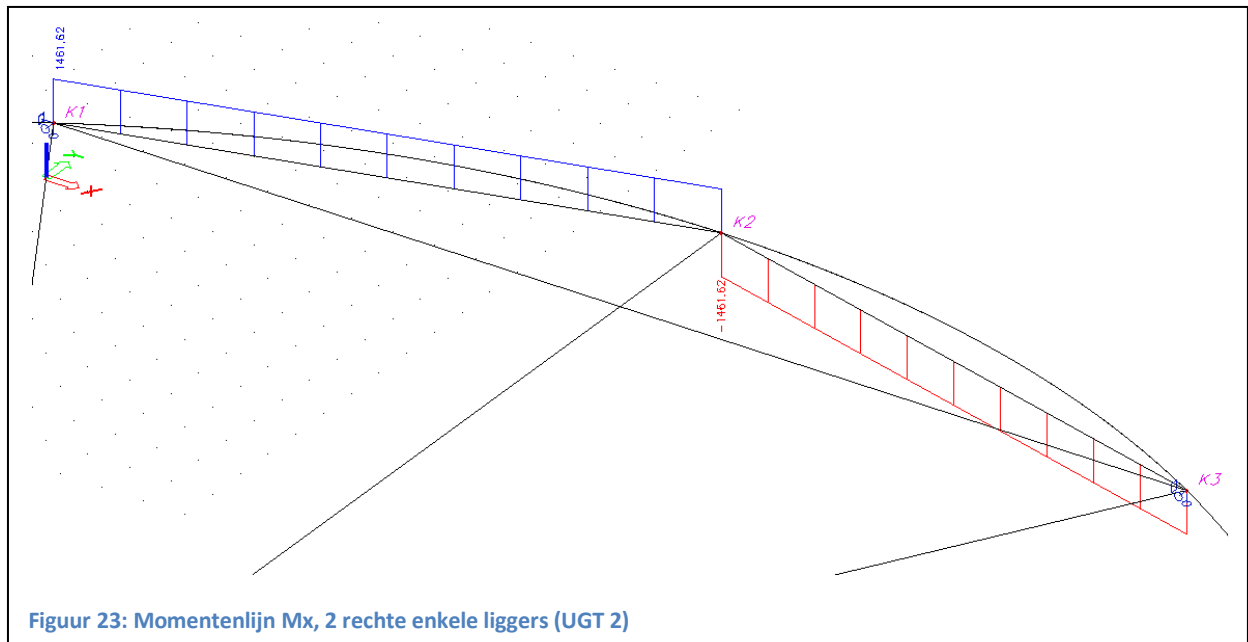
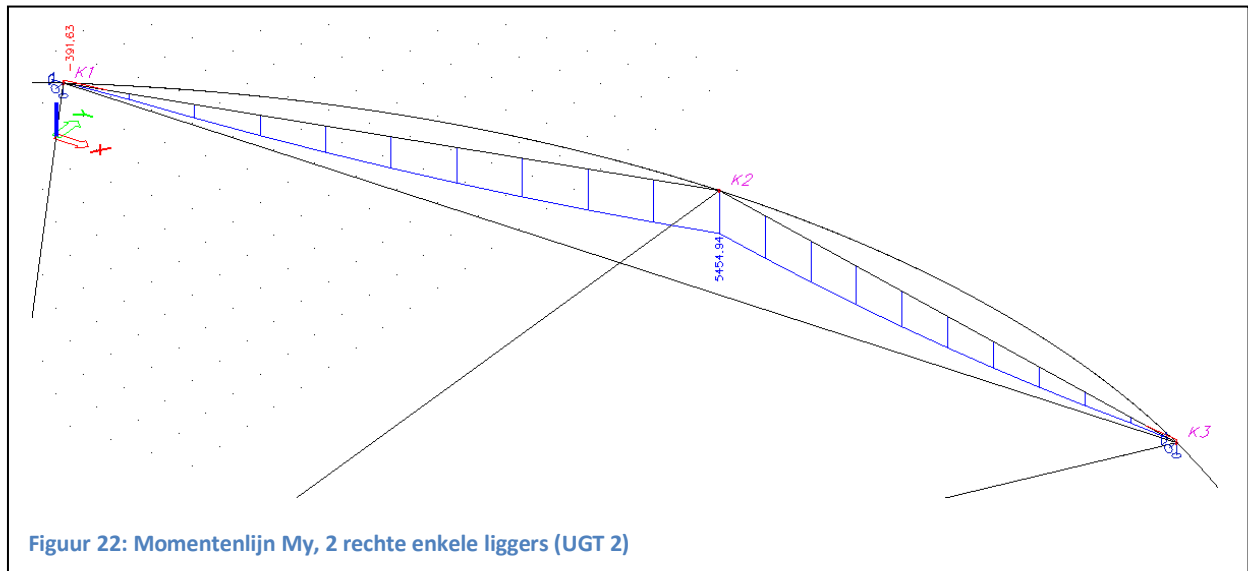
Tabel 5: Berekeningsresultaten gehele doorsnede, voor UGT 3 (eigen gewicht + vrachtwagens rechterbaan)

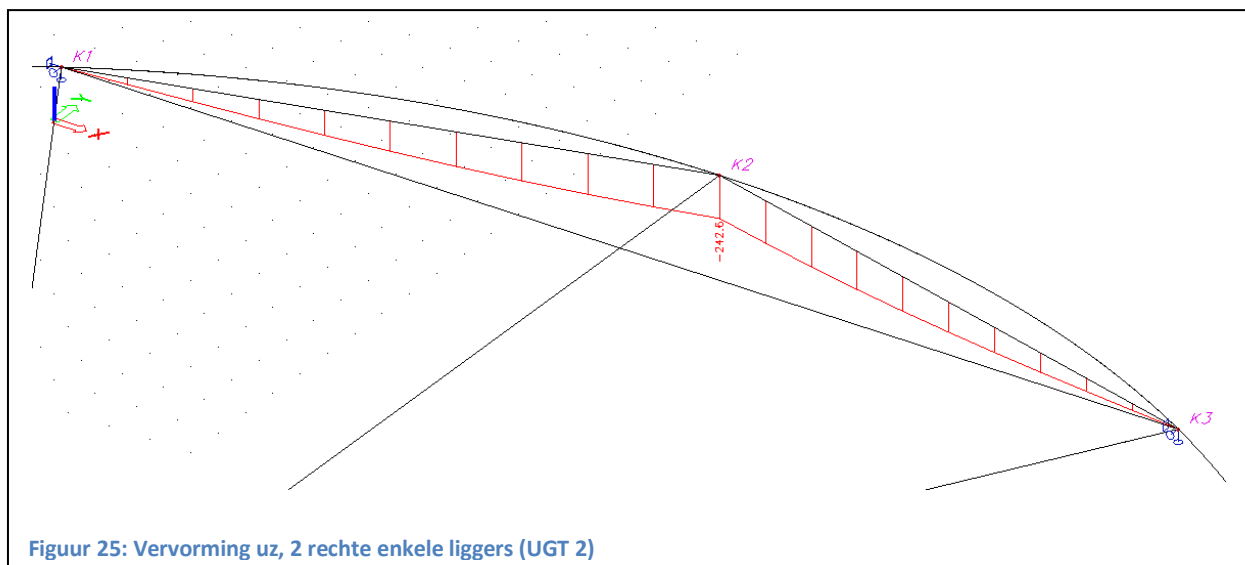
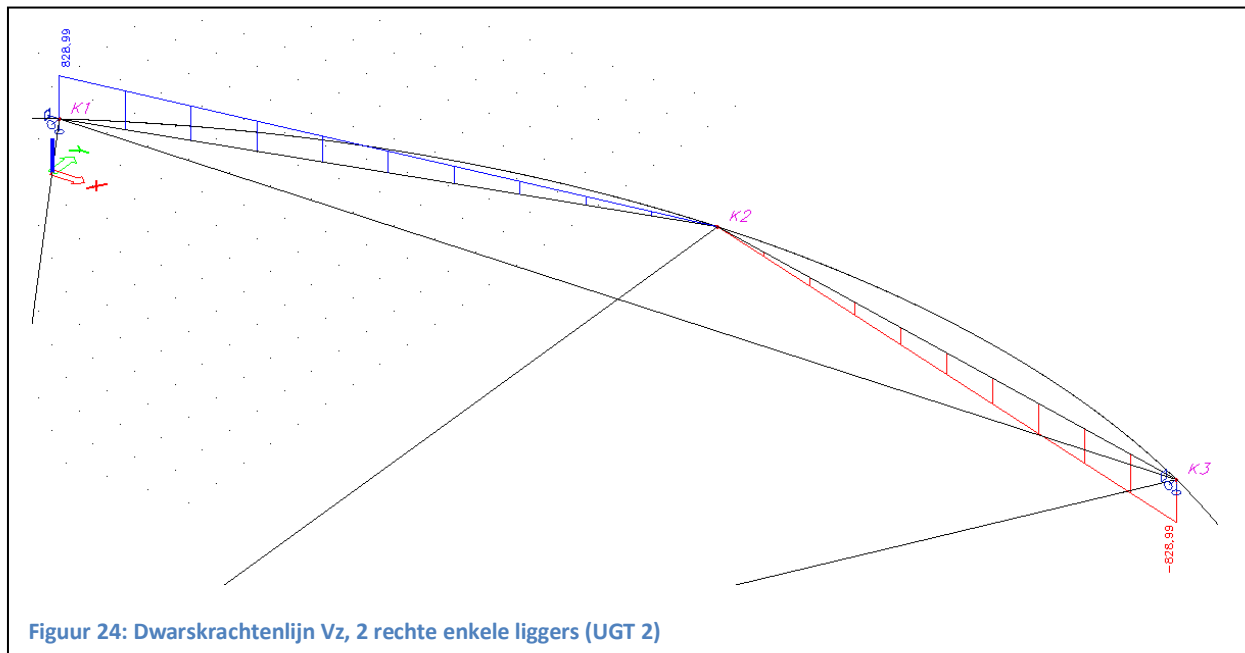
Enkele ligger viaduct

De resultaten van het onderzoek betreffende de enkele doorsnede zijn in eerste instantie interessant voor de belastingcombinatie UGT 2, waarbij het eigen gewicht en een extra lijnlast

meewerkt. Ook de situatie UGT 1, waarbij alleen het eigen gewicht werkt, is interessant tijdens de aanbouw fase. Deze aparte situatie wordt later in een ander hoofdstuk uitvoerig besproken.

UGT 2: Eigen gewicht + belasting





Ook bij de benadering van de enkele liggers is correct verlopen, omdat de lijnen en waarden in bovenstaande afbeeldingen reëel zijn. Alleen de afbeeldingen van de benadering met 2 elementen zijn hier in het rapport opgenomen. De zwarte lijnen die te zien zijn, zijn hulplijnen om de constructie op een goede manier in te voeren. De afbeeldingen van de resterende modellen zijn niet per definitie belangrijk om te laten zien. De resultaten, dus waarden van maximale momenten, dwarskrachten en vervormingen zijn natuurlijk wel belangrijk. Daarom is een tabel van deze resultaten hieronder te zien.

	2x	4x	8x	16x	32x	64x	128x
My [kNm]	5454,94	5547,76	5570,62	5576,32	5577,74	5578,09	5578,18
Mx [kNm]	1461,62	1756,47	1792,67	1784,34	1781,45	1780,98	1780,75
Vz [kN]	828,99	836,14	837,93	838,38	838,49	838,52	838,53
Uz [mm]	242,6	237,1	235,7	235,4	235,3	235,3	235,3

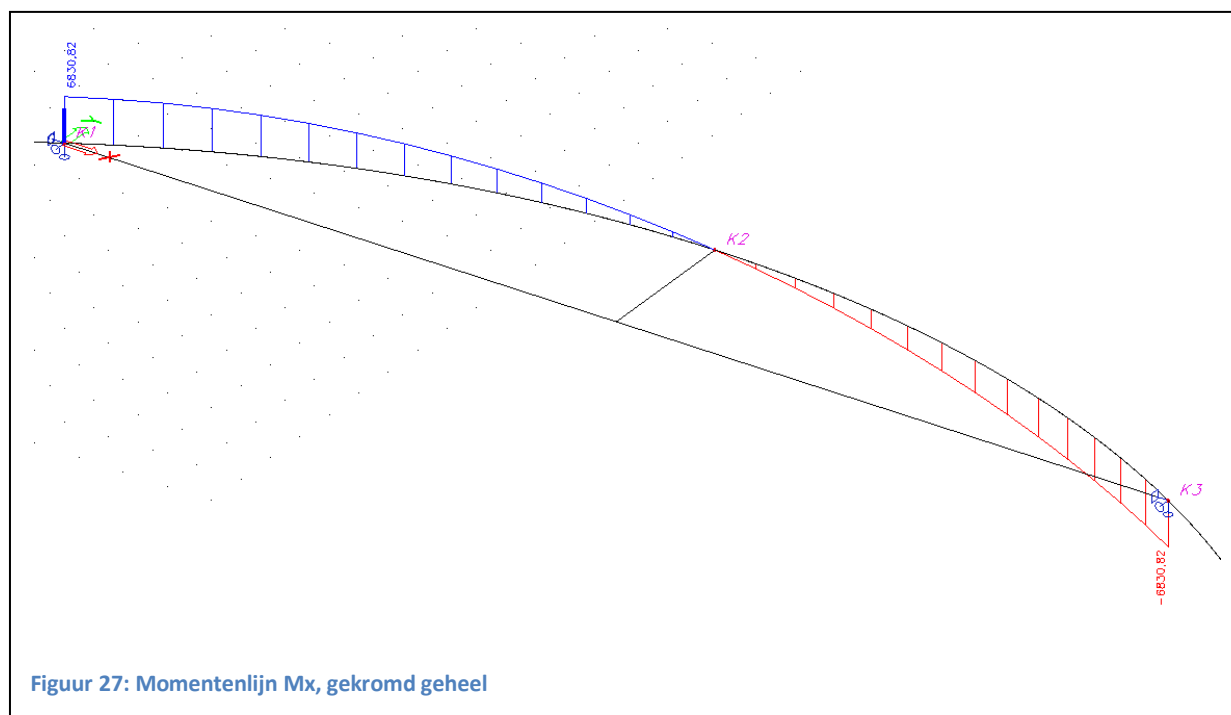
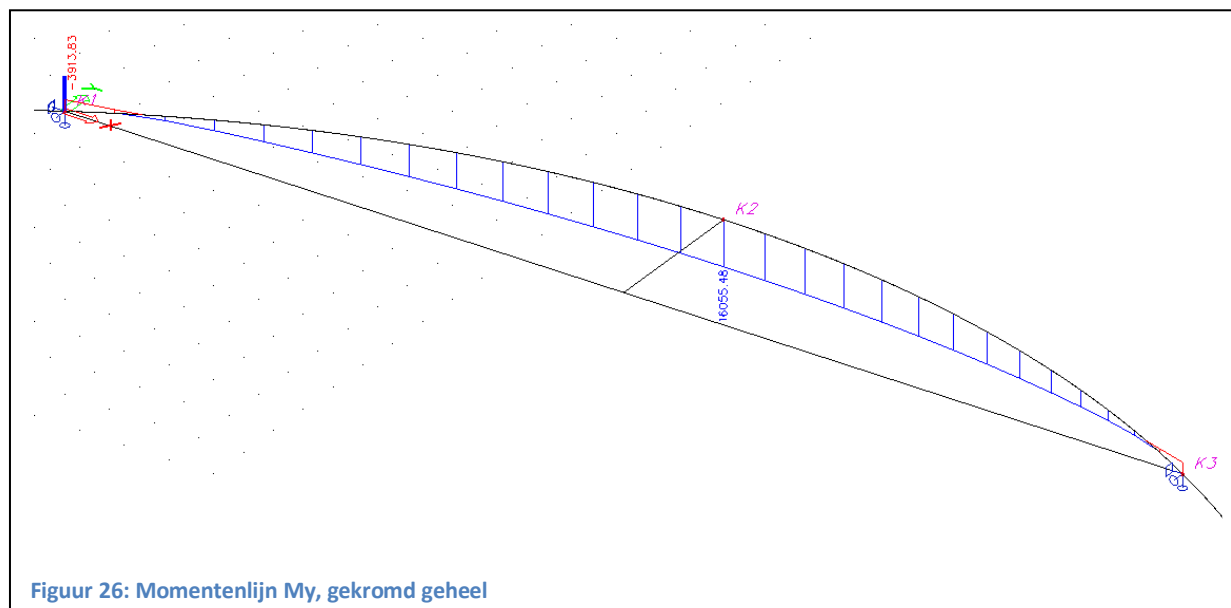
Tabel 6: Berekeningsresultaten enkele doorsnede, voor UGT 2 (eigen gewicht + lijnlast vrachtwagens)

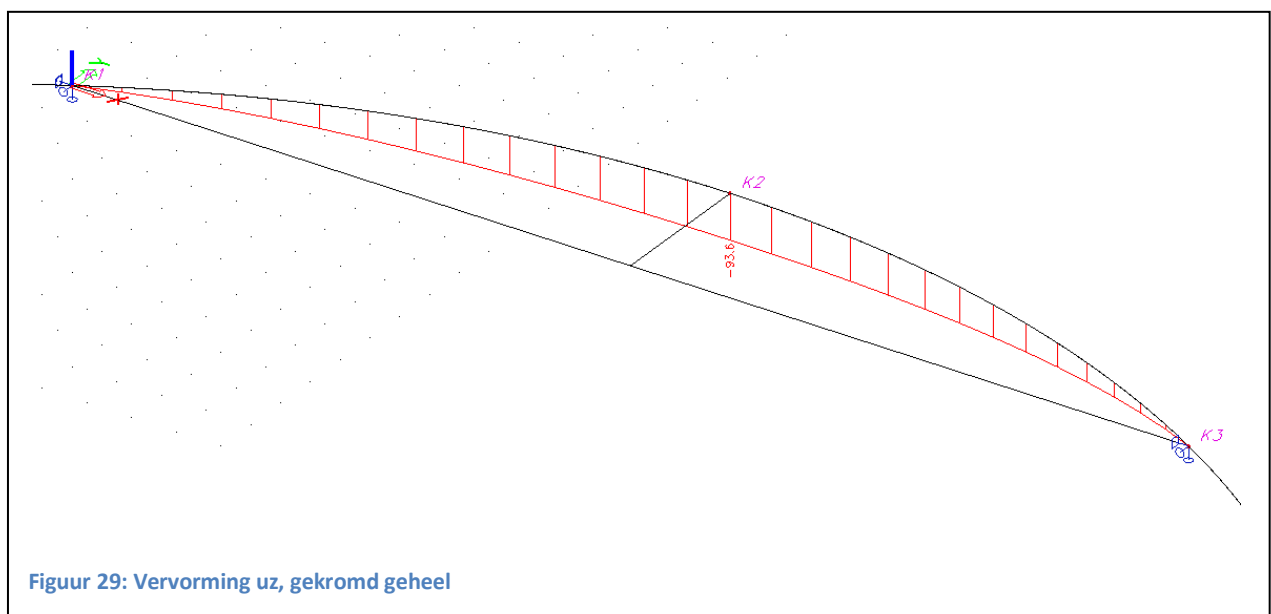
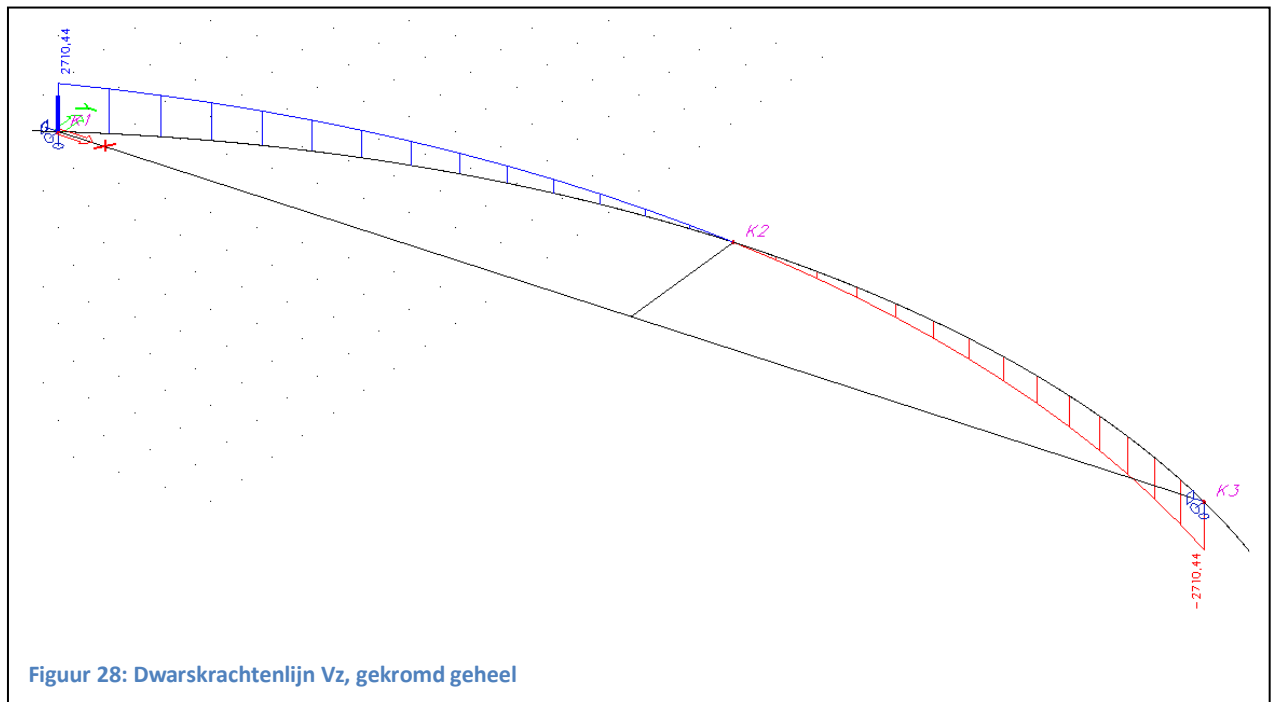
In eerste instantie weken de waarden van de benadering door 64 en 128 rechte elementen erg af van de overige benaderingen. Na de verbetering van de I_t , de A_y en de A_z van de doorsnede was ook dit probleem opgelost.

Gekromde liggers

In het programma Scia Engineer kunnen ook gekromde liggers ingevoerd worden. Deze maak je door een staaf toe te kennen aan een bepaalde cirkelboog met de goede lengte en kromtestraal. Deze paragraaf laat de resultaten zien van gekromd ingevoerde liggers, ipv een handmatige benadering van de gekromd met behulp van rechte elementen. In feite wordt de kromming in Scia Engineer ook opgedeeld in rechte elementjes, maar hoeveel is onbekend. De resultaten in deze paragraaf kunnen gebruikt worden om eventueel te bepalen in hoeveel deeltjes het programma een gekromde ligter opdeelt. Eerst wordt de gehele doorsnede behandeld voor de belastingcombinatie UGT 3, en daarna de enkele doorsnede. Voor de enkele doorsnede wordt alleen de combinatie van belastingen UGT 2 behandeld. De situatie UGT 1, met alleen het eigen gewicht, wordt later in een aparte situatie behandeld.

Samengestelde doorsnede

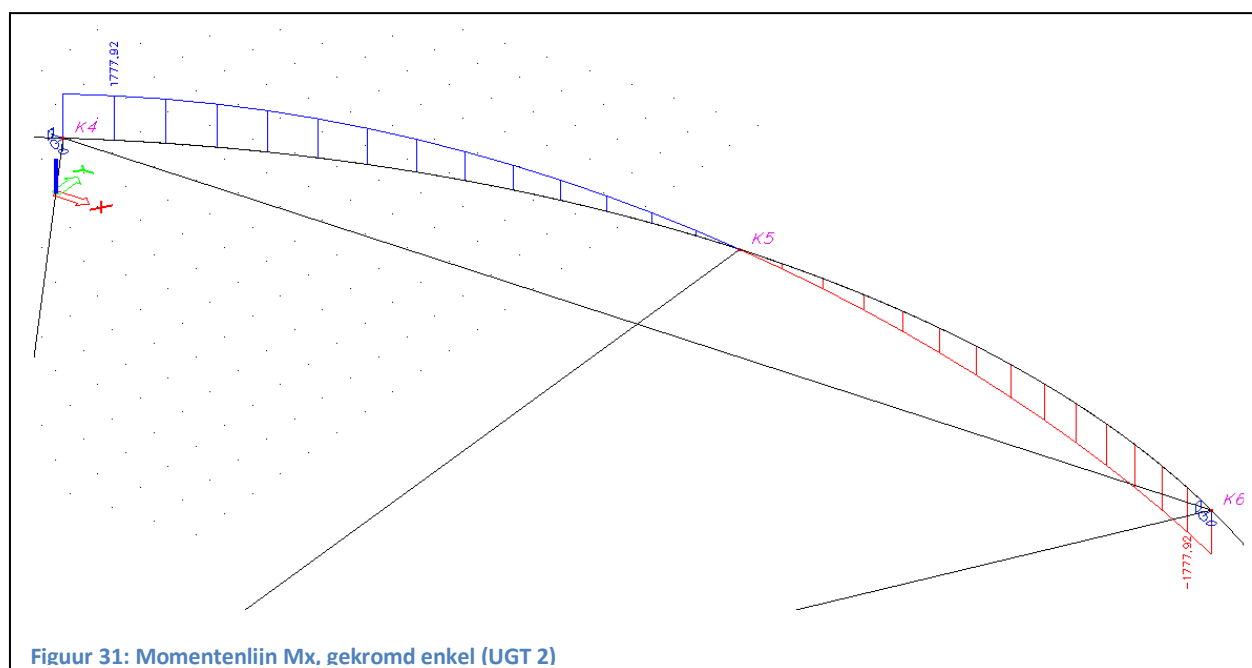
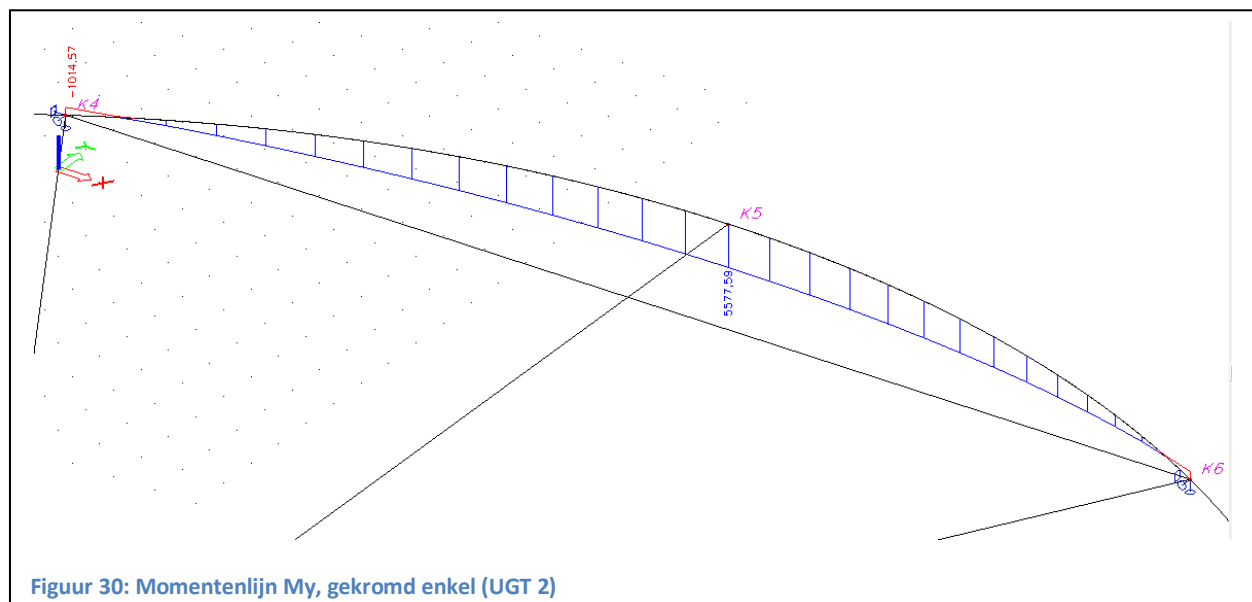


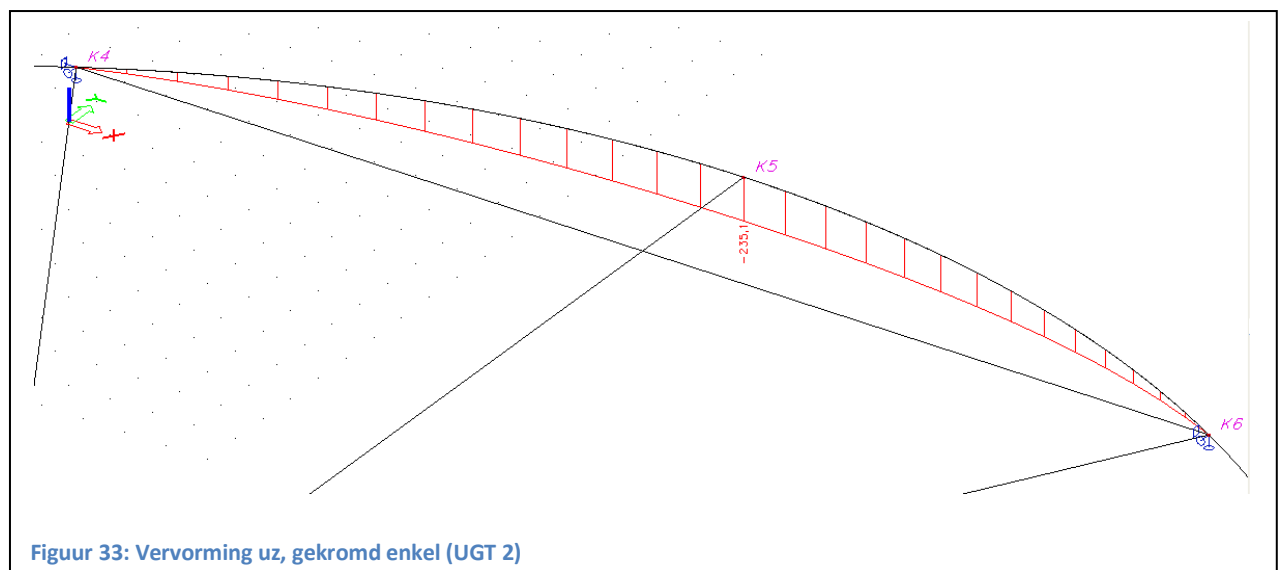
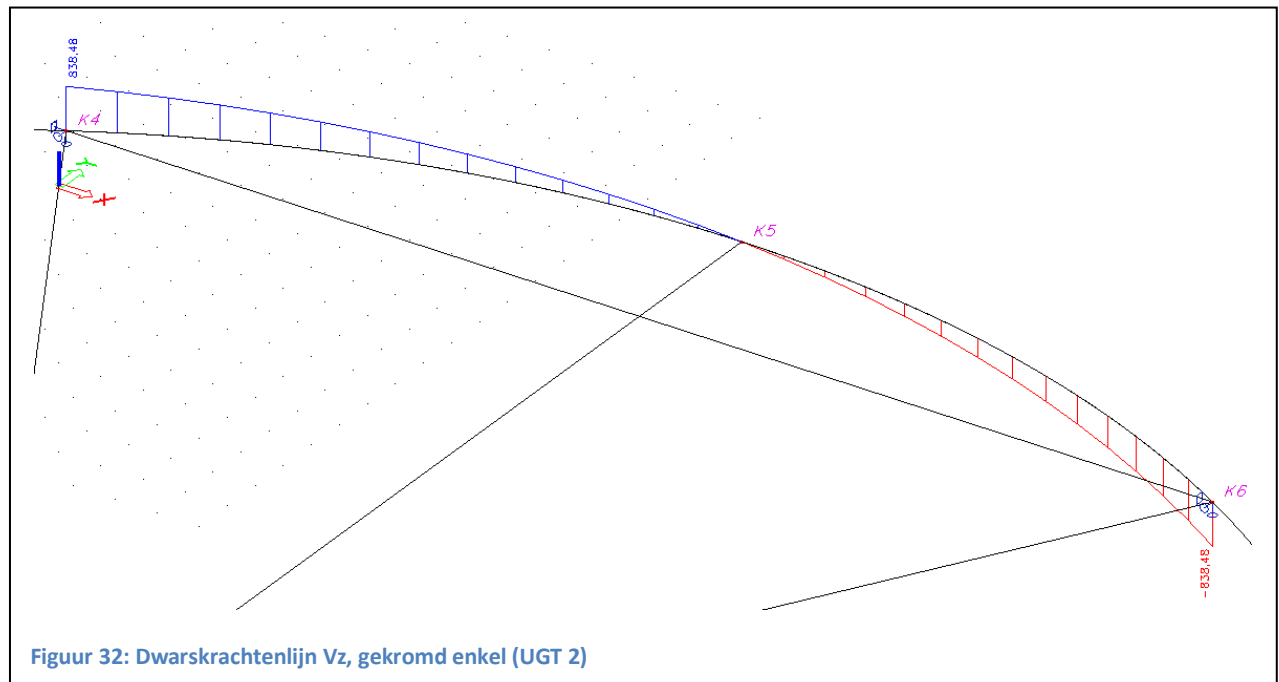


	Gekromd geheel
My [kNm]	16055,48
Mx [kNm]	6830,82
Vz [kN]	2710,44
Uz [mm]	93,6

Tabel 7: Berekeningsresultaten gehele gekromde doorsnede, voor UGT 3

Enkele doorsnede





	Gekromd enkel
My [kNm]	5577,59
Mx [kNm]	1777,92
Vz [kN]	838,48
Uz [mm]	235,1

Tabel 8: Berekeningsresultaten enkele gekromde doorsnede, UGT 2

Analyse

Nu is het belangrijk een analyse van de resultaten die in dit hoofdstuk staan te doen. Alleen op die manier is er iets te zeggen over de benadering van een krom viaduct met rechte elementen. Hier volgen nog even alle resultaten op een rijtje, van de gehele doorsnede en van de enkele ligger. Achter de tabel is een kolom geplakt met de resultaten van een gekromde ligger, ter vergelijking met de andere resultaten.

Geheel	2x	4x	8x	16x	32x	64x	<i>Gekromd geheel</i>
My [kNm]	15708,21	15971,08	16035,76	16051,86	16055,89	16057,88	16055,48
Mx [kNm]	6086,97	6885,13	6943,51	6891,69	6846,34	6818,80	6830,82
Vz [kN]	2679,74	2702,86	2708,66	2710,11	2710,48	2710,56	2710,44
Uz [mm]	97,1	94,5	93,9	93,7	93,7	93,6	93,6

Enkel UGT 2	2x	4x	8x	16x	32x	64x	128x	<i>Gekromd enkel</i>
My [kNm]	5454,94	5547,76	5570,62	5576,32	5577,74	5578,09	5578,18	5577,59
Mx [kNm]	1461,62	1756,47	1792,67	1784,34	1781,45	1780,98	1780,75	1777,92
Vz [kN]	828,99	836,14	837,93	838,38	838,49	838,52	838,53	838,48
Uz [mm]	242,6	237,1	235,7	235,4	235,3	235,3	235,3	235,1

Naar bovenstaande resultaten kijkende zijn er een aantal conclusies te trekken. Allereerst is het interessant om te kijken naar het aantal elementen waarbij een nauwkeurige benadering (1%) van een kromme wordt bereikt. Te zien is dat al redelijk snel een goede benadering wordt bereikt, zelfs met 2 elementen. Maar een voorwaarde voor voldoende nauwkeurigheid is dat het verschil tussen de waarden bij een benadering en de volgende benadering maximaal 1% is. Als dat het geval is ben je op het punt beland dat je kan zeggen dat die benadering een nauwkeurige is. Maar dat is nog niet genoeg, het verschil tussen de nauwkeurige benadering en de laatste benadering in het rijtje dat je doet mag ook meer dan 1% zijn. Als aan deze twee voorwaarden voor een bepaald aantal elementen wordt voldaan kun je zeggen dat die benadering een nauwkeurige is.

In dit geval is te zien dat vanaf 8 elementen een nauwkeurige benadering van een kromme wordt bereikt, omdat het verschil tussen 4 en 8 elementen bij alle waarden minder is dan 1% of rond de 1% ligt. Alleen bij de waarden van Mx bij de gehele doorsnede schommelen de waarden

heel erg, zodat deze eis niet perfect wordt voldaan. Verder zijn ook de verschillen van de waarden van de benadering met 8 elementen met de benaderingen met 64 en 128 elementen kleiner dan 1%. Daarom is aan de voorwaarden voldaan, en is dus te zeggen dat de benadering met 8 rechte elementen voor dit geval (een netto overspanning van 25 meter en een kromtestraal van 25 meter) een nauwkeurige benadering voor een perfecte kromming oplevert.

Een andere conclusie die uit de bovenstaande resultaten getrokken kan worden is dat de stijfheid van de constructie toeneemt naarmate het aantal elementen groter wordt. Dit is te zien aan de maximale vervorming u_z van de constructie, die afneemt naarmate de elementen kleiner worden. Dit is ongewoon te noemen, want bij eindige elementen berekeningen wordt de vervorming meestal groter naarmate de meshverkleining toeneemt. Een goede verklaring is hiervoor niet te geven. Het zou kunnen dat dit komt doordat er steeds meer ligger, dus meer materiaal en dus steeds meer buigstijfheid wordt toegevoegd aan de constructie naarmate het aantal elementen toeneemt. Maar dat zou ook weer teniet gedaan moeten worden doordat er steeds meer excentriciteit en meer excentrische belasting wordt toegevoegd alleen al door het eigen gewicht. Over de reden van deze toename van de stijfheid is dus op dit moment in deze situatie niets over te zeggen.

Zoals al gezegd schommelen de waarden van M_x bij de gehele doorsnede heel erg, en is er geen duidelijke convergentie te zien. Dit is alleen het geval bij een samengestelde doorsnede en niet bij de enkele doorsnede. Het wringmoment neemt eerst erg toe, dan neemt het weer langzaam af. Maar dan bij de 64 elementen neemt M_x weer ineens heel erg af, dus is er geen rustige convergentie naar een bepaalde waarde. Hier is dus over te zeggen dat het wringmoment M_x gevoelig is voor de elementverkleining (meshverkleining) bij de gehele doorsnede.

Ook over de gekromd ingevoerde liggers iets op te merken. Deze gekromde liggers worden voor de EEM-berekening door het programma opgedeeld in bepaalde elementen, maar op welke manier is onbekend. De resultaten van de gekromde liggers in de kolom naast de andere resultaten in bovenstaande tabellen. De resultaten zijn opmerkelijk te noemen, ze zijn niet constant. Over de waarden is niet goed te zeggen dat de benadering met een bepaald aantal rechte elementen is gedaan. De momenten M_y en dwarskracht V_z zijn zo dat de benadering zou moeten zijn gedaan met bijvoorbeeld tussen de 25 en 30 elementen als een vergelijking wordt gemaakt met de overige resultaten. De vervormingen u_z zijn zo dat de kromming is opgedeeld tussen de 32 en 64 elementen. De momenten M_x daarentegen zijn zo afwijkend dat er niks over te zeggen is. Concluderend kan worden gezegd dat het programma een andere manier gebruikt

om de resultaten van een kromme te berekenen, en het niet benaderd met ‘gewoon’ aantal rechte elementen.

Daaraan kan worden toegevoegd dat het waarschijnlijk is dat het programma voor een gekromd element een andere netverdeling voor de EEM-berekening gebruikt, en dat dat de reden is van de afwijkende waarden. Zo worden vaak in plaats van een vierkante meshverdeling een driehoekige meshverdeling gebruikt, omdat daarmee bochten beter kunnen worden gemaakt.

Als laatste kan er nog toegevoegd worden dat het belangrijk is dat de waarden een aantal doorsnede eigenschappen zoals de I_t , A_z en A_y goed met de hand moeten worden ingevoerd in het doorsnede scherm. Als dit niet of niet goed gebeurt, wordt de berekening niet goed uitgevoerd en zijn de waarden van vooral de vervorming uz veel te groot. Ook kan de berekening met heel veel elementen (64x of 128x) vreemde en verkeerde waarden opleveren.

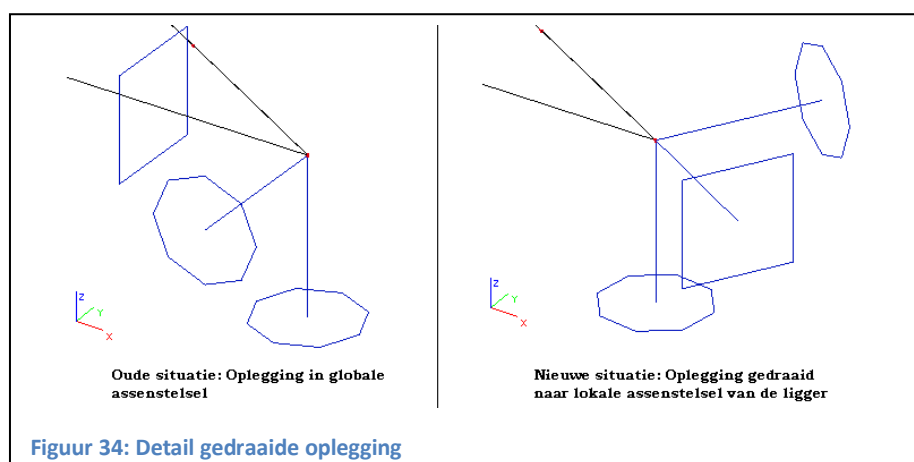
Onderzoek: 'Gedraaid assenstelsel'

Inleiding

In het vorige hoofdstuk is onderzoek gedaan naar een benadering van een kromme ligger met een bepaald aantal rechte elementen. In het programma Scia Engineer is een globaal assenstelsel aanwezig zoals eerder te zien was in de het hoofdstuk Ontwerp viaductsegment. De constructie heeft een eigen locale assenstelsel dat constant de richting van de ligger heeft. Dit is een goede situatie. Maar in tegenstelling tot de constructie zelf zijn de opleggingen geplaatst in de richtingen van het globale assenstelsel en niet in de richting van de liggers/elementen van de constructie. Daarom is het waarschijnlijk dat de momenten en dwarskrachten niet precies kloppen omdat bijvoorbeeld het torsiemoment M_x in de opleggingen niet om de eigen as van de ligger is. Het verkeerd staan van de opleggingen levert dus misschien onnauwkeurige of verkeerde waarden op, en daarom moet het onderzocht worden of het verbeterd kan worden.

Gedraaid assenstelsel

Zoals gezegd waren de opleggingen in het vorige onderzoeksdeel georiënteerd in de richting van het globale assenstelsel. Dus de x-, y- en z-as van de opleggingen zijn dezelfde als van het globale assenstelsel. Dit terwijl de (perfect) gekromde ligger begint met een hoek van 30° in het xy-vlak en eindigt met een hoek van -30° in het xy-vlak. Daarom is de oplegging gedraaid ten opzichte van de stand van de constructie. Deze draaiing moet er eigenlijk niet zijn, omdat er dan onnauwkeurigheden optreden. Het betekent dat de oplegging in de richting van het lokale assenstelsel van het einde van de constructie moeten staan, dus in het verlengde van de constructie. Een detailafbeelding van de opleggingen van de oude en de nieuwe situatie is in Figuur 34 te zien.



Goed is in de afbeelding te zien wat er bedoeld wordt. De oplegging is in het xy-vlak gedraaid, zodat de x-as in het verlengde ligt van de ligger, en de y-as loodrecht daarop. Linksonder in de afbeelding is het globale assenstelsel te zien.

Omdat er bij de benadering van de kromming berekeningen zijn gemaakt met 2x, 4x, 8x, 16x, 32x en 64x elementen is de hoek van inval bij de oplegging elke keer anders. In dit hoofdstuk worden alleen de resultaten bekeken van de benadering van de kromming met 64 elementen. Deze constructie benaderd de kromme qua vorm zo goed dat de beginhoek en eindhoek van de constructie aangenomen kunnen worden als respectievelijk 30° en -30° graden in het xy-vlak. Het is niet nodig dat alle waarden worden herberekend, want de benaderingen met 64 elementen zijn sowieso al het best (alhoewel ze vanaf 8 elementen al nauwkeurig genoeg zijn) en het zou veel onnodig werk zijn om alle in- en uitvalshoeken te bepalen. Daarom volgen nu de resultaten van de hernieuwde berekeningen met 64 rechte elementen en gedraaide opleggingen voor de gehele doorsnede en voor de zwaarbelaste enkele ligger.

Resultaten

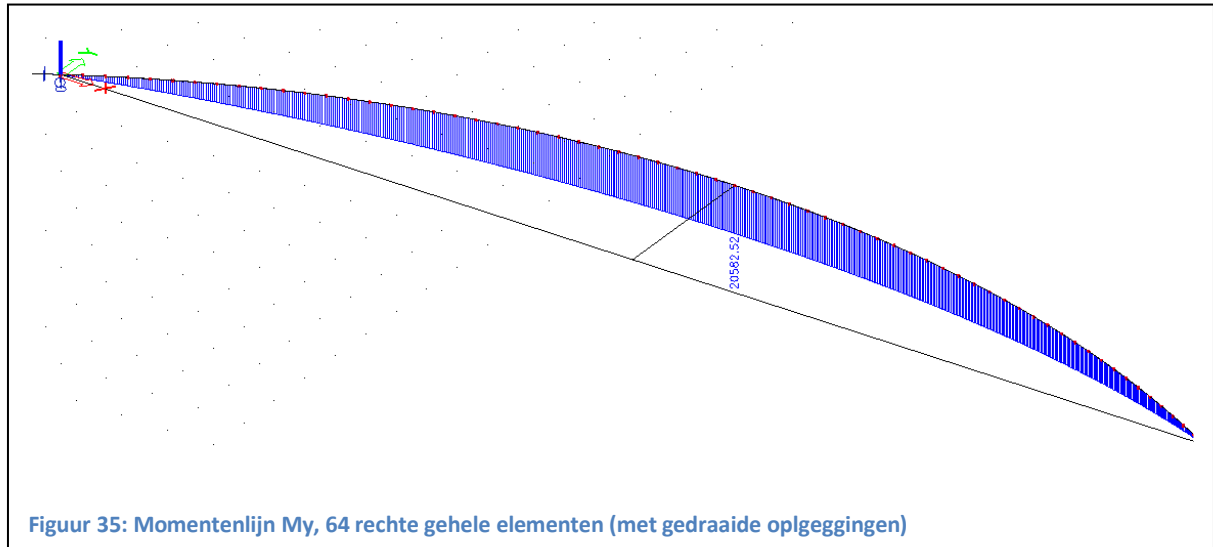
Geheel	64x (oud)	64x (nieuw)
My [kNm]	16057,88	20582,52
Mx [kNm]	6818,80	9048,95
Vz [kN]	2710,56	2710,56
Uz [mm]	93,6	154,8

Tabel 9: Vergelijking oude en nieuwe berekening gehele doorsnede

Enkel UGT 2	64x (oud)	64x (nieuw)
My [kNm]	5578,09	6750,58
Mx [kNm]	1780,98	2344,97
Vz [kN]	838,52	838,52
Uz [mm]	235,3	366,5

Tabel 10: Vergelijking oude en nieuwe berekening enkele doorsnede

Een plaatje van de momentenlijn My van de constructie met gehele doorsnede wordt hieronder voor de volledigheid nog geplaatst, omdat deze momentenlijn anders is dan in het eerste onderzoeksdeel. Er treden namelijk geen momenten in de opleggingen meer op. Dit is ook het geval bij de momentenlijn van My van de enkele doorsnede.



Analyse

Aan de momentenlijn van M_y (het zuivere buigend moment loodrecht op de eigen as van de constructie) is te zien dat er in de opleggingen geen moment optreedt. Het is de bedoeling dat er geen moment M_y optreedt in de opleggingen, want de constructie moet een statisch bepaalde constructie zijn. Daaruit is af te leiden dat deze resultaten correcter zijn, omdat de opleggingen in de juiste stand staan. De waarden van het buigend moment M_y en het wringmoment M_x en de vervorming u_z zijn dus in het goede model iets hoger, zoals te zien is in Tabel 9 en Tabel 10. Om de werkelijkheid goed te simuleren had er dus eigenlijk vanaf het begin gewerkt moeten worden met het laatste model met de opleggingen gedraaid naar het lokale assenstelsel van de ligger. De resultaten van het vorige hoofdstuk zijn ondanks de nieuwe inzichten nog steeds goed, vandaar dat de conclusies die daar gemaakt zijn als geldend worden aangenomen. Wel gaat er vanaf nu voor de verdere onderzoek naar de ontwerpprocedure en de dimensionering van het viaduct gebruik gemaakt worden van de waarden die gevonden zijn in dit hoofdstuk.

Maatgevende model t.b.v. dimensionering

Dit hoofdstuk dient ter bepaling van de belastingcombinatie van het model dat het meest maatgevend is voor een enkele ligger in het viaduct. Met deze belastingcombinatie van dat model wordt vervolgens de dimensionering bepaald. Voor het model van het gehele viaduct moeten er wat aannames worden gedaan om van de resultaten uit Scia te omrekenen naar resultaten in een enkele ligger. Voor het model van de enkele ligger is dit omrekenen uiteraard niet nodig en kunnen de resultaten gewoon uit Scia worden afgelezen.

Geheel

Voor het gehele viaduct zijn aannames gedaan.

Omdat de zes liggers door dwarsvoorspanning verbonden zijn blijven ze altijd in hetzelfde vlak. Ze maken dus allemaal dezelfde vervorming door ten gevolge van het torsiemoment. Daarom is het torsiemoment in alle ligger hetzelfde, en wordt het totale torsiemoment verdeeld over de zes liggers. Het totale torsiemoment wordt gedeeld door zes om tot het torsiemoment in een enkele ligger te komen.

Voor het buigend moment is de aanname dat de liggers minder samenwerken. Twee van de zes liggers zijn verantwoordelijk voor de afdracht van het buigend moment ten gevolge van variabele belasting in het viaduct. De resultaten tgv het eigen gewicht van zes ligger wordt wel door zes liggers gedeeld omdat alle liggers een eigen gewicht hebben.

De resultaten, omgerekend naar een enkele ligger volgens bovenstaande aannamen, zijn te zien in Tabel 11.

Geheel	UGT 1	UGT 2	UGT 3	UGT 4
M_x [kNm]	1650,11	831,67	1508,16	895,29
$M_{y,EG}$ [kNm]	2394,28	2394,28	2394,28	2394,28
$M_{y,var}$ [kNm]	6510,53	0	3108,43	2604,00
$M_{y,tot}$ [kNm]	8904,81	2394,28	5502,71	4998,28

Tabel 11: Maatgevende belastingcombinatie gehele viaduct, omgerekend naar een enkele ligger

Enkel ligger

Voor het model van een enkele ligger hoeven geen aannames worden gedaan, de resultaten komen direct uit het model in Scia en zijn als volgt (Tabel 12).

Enkel	UGT 1	UGT 2
M_x [kNm]	954,80	2345,27
$M_{y,EG}$ [kNm]	2748,63	2748,63
$M_{y,var}$ [kNm]	0	4001,95
$M_{y,tot}$ [kNm]	2748,63	6750,58

Tabel 12: Maatgevende belastingcombinatie enkele ligger

Analyse

Uit de resultaten blijkt dat de combinatie UGT 2 uit het model van een enkele ligger maatgevend is voor de waarde van het torsiemoment, omdat deze waarde het grootst is. En het torsiemoment is toch de meest interessante waarde voor dit onderzoek.

Verder is het buigend moment M_y maatgevend in het geval van UGT 1 (gehele viaduct). Deze waarde verschilt ook redelijk van de waarde van het buigend moment in UGT 2 (enkele ligger), namelijk 8904,81 om 6750,58. Dit verschil is meer dan 2100 kNm. Onbekend is of de waarde in UGT 1 (geheel) kloppend zijn. Het kan natuurlijk zijn dat de aannames die gedaan zijn mbt het buigend moment M_y (totale M_y delen door twee ligger ipv bijvoorbeeld zes) niet goed zijn.

Omdat het torsiemoment M_x het meest interessant is voor dit onderzoek en omdat de M_y van UGT 1 (enkele ligger) niet ver af ligt van de maatgevende M_y , wordt gekozen de ligger te dimensioneren op de resultaten uit het onderzoek van het model van een enkele ligger in UGT 2.

Dimensionering

Inleiding

Het eerste deel van het onderzoek is nu afgerond. Er is te zeggen dat een gekromd viaduct met deze afmetingen dat op deze manier ontworpen is qua krachtwerving en vervorming te benaderen is met acht rechte elementen. Maar om te weten of de procedure voor het ontwerpen van een gekromde viaduct mbv het programma Scia Engineer geschikt is, moet er ook een dimensionering plaatsvinden. Daarbij moet gedacht worden aan de voorspanning, dwarskrachtwapening en wringwapening. Dat zal in dit hoofdstuk aan bod komen. Alleen de enkele ligger uit het eerste onderzoeksdeel zal gedimensioneerd worden. Dit is gedaan omdat deze zwaarbelaste enkele ligger maatgevend is (zie “Maatgevende model t.b.v. dimensionering”).

Enkele zwaarbelaste ligger

Voorspanning

Bij dit onderzoek wordt er vanuit gegaan dat het een voorspanning met nagerekt staal betreft, terwijl het in werkelijkheid zeer waarschijnlijk voorgerekt staal betreft bij SKK-kokerliggers van de producent Spanbeton. Verder wordt er een gebogen fictieve kabel verondersteld. Dit wordt gedaan omdat het beton niet of niet teveel mag scheuren. En dat leidt weer tot een lage positie van de kabel in het midden van de ligger en een hoge positie boven de oplegging. Verder is het op deze manier handiger de kabels passend vast te maken en na te spannen.

De fictieve kabel loopt met een parabool over de lengte van de ligger L . De lengte L van de ligger is 28,54 meter, omdat de enkele beschouwde ligger uit het midden van de totale doorsnede ligt. De netto overspanning is 27,25 meter en de booglengte L is dus 28,54 meter. De ligger wordt aangenomen voor deze berekening als een rechte ligger met een lengte van 28,54 meter. De voorspankabels in combinatie met de horizontale kromming van de ligger komt ter sprake in een ander hoofdstuk.

Gegevens:

Beton

Sterkteklasse	: C53/65 ($f_{ck} = 53 \text{ N/mm}^2$)
Ontwerpwaarde druksterkte	: $f_{cd} = 53/1,5 = 35,3 \text{ N/mm}^2$
Gemiddelde waarde axiale treksterkte beton	: $f_{ctm} = 4,2 \text{ N/mm}^2$
Specifiek gewicht	: $\rho = 25 \text{ kN/m}^3$

Milieuklasse	: XC4
E-modulus beton korte termijn	: $E = 38500 \text{ N/mm}^2$
Oppervlakte betondoorsnede	: $A_b = 0,6023 \text{ m}^2$
Weerstandsmoment onderste vezel	: $W_{c,onder} = W_{c,o} = I_y/y_c = 0,125 \text{ m}^3$
Weerstandsmoment bovenste vezel	: $W_{c,boven} = W_{c,b} = I_y/0,394 = 0,129 \text{ m}^3$

Voorspanstaal (Y1860S7)

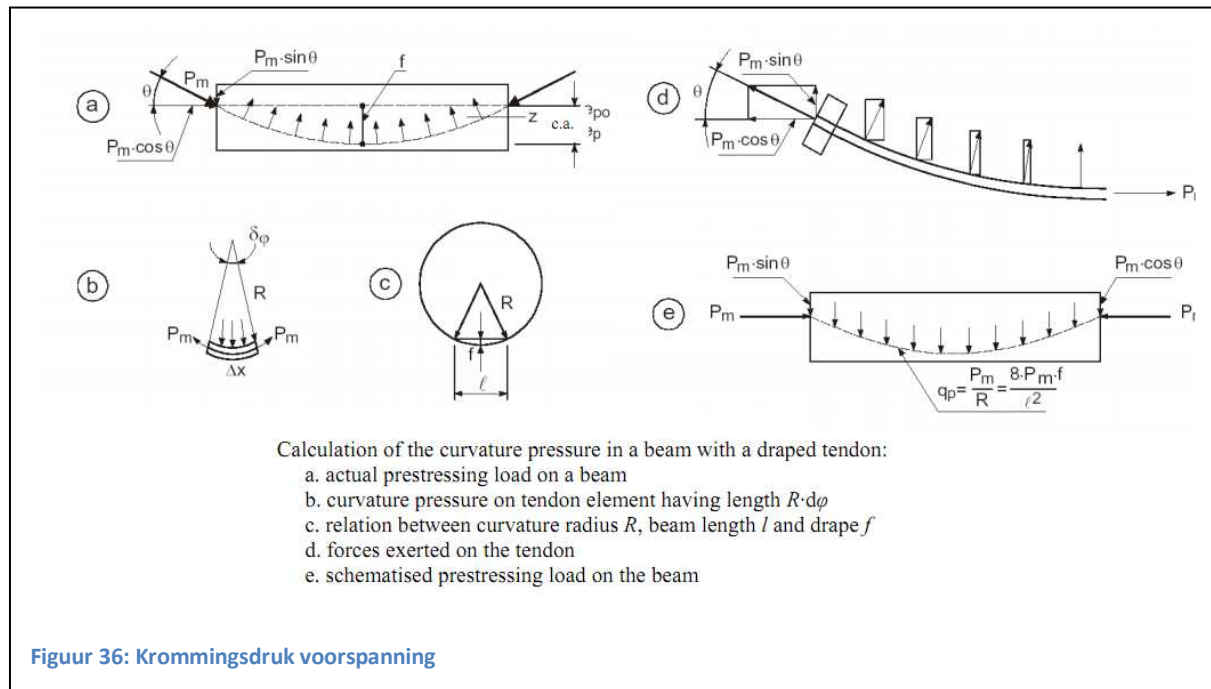
VSL multistreng systeem	: type E
Aantal draden per streng	: 7
Kabel eenheid te gebruiken	: 6-12 (6-1 t/m 6-55 mogelijk)
Diameter van een streng	: 15,2 mm (0,6 inch)
Oppervlakte van een streng	: 140 mm^2
Karakteristieke treksterkte	: $f_{pk} = 1860 \text{ N/mm}^2$
Karakteristieke 0,1% - spanning	: $f_{p0,1k} = 0,9 * f_{pk} = 1674 \text{ N/mm}^2$
Ontwerp waarde treksterkte	: $f_{pd} = 1674 / 1,1 = 1522 \text{ N/mm}^2$
Aanvangs trekspanning	: $\sigma_{pm0} = 0,75 * 1860 = 1395 \text{ N/mm}^2$
E-modulus voorspanstaal	: $E = 195000 \text{ N/mm}^2$
Materiaalfactor voorspanstaal	: $\gamma_s = 1,1$

De parabolische vorm van de kabel leidt tot een krommingsdruk of krommingskracht, die als een belasting werken. In onderstaande Figuur 36³ is een algemeen plaatje te zien van een voorspankabel en de daardoor werkende krommingsdrukken. De kromming van de voorspankabel loopt cirkelvormig met een straal R en een drape f . Volgens het evenwicht volgt dat geldt (dit is ook in de afbeelding te zien):

$$q_p \cdot R \cdot d\phi = P_m d\phi \rightarrow q_p = \frac{P_m}{R}$$

De vorm van de fictieve kabel in dit specifieke geval loopt zoals te zien in Figuur 37. In het midden (wordt doorsnede A-A' genoemd) van de ligger ligt de kabel op 150 mm boven de onderzijde van de doorsnede. De beide uiteinden (ter plaatse van doorsnede B-B') van de fictieve kabel liggen op dezelfde hoogte als de zwaartelijn van de doorsnede. Daaruit volgt dat de drape $f = 406 - 150 = 256 \text{ mm}$.

³ Bron: Walraven, J.C. (2011). Collegedictaat: "Prestressed Concrete Structures CT3150/CT4160"



De maximale momenten (M_y) in de ligger (halverwege de overspanning) ten gevolge van het eigen gewicht en de variabele belasting worden afgelezen uit het model in Scia Engineer. Hiervoor worden zoals gezegd de waarden gebruikt uit het model met gedraaide opleggingen en 64 rechte elementen (enkele doorsnede), want deze waarden zijn het meest correct.

Zoals bepaald in het vorige hoofdstuk ("Maatgevende model t.b.v. dimensionering") is de belastingcombinatie UGT 2 voor de enkele gebruikt. De waarden van de maximale buigende momenten zijn als volgt:

$$\left. \begin{array}{l} M_G(\text{eigen gewicht}) = 2748,63 \text{ kNm} \\ M_Q(\text{variabel}) = 4001,95 \text{ kNm} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{(hier waren de belastingfactoren al in verwerkt} \\ \text{in het programma Scia Engineer)} \end{array}$$

Voor de berekening worden dus gebruikt:

In BGT (voor de bepaling van de hoeveelheid voorspanning nodig):

$$\text{Gebruikt } M_G/1,2 + M_Q/1,5 = M_{G,BGT} + M_{Q,BGT} = M_{\text{totaal,bgt}} = 2290,5 + 2668,0 = 4958,5 \text{ kNm}$$

In UGT:

$$\text{Gebruik } M_G + M_Q = M_{G,UGT} + M_{Q,UGT} = M_{\text{totaal,ugt}} = 6750,6 \text{ kNm}$$

Zoals reeds gezegd is er een f van 256 mm. Wanneer voor de voorspankabel geldt dat de straal van de kromme $R \gg f$, dan wordt de vorm van de kabel door de volgende formule beschreven:

$$R = \frac{l^2}{8f} \rightarrow \text{vergelijking combineren met vergelijking voor opwaartse kracht } q_p \rightarrow$$

$$q_p = \frac{8P_m f}{l^2}$$

Het buigend moment in het midden ten gevolge van de opwaartse lijnlast q_p is:

$$M_{p,1} = -\frac{1}{8} q_p l^2 = -P_{m,\infty} f$$

Het buigend moment in het midden van de ligger ten gevolge van de excentrische ankers bij de opleggingen, welke trouwens constant is over de gehele lengte van de ligger, is:

$$M_{p,2} = P_{m,\infty} e \quad \text{met} \quad e = 0,186m$$

Allereerst wordt de voorspankracht bepaald. Vervolgens is het mogelijk om de hoeveelheid voorspanning te bepalen. Hiervoor wordt altijd in de BGT gewerkt.

Ter plaatse van de onderste vezel van de doorsnede, komt de hoogste trekspanning voor wanneer het maximale buigend moment op de ligger werkt. Nu wordt de werkende voorspankracht ($P_{m,\infty}$) berekend op tijdstip $t = \infty$ in het midden van de ligger (trekspanning in de onderste vezel is niet toegestaan):

$$-\frac{P_{m,\infty}}{A_b} - \frac{P_{m,\infty} f}{w_{c,o}} + \frac{M_{\text{totaal,BGT}}}{w_{c,o}} \leq 0$$

Na omschrijven kan $P_{m,\infty}$, de werkende voorspanning wanneer het viaduct in gebruik is, berekend worden.

$$P_{m,\infty} \geq \frac{M_{\text{totaal,BGT}}}{w_{c,o} \left(\frac{1}{A_b} + \frac{f}{w_{c,o}} \right)} = \frac{4958,5}{0,125 \left(\frac{1}{0,6023} + \frac{0,256}{0,125} \right)} = 10697,1 \text{ kN}$$

Tegelijkertijd hebben de complete voorspanningsverliezen, die afhankelijk zijn van de tijd, zich ontwikkeld. Er mag vanuit worden gegaan dat de tijdgerelateerde verliezen en de frictieverliezen van de voorspankracht 20% zijn, om de aanvangsvoorspankracht $P_{m,0}$ als het viaduct nog niet in gebruik is, te berekenen.

$$P_{m,0} = \frac{P_{m,\infty}}{0,8} = 13371,3 \text{ kN} \quad \text{Hieruit volgt: } \rightarrow \quad P_{m,0} \geq 13371,3 \text{ kN}$$

De initiele voorspankracht $P_{m,0}$ hangt af van de toegestane betondrukspanning. De drukspanning toegestaan is:

$$\sigma_c = 0,6 \cdot f_{ck} = 0,6 \cdot 53 = 31,8 \text{ N/mm}^2$$

Nu moet de drukspanning σ_c gecontroleerd worden op de volgende twee manieren.

De eerste is met een berekening van de aanvankelijke voorspankracht $P_{m,0}$ op tijdstip $t=0$, in het midden van de ligger (betondrukspanning zoals toegestaan, voor de onderste vezel). Om de grenswaarde van de aanvankelijke voorspankracht $P_{m,0}$ te berekenen:

$$-\frac{P_{m,0}}{A_b} - \frac{P_{m,0} f}{w_{c,o}} + \frac{M_{G,BGT}}{w_{c,o}} \geq -\sigma_c = -31,8 \text{ N/mm}^2 = -31,8 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2$$

De aanvankelijke voorspankracht $P_{m,0}$ is hieruit te berekenen.

$$P_{m,0} \leq \frac{\frac{M_{G,BGT}}{w_{c,o}} + 31,8 \cdot 10^3}{\left(\frac{1}{A_b} + \frac{f}{w_{c,o}} \right)} = \frac{50124}{\left(\frac{1}{0,6023} + \frac{0,256}{0,125} \right)} = 13516,7 \text{ kN}$$

Bij de tweede controle wordt gecontroleerd of bij alleen het eigen gewicht, dus op tijdstip $t=0$, geen trekspanningen ontstaan in de bovenste vezels van de doorsnede halverwege de ligger ten gevolge van de aanvankelijke voorspankracht $P_{m,0}$:

$$-\frac{P_{m,0}}{A_b} + \frac{P_{m,0} f}{w_{c,b}} - \frac{M_{G,BGT}}{w_{c,b}} \leq 0$$

De maximale aanvankelijke voorspankracht $P_{m,0}$ wordt vervolgens bepaald:

$$P_{m,0} \leq \frac{M_{G,BGT}}{w_{c,b} \left(-\frac{1}{A_b} + \frac{f}{w_{c,b}} \right)} = \frac{2290,5}{0,129 \left(-\frac{1}{0,6023} + \frac{0,256}{0,129} \right)} = 54769,1 \text{ kN}$$

Wat er nu voor conclusie uit bovenstaande vergelijkingen getrokken kan worden is dat $P_{m,0} \geq 13371,3 \text{ kN}$, en dat $P_{m,0} \leq 13516,7 \text{ kN}$. Aan beide voorwaarden wordt voldaan. Zowel de kracht $P_{m,0}$ als de verdeelde belasting q_p kunnen in het huidige model in Scia Engineer ingevoerd worden om de voorspanning te modelleren.

Dan moet nu de voorspanning gedimensioneerd worden. Gerekend wordt met de maximale aanvankelijke voorspankracht, de bovengrens van $P_{m,0}$. Vaak wordt de ondergrens getoetst, maar in dit geval zitten ze heel erg dicht bij elkaar dus is het verschil verwaarloosbaar.

$$P_{m,0} \leq 13516,7 \text{ kN}$$

$$\sigma_{pm0} \leq 1395 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Benodigde oppervlakte voorspanstaal: } A_{p,ben} \geq \frac{13516,7 \cdot 10^3}{1395} = 9689,4 \text{ mm}^2$$

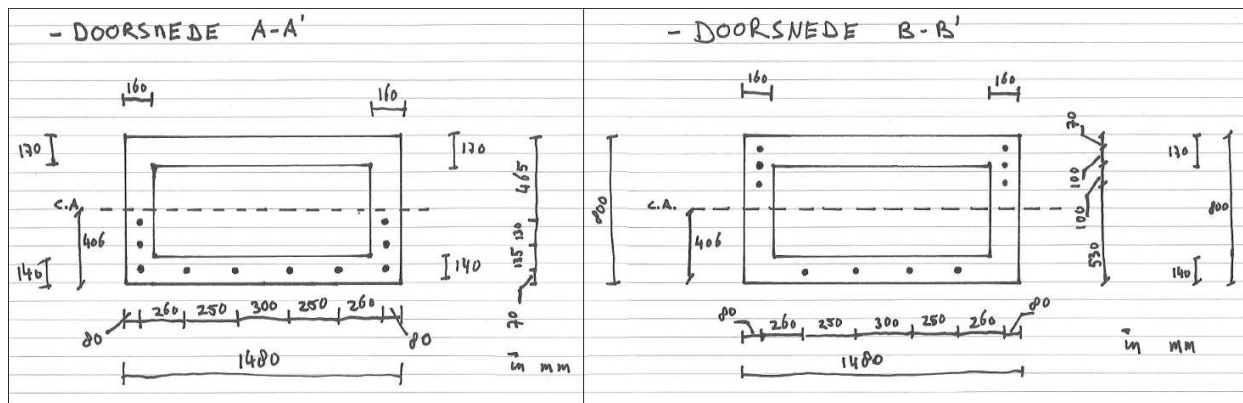
Zoals bij de gegevens gezegd, is de oppervlakte A_p van één streng, bestaande uit 7 draden, 140 mm^2 . Nodig zijn dus $9689,4/140 = 69,2$ strengen ≈ 70 strengen.

Omdat er gebruik wordt gemaakt van een VSL multistrand systeem type E, 6-7, zijn er per kabel maximaal 7 strengen mogelijk. Er wordt gekozen voor dit type, omdat het gunstiger is een kanaal met een zo klein mogelijke diameter te hebben i.v.m. het door de dekking trekken van de kabel t.g.v. de kromming in het horizontale vlak. De kanaal van dit type voorspankabel heeft een diameter van 59mm. Ook is het feit dat er gebruik wordt gemaakt van 10 kabels ipv bijvoorbeeld 4 gunstig, omdat er bij meer kabels de kracht per kabel kleiner wordt. Dit is gunstig omdat er dan ook minder kans is dat de kabel aan de binnenkant door de dekking wordt getrokken.

Er wordt gekozen in dit geval voor kabels van het type 6-7,7. Met 70 strengen noodzakelijk, zijn er 10 kabels van 7 strengen noodzakelijk, want $70/7 = 10$ kabels. In totaal worden er dus $10 \times 7 = 70$ strengen gebruikt. De doorsnede van een kabel is dan $7 \times 140 = 980 \text{ mm}^2$. In totaal wordt er dus een oppervlak voorspanstaal gebruikt van $980 \times 10 = 9800 \text{ mm}^2$.

De ligging van de 10 voorspankabels moet equivalent zijn aan de ligging van de fictieve kabel. In het midden van de overspanning, halverwege de ligger (doorsnede A-A') moet het zwaartepunt van de gecombineerde 10 werkelijke kabels op 0,15 meter boven de onderste vezel liggen. Hetzelfde geldt voor de uiteinden van de ligger vlak voor de opleggingen (doorsnede B-B'), waar het zwaartepunt van de 10 kabels op dezelfde hoogte moet liggen als de centrale as van de

doorsnede, namelijk op 0,406 meter boven de onderste vezel. Om dit te bereiken worden verschillende plekken uitgeprobeerd, zodat uiteindelijk het gewenste resultaat wordt bereikt. Het resultaat, voor beide doorsneden A-A' en B-B' is te zien in onderstaande afbeelding. De tekening maakt gebruik van de vereenvoudigde doorsnede (zie "Handberekening doorsnede eigenschappen"), maar de maten zijn afstanden zijn hetzelfde. De maten in de tekening zijn in mm.



Figuur 37: Ligging voorspankabels

Controle voor doorsnede A-A' of de zwaartelij van de kabels gelijk is aan de fictieve kabel:

$$z_{\text{fictief}, A-A'} = \frac{\sum z_{\text{tot onderstevezel}}}{n} = \frac{(6 \cdot 70 \text{ mm}) + (2 \cdot 205 \text{ mm}) + (2 \cdot 335 \text{ mm})}{10} = 150 \text{ mm}$$

Controle voor doorsnede B-B' of de zwaartelij van de kabels gelijk is aan de fictieve kabel:

$$z_{\text{fictief}, B-B'} = \frac{\sum z_{\text{tot onderstevezel}}}{n} = \frac{(4 \cdot 70 \text{ mm}) + (2 \cdot 530 \text{ mm}) + (2 \cdot 630 \text{ mm}) + (2 \cdot 730 \text{ mm})}{10} = 406 \text{ mm}$$

De resultaten uit deze paragraaf, $P_{m,\infty}$ en q_p , zullen in het model in Scia Engineer ingevoerd worden voordat de volgende berekening voor de dwarkrachtwapening wordt uitgevoerd. $P_{m,\infty} = 0,8 \cdot 13516,7 = 10813,4 \text{ kN}$. En $q_p = (8 \cdot P_{m,\infty} \cdot f) / l^2 = 27,19 \text{ kN/m}$.

Bij de berekening voor de voorspanning kan wel een kanttekening worden geplaatst. Bij de berekening is aangenomen dat er gebruik wordt gemaakt van nagespannen staal. Dit systeem maakt gebruik van een kanaal waar de kabel doorheen wordt gelegd die vervolgens wordt gespannen. Bij dit soort slanke, prefab kokerliggers die speciaal voor bruggen worden gefabriceerd worden over het algemeen voorgespannen kabels gebruikt, die al in de fabriek worden aangelegd. Deze kabels bestaan ook uit evenzoveel strengen, maar hoeven niet als een

kabel bij elkaar gehouden te worden. Ook hoeft er geen kanaal gemaakt te worden, wat ook weer betondoorsnede scheelt. Er is dus uitgegaan bij de berekening van een nagespannen systeem, terwijl er meestal voor dit soort liggers een voorgespannen geprefabriceerd systeem wordt gebruikt. De verschillen in resultaten en hoe de kabels dan liggen en reageren zijn niet onderzocht, maar dit zou verder onderzocht kunnen worden.

Verder is voor de berekening gebruikt gemaakt van volledige voorspanning, dat betekent dat er geen spanning in de doorsnede gewenst is. Het is niet noodzakelijk het op deze manier te doen, maar een berekening van niet volledig gespannen voorspanning valt niet binnen de context van het bachelor eindwerk. Deze berekening zou ook nog uitgevoerd kunnen worden, en waarschijnlijk zou er dan uitkomen dat er minder voorspanning nodig is.

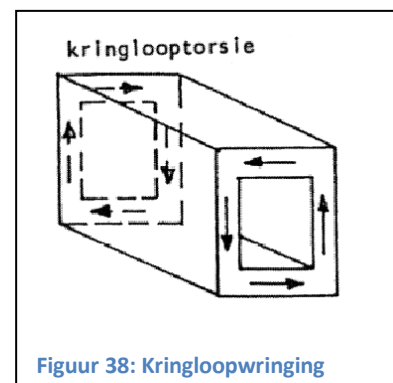
Afschuifwapening (beugels)

Voor de berekening voor de beugels wordt gekeken naar de enkele ligger in de gebruiksfase. De enkele ligger met een eigen gewicht, een lijnlast van verkeer en de voorspanning vormt hiervoor het uitgangspunt. De enkele ligger tijdens de aanleg komt in een apart hoofdstuk ter sprake.

De ligger wil door de aanwezigheid van dwarskracht afschuiven. Om te zorgen dat de ligger genoeg capaciteit heeft tegen deze afschuiving worden over het algemeen beugels toegepast. Voor de bepaling van de beugels spelen twee dingen mee, de maximale dwarskracht in de ligger en het wringend moment in de ligger. De dwarskracht is maximaal bij de opleggingen. Hetzelfde geldt voor het maximale wringmoment, vanwege de verhindering van rotatie om de x-as bij de opleggingen (gaffeloplegging).

Professor J.C. Walraven publiceert in het collegedictaat CT2052 “Gewapend beton” (2010) over de kokerligger het volgende: “Voor de kokerligger in dit geval zal het wringend

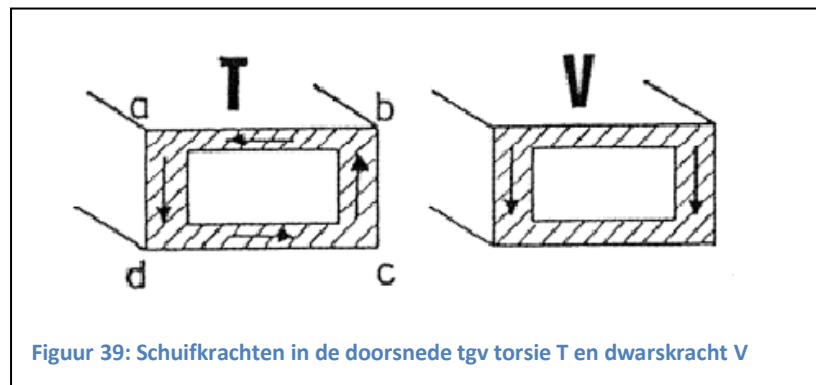
moment voornamelijk worden afgedragen via kringloopwringing in de koker, doch welving zal optreden in de buurt van de tussenschotten. Meestal zal men van het dominerende wringmechanisme uitgaan en de constructie dimensioneren onder de aanname dat dit de enige vorm van wringing is.” Daarom zal er in dit geval ook worden uitgegaan dat kringloop wringing de enige vorm van wringing is. Figuur 38⁴ illustreert de kringloop wringing in de kokerligger.



Figuur 38: Kringloopwringing

⁴ Bron: Walraven, J.C. (2010). Collegedictaat CT2052 “Gewapend beton”

De dwarskracht en het wringmoment resulteren in schuifkrachten in de doorsnede. Deze schuifkrachten zijn te zien in onderstaande Figuur 39⁵. Het wringend moment of torsiemoment resulteert in



Figuur 39: Schuifkrachten in de doorsnede tgv torsie T en dwarskracht V

een kringloop schuifkracht, zoals ook al is te zien was in Figuur 38. De dwarskracht V resulteert in twee verticale schuifkrachten, want omdat de boven- en onderflens in de z-richting relatief zwak zijn worden deze zijden verwaarloosd als het gaat om afdragen van de dwarskracht. Kijkend naar de situatie dat het torsiemoment en de dwarskracht beide werken, zal zijde ad de grootste schuifkracht moeten verdragen. De afschuifwapening zal op die zijde worden gedimensioneerd.

Dus voor een berekening van de beugels in de maatgevende doorsnede, bij de opleggingen, moeten de maximale dwarskracht en het maximale wringmoment beide bekend zijn. Deze beide waarden kunnen worden afgelezen uit het Scia Engineer model van 64 rechte elementen (uiteraard enkele doorsnede) in de gebruiksfase waaraan de krachten uit de voorspanning $P_{m,\infty}$ en q_p uit de vorige paragraaf zijn toegevoegd.

$$V_{\max, \text{dwarskracht}} = 231,2 \text{ kN}$$

$$T_{\max} = 646,6 \text{ kNm}$$

De totale constante schuifstroom kan bepaald worden met onderstaande formule (de formule is ook afkomstig uit “Collegedictaat CT2052: Gewapend beton”) - (uitgaande van een enigszins vereenvoudigde doorsnede, zie “Handberekening doorsnede eigenschappen”):

$$\tau \cdot t = \frac{T_{\max}}{2b_m h_m} \quad \text{waarin} \quad t = \text{dikte wanden} \quad \text{en}$$

$$b_m = \text{meew. breedte} = 1480 - 160 = 1320 \text{ mm} \quad \text{en}$$

⁵ Bron: Walraven, J.C. (2010). Collegedictaat CT2052 “Gewapend beton”

$$h_m = \text{meew. hoogte} = 800 - 85 - 70 = 645 \text{ mm}$$

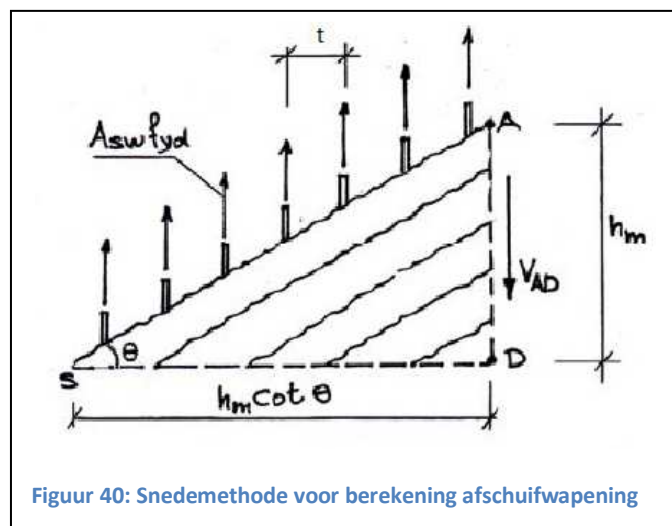
Hieruit kan de schuifkracht ten gevolge van het wringend moment voor wand ad bepaald worden:

$$V_{AD, \text{wringing}} = \tau \cdot t \cdot h_m = \frac{T_{\max}}{2b_m} = \frac{646,6}{2 \cdot 1,32} = 244,9 \text{ kN}$$

De totale afschuifkracht ten gevolge van dwarskracht en torsiemoment is dan simpel te berekenen:

$$V_{AD} = \frac{1}{2} V_{\max, \text{dwarskracht}} + V_{AD, \text{wringing}} = \frac{1}{2} 231,2 + 244,9 = 360,5 \text{ kN}$$

Door de invloed van bovenstaande schuifkracht ontstaan er scheuren in het beton. Deze scheuren lopen onder een bepaald hoek. Een snedemethode voor de bepaling van de afschuifwapening in maatgevende wand ad - en dus de hele ligger - is in onderstaande Figuur 40 te zien. Omdat het beton gescheurd is onder een hoek θ kan het beton geen trekkracht opnemen in de verticale richting. Om evenwicht te maken met de schuifkracht V_{AD} is er schuifwapening in de vorm van beugels nodig. Deze beugels zijn in de figuur te zien. Voor de gehele situatie geldt:



Figuur 40: Snedemethode voor berekening afschuifwapening

$$V_{AD} = \frac{A_{sw} \cdot f_{yd}}{t} \cdot h_m \cdot \cot \theta$$

De hoek θ ligt volgens de normen (eurocode) tussen de 22 en 68 graden, afhankelijk van of het beton al erg gescheurd is. Voor deze berekening wordt een waarde gekozen voor θ van 45° . Deze waarde is standaard voor berekeningen met wringing. Verder moet de afstand t nog nader bepaald worden, maar zal liggen tussen de 100 en 200mm. De beugels moeten dus redelijk dicht

bij elkaar liggen, omdat de diagonalen met druk in het beton hun kracht puur en alleen via de connecties en de hoeken met de beugels kunnen afdragen. Dit komt omdat er scheurtjes beginnen te komen in het beton, dus trek is niet mogelijk. Verder wordt er voor deze beugelberekening uitgegaan van wapeningsstaal FeB500. Dit is een standaard wapeningsstaal dat veel wordt toegepast met een karakteristieke vloeispanning van $f_{yd} = 435 \text{ N/mm}^2$.

De benodigde schuifwapening per eenheid van lengte is:

$$\frac{A_{sw,ben}}{t} = \frac{V_{AD}}{h_m \cdot \cot \theta \cdot f_{yd}} = \frac{360,5 \cdot 10^6}{645 \cdot \cot 45 \cdot 435} = 1284,9 \text{ mm}^2 / \text{m}$$

Voor afstand t tussen de beugels wordt een waarde gekozen van 100mm. Bovenstaande formule invullend met deze waarde t levert een waarde voor de oppervlakte $A_{sw,ben}$ per beugel:

$$A_{sw,ben} = \frac{V_{AD}}{h_m \cdot \cot \theta \cdot f_{yd}} \cdot t = 1284,9 \cdot 0,100 = 128,5 \text{ mm}^2 \longrightarrow r = 6,4 \text{ mm} \longrightarrow d = 12,8 \approx 14 \text{ mm}$$

De benodigde beugels hebben een straal van 6,4 en een afgeronde diameter van 14mm. H.o.h. liggen de beugels dus 100mm.

Dan moet er alleen nog gecontroleerd worden of de drukspanning σ_c de betondiagonalen de toelaatbare spanning van het beton niet overschrijdt. Uit het evenwicht kan de volgende formule worden afgeleid:

$$\sigma_c = \frac{V_{AD}}{t_2 \cdot h_m \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta} \quad \text{waarin} \quad t_2 = \text{dikte wand} \quad AD = 160 \text{ mm}$$

$$\sigma_c = \frac{360,5 \cdot 10^3}{160 \cdot 645 \cdot \sin 45 \cdot \cos 45} = 6,99 \text{ N/mm}^2$$

Grenswaarde betondrukspanning σ_c :

$$\sigma_c \leq \nu \cdot f_{cd} \quad \text{waarin}$$

$$\nu = 0,6 \cdot \left[1 - \frac{f_{ck}}{250} \right] = 0,6 \cdot \left[1 - \frac{53}{250} \right] = 0,4728$$

$$\sigma_c \leq \nu \cdot f_{cd} = 0,4728 \cdot 35,33 = 16,7 \text{ N/mm}^2$$

Zo te zien wordt aan deze voorwaarde ruim voldaan, want $6,99 \leq 16,7$. Dus de beugels voor afschuifcapaciteit hebben uiteindelijk een diameter van 14mm, en liggen h.o.h. 100mm. Gebruik wordt gemaakt van FeB500 wapeningsstaal.

Langswapening

Door de afschuifwapening zal er ook automatisch een verhoging van de langswapening moeten komen. Met deze langswapening wordt bedoeld de wapening in de lengterichting van de ligger, die anders is aan de voorspanning. Deze langswapening ligt in alle vier de vlakken.

De formule voor de langswapening⁶ wordt gegeven door:

$$A_{s,langs} = \frac{b_m + h_m}{b_m \cdot h_m} \cdot \frac{T_{\max}}{f_{yd}} = \frac{1320 + 645}{1320 \cdot 645} \cdot \frac{646,6 \cdot 10^6}{435} = 3430,6 \text{ mm}^2$$

Deze hoeveelheid langswapening moet gelijkmatig verdeeld worden over de vier zijden. De langswapening voor de boven- en onderwand samen is:

$$A_{s,langs,onder\&boven} = \frac{2b_m}{2(b_m + h_m)} \cdot A_{s,langs} = \frac{2 \cdot 1320}{2 \cdot (1320 + 645)} \cdot 3430,6 = 2304,5 \text{ mm}^2$$

Voor de zijwanden is de langswapening als volgt:

$$A_{s,langs,zijvlakken} = \frac{2h_m}{2(b_m + h_m)} \cdot A_{s,langs} = \frac{2 \cdot 645}{2 \cdot (1320 + 645)} \cdot 3430,6 = 1126,1 \text{ mm}^2$$

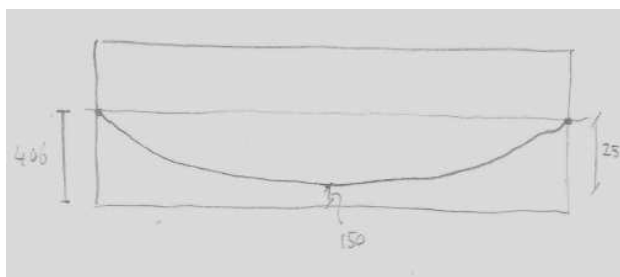
Nu de langswapening bekend is, moet nog de precieze uitwerking van de wapening worde bepaald. Voor de boven- en onderwand zijn beide 1152,25 mm² aan wapening nodig. Omdat de breedte redelijk groot is is er veel ruimte voor langswapening. Een wapening van 11Ø12 voldoet (A = 1244,1 mm²). Voor de zijvlakken is benodigd een oppervlak van 563,1 mm². Dit wordt bereikt met een configuratie van 5Ø12.

⁶ Bron: Ir. F.J.M. Luijten (TU/e), (2007). Collegesheets #3 "Vak Beton 2 (7P730), TU Eindhoven"

Dit is allemaal berekend zonder momentwapening in de doorsnede. Het is onbekend of dit nodig is in combinatie met voorspanning. Dit zou verder onderzocht moeten worden. Dan zou mogelijk de wapening voor afschuiving en wringing ook veranderen.

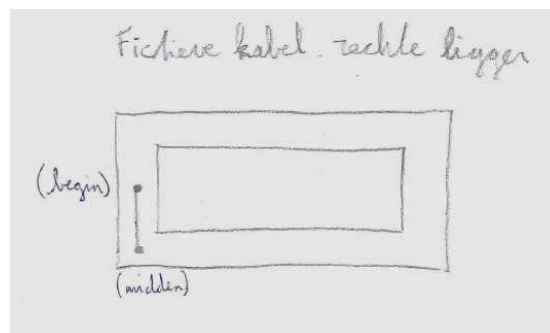
Discussie

Nieuwe inzichten kwamen aan het licht na de dimensionering van de liggers. Er was namelijk van een rechte ligger uitgegaan voor de berekening van de voorspanning, en dat de voorspankabels in het xy-vlak verticaal liggen. Dit is het geval omdat de kabel overal op de zelfde plek in de kabel in de y-richting ligt. Een zijaanzicht van de fictieve kabel is te zien in Figuur 42. En een doorsnede van een rechte ligger met daarin de ligging van de fictieve kabel is



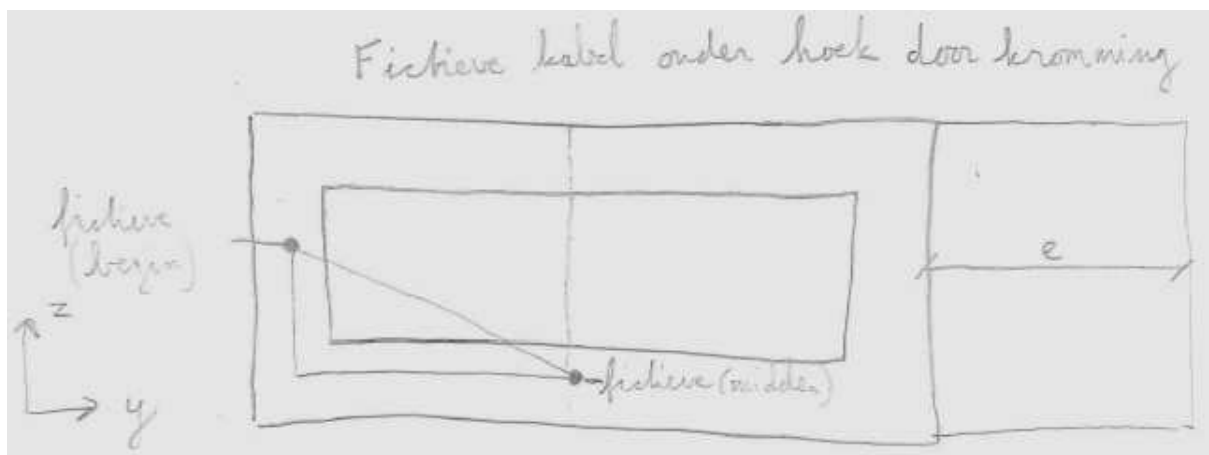
Figuur 42: Zijaanzicht ligging fictieve kabel

te zien in Figuur 41.



Figuur 41: Doorsnede ligging fictieve kabel, rechte ligger

Maar het nieuwe inzicht is dat de kabels niet verticaal liggen in het y-z vlak. Door de kromming van de ligger heeft de kabel namelijk een excentriciteit in het midden in de y-richting, waardoor de voorspankabel diagonaal komt te liggen in het y-z vlak. Een voorbeeld daarvan is te zien in Figuur 43.



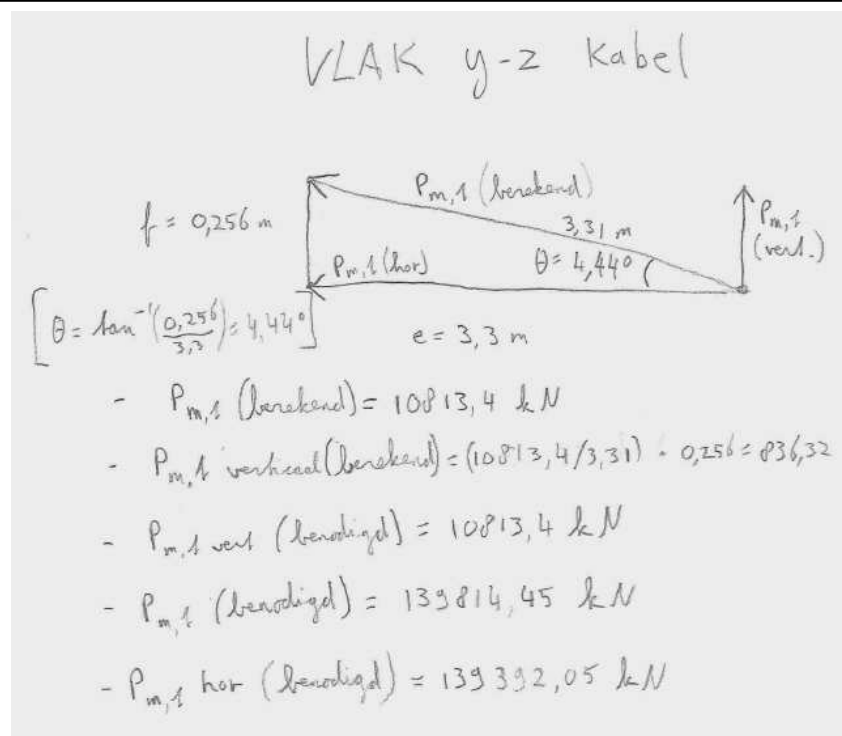
Figuur 43: Doorsnede ligging fictieve kabel, kromme ligger

In Figuur 43 is te zien hoe de kabel diagonaal komt te liggen. In werkelijkheid ligt de kabel nog vlakker dan in de afbeelding. Dit komt door de verhouding tussen de verticale afstand tussen beginpunten en het midden, de drape, en de excentriciteit.

Figuur 44 laat dat nog beter zien. Toegevoegd is de hernieuwde berekening van de benodigde $P_{m,t}$.

Door de extreme excentriciteit van de ligger ligt de kabel bijna horizontaal. De eerder berekende waarde van $P_{m,t}$ is de schuine zijde in het

verhoudingsvlak, en is de resultante voorspankracht. Deze berekende waarde is eigenlijk de benodigde verticale voorspankracht (er werd namelijk vanuit gegaan dat deze verticaal gericht was door uit te gaan van een rechte ligger). De verticale component van de voorspankracht $P_{m,t}$ is vele malen, namelijk 12,9 keer, kleiner dan de resultante. Dit komt door de vlakke (bijna horizontale) ligging van de kabel. De benodigde verticale voorspankracht is 12,9 keer groter dan



Figuur 44: Ligging fictieve kabel in y-z vlak + berekening nieuwe $P_{m,t}$

de berekende verticale voorspankracht. De resultante voorspankracht $P_{m,t}$ wordt dus ook 12,9 keer groter dan eerder berekend en die wordt daarmee 139814,45 kN.

Omdat deze waarde veel groter is zou de voorspanning opnieuw berekend moeten worden, maar in het kader van dit onderzoek is hier geen tijd voor. Voor de nieuwe berekening van de voorspanning moet gebruikt gemaakt worden van de voorspankracht $P_{m,t}$ (de resultante kracht in Figuur 44). Op deze manier wordt de benodigde waarde van de $P_{m,t}$, verticaal bereikt. De nieuwe berekening betreft voorspanning wordt dus niet uitgevoerd, maar het zou goed kunnen zijn dat de voorspanning veel omvangrijker is, door een grotere benodigde voorspankracht die 12,9 keer groter is. Misschien past de voorspanning dan niet meer in de doorsnede en zou er een nieuw profiel gekozen moeten worden. Dit zou verder onderzocht moeten worden.

Het zou wel uitkomst bieden om een berekening met niet-volledig voorgespannen kabels uit te voeren, omdat dan de benodigde voorspankracht kleiner is. Dit is het gevolg van het feit dat er bij deze berekening wel trekspanningen mogelijk zijn in de doorsnede.

Er is niet zomaar te zeggen dat de voorspanning berekent kan worden alsof de kromme ligger een rechte ligger is. Het is mogelijk, mits er rekening wordt gehouden met de diagonale ligging van de kabels in het y-z vlak.

Als laatste op te merken is, dat er voor de berekening van de hoeveelheid afschuifwapening uitgegaan is van de voorspanning zoals die is berekend in eerste instantie. Deze hoeveelheid beugelwapening zal ook zeer waarschijnlijk moeten veranderen als de voorspanning verandert.

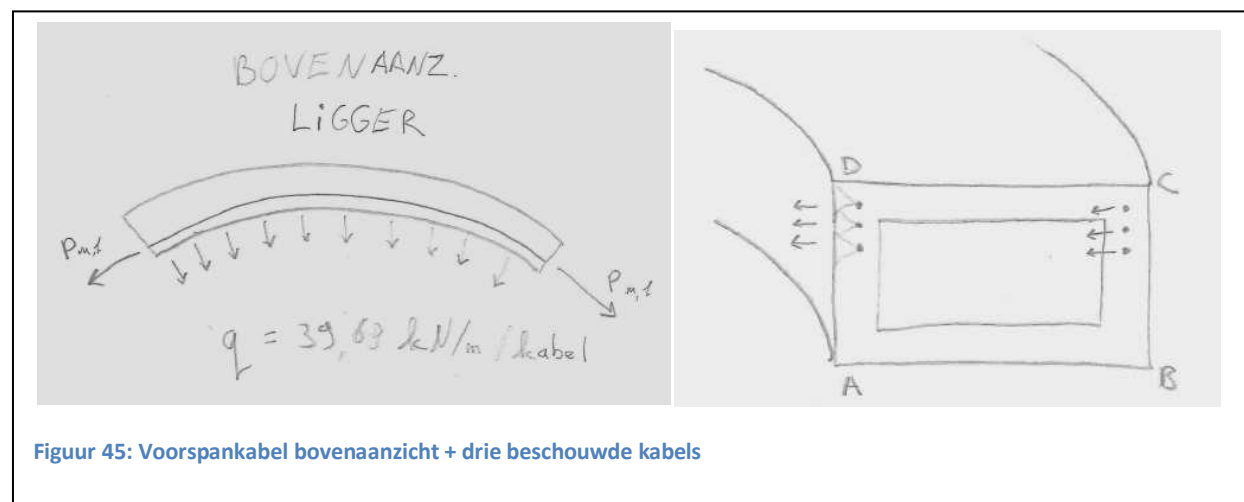
Detaillering

Voorspanning dekking controle

In het vorige hoofdstuk is de voorspanning voor de constructie bepaald. Dit is gedaan naar aanleiding van de enkele zwaarbelaste ligger uit het viaduct. Voorspankabels hebben van nature een parabolisch verloop in de verticale richting. Dit verloop zorgt voor een opwaartse kracht q_p in de ligger (zie Figuur 36).

In dit geval krijgen de voorspankabels er een extra kromming in het horizontale vlak bij, en dat heeft gevolgen. Omdat de kabel wordt aangetrokken zal er namelijk een kracht naar de binnenzijde ligger ontstaan. De kabels hebben de neiging zich door de dekking te trekken. Het beton moet deze kracht kunnen tegenhouden, zonder dat het beton scheurt. In dit hoofdstuk wordt geprobeerd een controle uit te voeren of de betondekking genoeg is om te voorkomen dat de voorspankabels uit de dekking worden getrokken.

Twee schetsen van de situatie zijn te zien in Figuur 45.



Figuur 45: Voorspankabel bovenaanzicht + drie beschouwde kabels

Omdat er slechts drie voorspankabels aan de binnenkant van de ligger liggen, zullen niet alle kabels dit probleem hebben. Deze drie kabels worden in beschouwing genomen. In de paragraaf over voorspanning is er een voorspankracht $P_{m,t}$ van 10813,4 kN berekend. Deze voorspanning wordt verdeeld over 10 kabels. Als wordt aangenomen dat elke kabel een even grote kracht representeert, is de P_m per kabel 1081,34 kN. Van de drie kabels wordt er voor één kabel berekend of hij wel of niet uit de dekking wordt getrokken, en die uitkomst/oplossing wordt aangenomen als de juiste voor 6 voorspankabels in de zijwanden van de doorsnede.

Volgens de theorie die in het hoofdstuk Voorspanning aan bod is gekomen kan ook de in dit hoofdstuk belangrijke naar de binnenzijde gerichte kracht berekend worden. Ondanks dat de hoeken in het horizontale vlak aan beide uiteinden van de ligger niet zo klein zijn als de hoek in de verticale richting (beide 30°), wordt toch aangenomen dat de manier om de krommingsdruk $q_{\text{horizontaal}} = q_h$ uit te rekenen. De horizontale krommingsdruk q_h moet voorstellen de kracht per lengte-eenheid van de boog loodrecht op de kabel (en dus loodrecht op de ligger, omdat de ligger gekromd is), anders dan de q_p die loodrecht op de ligger in verticale richting werkt. De voorspankracht $P_{m,t}$ staat loodrecht op het einde van de kabel en de ligger ipv dat er wordt gekeken naar de P_m die loodrecht op de ligger staat in verticale richting en dus precies horizontaal. Daarom hoeft de kracht $P_m \cdot \cos\theta$ ook niet vereenvoudigd te worden tot P_m , omdat we willen kijken naar alle loodrechte krachten P_m en q_h (dat vereenvoudigen zou bij deze situatie ook niet helemaal kloppen, vanwege redelijk grote θ).

Uit het evenwicht van een klein stukje (cirkelsegment) van de kabel volgt dat de volgende formule geldt. Daarbij wordt aangenomen dat de voorspankracht constant is over de gehele lengte. Deze formule is ook te zien in Figuur 36:

$$q_h \cdot R \cdot d\varphi = P_{m,\infty} \cdot d\varphi \rightarrow q_h = \frac{P_{m,\infty}}{R} = \frac{1081,34}{27,25} = 39,68 \text{ kN/m (per kabel)}$$

Deze waarde van kN/m/kabel gaat gebruikt worden voor de berekening van één kabel (zie Figuur 45).

In het collegedictaat CT2052, gewapend beton staat een berekening vergelijkbaar met deze. Daarin wordt uitgegaan van een moment dat op een gekromd element staat, waarbij de normaalkracht in uiterste vezels opgenomen moeten worden door wapening en die wapening moet door ondanks die kracht en de q -last die het veroorzaakt niet door de dekking worden getrokken. In onze situatie is er een voorspanning die een q -last veroorzaakt, die moet voorkomen worden door de dekking te worden getrokken. Volgens de theorie van CT2052⁷: “moet de beugelafstand t zoals berekend in het vorige hoofdstuk niet groter worden dan $10 \cdot \emptyset_s$, waarin $\emptyset_s$ is de diameter van de relevante langsstaven (in dit geval de voorspankabels) is, om te zorgen dat de krommingsdruk tussen de ophangbeugels niet toch de dekking afdrukt.” Dat zou in dit geval betekenen dat met een kabeldiameter van 35 mm de beugelafstand maximaal 350 mm mag zijn, en met een gekozen beugelafstand van 100 mm wordt hier ruim aan voldaan.

⁷ Bron: Walraven, J.C. (2010). Collegedictaat CT2052 “Gewapend beton”

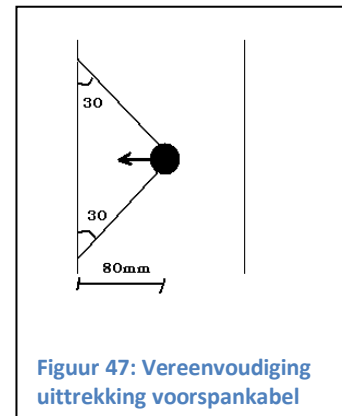
Omdat deze situatie toch anders lijkt, wordt het vervolgens nog een keer met de hand berekend.

Er wordt vanuit gegaan dat de complete door de trek in het beton moet worden overgedragen. De kracht q_h is 39,68 kN per meter ligger per kabel. We bekijken de situatie van de kabel. De kabel ligt met zijn hart op 80mm van de rand. Er wordt vanuit gegaan dat er een hoek uit het beton gedrukt wil worden.

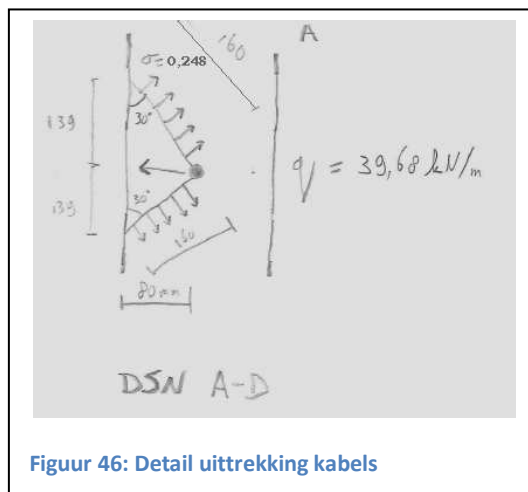
Daardoor ontstaan er twee zijdes die onder trek staan. De hoek van afschuiving van het beton wordt geschat op 30° . Een figuur van de vereenvoudiging is te zien in Figuur 47. De resultanten van de krachten langs de twee wanden F_x zijn simpel met de

krachtenveelhoek methode te berekenen. $F_x = (\frac{1}{2} * q_h) / \sin 30 = 39,68 \text{ kN} / \text{m} = q_h$. Deze kracht is

een trekkracht. De trekkracht moet door de betondekking kunnen worden opgenomen. De lengte van de wand is ook te berekenen. $L_x = 80 / \sin 30 = 160 \text{ mm}$. De q -last per meter kabel is dan langs de wand $q_x = 0,248 \text{ N/mm/mm}$. Deze lijnlast per meter kabel is gelijk te stellen aan een trekspanning in de betonsnede van $\sigma_x = 0,248 \text{ N/mm}^2$. Nu moet gekeken worden of deze waarde voldoet of dat er een oplossing voor bedacht moet worden. Een detail hiervan met waarden is te zien in Figuur 46.



Figuur 47: Vereenvoudiging uittrekking voorspankabel



Figuur 46: Detail uittrekking kabels

Aangezien de betonsoort C53/65 een ontwerp treksterkte f_{ctd} heeft van $f_{ctm} / 1,5 = 4,2 / 1,5 = 2,8 \text{ N/mm}^2$, wordt deze waarde dus ruim niet gehaald.

De voorspanning wordt op deze manier met deze berekening niet door de dekking getrokken. Wel moet daarbij natuurlijk worden gezegd dat de aanname was dat elke kabel precies een 10^e deel van de voorspanning op zijn rekening kreeg. De simpele berekening vanuit de theorie van CT2052 eerder dit hoofdstuk bleek in dit geval dus toch te kloppen.

Discussie

Door de nieuwe inzichten (te zien in het hoofdstuk "Dimensionering" in paragraaf "Discussie") zal de berekening uitgevoerd in dit hoofdstuk niet meer helemaal voldoen. Omdat de voorspankracht anders zou moeten zijn en de fictieve kabel in het y-z vlak niet verticaal komt te

liggen maar onder een hoek, verandert er ook wat voor deze paragraaf. Een korte berekening volgt.

De hoeveelheid voorspanning zou door de nieuwe inzichten anders berekend moeten worden, maar hier was zoals gezegd geen tijd meer voor. De hoeveelheid voorspanning is hetzelfde gebleven, en hiervan wordt ook uitgegaan bij deze hernieuwde berekening.

De resultante voorspankracht $P_{m,t}$ is 139814,45 kN (zie Figuur 44). Deze resultante heeft door de ligging een horizontale component, welke is $P_{m,t,hor} = 139392,05$ kN. Met deze horizontale component kan exact de horizontale lijnlast worden berekend die de kabel uitoefent op de betondekking. Dit gegeven was anders bij de voorgaande berekening, toen was uitgegaan van de voorspankracht $P_{m,t}$, omdat er was aangenomen dat er geen diagonale ligging van de fictieve kabel was.

De q-last langs de ligger die de kabel uitoefent op de dekking is dan $q_h = 139392,05 / 27,25 = 507,86$ kN/m. Deze waarde is 12,8 keer zo groot als de eerder berekende q-last van 39,68 kN/m.

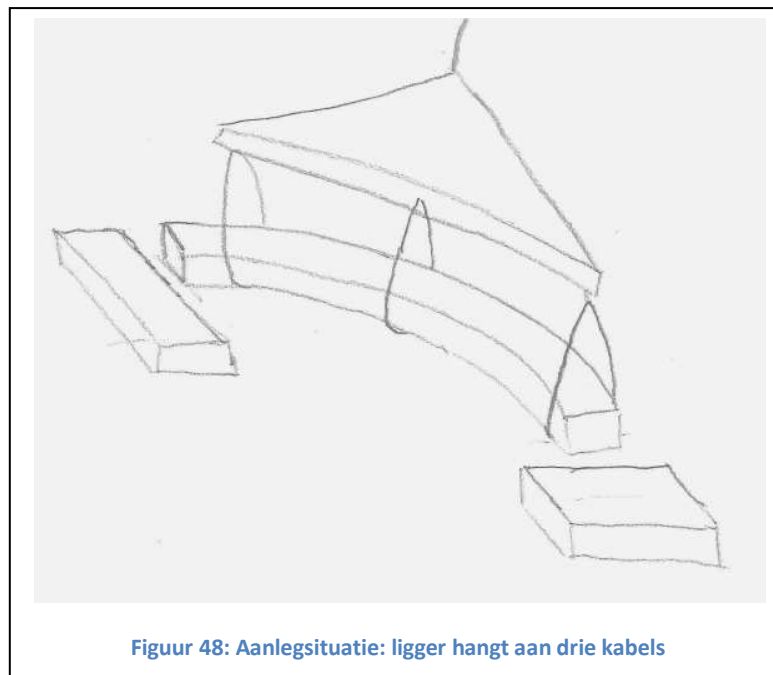
Uitgaande van tien voorspankabels wordt de maximale trekspanning in het beton dan ook 12,8 keer zo groot. Deze wordt dan $3,17$ N/mm², welke net groter is dan de maximale trekspanning van beton van $2,8$ N/mm².

Zoals gezegd zou het kunnen dat de hoeveelheid voorspanning (aantal kabels, diameter ect.) verandert ten gevolge van de berekening door nieuwe inzichten, maar dit zou onderzocht moeten worden. Op deze manier blijkt dat met tien in aantal de drie binnenste voorspankabels net wel door de dekking worden getrokken, en hiervoor zou een oplossing bedacht moeten worden. Bijvoorbeeld zou een sterker betonsoort toegepast kunnen worden, waarbij de treksterkte net niet bereikt wordt. Ook kunnen de kabels meer naar binnen in de doorsnede of zelfs aan de binnenkant van de koker tegen de wand worden gelegd. Verder onderzoek is hiervoor noodzakelijk.

Situatie: Enkele ligger tijdens aanleg

De situatie van een enkele ligger tijdens de aanleg van het viaduct is interessant om iets nader te bekijken. De ligger moet namelijk niet omvallen tijdens het bouwen, iets dat door de kromming en dus de excentriciteit wel zou kunnen gebeuren. Daarom is er in dit hoofdstuk kort gekeken naar deze situatie. Hiervoor wordt naar het model in Scia Engineer gekeken van de enkele ligger met 64 rechte elementen en gedraaide opleggingen, met uitsluitend eigen gewicht (UGT 2). Maar eerst wordt er naar een model gekeken van de enkele ligger die op zijn plek wordt gehesen. In dit hoofdstuk worden de belastingen uit de voorspanning buiten beschouwing gelaten. De situatie wordt hierdoor alleen nog maar ongunstiger, vanwege de opwaartse krommingsdruk die de voorspanning zou veroorzaken.

Allereerst wordt zoals gezegd gekeken naar een model van de ligger die op zijn plek wordt gehesen. Daarvoor wordt het gemodelleerd als een ligger op drie steunpunten. De drie steunpunten zijn dan de kabels waar de ligger in hangt terwijl hij naar zijn plek wordt gehesen. De derde oplegging is nodig omdat de ligger ander gaat roteren. Het desbetreffende model in Scia is nog niet gemaakt, dus dit moet eerst gebeuren. In Figuur 48 is een afbeelding geplaatst waarin te zien is hoe deze situatie wordt voorgesteld.



Alle drie de 'opleggingen' zijn in het Scia model opleggingen waarbij translatie in de z- en de y-richting verhinderd zijn. Het middensteunpunt verhinderd naast deze twee richtingen ook de x-

richting in het model omdat het systeem anders kinematisch onbepaald is en er dan geen berekening kan worden uitgevoerd. Als de ligger in de kabels hangt is er ter plaatse van geen enkel scharnier een buigend moment M_y aanwezig, dus deze rotatie richting wordt vrij gelaten. Ook de resterende rotatierichtingen worden bij de drie opleggingen vrij gehouden, omdat de ligger in principe vrij kan draaien. Het model ziet er dan als volgt uit, en kan zo worden voorgesteld:

Een berekening onder alleen het eigen gewicht in UGT 1 wordt uitgevoerd met dit model. De voorspanning staat er zoals gezegd nog niet op. De resultaten van een ligger in aanleg op drie punten staan in Tabel 13 geplaatst, in vergelijking met de resultaten van een geplaatste ligger op twee steunpunten.

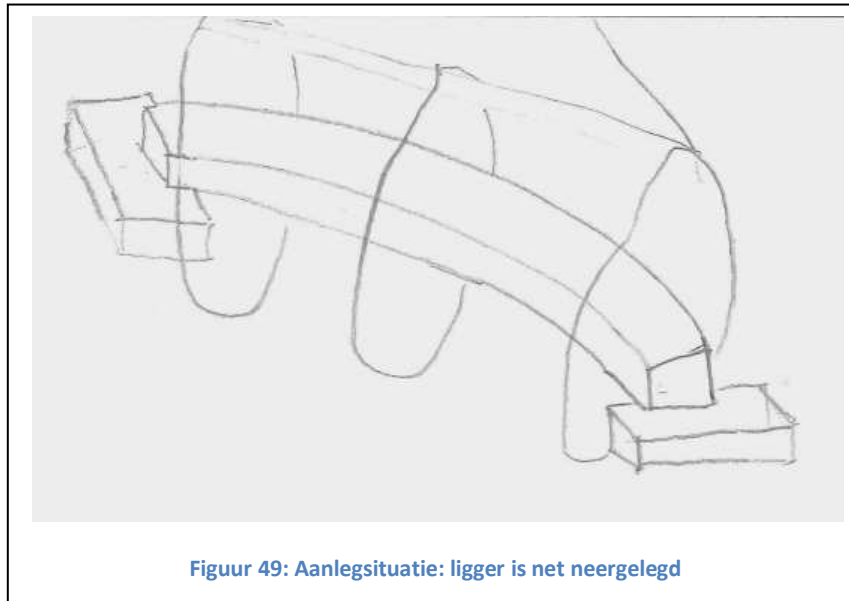
Enkel UGT 1	In aanleg	Geplaatst
$M_y \text{ [kNm]}_{\max}$	-814,80	2748,63
$M_x \text{ [kNm]}_{\max}$	63,60	954,80
$V_z \text{ [kN]}_{\max}$	226,51	341,42
$U_z \text{ [mm]}_{\max}$	8,7	149,2

Tabel 13: Resultaten ligger in aanleg op 3 steunpunten

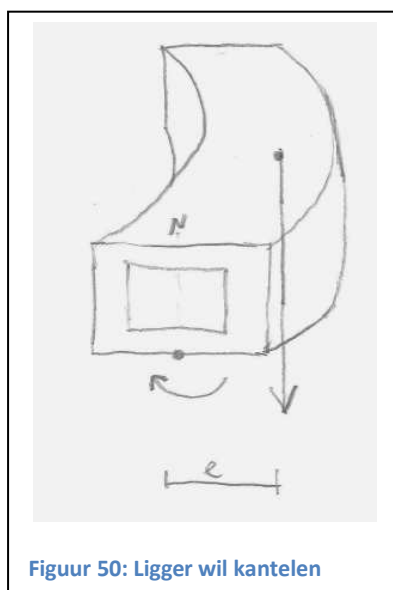
Interessant zijn de resultaten op het punt van het maximale buigend moment M_y . Dit moment is een negatief moment en treedt op in het middenpunt. Er moet dus rekening mee worden gehouden dat er ook trekwapening aan de bovenkant van de ligger wordt geplaatst.

Het maximale torsiemoment M_x is veel kleiner vanwege het extra steunpunt en hetzelfde geldt voor de vervorming.

Maar tijdens de aanleg wordt het pas echt interessant als het derde steunpunt in het midden weggaat. Als de ligger wordt neergelegd en het derde tijdelijke steunpunt valt weg, dan is de ligger ineens veranderd in een ligger op twee steunpunten. Voordat de liggers aan elkaar worden verbonden met dwarsvoorspanning, moeten ze ook blijven liggen. Een afbeelding van de situatie is te zien in Figuur 49.



De steunpunten moeten na het plaatsen een torderend moment opnemen en dat is lastig. Want een geheel viaduct kan niet om zijn as roteren ter plaatse van de oplegging, maar een enkele ligger wel. Dit komt omdat het zwaartepunt van de ligger buiten de oplegging ligt. Als dit niet het geval is – wat meestal het geval is bij conventionele kromme ligger met een kromtestraal van minimaal 100m – dan kan de ligger niet roteren. De excentriciteit van de hartlijn van de ligger is 3,35 meter in het midden van de overspanning. Het zwaartepunt van de ligger ligt dus op ongeveer iets minder dan de helft van deze overspanning, en wordt gesteld op 1,5 meter. Omdat de oplegging ongeveer 1,5 meter breed is, maar het zwaartepunt van het eind van de

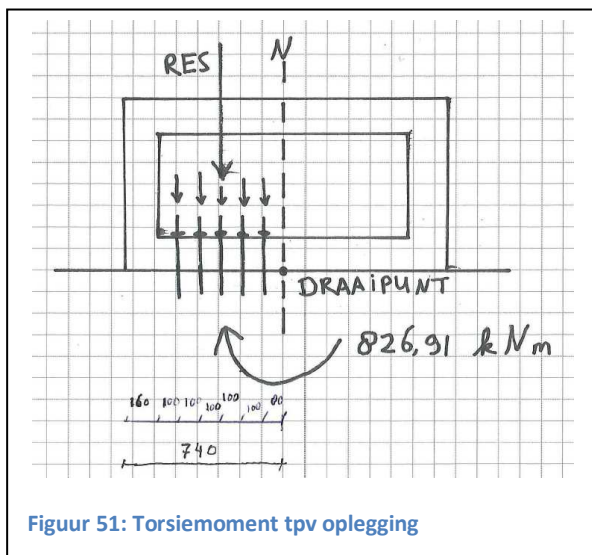


ligger in het midden van de doorsnede ligt (op 0,75m) kan deze ligger gaan roteren. De excentriciteit is 0,75 meter te groot. Dit is geschetst in Figuur 50. Hij moet op de een of andere manier verankerd worden.

Als deze situatie zich voordoet zijn de resultaten uit het Scia model als volgt. De resultaten zijn zoals de tweede kolom in Tabel 13, maar daar is nog een belangrijke aan toe te voegen. Namelijk het complete torderend moment dat in de oplegging moet worden opgenomen. Deze waarde is 826,91 kNm. Het torderend moment wat de oplegging moet opnemen zodat hij niet omvalt, is bekend. Nu moet er een oplossing worden bedacht om dit moment op te nemen meteen na het plaatsen

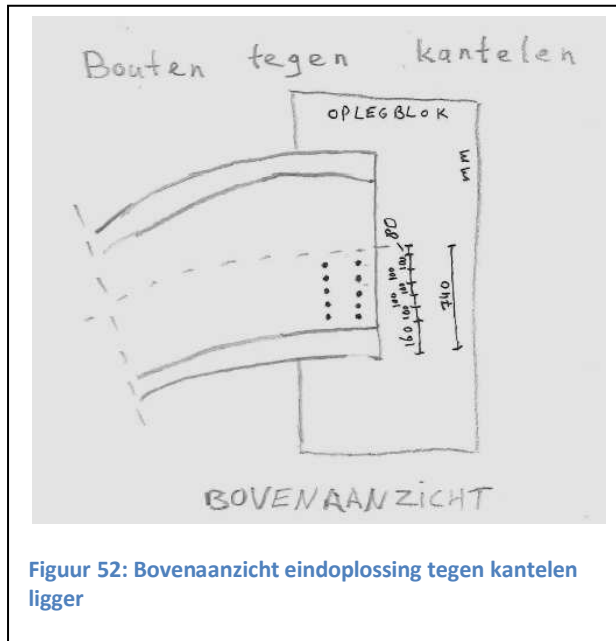
van een ligger.

Er kan hierbij gedacht worden aan een aantal stalen pinnen die aan het eind van de kokerligger ter plaatse van de oplegging door de onderkant komen. Deze pinnen zitten vast in de oplegging en daaroverheen wordt dan de koker gelegd. De pinnen worden aan de binnenkant van de koker met bouten vastgedraaid en op deze manier ontstaat er een systeem wat niet kan roteren om de eigen as. Er wordt gedacht aan ongeveer 2 rijen van 5 stalen pinnen die verdeeld over de helft van de koker verspreid liggen aan het uiterste puntje van de ligger boven de oplegging. De helft van de koker wordt gebruikt omdat er natuurlijk een torsiemoment werkt, en dit moment moet worden opgenomen door de pinnen. Dit kan alleen maar door trek, en omdat het zwaartepunt en dus het draaipunt van de doorsnede in het midden ligt wordt de helft van de breedte van de doorsnede voor de pinnen gebruikt. Een tekening van de geschetste situatie volgt in Figuur 51.



Er wordt gebruikt gemaakt van 10 pinnen/bouten, dit is een aanname die later veranderd kan worden. Berekend wordt de oppervlakte A_{pin} van een afzonderlijke bout. De 10 bouten worden hetzelfde gedimensioneerd en de kracht in de bouten wordt hetzelfde aangenomen. Het moment wat opgenomen moet worden is 826,91 kNm. De bouten staan op 80, 180, 280, 380, 480 mm uit het midden van de doorsnede. De resultante van deze afstanden ligt op 280mm uit het midden. De

resultante kracht die moet opgenomen worden door de 10 bouten is $826,91 / 0,280 = 2953,3$ kN. Als deze kracht door 10 wordt gedeeld komt de kracht per bout uit op 295,3 kN. Met een momentensom rond het midden blijkt nu dat de doorsnede in evenwicht is (komt natuurlijk omdat alle 10 de krachten hetzelfde zijn en omdat met een resultante afstand is gerekend). Als 295,3 kN de kracht is, dan is daarmee de oppervlakte van een bout uit te rekenen. $295,3 \cdot 10^3 / 435 = 678,9$ mm². Er volgt hieruit dat de diameter van de bouten uitkomt op $\varnothing 30$ mm. Met 10 bouten van 30 mm in diameter geplaatst in twee rijen van 5 dicht bij elkaar, aan beide kanten van de ligger kan het worden voorkomen dat hij gaat roteren. Een bovenaanzicht van deze eindoplossing is te zien in Figuur 52.



Er is niet echt rekening gehouden met de ligging van de voorspanning in dit voorbeeld, maar van de voorspanning liggen er twee kabels in de helft van de doorsnede. Verwacht wordt dat de bouten hier wel langs gelegd kunnen worden, maar of dat nog bepaalde andere problemen met zich meebrengt is onbekend. Er zijn bij het aandragen van deze oplossing totaal geen mogelijkheden of oplossingen uit de praktijk bij mij bekend, dus deze manier is een compleet nieuwe, geïmproviseerde manier. Of deze oplossing geschikt is, is onbekend en

er zijn vast nog meer mogelijkheden voor het 'vasthouden' van de ligger, maar daar zal nog veel aanvullend onderzoek naar gedaan moeten worden.

Ook kan er natuurlijk iets bedacht worden zodat de ligger in het midden een derde steunpunt blijven houden totdat er meerdere liggers aan elkaar verbonden zijn. Op deze manier kunnen de liggers los ook niet roteren. Het aansluiten van de liggers is dan eenvoudiger.

Als de ligger verzekerd is van zijn plaatsvastheid en hij kan niet meer roteren, dan is de oplegging een vaste in de x-rotatierichting en dan gaat in de ligger zelf een torderend moment optreden. Dit torderend moment kan samen met de dwarskracht voor afschuiving zorgen, en daarvoor moet de ligger goed met beugels bewapend zijn. Deze berekening is al uitgevoerd in het hoofdstuk over de dimensionering van een erg zwaarbelaste ligger. Deze zwaarbelaste ligger is maatgevend aangenomen voor de alle gevallen enkele ligger of enkele ligger omgerekend uit een gehele doorsnede (zie hoofdstuk "Maatgevende model t.b.v. dimensionering"). De enkele ligger wordt in het model in dit hoofdstuk nog niet belast (alleen eigen gewicht) dus de bepaalde beugelwapening zal voldoen voor deze situatie. Namelijk beugels van $\varnothing 14\text{mm}$ die h.o.h. 100 mm van elkaar liggen.

Conclusies en aanbevelingen

De ontwerpmethode die bij dit onderzoek is gebruikt is gebaseerd op een liggermodel van een enkele doorsnede van een kokerligger en een liggermodel van een gehele brug bestaande uit kokerliggers. Deze methode met behulp van het computerprogramma Scia Engineer blijkt snel tot resultaten te leiden. Deze resultaten lijken nauwkeurig, en de verwachting is dat de resultaten de gewenste nauwkeurigheid hebben. Echter, dit dient verder onderzocht te worden.

Voor het onderzoek naar de benadering van een kromme zijn er ook goede resultaten uitgekomen. Om de nauwkeurigheid van 1% te verkrijgen voor zowel de enkele ligger als voor het gehele viaduct in de berekende waarden van momenten, dwarskracht en vervorming dient een gekromde ligger opgedeeld te worden in tenminste 8 rechte elementen per radiaal. Dit is bij het beschouwde ontwerp het geval, of in zijn algemeenheid te zeggen is dat als de booglength gelijk is aan de kromtestraal de ligger opgedeeld mag worden in 8 elementen zou nog onderzocht moeten worden.

Wel is belangrijk gebleken dat er blij de opleggingen goed wordt gekeken naar het assenstelsel in Scia Engineer. Omdat de ligger gekromd is, wordt er eigenlijk in 2D gewerkt. Daarom moeten de opleggingen ook op de goede manier gedraaid staan ten opzichte van de constructie, zodat de momenten in de opleggingen ook kloppen. Als dit verkeerd gaat dan zijn de resultaten niet zo nauwkeurig als gewenst.

Ook is belangrijk dat de doorsnede eigenschappen I_t , A_y , en A_z van de doorsnede(n) in Scia eerst uit worden gerekend mbv een EEM berekening en vervolgens met de hand bij de doorsnede eigenschappen worden toegevoegd. Anders ontstaat er een groot probleem met de resultaten en vooral de vervorming van de constructie.

Voor de dimensionering is uitgegaan van de zwaarstbelaste enkele ligger. Dit is het maatgevende model voor het torsiemoment in één enkele ligger. Voor deze enkele ligger is de voorspanning en afschuifwapening bepaald. Deze berekeningen bleken haalbaar voor dit ontwerp van een gekromd viaduct.

De voorspanning kan niet zomaar als een rechte ligger worden ontworpen. Dit komt door de kromming die de ligger maakt, daardoor kantelt de voorspankabel in het y-z vlak en ligt hij niet meer verticaal. Als deze ligging van de kabel in beschouwing is genomen, is het mogelijk om de

voorspankabels te ontwerpen voor een kromme ligger alsof het een rechte ligger is. De berekende resultante voorspankracht is in feite de benodigde verticale voorspankracht. Op deze manier kan de benodigde resultante voorspankracht berekend worden volgens de verhoudingen van de driehoek waarin de kabel ligt in het y-z vlak. De voorspankracht berekend op de goede manier wordt bij dit onderzoek ongeveer 12,9 keer zo groot dan berekend alsof de ligger recht is. Doordat deze ontdekking laat tijdens de onderzoeksperiode plaatsvond is de voorspanning niet opnieuw bepaald. Het is waarschijnlijk nog steeds mogelijk, maar zal nader onderzocht moeten worden.

Een tweede kanttekening bij de voorspanning is dat bij dit soort prefab kokerligger meestal gebruik wordt gemaakt van voorgespannen staal ipv nagespannen. Deze berekening is uitgevoerd uitgaande van nagespannen staal. De resultaten zouden met een andere berekening anders kunnen zijn. Een aanbeveling is dan ook dat dit nog nader wordt onderzocht.

Verder leverde de dwarskracht en extra torsiemoment in de gekromde ligger een flinke waarde op van afschuifspanning, waar de constructie capaciteit voor moet hebben. De berekening van het aantal en type beugels bleek ook goed haalbaar voor dit gekromde viaduct.

De extra kromming van de ligger en daardoor ook van de voorspanning in het horizontale vlak kan misschien voor problemen gaan zorgen. Door die kromming ontstaat er een krommingsdruk naar binnen gericht, die misschien groot genoeg is voor een uittrekking van de kabel door de betondekking. Dit gedrag is onderzocht, maar er is gebleken dat de voorspankabels volgens de eerste berekening er niet uitgetrokken worden ondanks de beschouwde grote horizontale kromming. Dit kan komen doordat er met opzet voor gekozen is om veel en wat kleinere voorspankabels te gebruiken. Op deze manier is de krommingsdruk die ontstaat per kabel relatief klein, en kan de betondekking nog genoeg weerstand bieden. Bij deze berekening is uitgegaan van de voorspanning bepaald voor een rechte ligger.

Kanttekening hierbij is dat nieuwe inzichten hebben geleid tot een andere voorspankracht die vele malen groter is dan in eerste instantie werd gedacht. De krommingsdruk per kabel is dus ook groter (uitgaande van dezelfde hoeveelheid voorspanning) en nu blijkt dat de voorspankabels net wel door de dekking worden getrokken. Dit kleine probleem is op te lossen door de kabels iets meer naar binnen in de doorsnede te leggen of een sterkere betonsoort te gebruiken. Dit feit is ook onzeker omdat ervan uitgegaan is dat de benodigde voorspankracht groter is maar dat de hoeveelheid voorspanning hetzelfde gebleven is. Eerst zal nog verder onderzoek gedaan moeten worden en zal er een nieuw ontwerp van de

voorspanning moeten worden gemaakt, voordat er een eenduidige conclusie wat betreft de uittrekking van voorspankabels kan worden getrokken.

Naar de aparte situatie van een enkele ligger in aanbouw is ook gekeken. Deze situatie was interessant omdat de ligger door de kromming wil roteren op het moment dat hij wordt neergelegd en nog niet verbonden is aan de andere liggers. Het torderend moment dat opgenomen moet worden om deze rotatie tegen te gaan is berekend in Scia Engineer, en daarna is een oplossing aangedragen om dit probleem op te lossen. Naar deze of andere oplossingen om dit probleem op te lossen moet echter nog onderzoek naar gedaan worden om goede resultaten te bereiken.

De procedure die gevolgd is om tot een bepaald ontwerp te komen met behulp van het computerprogramma Scia Engineer is redelijk geschikt gebleken. Om de procedure een echte geschikte methode te noemen is nog te vroeg, dan dient er nog onderzoek plaats te vinden. De procedure uiteengezet in dit rapport kan als opstap en leidraad kunnen dienen voor verder onderzoek.

Bronnen

1. Hansen, I.A. (2006). *Functioneel ontwerpen van wegen en spoorwegen (CT3041)*.
2. Hartsuijker, C. (2003). *Toegepaste mechanica deel 2: spanningen, vervormingen en verplaatsingen*.
3. Hoogenboom, P.C.J. (2006), *Aantekeningen over wringing*.
http://www.mechanics.citg.tudelft.nl/~pierre/1TM5_aantekeningen.pdf
4. Luijten, F.J.M. (2007). *Collegesheets #3 "Vak Beton 2 (7P730), TU Eindhoven"*.
<http://www.bwk.tue.nl/co/Education/7p730/collegesheets3.pdf>
5. Walraven, J.C. (2010). *Collegedictaat Gewapend Beton CT2052*.
6. Walraven, J.C. (2011). *Collegedictaat Prestressed Concrete CT3150/CT4160*.
7. NEN 6723 (1995). *Voorschriften beton – Bruggen (VBB 1995) – Constructieve eisen en rekenmethoden*.
8. Bouwdienst Rijkswaterstaat, werkgroep "Vuistregels" (2004). *Vuistregels voor het ontwerpen van betonnen bruggen en viaducten*.
9. de Boer, S.J & BFBN (Bouwen in Prefab Beton). *Handboek Prefab Beton Hoofdstuk 13: "Brugsystemen en Viaducten"*.
10. Scia Group NV (2008). *Referentiehandleiding SCIA Engineer*.
11. www.scia-online.com/nl
12. www.spanbeton.nl

Evaluatie

Nu het project is afgerond, is het belangrijk om een goede evaluatie van de procesgang te doen. Ik begon het project vol goede moed met een startnotitie in de eerste week, wat eigenlijk een soort plan van aanpak was. Ik had achteraf gezien toch niet meteen de goede indruk van wat ik moest gaan doen, omdat ik dacht dat ging om een viaduct met een grote kromtestraal van bijvoorbeeld ongeveer 200 meter. Dit idee bleek niet zo goed voor mijn onderzoek want het was veel interessanter om een extreem kleine kromtestraal te onderzoeken, vanwege de extreem afwijkende krachtswerking in dat geval.

Zoals gezegd kwam mijn project moeilijk op gang. De eerste weken had ik mede door nog wat andere activiteiten, het grote aantal vrije dagen tussendoor veel moeite om mezelf er toe te zetten echt te beginnen met het project. Dit is geen excuus, ik had gewoon heel veel moeite met de zelfdiscipline. Ik begon dus pas na ongeveer 2 a 3 weken echt met het project, en in het begin ook nog met het verkeerde idee van het onderzoek. Toen het tot mij doordrong dat ik toch echt wat werk moest verzetten, toen ging het ook wel lopen. Toen kon ik langs de begeleiders en kreeg ik ook goede feedback. Ik maakte een goed ontwerp en begon met het programma Scia Engineer te werken. Helaas moest ik dit thuis doen, vanwege de verlopen licentie op de algemene TU computers, dus eigenlijk het hele onderzoek heb ik thuis uitgevoerd. Dit was op zich geen probleem, na een tijdje was ik er wel aan gewend. Het leren werken met Scia Engineer heeft ook wel redelijk lang geduurd, omdat het een programma is wat vele opties kent en erg ingewikkeld is. Ik ben trouwens erg blij dat ik heb leren werken met het programma Scia Engineer – tot op zekere hoogte, want het programma heeft nog vele, vele functies die ik niet heb gebruikt – en ik denk dat ik in de toekomst nog vaker met dit programma wil en zal gaan werken.

Ik ben blij dat er gekozen is voor één bepaald ontwerp voor gekromde liggers, want op deze manier was het onderzoek wel duidelijk afgebakend. Alsnog betrof mijn onderzoek een breed onderwerp omdat ik eigenlijk iets nuttigs moest zeggen over de procedure om een gekromd viaduct te ontwerpen, en daarom was de technische diepgang wat betreft modellering misschien iets minder dan ik van te voren had gedacht. Een algemene richtlijn of iets dergelijks over gekromde liggers is dus helaas niet te geven na mijn onderzoek, daar is simpelweg te weinig onderzoek voor geweest.

Verder was het voor mij wel leerzaam om een aantal weken erg zelfstandig en met discipline aan een onderzoek te werken waarvan je de procedure en de uitkomst nog niet echt wist. In het begin had ik zoals gezegd veel moeite die discipline op te brengen, maar in de loop van het

onderzoek en naar het eind van de periode heb ik toch echt best werk verzet. Ik ben dan ook redelijk tevreden met het eindresultaat.

Ook ben ik achteraf blij dat ik de stof van een aantal vakken weer een beetje heb opgehaald met dit project, namelijk CT2052 en CT3150. Al met al is dit een leerzaam project geweest.

Bijlage 1: Lijst met Figuren

Figuur 1: Bovenaanzicht Viaduct.....	14
Figuur 2: Dwarsdoorsnede algemene SKK-ligger	16
Figuur 3: Draaggrafiek SKK-liggers.....	17
Figuur 4: Dwarsdoorsnede viaduct, bestaande uit 6 SKK-liggers	18
Figuur 5: Bovenaanzicht viaduct, wegingdeling	18
Figuur 6: Assenstelsel.....	20
Figuur 7: Horizontale verloop viaductsegment	20
Figuur 8: Enkele doorsnede SKK-800	21
Figuur 9: Samengestelde doorsnede	22
Figuur 10: Visualisatie gehele doorsnede + enkele doorsnede	24
Figuur 11: Verzameling voorbeelden geometrie.....	25
Figuur 12: Schuifspanning σ_{xy} in y-richting van de doorsnede.....	26
Figuur 13: Vereenvoudigde doorsnede, maten in mm.....	27
Figuur 14: Momentenlijn M_y , 2 rechte gehele elementen.....	34
Figuur 15: Momentenlijn M_x , 2 rechte elementen	35
Figuur 16: Dwarskrachtenlijn V_z , 2 rechte gehele elementen	35
Figuur 17: Vervorming u_z , 2 rechte gehele elementen	36
Figuur 18: Momentenlijn M_y , 64 rechte gehele elementen	36
Figuur 19: Momentenlijn M_x , 64 rechte gehele elementen	37
Figuur 20: Dwarskrachtenlijn V_z , 64 rechte gehele elementen	37
Figuur 21: Vervorming u_z , 64 rechte gehele elementen	38
Figuur 22: Momentenlijn M_y , 2 rechte enkele liggers (UGT 2).....	39
Figuur 23: Momentenlijn M_x , 2 rechte enkele liggers (UGT 2).....	39
Figuur 24: Dwarskrachtenlijn V_z , 2 rechte enkele liggers (UGT 2)	40
Figuur 25: Vervorming u_z , 2 rechte enkele liggers (UGT 2).....	40
Figuur 26: Momentenlijn M_y , gekromd geheel	42
Figuur 27: Momentenlijn M_x , gekromd geheel	42
Figuur 28: Dwarskrachtenlijn V_z , gekromd geheel.....	43
Figuur 29: Vervorming u_z , gekromd geheel	43
Figuur 30: Momentenlijn M_y , gekromd enkel (UGT 2)	44
Figuur 31: Momentenlijn M_x , gekromd enkel (UGT 2)	44
Figuur 32: Dwarskrachtenlijn V_z , gekromd enkel (UGT 2).....	45
Figuur 33: Vervorming u_z , gekromd enkel (UGT 2)	45
Figuur 34: Detail gedraaide oplegging.....	49
Figuur 35: Momentenlijn M_y , 64 rechte gehele elementen (met gedraaide opleggingen).....	51
Figuur 36: Krommingsdruk voorspanning.....	56
Figuur 37: Ligging voorspankabels	60
Figuur 38: Kringloopwringing	61
Figuur 39: Schuifkrachten in de doorsnede tgv torsie T en dwarskracht V	62
Figuur 40: Snedemethode voor berekening afschuifwapening.....	63
Figuur 41: Doorsnede ligging fictieve kabel, rechte ligger.....	66
Figuur 42: Zijaanzicht ligging fictieve kabel	66

Figuur 43: Doorsnede ligging fictieve kabel, kromme ligger	67
Figuur 44: Ligging fictieve kabel in y-z vlak + berekening nieuwe $P_{m,t}$	67
Figuur 45: Voorspankabel bovenaanzicht + drie beschouwde kabels	69
Figuur 46: Detail uittrekking kabels	71
Figuur 47: Vereenvoudiging uittrekking voorspankabel	71
Figuur 48: Aanlegsituatie: ligger hangt aan drie kabels	73
Figuur 49: Aanlegsituatie: ligger is net neergelegd	75
Figuur 50: Ligger wil kantelen	75
Figuur 51: Torsiemoment tpv oplegging	76
Figuur 52: Bovenaanzicht eindoplossing tegen kantelen ligger	77

