

# Lange overspanningen in geprefabriceerd beton

---

Een onderzoek naar de mogelijkheden om langere overspanningen,  
tot 100 meter, mogelijk te maken in geprefabriceerd beton



**Twan Boelders**

**Master Thesis**

**2019**

*Voorpagina: een impressie van een mogelijke overspanning van het Amsterdam-Rijnkanaal nabij Utrecht met behulp van een 100 meter lange samengestelde liggerbrug.*

# Lange overspanningen in geprefabriceerd beton

---

**Een onderzoek naar brugoplossingen om langere overspanningen,  
tot 100 meter, mogelijk te maken in geprefabriceerd beton**

**Building Larger Bridge Spans in Prefabricated Concrete**

**A study on a possible design to build larger bridge spans, up to 100 meters, in  
prefabricated concrete**

By:

**T.J.B. (Twan) Boelders**

in partial fulfilment of the requirements for the degree of

**Master of Science**  
in Civil Engineering

at the Delft University of Technology,  
to be defended publicly on Monday July 1, 2019 at 16:00

Thesis committee:	Dr. ir. C. van der Veen,	TU Delft, Chairman
	Prof. ir. A.Q.C. van der Horst,	TU Delft
	Ir. J.M. Houben	TU Delft
	Ir. C. Quartel	Consolis Spanbeton
	Ir. E. van Vliet	Consolis Spanbeton

An electronic version of this thesis is available at <http://repository.tudelft.nl/>.



# Voorwoord

Dit onderzoek naar het bouwen van langere overspanningen in prefab beton is uitgevoerd als afstudeeronderzoek van het masterdiploma Civiele Techniek aan de Technische Universiteit Delft. Het onderzoek is uitgevoerd als ontwerpdracht om een oplossing te vinden om lange overspanningen in prefab beton mogelijk te maken waarbij is steeds een brugdekoplossing voor een overspanning van 100 meter als doel aangehouden. Dit rapport beschrijft hoe het uiteindelijke ontwerp tot stand is gekomen en welke alternatieve varianten zijn afgefallen.

Ik wil Spanbeton bedanken voor de mogelijkheid om dit onderzoek te voeren. Ondanks dat het er veel werk verzet moest worden, is het een leuke en zeer interessante opdracht gebleken die mij de kans heeft gegeven om te groeien als (toekomstig) ingenieur. Ik wil ook alle medewerkers van Spanbeton, zowel van het hoofdkantoor als van de fabriek, bedanken voor de hulp die ik de afgelopen maanden heb mogen ontvangen. Zonder deze hulp zou het doel, het ontwerpen van een overspanning van 100 meter, niet gehaald zijn. De gesprekken die ik de afgelopen maanden heb mogen voeren over de verschillende aspecten van betonnen bruggen hebben een groot deel van de inspiratie gevormd voor de verschillende varianten en de ontworpen brugdekoplossing.

Ik wil de constructeurs en tekenaars van het ingenieursbureau van Spanbeton bedanken voor hun hulp en bereidheid om de meest uiteenlopende vragen over de brugconstructies van Spanbeton te beantwoorden. De gesprekken en discussies die ik heb mogen voeren met de constructeurs over verschillende rekenmethode hebben mij op een nieuwe en systematische manier naar (beton)constructies leren kijken. Ook wil ik Wim van der Meijden van het transportbedrijf Van der Meijden bedanken voor de hulp en het meedenken over het transport van prefab betonnen liggerdelen van het ontwerp.

Ik wil hierbij ook de commissieleden namens Spanbeton, Kees Quartel en Evert van Vliet bedanken. Het enthousiasme en de open blik waarmee ze de ontworpen oplossingen tegemoet traden hebben bijgedragen aan een mijn motivatie om het onderzoek en ontwerp nog beter te maken.

Tenslotte wil ik ook de commissieleden van de TU Delft bedanken. Allereerst wil ik de voorzitter van de afstudeercommissie, Cor van der Veen, bedanken voor het beantwoorden van mijn vragen en voor het meedenken over de te volgen rekenmethode. Ik wil Aad van der Horst bedanken voor de kritische vragen die gesteld werden na aanleiding van mijn werk. Deze waren niet altijd eenvoudig om te beantwoorden, maar hebben een onmisbare bijgedragen geleverd aan een beter onderzoek en een beter ontwerp voor de brugoplossing. Tenslotte wil ik Lambert Houben bedanken voor zijn werk als afstudeercoördinator en als vervanger van Dick Hordijk.

Ik wens de lezer veel leesplezier en ik hoop dat het rapport als inspiratie dient om nog betere en natuurlijk vooral ook langer brugoverspanningen in prefab beton te bouwen.

*Twan Boelders*

*Koudekerk aan den Rijn, 14 juni 2019*



# Samenvatting

In het dichtbevolkte Nederland met een druk bereden weg- en spoornetwerk moeten steeds meer wegen verbreed en uitgebreid. De groter wordende wegbreedte vraagt om brugoplossingen die steeds grotere overspanningen kunnen overbruggen, maar ook brugoplossingen die met weinig hinder voor het kruisend verkeer gebouwd kunnen worden. Ook heeft Rijkswaterstaat de wens om tussensteunpunten te voorkomen om zo de snelweg onder het brugdek vrij indeelbaar te maken.

De huidige oplossing om een brugdek te bouwen over een snelweg met minimale hinder tijdens het bouwproces is een brugdek opgebouwd uit voorgespannen betonnen prefab liggers. Voor overspanningen groter dan 60 meter worden de liggers echter te zwaar en te lang om deze eenvoudig over de weg naar de bestemming te vervoeren. De bestaande liggersystemen lopen dus tegen de grenzen aan wat betreft de maximale overspanning. Het doel van het onderzoek is om een prefab brugdekoplossing te vinden waarmee een grote overspanningen tot ongeveer 100 meter mogelijk zijn. Een dergelijke brugdekoplossing kan dan ook gebruikt worden voor het overspannen van kanalen of kleine rivieren.

De bestaande bruggen met een overspanning groter dan 60 zijn voornamelijk gebouwd over het water en niet over snelwegen. De belangrijkste concurrerende oplossing voor overspanningen van 60 tot 100 meter is een stalen boogbrug of een stalen vakwerkbrug. Oplossingen in beton worden voor deze overspanningen niet veel toegepast. De belangrijkste nadelen van de alternatieve in staal zijn de relatief hoge kostprijs en de gevoeligheid voor vermoeiingsschade door het vrachtverkeer.

Voor de brugdekoplossing is een programma van eisen, wensen en randvoorwaarden opgesteld. Hierin is bepaald dat de oplossing geschikt moet zijn als kanaalbrug of als snelwegviaduct. De oplossing moet een zo eenvoudig mogelijke bouwmethode hebben met zo weinig mogelijk hinder voor het kruisende verkeer. De oplossing moet ook geschikt zijn voor fabrieksmatige productie, vergelijkbaar met de bestaande liggeroplossingen. Ook moet de ligger een zo laag mogelijke integrale kostprijs hebben. Tenslotte is een lage constructiehoogte van groot belang om hoge kosten voor de op- en afritten te vermijden en om de geprefabriceerde delen te kunnen transporteren over de openbare weg.

Met het opgestelde programma van eisen, wensen en randvoorwaarden is een variantenstudie uitgevoerd naar 4 mogelijk type oplossingen: een liggerbrug waarbij de ligger opgedeeld zijn in meerdere liggerdelen, een segmentbrug, een boogbrug en een vakwerkbrug. De boog- en vakwerkbrug bleken geen geschikte oplossingen omdat hier geen geschikte bouwmethode voor beschikbaar is. Voor de segmentbrug bleek ook alleen een geschikte bouwmethode te hebben indien er veel overspanningen achter elkaar worden gebouwd en er van een portaal constructie (launching gantry) gebruik gemaakt kan worden. Ook bleken deze varianten minder geschikt voor brede brugdekken, omdat dan de segmenten niet voldoende maatvast geproduceerd kunnen worden.

De variant waarbij de liggers in liggerdelen worden geproduceerd en getransporteerd bleek de meest geschikte oplossing, de samengestelde liggerbrug zoals deze is genoemd wordt opgebouwd uit drie liggerdelen om een lange ligger te vormen. De variant kan gebouwd worden met relatief weinig hinder voor het kruisende verkeer. Ook is de vormvrijheid goed, brugdekken met een scheve kruisingshoek en in veel verschillende breedtes zijn mogelijk.

Het ontwerp van deze samengestelde liggerbrug is vervolgens verder ontworpen en getoetst op de haalbaarheid. Een overspanning van 100 meter is mogelijk met een constructiehoogte van 3 meter. Deze relatief lage constructiehoogte is mogelijk door het gebruik van hogesterktebeton en door de goede dwarsspreiding van het brugdek. De liggerdelen van een dergelijke overspanning kunnen getransporteerd worden over de openbare weg, maar dit zal door de grote hoogte en het grote gewicht niet eenvoudig zijn. Ook kortere overspanningen zijn mogelijk, voor een overspanning van 80 meter is een constructiehoogte van 2,1 meter voldoende.

Een globale kostenberekening laat zien dat de oplossing relatief duur is vergeleken met de bestaande liggeroplossing, maar goedkoper kan zijn dan de bestaande oplossingen in staal. Aanbevolen wordt om het onderzoek naar de samengestelde liggerbrug voort te zetten, omdat de mogelijk lager kostprijs en de goede vormvrijheid vergeleken met bestaande oplossingen ervoor zorgen dat de samengestelde liggerbrug zeker kansrijk is om groter overspanningen in prefab beton mogelijk te maken.



# Abstract

The Netherlands is a densely populated country with a congested road and railway network. Therefore more and more highways are widened and expanded. These wider highways create a demand for bridges which are suited for longer spans. These bridge designs should be constructed with a minimum of hindrance to the other traffic. The Dutch agency responsible for the construction and maintenance of highways, Rijkswaterstaat, also wishes to reduce the number of intermediate supports so the space underneath a viaduct can be used more free by the traffic lanes.

The currently most used solution to build a highway overpass without disrupting the traffic too much is a concrete viaduct consisting of prefabricated prestressed concrete bridge beams. But for spans longer than 60 meters those beams become too long and too heavy for transport by truck to the building site. Therefore the currently in use bridge solutions are reaching the maximum distance to which it can be built. The primary goal of this report is to find a concrete bridge solution with which it is possible to construct longer bridge spans in prefabricated concrete up to 100 meters. With such a bridge solution it is also possible to span a waterway or a small river in the Netherlands.

Most existing bridges in the Netherlands, with a span larger than 60 meters are built over water and not over highways. The currently most used solutions for a bridge with a span of 60 to 100 meters is a steel truss bridge or a steel tied arch bridge. The biggest drawbacks of these steel bridges are the high cost price and a high fatigue sensitivity. Another option used to build these bridge spans in the Netherlands is an in situ concrete box girder bridge, the main drawback of this solution is the long construction time.

Another conclusion that can be drawn about these existing bridges in the Netherlands is the lack of a standardized design for these bridges. If a standardized design is possible, reducing the costs of these bridges will possibly take place.

To make it possible to design a bridge solution a representative situation is determined where a bridge with a span of 100 meters can be applied. With this situation also the loads acting on the bridge deck are determined. The bridge deck in this situation is 17,8 meters wide so 3 traffic lanes and a hard shoulder will fit on it.

A program of requirements is composed for the design of this bridge solution. The design of the solution satisfies the following requirements:

1. The design should be suitable for a bridge span over highways as well as over waterways. The bridge should be able to withstand the loads determined for the representative situation.
2. The solution should be suited for industrial production in a precast concrete factory, comparable to the current beam bridge solutions. The total cost price of the solution should be as low as possible.
3. The design should be adjustable for bridge decks with different widths

The design should also aspire to satisfy the following points:

1. The construction should be as efficient as possible, with the minimal possible use of materials like concrete and steel.
2. The design should be easy to produce in a precast concrete factory.
3. A wide variety of bridge deck shapes should be possible with the design.
4. The precast elements should be easy to transport by truck to the building site.
5. The design should be easy to build with the least possible hindrance at the building site.
6. The design should be as sustainable as possible.
7. The total costs of the solution, including for example maintenance, should be as low as possible.

To make sure the precast elements can be transported by truck to the building site, the element should not be higher than 3,2 meters, weigh no more than 170 ton and have a

maximum length of 60 meters. These maximum dimensions are depending on each other and are influenced by the route to the building site.

Four different possible bridge designs are researched: A beam bridge in which the beams are produced and transported in multiple sections, a precast segmental bridge, an arch bridge and a truss bridge. For all four types of bridges different solutions for parts of the construction are sketched and analyzed.

The arch and truss bridge are not a suitable solution because there is no easy building method available for both types of bridges. Segmental bridge is also not a suitable solution because the only building methods available with a minimum of hindrance for other traffic, construction with a so called launching gantry, is only a good method if multiple spans are constructed directly after each other. This solution is also less suitable for wide bridge decks because wide segments are either too heavy for transport or the segments are too slender and therefore they will bend during the casting process.

The solution in which beams are produced in different beam parts is the most suitable solution. In this type of bridge the 100 meter long beam is divided in 3 parts to form a complete beam of 100 meters. These beam parts can be transported to the building site by truck. Near the building site the beams will be joined together to form a complete beam. This solution can be constructed with relative small hindrance for the other traffic if the complete beam is placed with large cranes. Another building method is also possible, in this case the beam will be joined while it is placed on temporary supports above the highway. This bridge solution is relatively flexible in the shapes of bridge decks that can be constructed, skew bridges and wide bridge decks are both possible.

The prestressed beams of this bridge have an I-shaped cross-section. In the transversal direction the top and bottom flange are prestressed against each other to form a stiff bridge deck. The prestressing in the transversal direction is done with external tendons which are anchored in the edge beams. The beam parts of this bridge are all prestressed in the precast concrete factory with pre-tensioned steel. To connect the beam part together prestressing with post-tensioned steel is used. This prestressing is anchored in the two end beam parts at different positions to prevent tensile stresses in the top of the beam near the supports. The webs of the I shaped beams are reinforced with ribs to increase the bending stiffness

With this design a span of 100 meters is possible with a construction height of only 3 meters. This relatively slender design is possible because high strength concrete is used and because the bridge deck is designed to spread the traffic load efficiently over the full width of the bridge deck. The beam parts of this bridge can be transported by truck to its destination. But this won't be easy because of the height and weight of the prefabricated beam parts. Shorter spans are also possible, for example an 80 meter span is possible with a construction height of 2,1 meters.

A rough cost estimation shows that the designed solution is expensive compared to existing concrete beam bridges. The cost price is for a large part determined by the chosen construction method, if the beam is joined on temporary supports the cost price will be less. Compared to existing solutions it is possible that the designed solution has a lower cost price compared to existing solutions in steel. It is advised to continue the research to and development of the bridge design because of the possible lower cost price and because with this solution bridge deck can be constructed which now cannot easily be built with existing solutions.

---

# Inhoudsopgave

<b>Voorwoord</b>	<b>1</b>
<b>Samenvatting</b>	<b>3</b>
<b>Abstract</b>	<b>5</b>
<b>Inhoudsopgave</b>	<b>7</b>
<b>1. Inleiding</b>	<b>10</b>
1.1 Spanbeton	10
1.2 Onderzoeksopdracht	10
1.3 Analyse van het probleem	11
1.4 Onderzoeksdoel	12
1.5 Leeswijzer	14
<b>2. Bestaande brugoplossingen</b>	<b>16</b>
2.1 Viaducten over de snelwegen	16
2.2 Stalen boogbrug	16
2.3 Stalen vakwerkbruggen	17
2.4 Stalen Liggerbruggen	18
2.5 Betonnen kokerbrug	18
2.6 Andere oplossingen	19
2.7 Geen standaardisatie	20
2.8 Maximale overspanning	20
2.9 Mogelijke voordelen voor een prefab betonnen oplossing	21
2.10 Mogelijke nadelen van prefab betonnen oplossing	22
<b>3. Toepassingssituaties</b>	<b>24</b>
3.1 Algemeen	24
3.2 Omschrijving van de toepassingssituaties	24
3.3 Normen en richtlijnen	26
3.4 Omschrijving van het brugdek	27
3.5 Systeem grenzen	28
3.6 Belastingen op het brugdek	28
<b>4. Eisen, wensen en randvoorwaarden</b>	<b>34</b>
4.1 Eisen	34
4.2 Wensen	34
4.3 Randvoorwaarde	35
4.4 Maximale constructiehoogte	38
<b>5. Opzet van de variantenstudie</b>	<b>40</b>
5.1 Samengestelde ligger- en segmentbrug	40
5.2 Boog- en vakwerkbrug	42
5.3 Bestaande bruggen	42
5.4 Uitwerking van de deelvarianten	46

<b>6.</b>	<b>Samengestelde liggerbrug</b>	<b>47</b>
6.1	Algemeen	47
6.2	Aantal liggerdelen	47
6.3	Liggerprofiel	50
6.4	Liggerkoppeling	57
6.5	Transport en montage	62
6.6	Samengestelde varianten van de samengestelde liggerbrug	64
<b>7.</b>	<b>Segmentbrug</b>	<b>68</b>
7.1	Algemeen	68
7.2	Segmenten	68
7.3	Voegen tussen de segmenten	71
7.4	Voorspanning in de lengterichting	72
7.5	Voorspanning in de dwarsrichting	75
7.6	Transport en montage	76
7.7	Samengestelde varianten van segmentbrug	78
<b>8.</b>	<b>Boog- en vakwerkbrug</b>	<b>81</b>
8.1	Algemeen	81
8.2	Randconstructie	81
8.3	Prefab staven	83
8.4	Koppeling tussen de staven	84
8.5	Brugdek	87
8.6	Verbinding brugdek randconstructie	89
8.7	Transport en montage	90
8.8	Samengestelde variant van de boog- en vakwerkbrug	91
<b>9.</b>	<b>Analyse van de varianten</b>	<b>93</b>
9.1	Variant 1: 3-delige samengestelde liggerbrug	93
9.2	Variant 2: 5-delige samengestelde liggerbrug	97
9.3	Variant 3: Kokersegment met gecombineerde voorspanning	99
9.4	Variant 4: Ruimte vakwerk segment met externe voorspanning	102
9.5	Variant 5: Staal en beton vakwerk	105
9.6	De multicriteria-analyse	107
9.7	Evaluatie van de multicriteria-analyse	107
9.8	Evaluatie van de variantenstudie	108
9.9	Conclusie van de variantenstudie	108
<b>10.</b>	<b>Het ontwerp van de samengestelde liggerbrug</b>	<b>112</b>
10.1	Ontwerp van het brugdek	113
10.2	Productie	135
10.3	Transport	137
10.4	Bouwmethode	138
<b>11.</b>	<b>Rekenmethode voor de samengestelde liggerbrug</b>	<b>150</b>
11.1	Lijst met gebruikte symbolen	150
11.2	Berekeningswijze	153
11.3	Belastingen op de constructie	154
11.4	Eigengewicht van de ligger	155

---

11.5	Krachtenverdeling berekening	155
11.6	Lokale effecten	163
11.7	Krachten op de ligger	169
11.8	Belastingcombinaties voor het toetsen van de ligger	174
11.9	Toetsen van de ligger	175
11.10	Stootbelastingen tegen het brugdek	203
<b>12.</b>	<b>Evaluatie van de samengestelde liggerbrug</b>	<b>205</b>
12.1	Eigenschappen van de samengestelde liggerbrug	205
12.2	Haalbaarheid van een overspanning van 100 meter	207
12.3	Openstaande problemen	211
12.4	Mogelijke optimalisaties van het ontwerp	212
12.5	Kosten	214
12.6	Discussie	216
<b>13.</b>	<b>Conclusie en aanbevelingen</b>	<b>219</b>
13.1	Conclusie	219
13.2	Aanbevelingen	220
	<b>Literatuurlijst</b>	<b>223</b>
	<b>Afbeeldingenlijst</b>	<b>226</b>
	<b>Bijlage</b>	<b>228</b>
	Bijlage A - Test constructiehoogte	228
	Bijlage B1 - Eigengewicht 3 liggerdelen	230
	Bijlage B2 - Ligger koppeling met voorspanstaven	230
	Bijlage B3 - Vakwerkcombinatiekoker en D <sub>55</sub>	232
	Bijlage B4 - Eigengewicht 5 liggerdelen	232
	Bijlage B5 - Eigengewicht segmenten variant 3	234
	Bijlage B6 - Eigengewicht segmenten variant 4	234
	Bijlage B7 - Gevolgen openklappen voegen	235
	Bijlage B8 - Dwarsspreiding van de Combinatie kokerligger	236
	Bijlage B9 - Voorspanning in de 3-delige ligger	237
	Bijlage B10 - Gevolgen in-situ druklaag	238
	Bijlage C1 - Berekening torsie- en afschuifstijfheid	240
	Bijlage C2 - Excel berekening 100 meter randligger	242

# 1. Inleiding

Nederland is een dichtbevolkt land met een dicht en druk bereden weg- en spoornetwerk. De groeiende economie en bevolking vragen om een continue verbetering van de infrastructuur. Daarvoor worden steeds meer wegen verbreed en uitgebreid. Deze groei van de totale wegbreedte vraagt om brugoplossingen die grote overspanningen kunnen overbruggen, maar ook brugoplossingen die weinig hinder geven tijdens het bouwproces en dit alles tegen een minimale kostprijs.



*Figuur 1-1 knooppunt Oudenrijn, een verkeersknooppunt nabij Utrecht.*

Voor de kleine en middelgrote overspanningen tot 60 meter is vaak gekozen voor gewapend of voorgespannen beton als constructiemateriaal. Deze constructies zijn globaal in te delen in twee categorieën naar bouwmethode: geprefabriceerde betonnen viaducten die vaak met liggersystemen worden gebouwd en in-situ betonnen viaducten. Waarbij het laatste type vooral gekozen wordt als het bouwen geen hinder geeft voor het verkeer, zoals bij een nieuw aan te leggen snelweg. De prefab oplossing wordt vaak gekozen als de hinder voor kruisend verkeer zo min mogelijk moet zijn, bijvoorbeeld bij een nieuw viaduct over een in gebruik zijnde snelweg. Deze prefab viaducten worden veelal gebouwd met gestandaardiseerde liggers.

## 1.1 Spanbeton

Een van de producenten van voorgespannen betonnen liggers is Spanbeton. Deze liggers worden geproduceerd in de eigen fabriek in Koudekerk aan den Rijn. De ligger worden voorgespannen met voorgerekt staal. Hiervoor worden de voorspanstrengen gespannen op de spanbaan, waarna het beton in de bekisting gestort wordt. Er is dus een directe aanhechting tussen het voorspanstaal en het beton. Het bedrijf Spanbeton is actief in Nederland en België, maar de voornaamste afzetmarkt is Nederland. Dit onderzoek is uitgevoerd bij en in samenwerking met Spanbeton.

## 1.2 Onderzoeksopdracht

Vanuit Spanbeton kwam de vraag om te kijken naar prefab betonnen overspanningen groter dan 60 meter, om te onderzoeken hoe een grotere overspanning dan deze 60 meter mogelijk is. 60 meter is de maximale lengte die op dit moment geproduceerd kan worden met de huidige liggersystemen in de huidige fabriek van Spanbeton. De overspanning van 100 meter is als voorlopig richtdoel gesteld. Als randvoorwaarde is ook gesteld dat de oplossing met de huidige normen en richtlijnen te produceren moet zijn om de maatschappelijke acceptatie van de oplossing te vereenvoudigen.

## 1.3 Analyse van het probleem

### 1.3.1 De huidige ligger systemen

In Nederland wordt een aanzienlijk deel van de bruggen en viaducten voor overspanningen van 15 tot 60 meter gebouwd met behulp van geprefabriceerde voorgespannen betonnen liggers. Deze brugliggers worden geprefabriceerd in de fabriek en vervolgens naar de bouwplaats getransporteerd. Deze bouwmethode wordt in Nederland veel toegepast omdat er dan gebouwd kan worden met minimale hinder voor het kruisende verkeer. Doordat de liggers geprefabriceerd worden in een fabriek is er op de bouwplaats geen uitgebreide bekisting nodig die het kruisende verkeer kan hinderen. De brugliggers kunnen gemonteerd worden tijdens een korte wegafsluiting die vaak in de nacht wordt gepland. Hierdoor wordt het kruisende verkeer op bijvoorbeeld een snelweg slechts kort gehinderd.



*Figuur 1-2 Voorbeeld van een 's nachts uitgevoerde liggermontage waarbij gebruik wordt gemaakt van mobiele hijskranen.*

Bij Spanbeton zijn er drie gestandaardiseerde systemen in gebruik. De volstortligger, bij Spanbeton bekend als SJP-FLEX, deze is bedoeld voor de korte overspanningen tot ongeveer 25 meter. Voor de grotere overspanningen van ongeveer 22 tot 60 meter zijn twee systemen in gebruik: de railbalkliggers en de kokerliggers. De railbalkliggers zijn bij Spanbeton bekend onder de naam ZIPXL. De kokerliggers zijn bekend onder de naam SKK(D), deze kokerliggers kunnen zowel met dwarsvoorspanning als druklaag geproduceerd worden.

Deze standaard liggeroplossingen hebben in Nederland een groot marktaandeel veroverd. De belangrijkste reden hiervoor is dat deze bouwmethode relatief weinig hinder geeft voor het verkeer, iets wat in Nederland als zeer belangrijk wordt gezien. Ook de brede toepasbaarheid voor verschillende soorten viaducten maakt de liggers populair. Hierdoor is er in Nederland ook veel ervaring met de bouw van dit soort viaducten waardoor aannemers snel geneigd zijn om voor deze oplossing te kiezen.

### 1.3.2 De grenzen van de huidige liggersystemen

De maximale overspanning van een prefab betonnen liggerbrug is door de jaren heen steeds gegroeid. De langste liggers, ooit geproduceerd door Spanbeton zijn 61 meter lang, deze zijn toegepast in de overspanning van de snelweg A12 voor de bouw van het station Zoetermeer-Lansingerland. Deze grote overspanning was noodzakelijk omdat Rijkswaterstaat, de beheerder van de A12, geen tussensteunpunten toestond in de middenberm van de snelweg. Bij de realisatie van dit project liep men tegen verschillende grenzen van de huidige liggersystemen aan: liggers met deze lengte worden te lang en te zwaar om ze eenvoudig over de weg te transporteren, ook is de fabriek van Spanbeton niet geschikt om langere liggers dan 62 meter te produceren.



*Figuur 1-3 het station Zoetermeer-Lansingeland in aanbouw, met de overspanning over de snelweg A12.*

De langste prefab liggers, geproduceerd in Nederland zijn 68 meter lang. Hierbij was het transport alleen mogelijk omdat de bouwlocatie over het water bereikt kon worden vanaf de fabriek. Ook een project met nog langere liggers van 69 meter, dat gepland staat voor 2020, kan alleen uitgevoerd worden omdat de bouwlocatie over water bereikt kan worden [1]. Vervoer per schip kan dus een oplossing bieden voor dit transportprobleem, maar over het water zijn niet alle bouwlocaties te bereiken. Voor De huidige liggersystemen lopen dus tegen hun grenzen aan wat betreft het vergroten van de maximale overspanning.

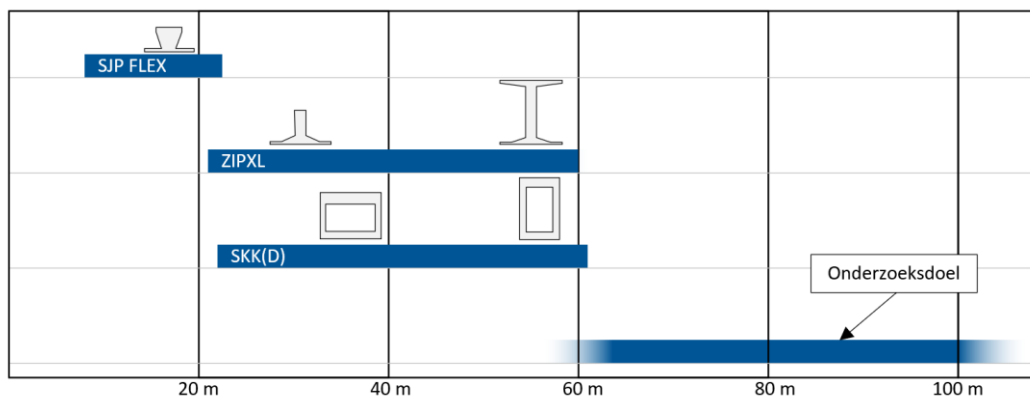
### **1.3.3 Verwachtingen voor de toekomst**

Terwijl Spanbeton tegen de grenzen van haar liggersystemen aanloopt wordt er verwacht dat er steeds meer vraag komt naar langere overspanningen, waarbij snelwegen in een overspanning, dus zonder tussen steunpunten kunnen worden overbrugt. Bij de bouw van viaducten aan de snelweg wordt het voorkomen van hinder door bouwwerkzaamheden nog belangrijker dan deze nu al is. Daarom wil men het aantal tussensteunpunten zoveel mogelijk verminderen, deze moeten immers gebouwd worden tussen de rijstroken in terwijl het verkeer zoveel mogelijk door moet kunnen rijden. Ook wil Rijkswaterstaat deze tussensteunpunten vermijden om de weg zo vrij indeelbaar mogelijk te maken. Hierdoor is kan een weg gemakkelijker ingedeeld worden wat de flexibiliteit van de infrastructuur ten goed komt. Dit vermijden van tussensteunpunten in combinatie met steeds breder wordende snelwegen vraagt om oplossingen die groter overspanningen dan 60 meter mogelijk maken.

## **1.4 Onderzoeksdoel**

De opdracht vanuit Spanbeton is dus om op zoek te gaan naar de volgende stap in prefab betonnen brugdekken. Met als doel om overspanningen in prefab beton te kunnen bouwen die groter zijn dan de huidige liggerlengte en zo dus op zoek te gaan naar de volgende prefab oplossing die overspanningen van 60 tot ongeveer 100 meter mogelijk maakt. Hierbij wordt specifiek uitgegaan van de situatie in Nederland waarbij bijvoorbeeld een grote nadruk wordt gelegd op een slanke constructie en een bouwmethode die weinig hinder geeft. Ook worden de begrenzingen van de huidige normen en richtlijnen gebruikt, de oplossing moet dus met de huidige kennis en bestaande techniek te bouwen zijn. In Figuur 1-4 is dit doel schematisch weergegeven in relatie tot de bestaande prefab betonnen liggersystemen van Spanbeton.





Figuur 1-4 een overzicht van de liggersystemen in gebruik en het onderzoeksdoel, een prefab oplossing geschikt voor overspanningen van 60 meter tot ongeveer 100 meter

Een prefab betonnen brugdeksysteem geschikt voor overspanningen van 60 tot 100 meter biedt nog meer mogelijkheden dan het overspannen van snelwegen. Ook grotere kanalen en kleinere rivieroverspanningen komen in beeld als mogelijke toepassingsgebieden van dit liggersysteem. Op dit moment zijn dergelijke overspanningslengtes ook voornamelijk over water gebouwd. Hierbij moet bijvoorbeeld gedacht worden aan het overbruggen van bijvoorbeeld het Amsterdam-Rijnkanaal, Twentekanaal of de IJssel. Een maximale overspanning van 100 meter is net voldoende om het Amsterdam-Rijnkanaal te overbruggen.

#### 1.4.1 Hoofdvraag

De hoofdvraag voor het onderzoek is als volgt geformuleerd:

- Hoe kan een in delen geproduceerde prefab betonnen brug geschikt voor een overspanning van 60 tot 100 meter worden gebouwd?

#### 1.4.2 Deelvragen

Om een zo compleet mogelijk advies uit te kunnen brengen zijn een aantal deelvragen geformuleerd:

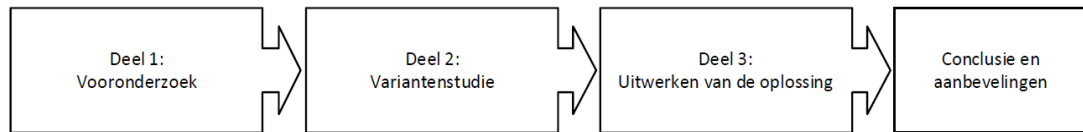
- Hoe kan het brugdek voor een overspanning van 60 tot 100 meter het beste in te prefabriceren elementen verdeeld worden?
- Wat is het meest geschikte profiel voor een brug met een overspanning van 60 tot 100 meter?
- Hoe kunnen de geprefabriceerde constructieonderdelen het beste worden gekoppeld tot een brugdek?
- Is dezelfde prefab betonnen oplossing geschikt voor alle overspanningen binnen de onderzochte overspanningsafstand van 60 tot 100 meter?
- Is dezelfde prefab betonnen oplossing geschikt voor zowel een overspanning van een snelweg als de overspanning van een kanaal?
- Kunnen prefab betonnen elementen voor een brug met een overspanning van 60 tot 100 meter nog steeds over de openbare weg vervoerd worden?
- Hoe kan het brugontwerp geoptimaliseerd worden voor productie in de huidige fabriek van Spanbeton?

#### 1.4.3 Interpretatie van een prefab oplossing

Het onderzoek beperkt zich tot oplossingen in prefab beton. Hiermee wordt bedoeld een oplossing waarbij een merendeel van de constructie in een fabriek geproduceerd wordt en vervolgens naar de eindbestemming wordt vervoerd. Hiervoor is gekozen omdat dit het beste bij de huidige werkwijze van Spanbeton aansluit. Mogelijke oplossingen waarbij een tijdelijke fabriek ter plaatse van de te bouwen brug opgebouwd wordt zijn dus niet beschouwd. Deze oplossingen zijn niet beschouwd omdat meerdere malen bij Spanbeton is gebleken dat dit, zelfs voor een viaduct met veel overspanningen geen economische oplossing is.

## 1.5 Leeswijzer

Het onderzoek en dit rapport is opgedeeld in drie delen: het vooronderzoek, de variantenstudie en het uitwerken van het ontwerp van de oplossing, deze structuur is geschetst in Figuur 1-5.



*Figuur 1-5 een afbeelding met de opbouw van het onderzoek in drie delen, het vooronderzoek, de variantenstudie en het uitwerken van het ontwerp van de oplossing.*

In het eerste deel, het vooronderzoek is onderzocht wat de bestaande brugoplossingen zijn die toegepast worden voor overspanningen van 60 tot 100 meter. De sterke en zwakke punten van deze oplossingen zijn belicht in relatie tot een mogelijk alternatief in geprefabriceerd beton. Vervolgens zijn twee representatieve toepassingsituaties opgesteld om een oplossing te kunnen ontwerpen. Hiermee is in hoofdstuk 4 het programma van eisen, wensen en randvoorwaarde opgesteld waar de oplossing aan moet voldoen.

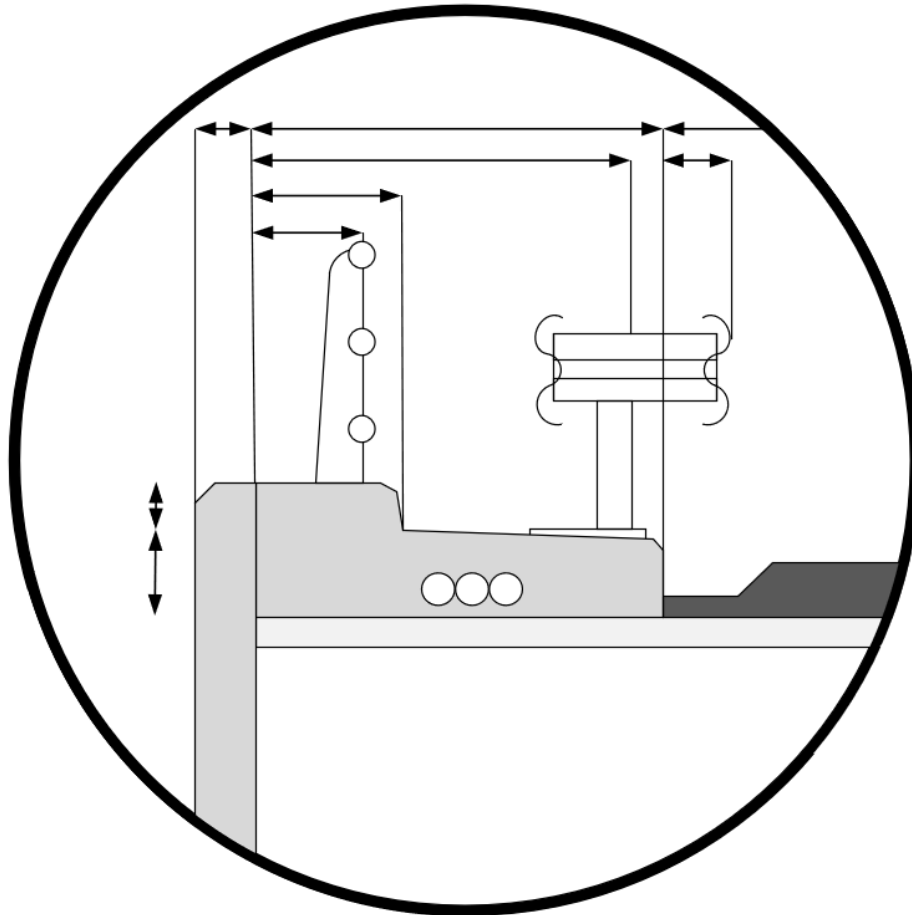
In het tweede deel van het rapport, de variantenstudie, zijn verschillende varianten geformuleerd om een prefab brugdek met een overspanning van 60 tot 100 meter mogelijk te maken. In de hoofdstukken 6, 7 en 8 zijn oplossingen beschreven voor onderdelen van de constructie. Om de verschillende oplossingsrichtingen te kunnen vergelijken zijn een aantal samengestelde varianten opgesteld. Tenslotte zijn deze varianten in hoofdstuk 9 geanalyseerd met behulp van een multicriteria-analyse.

In het derde deel van het rapport is de meest geschikte variant van de variantenstudie, de samengestelde liggerbrug verder uitgewerkt. Het ontwerp van de liggers, de voorspanning en het totale brugdek is beschreven. Vervolgens is de toetsingsmethode beschreven, hiermee is het ontwerp ontworpen en getoetst om te controleren of de samengestelde liggerbrug constructief mogelijk is. Dit ontwerp is in hoofdstuk 12 geanalyseerd op de mogelijkheden van een overspanning van 100 meter. Ook zijn de mogelijke optimalisaties en de nog openstaande problemen beschreven.

Tenslotte zijn in het laatste hoofdstuk de conclusies van het onderzoek en het antwoord op de hoofd- en deelvragen beschreven. Ook zijn er aanbevelingen gedaan hoe het onderzoek naar de samengestelde liggerbrug voortgezet kan worden.

# Deel I: Vooronderzoek

---



*Het eerste deel van het rapport is het vooronderzoek. In dit deel wordt begonnen met het analyseren van de bestaande brugoplossingen om te onderzoeken wat hun sterke en zwakke punten zijn en waar de kansen liggen voor een oplossing in prefab beton. Vervolgens is vastgesteld waar de oplossing toegepast kan worden en hoe dit het ontwerp beïnvloed. Tenslotte is met deze informatie een programma van eisen, wensen en randvoorwaarde opgesteld waaraan het ontwerp moet voldoen.*

---

## 2. Bestaande brugoplossingen

Om in beeld te krijgen wat op dit moment de oplossingen zijn om een overspanning te bouwen van 60 tot 100 meter is gekeken hoe in het verleden een overspanning van 60 tot ongeveer 100 meter is gebouwd in Nederland. Ook biedt deze verkenning de mogelijkheid om de toepassing van het te ontwerpen brugdeksysteem te verkennen. Tenslotte kan hieruit afgeleid worden waar de mogelijke kansen voor een prefab betonnen oplossingen liggen en wat de mogelijke nadelen zijn vergeleken met bestaande oplossingen.

### 2.1 Viaducten over de snelwegen

De eerste constatering is dat bruggen met een overspanning van 60 tot 100 meter bijna allemaal over het water gebouwd zijn [2]. Voor het overbruggen van extreem brede snelwegen is er in bijna alle gevallen voor gekozen om een viaduct te bouwen met meerdere tussensteunpunten tussen de rijbanen. Een voorbeeld van een dergelijk viaduct is te zien in Figuur 2-1. Dit viaduct overbrugt met twee overspanningen 10 rijstroken. Uitzonderingen zijn bijvoorbeeld enkele spoorbruggen en voetgangersbruggen die als stalenbrug zijn gebouwd en wel een overspanning over de snelweg hebben met een overspanning groter dan 60 meter. Een andere uitzondering is een snelweg viaduct bij de kruising van de A4 en A5 dat uitgevoerd is als een in het werk gestorte kokerligger met een maximale overspanning van 66 meter [3].



*Figuur 2-1 het Lageweideviaduct over de A2 bij Utrecht met een totale lengte van ongeveer 94 meter en twee overspanningen van 47 meter.*

### 2.2 Stalen boogbrug

Een veel gebruikte oplossing om een afstand van 60 tot 100 meter te overbruggen is een stalen boogbrug met trek band. Dit type brug wordt zowel gebruikt als spoorbrug en als brug voor het wegverkeer. Wat opvalt is dat een relatief groot deel van de stalen boogbruggen in Nederland enkele tientallen meters groter zijn dan 100 meter.

Een belangrijk voordeel van deze stalen boogbruggen is dat een aanzienlijk deel van het werk geprefabriceerd kan worden. Hierbij wordt in de fabriek de boog in transporteerbare onderdelen geproduceerd. In de buurt van de bouwlocatie kunnen vervolgens de onderdelen gecombineerd worden tot de complete overspanning. Vervolgens kan de brug met behulp van wielvoertuigen of pontons naar de eindlocatie getransporteerd worden. Hierdoor is slechts een korte afsluiting van het water of het verkeer op de snelweg noodzakelijk.

Een aanzienlijk deel van deze boogbruggen is gebouwd in de periode van 1930 tot 1960, hierbij gaat het bijvoorbeeld om een aantal boogbruggen over het Amsterdam-Rijnkanaal en het Twentekanaal die gebouwd zijn bij de aanleg en verbreding van deze kanalen. Deze bruggen zijn ontworpen voor een veel lagere verkeerintensiteit en met veel minder kennis van vermoeiingsverschijnselen. Daarom hebben veel van deze bruggen te maken met

vermoeiingsverschijnselen. Deze problemen kunnen dermate ernstig worden dat tot afsluiten van de brug voor vrachtverkeer moet worden besloten, zoals is gebeurd bij de Merwedeburg in oktober 2016. Dit heeft het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat doen besluiten om drie stalenbruggen te vervangen door nieuwe betonnen exemplaren [4].



*Figuur 2-2 de Doesburgbrug over de IJssel met een overspanning van 89 meter.*

### **2.3 Stalen vakwerkbruggen**

Een andere oplossing die in Nederland vaak is toegepast is voor overspanningen van 60 tot 100 meter is de Stalen vakwerkbrug. Deze oplossing komt minder voor dan de boogbrug. Ook zijn de overspanningen gemiddeld korter en is de constructie ouder vergeleken met de stalen boogbrug. Ook is dit type oplossing vaker in gebruik als spoorbrug vergeleken met de stalenboogbrug die relatief gezien meer voor wegverkeer wordt gebruikt.

Dit type brug deelt veel van de voor- en nadelen met de stalenboogbrug, de brug kan in delen worden geprefabriceerd, die nabij de eindlocatie samengesteld worden tot een brug. Vervolgens kan de brug naar de eindlocatie getransporteerd worden. Deze oplossing is de afgelopen decennia niet vaak toegepast, dit komt waarschijnlijk omdat de vele verbindingen tussen de staven deze oplossing relatief duur maken.



*Figuur 2-3 de IJsselspoorbrug in Deventer met een overspanning van 96 meter.*



Figuur 2-4 de Spijkenisserbrug, met een overspanning van 100 meter, met hergebruikte overspanningen van de Moerdijkbrug.

## 2.4 Stalen Liggerbruggen

Een minder vaak in Nederland toegepaste oplossing voor dergelijke overspanningen is de stalen liggerbrug. Dit type brug is een aantal maal gebruikt om rivieren en kanalen te overspannen. Maar in de afgelopen 20 jaar is dit type niet toegepast voor dergelijke overspanningen. Het voordeel van dit type brug is, net als bij de stalen boog en-vakwerkbrug de bouwsnelheid, waarbij de rivier gebruikt kan worden om grote segmenten van de brug eenvoudig aan te voeren. Net als bij andere type stalen bruggen hebben ook deze te last van vermoeiingsproblemen. Versterking of vervanging van deze bruggen zijn de afgelopen jaren aan de orde geweest bij deze bruggen, of moeten nog aan de orde komen.



Figuur 2-5 de Middachterbrug, de A348 kruist hier een zijtak van de IJssel. Dit een liggerbrug met een overspanning van 79 meter.

## 2.5 Betonnen kokerbrug

Voor het overbruggen van rivieren en kanalen wordt in Nederland ook vaak gebruik gemaakt van een betonnen kokerbrug met een gebogen onderrand. Deze brug wordt, zeker bij grote overspanningen gebouwd als een uitbouwbrug waarbij vanaf de steunpunten de koker in segmenten wordt gestort. Deze segmenten worden vervolgens met na spanning aan elkaar verbonden. Indien ondersteuning tijdens de bouw geen probleem zijn kan dit type brug ook op een vaste bekisting gebouwd worden.

Door de gekozen bouwwijze, waarbij vanaf de steunpunten steeds aan beide zijden een nieuwe moot wordt gestort zijn er geen ondersteuning nodig. Het belangrijkste nadeel van dit type brug is de relatief lange bouwtijd. Deze lange bouwtijd en het feit dat er bijna niks geprefabriceerd kan worden maakt deze bruggen relatief duur. De Betonnen kokerbrug met en gebogen onder rand is in Nederlands voor veel overspanningen over vaarwegen gebouwd,

met overspanningen vanaf 100 meter wordt dit type brug populair, omdat bij de uitbouwmethode het scheepvaartverkeer nauwelijks wordt gehinderd.

Voor de overspanningen van 60 tot 90 meter is in Nederland niet vaak voor een oplossing in beton gekozen. Een uitzondering hierop zijn bijvoorbeeld de aanbruggen van de nieuwe Botlekbrug. Deze zijn uitgevoerd als in het werk gestorte kokerbruggen zonder verlopende constructiehoogte.



*Figuur 2-6 de John F. Kennedybrug in Maastricht, met een hoofdoerspanning van 112 meter.*



*Figuur 2-7. een van de aanbruggen van de nieuwe Botlekbrug*

## 2.6 Andere oplossingen

Naast de hierboven genoemde veel voorkomende oplossingen zijn er nog diverse andere oplossingen toegepast om een overspanning van 60 tot 100 meter te overbruggen. Zo zijn er over het Twentekanaal rond 1930 enkel betonnen boogbruggen gebouwd. Een techniek die nu vanwege de arbeidsintensieve bouwmethode niet meer wordt toegepast. Een ander opvallend voorbeeld van een brug van 100 meter is de recent voltooide Daphne Schippersbrug over het Amsterdam-Rijnkanaal in Utrecht. Dit is een de weinige hangbruggen van Nederland. Een andere oplossing die opvalt is de Louis Raemaekersbrug in Roermond, deze brug bestaat uit geprefabriceerde liggers die zijn opgelegd op uitkragende betonnen liggers zodat een totale overspanning van 80 meter mogelijk is, deze methode is vaker toegepast in België.



*Figuur 2-8 de Louis Raemaekersbrug in Roermond met een overspanning van 80 meter.*

## 2.7 Geen standaardisatie

Hoewel de hierboven geanalyseerde oplossingen zeer verschillend zijn, hebben ze een ding gemeen, dat ze onderscheid van bruggen korter dan 60 meter, er vind bijna geen standaardisatie plaats. Veel bruggen korter dan 60 meter worden op dit moment gebouwd met gestandaardiseerde liggerprofielen. Bruggen die langer zijn hebben juist gemeen dat het allemaal unieke ontwerpen zijn die specifiek voor die overspanning ontworpen zijn. Hierbij moet opgemerkt worden dat incidenteel een brugontwerp meerdere keren is gebruikt, bijvoorbeeld over het Amsterdam-Rijnkanaal waar bij de verbreding een aantal maal dezelfde boogbrug is gebouwd.

## 2.8 Maximale overspanning

Tijdens deze verkenning van de huidige oplossingen is gekeken naar overspanningen van 60 tot ongeveer 100 meter. Het viel op dat een aanzienlijk deel van de onderzochte kanaal bruggen een hoofdoverspanning hebben van 100 tot 120 meter. Dit komt vaak voor bij de stalenboogbruggen en kleinere betonnen uitbouwbruggen. Om een prefab betonnen ontwerp te hebben dat kan concurreren met deze oplossingen zou het dus wenselijk kunnen zijn om een systeem te hebben dat een maximale overspanning van 120 meter zou hebben. Op deze manier zijn ook meer overspanningen met een scherpe kruisingshoek, bijvoorbeeld over een snelweg mogelijk.

Tegelijk moet ook opgemerkt worden dat een deel van de overspanningen korter zou kunnen zijn indien dat tot een grote kostenbesparing zou lijden. De pijlers zouden bijvoorbeeld dicht bij de waterkant geplaatst kunnen worden waardoor deze net binnen de marge van 100 meter zou vallen. De resterende stukken kunnen dan als aanbrug op een traditionele manier gebouwd worden. Dit voorbeeld is goed te zien op Figuur 2-9, deze brug over het Twentekanaal is 117 meter lang, maar het kanaal zelf is ongeveer 70 meter breed. Ondanks dat bij deze brug de overspanning dus groter is dan 100 meter zou een oplossing geschikt tot 100 meter nog steeds een oplossing kunnen zijn. wel moet opgemerkt worden dat brugpijlers niet te dicht bij de over gebouwd mogen worden om deze te beschermen tegen aanvaringen

Ook is het mogelijk om lange liggers te combineren met een uitkragende constructie zoals is toegepast bij de Louis Raemaekersbrug in Roermond, waardoor nog langere overspanningen mogelijk zijn. Mede hierdoor is besloten om het eerder voorgestelde doel van 100 meter te gebruiken als doel voor de maximale overspanning.





Figuur 2-9 de Polbrug over het Twentekanaal, met een overspanning van 117 meter.

## 2.9 Mogelijke voordelen voor een prefab betonnen oplossing

Uit de analyse van de bestaande situatie volgen een aantal mogelijke voordelen van een prefab betonnen oplossing voor overspanningen van 60 tot 100 meter, deze zijn hieronder opgesomd.

### 2.9.1 Kansen als snelwegviaduct

Uit het bestuderen van de gebouwde bruggen in Nederland kan geconcludeerd worden dat er bijna geen viaducten over de snelwegen zijn gebouwd die langer zijn dan 60 meter. De vraag is of dit komt omdat er geen vraag is naar dergelijke overspanningen, of dat er geen geschikte oplossing beschikbaar is voor deze overspanning binnen het gestelde budget. Dit wordt het meest waarschijnlijk geacht. Het meest geschikte alternatief om een brug met een grote overspanning over de snelweg te bouwen is de stalen boog- of vakwerkbrug. Deze hebben beiden een veel grotere kostprijs dan het toevoegen van extra steunpunten, zelfs als de aannemer financieel bestraft wordt voor de extra hinder die dat veroorzaakt. Een prefab betonnen oplossing zonder tussensteunpunten is dus aantrekkelijk als deze een lagere kostprijs heeft dan de alternatieven in staal. Hierbij kan er vanuit worden gegaan dat Rijkswaterstaat het voorkomen van tussensteunpunten zo belangrijk vindt dat de meer prijs van een viaduct zonder tussensteunpunten met een grotere overspanning geaccepteerd wordt.

### 2.9.2 Goedkoper dan stalen brugoplossingen

De verwachting is dat een prefab betonnen brugoplossing geschikt voor overspanningen van 60 tot ongeveer 100 meter aanzienlijk goedkoper kan zijn dan een stalen vakwerk of boogbrug. Een stalen boogbrug is immers een bijzonder dure constructie, dit komt bijvoorbeeld door al het hoogwaardige laswerk dat noodzakelijk is. Ook de hoge eisen die tegenwoordig worden gesteld met betrekking tot vermoeiing zorgen ervoor dat stalen bruggen een hogere kostprijs hebben dan betonnen alternatieven. Een prefab betonnen oplossing kan dus een aantrekkelijk alternatief zijn voor overspanningen die op dit moment in staal worden uitgevoerd als deze een lagere kostprijs heeft.

Andere voordelen van een prefab betonnen oplossing ten opzichten van een oplossing in staal is de lagere geluidsproductie door passerend verkeer en een verminderde radarreflectie, wat de veiligheid van de scheepvaart ten goede komt.

### **2.9.3 Kortere bouwtijd dan een betonnen brug**

Een belangrijk nadeel van de brugoplossingen in beton die op dit moment in Nederland gebruikt zijn voor overspanningen van 60 tot 100 meter is de langdurige bouwtijd en de hoge kosten die gepaard gaan met de in situ constructie. Een prefab betonnen oplossing kan de bouwtijd drastisch te verkorten, op dezelfde manier zoals dat ook mogelijk is voor viaducten met een overspanning kleiner dan 60 meter.

### **2.9.4 Standaardisatie**

Een van de voordelen van de betonnen prefab viaducten is dat er een grote mate van standaardisatie is, hierdoor kan er efficiënter worden geproduceerd, wat weer leidt tot een kosten reductie. Indien dit ook bereikt kan worden voor viaducten groter dan 60 meter, dan kan ook voor de grotere overspanningen een kosten reductie verwacht worden.

## **2.10 Mogelijke nadelen van prefab betonnen oplossing**

Naast de verwachte voordelen van een prefab betonnen oplossing zijn er ook verwachte nadelen die het toepassingsgebied kunnen beperken. Hier zal in het op te stellen programma van eisen en het ontwerpproces aandacht aan geschonken worden om de verwachte nadelen zo veel mogelijk te beperken.

### **2.10.1 Constructiehoogte**

Zowel de stalen vakwerkbrug en stalenboogbrug hebben als voordeel dat het rijdek relatief dicht bij de onderzijde van de brugconstructie kan worden geplaatst. Dit heeft als voordeel dat er kosten bespaard kan worden op de op- en afrit van het brugdek. Ook de betonnen uitbouwbrug en de stalenliggerbrug hebben veelal een verlopende constructiehoogte, zodat deze in het midden van de overspanning dunner is dan bij de steunpunten.

Bij een prefab betonnen brug verloopt de constructiehoogte niet over de overspanning en is deze dus dikker dan het brugdek van een oplossing in staal, zodat het risico bestaat dat de financiële winst die gehaald wordt met de goedkopere constructie verloren gaat door kosten voor de op- en afritten. Ook zal inzetbaarheid van deze oplossing afnemen indien er lange op- en afritten noodzakelijk zijn, iets waar niet altijd ruimte voor aanwezig is. Daarom is ernaar gestreefd deze constructiehoogte zoveel mogelijk te beperken.

### **2.10.2 Eigengewicht van de constructie**

Een prefab betonnen constructie zal na verachting een veel groter eigengewicht hebben vergeleken met een staalconstructie van dezelfde overspanning. In een situatie waar een stalen brug vervangen wordt door een betonnen prefab constructie is de kans bijzonder groot dat bestaande brugpijlers en funderingen versterkt of compleet vervangen moeten worden.

### **2.10.3 Esthetische waarde**

De keuze voor een boogbrug is in een aantal gevallen niet alleen gemaakt op basis van de gewenste overspanning, maar ook op basis van esthetische eisen. Zeker als de brug in stedelijk gebied gebouwd moet worden kan dit een belangrijke factor zijn, denk bijvoorbeeld aan de Enneüs Heermabrug in Amsterdam, zichtbaar in Figuur 2-10. De vraag is of een geprefabriceerde betonnen brug een alternatief kan zijn voor deze stalen boogbrug. Tegelijk biedt een prefab betonnen oplossing ook nieuwe kansen voor architecten om tot andere ontwerpen te komen die ook als visueel aantrekkelijk worden.



*Figuur 2-10 de Enneüs Heermabrug In Amsterdam met twee hoofdovertoppingen van 75 meter.*

## 3. Toepassingsituaties

Om een prefab oplossing te kunnen ontwerpen zijn twee mogelijke representatieve gebruikssituaties gedefinieerd. Deze situaties zijn bepaald aan de hand van de verwachte toepassing van het te ontwerpen systeem zoals geformuleerd in analyse van de bestaande brugoplossingen. Ook zijn deze situaties gebaseerd op de nu bestaande situaties waar een brug met een overspanning van 60 tot ongeveer 100 meter is gebouwd. In hoofdstuk 4 is vervolgens met behulp van deze toepassingsituaties het programma van eisen, wensen en de randvoorwaarden worden opgesteld.

### 3.1 Algemeen

Spanbeton is zowel actief in Nederland als in België, maar omdat de verwachte toepassing vooral in Nederland licht is besloten om in de ontwerpfase alleen rekening te houden met de in Nederland geldende regels en richtlijnen. Bij het opstellen van het ontwerp zal ook specifiek met de Nederlandse situatie rekening gehouden worden, dit betekend bijvoorbeeld veel aandacht voor een slanke constructie, iets wat in Nederland een belangrijker eis is vergeleken met de omliggende landen.

Om het aantal ontwerpbelastingen te verminderen zal in de toepassingsituatie alleen gerekend worden met de verkeersbelasting zoals deze geformuleerd is voor autosnelwegen in Nederland. Ook is er alleen rekening gehouden met het gebruik als verkeersbrug in de ontwerpfase van dit onderzoek. Hierdoor wordt het aantal mogelijke toepassingsituaties aanzienlijk verkleind. Aangezien het ontwerp geschikt moet zijn als autosnelwegviaduct wordt de toepassingsituatie gebaseerd op de richtlijnen van Rijkswaterstaat, zoals de Richtlijn Ontwerp Kunstwerken, ROK [5] en de Richtlijn Ontwerp Autosnelwegen, ROA [6]. Dit heeft tot gevolg dat er gerekend moet worden met de hoogste gevolgklasse CC3, zoals voorgeschreven door de ROK [5] voor bruggen die onderdeel zijn van de hoofdinfrastructuur. Deze gevolgklasse wordt in Nederland ook vaak door lagere overheden voorgeschreven.

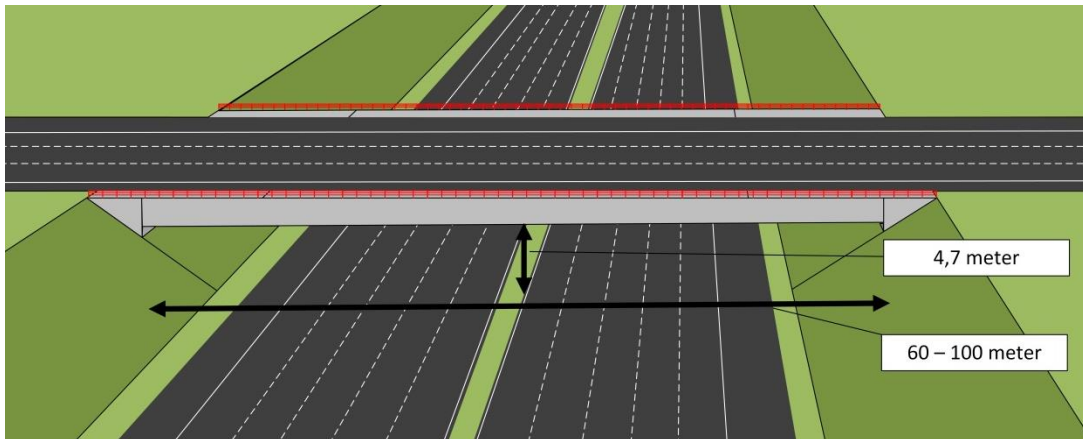
De huidige liggersystemen geschikt voor overspanningen kleiner dan 60 meter worden breed toegepast. Naast de veel voorkomende toepassing als verkeersbrug, worden deze bijvoorbeeld ook gebruikt als spoorbrug, ecoduct of voetgangersbrug. In een later vervolgonderzoek kan er nog onderzoek gedaan worden naar de effecten van deze andere toepassingen op het brugdek ontwerp.

### 3.2 Omschrijving van de toepassingsituaties

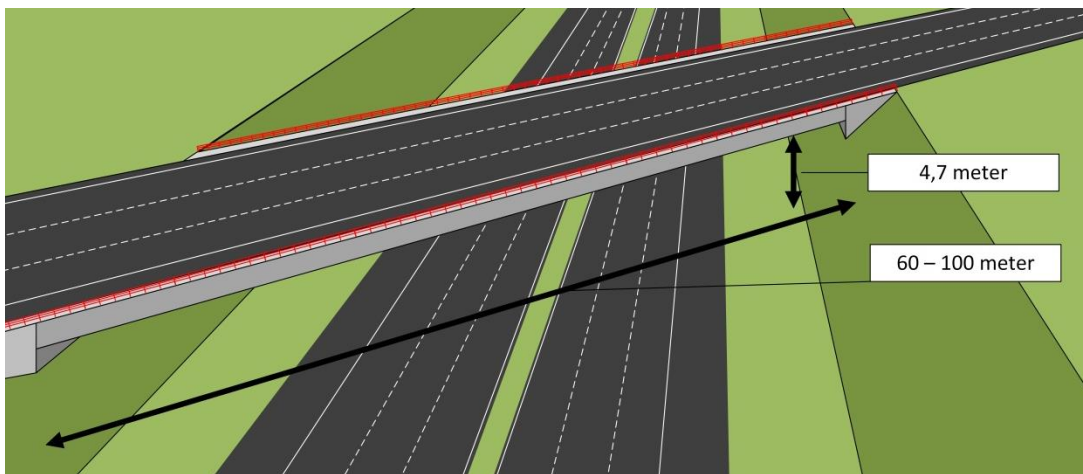
Om een ontwerp te maken dat zo geschikt mogelijk is voor de verwachte toepassing zijn twee toepassingsituaties bepaald. De situaties beschrijven een mogelijke omgeving waar het ontwerp toegepast kan worden. Met behulp van deze omgeving kunnen vervolgens eisen, wensen en randvoorwaarden worden gedefinieerd voor het programma van eisen.

#### 3.2.1 Toepassingsituatie 1: Snelwegviaduct

De eerste toepassingsituatie is de toepassing als viaduct over een zeer brede snelweg of met een scherpe kruisingshoek over een snelweg, om op deze manier de snelweg te overspannen zonder extra tussen steunpunten. Hierbij wordt er vanuit gegaan dat er een snelweg onder het brugdek door gaat en dat er een snelweg over het brugdek zelf wordt aangelegd. Omdat er in deze toepassingsituatie wegverkeer is onder het brugdek zal de ontworpen oplossing ook bestand moeten zijn tegen de daarbij behorende aanrijbelasting.



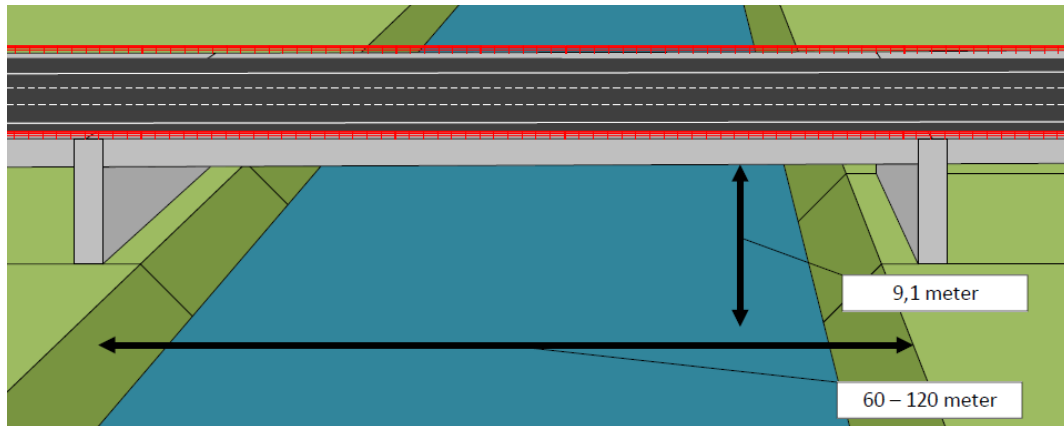
Figuur 3-1 een schets van een mogelijke toepassing als viaduct over een brede snelweg.



Figuur 3-2 een schets van een mogelijke toepassing als viaduct over een snelweg met een zeer scherpe kruisingshoek

### 3.2.2 Toepassingssituatie 2: Kanaalbrug

De tweede toepassings situatie is de toepassing als snelwegviaduct over een kanaal of rivier met scheepvaart. Denk hierbij aan bijvoorbeeld het Amsterdam-Rijnkanaal of de IJssel. Er wordt uitgegaan van een doorvaarthoogte van 9,1 meter ten opzichten van de Maatgevende Hoge Waterstand (MHWS) zoals die door Rijkswaterstaat voor hoofdtransportassen voorgeschreven is in de Richtlijnen vaarwegen. De hoogte van het brugdek wordt dan beïnvloed door de constructiehoogte en de ligging van de MHWS ten opzichten van de oeverhoogte. De constructiehoogte is in eerste instantie geschat op 4 meter voor een overspanning van 100 meter. Het verschil tussen de MHWS en de over is geschat op 0,5 meter. Zodat de hoogte van het brugdek afgerond uitkomt op 13 meter boven het maaiveld. Bestudering van een aantal vergelijkbare bruggen leert dat dit een realistische schatting is [7]. Ook wordt er in deze situatie vanuit gegaan dat er scheepvaartverkeer mogelijk is op het kruisende water. Voor deze Toepassings situatie zou het ook voordelig zijn als een overspanning tot ongeveer 120 meter mogelijk is omdat dan praktisch alle kanalen overspannen kunnen worden.



Figuur 3-3 een schets van de mogelijke toepassing als kanaalbrug

### 3.2.3 Verkeersbelasting in de toepassingsituaties

In beide situaties zal uitgegaan worden van dezelfde verkeersbelasting omdat in beide situaties een autosnelweg gebruik maakt van het brugdek. Voor beide toepassingsituaties wordt dus gebruik gemaakt van dezelfde verkeersbelasting. Beide toepassingsituaties hebben wel ieder hun eigen invloed op de eisen en randvoorwaarde waar de oplossing aan moet voldoen.

## 3.3 Normen en richtlijnen

De toepassingssituatie en de bijbehorende belastingen zijn bepaald met behulp van een aantal normen, richtlijnen en aanbevelingen die toegepast dienen te worden in de toepassingsituaties. Hierbij is uitgegaan van de meest recente situatie op 1 November 2018.

*Nederlandse normen:*

- NEN-EN 1990 Grondslag van het constructief ontwerp +A1+A1/C2 (2011)
  - Nationale bijlage NEN-EN 1990 +A1+A1/C2 (2011)
- NEN-EN 1991-1-1 Belastingen op constructies: Algemene belastingen +C1 (2011)
  - Nationale bijlage NEN-EN 1991-1-1 +C1 (2011)
- NEN-EN 1991-1-4 Belastingen op constructies: Windbelastingen +A1+C2 (2011)
  - Nationale bijlage NEN-EN 1991-1-4 +A1+C1 (2011)
- NEN-EN 1991-1-5 Belastingen op constructies: Thermische belastingen +A1 (2011)
  - Nationale bijlage NEN-EN 1991-1-5 +A1 (2011)
- NEN-EN 1991-1-7 Belastingen op constructies: Buitengewone belastingen +C1+A1(2015)
  - Nationale bijlage NEN-EN 1991-1-7 +C1 (2011)
- NEN-EN 1991-2 Belastingen op constructies: Verkeersbelasting op bruggen +C1 (2015)
  - Nationale bijlage NEN-EN 1991-2 +C1 (2011)

*Richtlijnen van Rijkswaterstaat:*

- Richtlijn Ontwerp Autosnelwegen (ROA) versie 1.1, november 2017
- Richtlijnen Vaarwegen, december 2017
- RTD1001 Richtlijn Ontwerp Kunstwerken (ROK) versie 1.4, april 2017
  - En Bijlagedocument deel A en B
- RTD1009 Richtlijn voor het ontwerp van asfalt wegverharding op betonnen en stalen brugdekken, versie 1.7 maart 2017
- RTD1010 Standaarddetails voor betonnen bruggen, versie 1.0, april 2017

### 3.4 Omschrijving van het brugdek

Bij het ontwerp van het standaard brugdek wordt uitgegaan van een recht niet gebogen brugdek met een rechte kruisingshoek. Aangenomen wordt dat het brugdek niet dusdanig schuin ligt dat er in de berekening van de brugdekconstructie rekening mee moet worden gehouden.

#### 3.4.1 Gevolgklasse

Aangezien het brugdek moet voldoen aan de eisen gesteld in de ROK [5] moet het brugdek voldoen aan ontwerplevensduurklasse 4, dit heeft tot gevolg dat er gerekend is met de zwaarste gevolgklasse, CC3.

#### 3.4.2 Ontwerplevensduur

Tijdens het ontwerp wordt er vanuit gegaan dat de ontwerplevensduur van het brugdek 100 jaar bedraagt. Dit is gebruikelijk voor alle bruggen van Rijkswaterstaat die onderdeel zijn van de hoofdinfrastructuur.

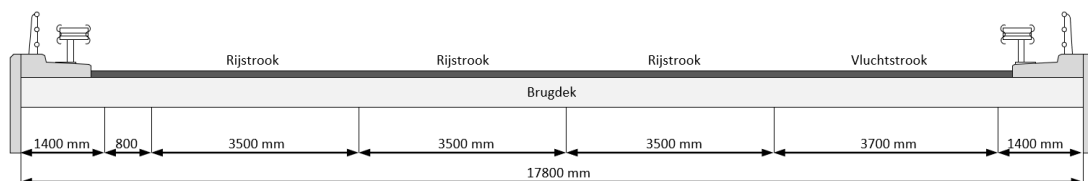
#### 3.4.3 Statisch systeem

Voor beide situaties zal uitgegaan worden van een statisch bepaald brugdek. Dit vereenvoudigd de berekening en zorgt ook voor de breedste toepassingsmogelijkheden. Hier is mede toe besloten omdat op dit moment voor de te bestuderen overspanningslengte zowel statisch bepaalde als statisch onbepaalde oplossingen zijn toegepast. Een statisch bepaalde oplossing is dus breder toepasbaar. In een eventueel vervolgonderzoek kan er dan nog aandacht besteed worden aan een statisch onbepaalde oplossing en de mogelijke voordelen daarvan.

#### 3.4.4 Indeling van het brugdek

De indeling van het brugdek wordt zodanig ontworpen dat deze geschikt is voor gebruik als autosnelweg. Hierbij wordt de indeling van het brugdek gebaseerd op de Richtlijn Ontwerp Autosnelwegen van Rijkswaterstaat [6]. Voor beide mogelijke toepassingen zoals geformuleerd in paragraaf 3.2 zal dezelfde indeling van het brugdek worden aangehouden.

Het brugdek in de toepassings situatie bestaat uit drie rijstroken van ieder 3,5 meter breed, hierbij is gemeten van rand kantstreep tot halverwege de deelstreep. De kant streep heeft een breedte van 0,20 meter. Naast deze kantstreep is een redresseerstrook aanwezig met de minimale breedte van 0,60 meter. Aan de andere zijde van het brugdek is een vluchtstrook van 3,5 meter aanwezig. Naast deze redresseer en-vluchtstrook bevindt zich de geleiderail constructie. Het brugdek zal maximaal 1,4 meter doorlopen tot de rand, indien deze afstand grote wordt dan 1,4 meter zal deze als een aparte rijweg moeten worden beschouwd. De randen van het brugdek worden tevens voorzien van een schamkant en leuning. De totale maximale breedte van het brugdek is dan: 17,8 meter. In Figuur 3-4 is dit brugdek geschetst.



Figuur 3-4 een schets van de brugdek indeling met afmetingen in millimeter.

Deze keuze voor deze dwarsopbouw van het brugdek is gemaakt vanuit het verwachte toepassingsgebied van het ontwerp als snelwegviaduct, of als overbrugging van een snelweg. Deze keuze voor drie rijstroken is gebaseerd op het gegeven dat steeds meer snelwegen in Nederland meer dan twee rijstroken hebben. De keuze voor de breedte van 17,8 meter is ook realistisch voor lokale wegen die snelwegen kruisen omdat deze vaak voorzien zijn van meerder rijstroken die dienen als opstel vak voor de verkeerslichten.

Ook voor lokale en provinciale wegen is de verwachting dat de breedte van de brugdekken zal toenemen. In een situatie waar een bestaande brug vervangen moet worden is de kans dus

zeer groot dat voor een breder exemplaar wordt gekozen. Daarom is deze breedte van 17,8 meter een goede representatieve schatting voor het werkelijke gebruik van de brugoplossing.

Wel moet er opgemerkt worden dat een breder brugdek zorgt voor een kleinere gemiddelde belasting per meter gemeten loodrecht op de langs richting van het brugdek, de zwaarste verdeelde belasting en zwaarste as lasten kunnen immers maar op een rijstrook aangebracht worden. Afhankelijk van de breedte en de dwarsstijfheid van het brugdek zal deze zwaarste belasting zich spreiden over het brugdek. Voor smallere brugdekken zal dit geschetste brugdek dus een te positieve inschatting geven van de capaciteiten van de oplossing.

#### **3.4.5 Randafwerking van het brugdek**

Bij de betonnen liggerviaducten met een overspanning kleiner dan 60 meter is het gebruikelijk dat de zijkant van een brugdek afgewerkt wordt met een zogenaamde randligger. In de toepassingssituatie zal het brugdek niet voorzien zijn van een dergelijke speciale randligger. Als alternatief zal er een speciale randbelasting aangebracht worden die dient om de aanwezigheid van een esthetisch rand element te simuleren. In paragraaf 3.6.6 is beschreven worden hoe deze belasting bepaald is.

### **3.5 Systeem grenzen**

Tijdens het ontwerp proces zal er uitsluitend gekeken worden naar het ontwerp van het brugdek. De onderbouw, voegovergangen, fundering en op- en afritten van het brugdek worden dus niet mee ontworpen. De fundering wordt als volledig stijf aangenomen.

#### **3.5.1 Opleggingen van het brugdek**

Tijdens de variantenstudie is aangenomen dat het brugdek op de voor prefab liggerbruggen gebruikelijke manier opgelegd kan worden, dus op gewapende rubberen oplegblokken. Alleen in het geval van varianten die duidelijk niet op deze manier opgelegd kunnen worden wordt hiervan afgeweken. Voor de gekozen variant is gebleken dat dit een goede aanname is waardoor dit ook is toegepast bij het uitwerpen van het ontwerp van de samengestelde liggerbrug.

### **3.6 Belastingen op het brugdek**

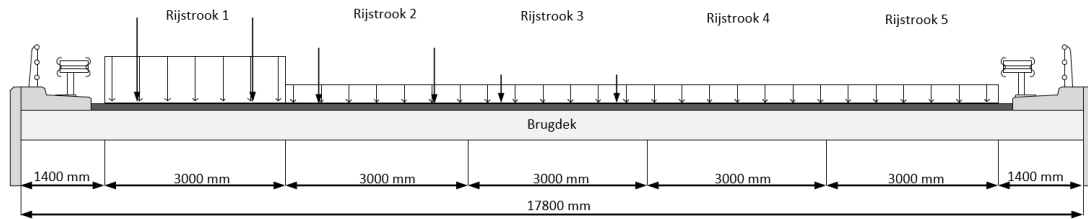
Bij het bepalen van de belastingen is ernaar gestreefd om een representatieve gemiddelde belasting te vinden om zo een zo goed mogelijke voorspelling te kunnen maken in hoeverre het ontwerp geschikt is voor de toepassingssituaties en of de gewenste overspanningen haalbaar zijn.

#### **3.6.1 Verkeersbelasting**

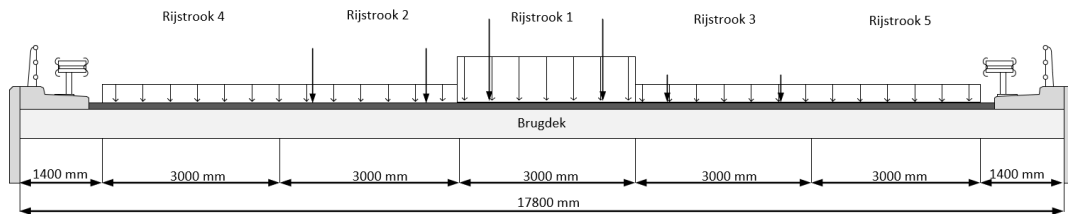
De verkeersbelasting op het brugdek wordt bepaald volgens NEN-EN 1991-2 [8]. Hierbij wordt voor de belasting op het hele brugdek belastings-model 1 (LM1) aangehouden. Dit belastingmodel kan toegepast worden omdat de lengte waarop de belasting aangrijpt in alle te bestuderen toepassingssituaties kleiner is dan 200 meter. Bij het opstellen van deze belasting is aangenomen dat de draagconstructie symmetrisch is in de dwarsrichting.

Voor dit belastings-model wordt het brugdek ingedeeld in theoretische rijstroken volgens NEN-EN 1991-2+C1 [8], tabel 4.1. Hierbij worden drie indelingen gemaakt. Indeling 1 heeft de zwaarste belasting aan de zijkant van het brugdek geplaatst, voor het grootste buigende moment in langs richting. In indeling 2 is de zwaarste belasting centraal op het brugdek geplaatst voor het grootste positieve buigende moment in dwarsrichting. Indeling 3 is juist gekozen voor het grootste negatieve buigend moment in het brugdek. De drie toegepaste indelingen zijn geschetst in Figuur 3-5, Figuur 3-6 en Figuur 3-7. In Tabel 3-1 zijn belastingen behorend bij de rijstroken weergegeven. Voor de  $\alpha_{Q1}$ ,  $\alpha_{q1}$  en  $\alpha_{qr}$  is 1,0 aangehouden volgens NEN-EN 1991-2 NB [9]. Er geldt  $\alpha_{qi} = 1,15$  voor de doelgroep rijstrook voor vrachtverkeer en  $\alpha_{qi} = 1,40$  voor de overige rijstroken.

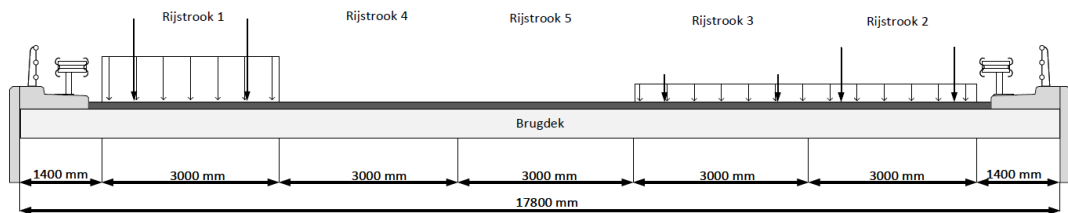




Figuur 3-5 een schets van de theoretische rijstrookindeling voor indeling 1.



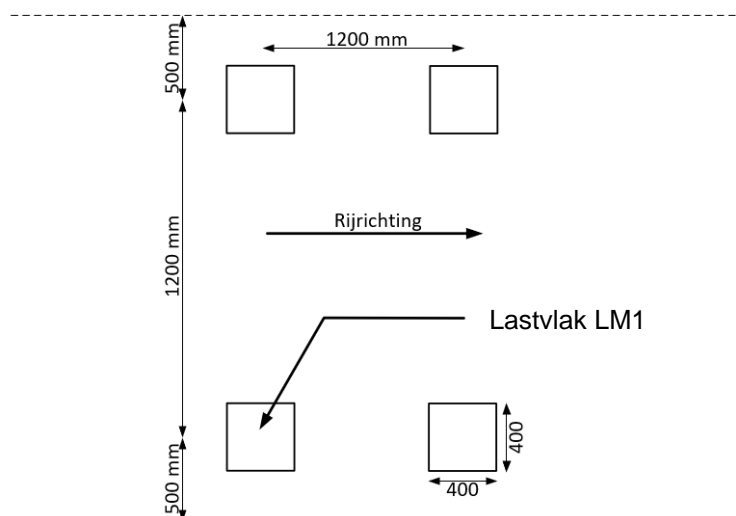
Figuur 3-6 een schets van de theoretische rijstrookindeling voor indeling 2.



Figuur 3-7 een schets van de theoretische rijstrookindeling voor indeling 3.

Rijstrook:	Tandemstelsel aslast $\alpha_{q_i} Q_{ik}$	Gelijkmatig verdeelde belasting (UDL) $\alpha_{q_i} q_{ik}$
Rijstrook 1	300 [kN]	10,35 [kN/m <sup>2</sup> ]
Rijstrook 2	200 [kN]	3,5 [kN/m <sup>2</sup> ]
Rijstrook 3	100 [kN]	3,5 [kN/m <sup>2</sup> ]
Rijstrook 4	-	3,5 [kN/m <sup>2</sup> ]
Rijstrook 5	-	3,5 [kN/m <sup>2</sup> ]

Tabel 3-1 een overzicht van de belastingen behorend bij de verschillende rijstroken.



Figuur 3-8 een schets van het tandemstelsel zoals het toegepast wordt voor belasting model 1.

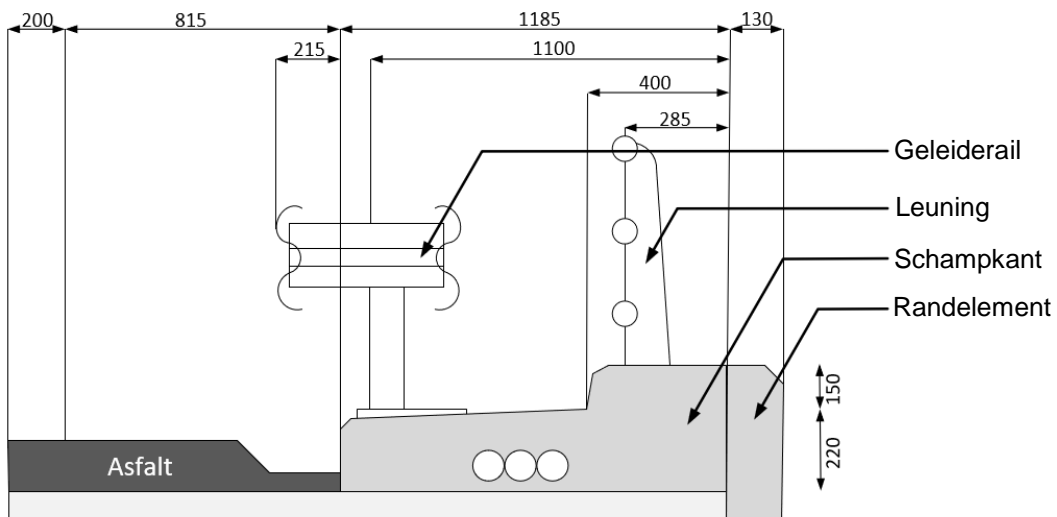
De rem en centrifugaal krachten veroorzaakt door de verkeersbelasting worden alleen meegenomen bij de berekening van de opleggingen en spelen dus geen rol bij het ontwerpen van het brugdek.

### 3.6.2 Asfalt

Een wegverharding van asfalt is aanwezig op het brugdek in de toepassings situatie. De asfalt laag is aanwezig over het gehele brugdek met uitzondering van een strook van 1185 mm breed aan de randen van het brugdek. De asfalt verharding steekt 215 mm door onder de geleiderail, de afschuining die overgaat in een goot is dus niet in mindering gebracht op de belasting zoals zichtbaar in Figuur 3-9. Voor het volumiek gewicht van het asfalt wordt  $23,0 \text{ kN/m}^3$  aangehouden zoals voorgeschreven door de ROK, art. A.6 (2017). De dikte van deze asfaltverharding in millimeter is gegeven door de formule  $140 + (L - 30)/4$ , waarbij L de lengte van de grootste overspanning in meter is en de dikte minimaal 140 en maximaal 170 mm is. Deze asfalt laag is gebaseerd op de dikste standaardoplossing voor betonnen kunstwerken volgens RTD1009:2017, art.5.2.2 [10].

$p_{\text{asfalt}} = 3,5 \text{ [kN/m}^2\text{]}$	(overspanningslengte = 70 m, asfalt laagdikte = 150 mm)
$p_{\text{asfalt}} = 3,5 \text{ [kN/m}^2\text{]}$	(overspanningslengte = 80 m, asfalt laagdikte = 153 mm)
$p_{\text{asfalt}} = 3,6 \text{ [kN/m}^2\text{]}$	(overspanningslengte = 90 m, asfalt laagdikte = 155 mm)
$p_{\text{asfalt}} = 3,6 \text{ [kN/m}^2\text{]}$	(overspanningslengte = 100 m, asfalt laagdikte = 158 mm)

### 3.6.3 Schampkant



Figuur 3-9 een detail schets van de randafwerking zoals deze is gebruikt in de toepassings situatie.

Aan beide randen van het brugdek is een schampkant aangebracht. Deze is aangebracht op het brugdek vanaf de rand van het asfalt tot de rand van het brugdek, dit is 1185 mm in de toepassings situatie. Deze schampkant heeft een variërende hoogte van 220 mm direct aansluitend op het asfalt en een hoogte van 370 mm aansluitend op het randelement van het brugdek. In de schampkant zijn drie kabeldoorvoerbuizen aangebracht met een diameter van 90 mm. Deze hier gegeven schampkant is gebaseerd op het standaarddetail van zoals deze voorgesteld is in RTD1010:2017.

De belasting van deze betonnen schampkant is bepaald als een gelijkmatig verdeelde belasting over het oppervlakte van de schampkant. Hierbij zijn de afschuiningen verwaarloosd, maar de kabeldoorvoer buizen zijn meegenomen in de berekening van het oppervlakte van de doorsnede. Aangenomen is een volumiek gewicht van beton van  $25 \text{ kN/m}^3$ . Het oppervlakte van de doorsnede van deze schampkant is dan  $0,3016 \text{ m}^2$  over een breedte van 1185 mm. De belasting door het eigengewicht van deze schampkant wordt dan  $6,4 \text{ kN/m}^2$ .

$$p_{\text{schampkant}} = 6,4 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

### 3.6.4 Geleiderails

De belasting door het eigengewicht van de geleiderail zal als lijnbelasting op het brugdek geplaatst worden. Deze komt op 1100 mm vanaf de rand van het brugdek zoals zichtbaar is in Figuur 1-4. Hierbij is uitgegaan van een geleiderail type VLP 1R 133-60 zoals volgens ROK, art. 4.7.3.3 (2) gangbaar is op kunstwerken van Rijkswaterstaat. Deze geleiderail heeft een eigengewicht van 234 kg per 4 meter [11]. Dit geeft een lijnbelasting van ongeveer 0,56 kN/m op het brugdek, deze belasting is verhoogd tot 0,75 kN/m om rekening te houden met eventueel zwaardere geleiderail systemen.

$$q_{\text{geleiderail}} = 0,75 \text{ [kN/m]}$$

### 3.6.5 Leuning

In Figuur 3-9 is een standaard leuning geschetst zoals deze in de standaard details wordt aangeraden door Rijkswaterstaat. Omdat er veel verschillende ontwerpen leuningen mogelijk zijn is besloten het eigengewicht te baseren op die van de toegepaste geleiderailconstructie. De belasting door deze leuning op het brugdek wordt dan 0,75 kN/m. Deze belasting wordt geplaatst op een afstand van 285 millimeter van de rand van het brugdek, zoals geschetst in Figuur 3-9.

$$q_{\text{leuning}} = 0,75 \text{ [kN/m]}$$

### 3.6.6 Randelementen

Zoals vermeld in paragraaf 3.4.5 is er een extra lijnbelasting aangebracht worden op de rand van het brugdek om de aanwezigheid van een randelement te simuleren. De lijnbelasting van dit rand element is geschat uitgaand van een betonnen rand element met een hoogte van 1 meter en een dikte van 130 mm., dit geeft een lijnbelasting op de rand van 3,25 kN/m. Een alternatief is om te kiezen voor een lichtgewicht metalen randelement, het verwacht eigengewicht hiervan is lager dan deze 3,25 kN/m zodat besloten is deze waarde als conservatieve schatting voor de randbelasting aan te houden.

$$q_{\text{rand}} = 3,25 \text{ [kN/m]}$$

### 3.6.7 Windbelasting

Om het ontwerpproces te vereenvoudigen is er voor alle toepassingsituaties een windbelasting bepaald. Er is bij de windbelasting uitgegaan worden van de basiswindsnelheid die geldt voor windgebied II volgens NEN-EN 1991-1-4 NB [12]. Hierbij is ervoor gekozen om een gemiddelde waarde te berekenen voor de windbelasting en omdat verwacht wordt dat het ontwerp weinig binnen wind gebied I toegepast zal worden. Bij deze berekening is uitgegaan van een hoogte van het wegdek ten opzichten van het maaiveld van 13 meter.

In deze paragraaf is een schatting gemaakt voor een gemiddelde verticale windbelasting die werkt op het brugdek. De horizontale windbelasting speelt voor de krachtsverdeling van het brugdek geen rol, maar deze wordt wel bestudeerd in de analyse van de opleggingen. De verticale windbelasting is bepaald volgens NEN-EN 1991-1-4 [13] en de nationale bijlage: NEN-EN 1991-1-4 NB.

$$v_b = c_{dir} * c_{season} * v_{b,0} = 27,0 \text{ m/s, met } c_{dir}, c_{season} = 1,0$$

Voor windgebied II geldt  $K=0,234$  en  $n = 0,5$ . De jaarlijkse overschrijdingskans is volgens de norm  $p=0,01$ .

$$c_{prob} = \left( \frac{1-K \cdot \ln(-\ln(1-p))}{1-K \cdot \ln(-\ln(0,98))} \right)^n = 1,042$$

$$v_b = v_{b,k} * c_{prob} = 28,13 \text{ m/s}$$

Er is uitgegaan van terreincategorie II voor onbebouwd gebied, hier geldt  $z_0(m)=0,2$  en  $z_{min}(m)=4$ .

$$k_r = 0,19 \left( \frac{z_0}{0,05} \right)^{0,07} = 0,209 \text{ met } z_0 = 0,2 \text{ m}$$

De constructiehoogte van het brugdek is geschat op 4 meter, de onderzijde van het brugdek heeft een geschatte hoogte ten opzichten van het brugdek van 9 meter. Zodat de totale hoogte,  $z$ , gelijk is aan  $9+3=13$  meter.

$$c_r(z) = k_r \ln \frac{z}{z_0} = 0,839 \text{ voor } z_{\min} \leq z \leq z_{\max}$$

De orografiefactor is 1,0 uitgaand van een wegdek zonder helling.

$$v_m(z) = c_r(z) * c_o(z) * v_b = 23,60 \text{ m/s}$$

De turbulentie intensiteit,  $k_1 = 1,0$ .

$$l_v(z) = \frac{k_1}{c_o(z) * \ln(z/z_0)} = 0,25$$

$$C_e = \frac{(1 + 7 * l_v(z)) * \frac{1}{2} * \rho * v_m^2(z)}{\frac{1}{2} * \rho * v_b^2} = 1,93 \text{ met } \rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$$

De krachtcoëfficiënt voor bruggen is bepaald voor de verticale belasting  $c_{f,z} = 0,9$ .

$$C_z = c_{f,z} * c_e = 1,74$$

$$q_{p,z} = \frac{1}{2} * \rho * v_b^2 * C_z = 0,861 \text{ kN/m}^2$$

De maatgevende windbelasting die opgenomen wordt in de belastingcombinatie is de maximale waarde van  $\psi_0 * F_{p,z}$  en  $F_{p,z}$ , waarbij  $F_{p,z}$  de verticale stuwdruk is voor een situatie met verkeer op het brugdek, dus met een lagere basiswindsnelheid van 23 m/s.

$$q_{p,z}^* = \frac{1}{2} * \rho * v_b^2 * C_z = 0,624 \text{ kN/m}^2$$

De geschatte maatgevende waarde voor de verticale stuwdruk over het volledige brugdek wordt dan:

$q_{\text{wind}} = 0,63 \text{ [kN/m}^2\text{]}$
--

### 3.6.8 Thermische belasting

De thermische belasting wordt bepaald volgens NEN-EN 1991-1-5 en de nationale bijlage zoals deze voor Nederland verplicht is. Deze invloed van deze belasting is afhankelijk van de gekozen variant en kan dus ook pas bepaald worden met een gedetailleerd ontwerp. Aangezien het brugdek in eerste instantie alleen ontworpen is voor situaties zonder scherpe kruisingshoek is dit geen probleem, omdat in deze situaties meestal geen grote effecten zijn te verwachten door de thermische belasting.

### 3.6.9 Stootbelasting

Voor de toepassingssituatie waarbij er sprake is van wegverkeer onder het brugdek moet het brugdek sterk genoeg zijn om een aanrijding tegen de onder of zijkant van het brugdek te kunnen weerstaan. Hierbij moet de onderzijde de belasting kunnen afdragen naar steunpunten. Ook voor de opleggingen is deze aanrijbelasting dus van belang.

Deze aanrijbelasting is bepaald volgens NEN-EN 1991-1-7 [14] en de nationale bijlage [15]. Hierbij wordt uitgegaan van hoogte van de onderzijde van het brugdek van 4,7 meter, de minimale hoogte van een kunstwerk over de snelweg in Nederland. De stootbelastingen zijn gegeven voor een autosnelweg volgens de nationale bijlage. De belastingen treden niet gelijktijdig op.

$F_{dx} = 2000 \text{ [kN]}$	(aangebracht op een aangrijpingsoppervlakte van $2,00 \text{ m} * 0,25 \text{ m}$ )
$F_{a,\beta} = 600 \text{ [kN]}$	(aangebracht op een oppervlakte van $0,25 \text{ m} * 0,25 \text{ m}$ gemeten loodrecht op de werkrichting van de kracht met $0^\circ \leq \beta \leq 30^\circ$ )

Voor de toepassings situatie waarbij sprake is van kruisend scheepvaartverkeer moet rekening gehouden worden met aanvaring door een schip. NEN-EN 1991-1-7 (2015) geeft hiervoor een indicatieve waarde van 1MN. Deze waarde is minder dan de bot belasting gegeven voor aanrijdingen met vrachtauto's zodat deze waarde niet maatgeven is voor het ontwerp.

$$F_{\text{aanvaring schip}} = 1000 \text{ [kN]}$$

*(niet maatgevend)*

### 3.6.10 Aardbevingen

Zoals bepaald in de toepassings situatie zal het brugdek getoetst worden op de zwaarste gevolgklasse, CC3. De Richtlijn Ontwerp Kunstwerken, ROK schrijft voor dat een brugdek, dat in deze gevolgklasse valt op aardbevingsbelastingen moet worden ontworpen. In de toepassings situatie is er van uitgegaan dat het brugdek niet in een aardbevingsgevoelig gebied wordt gebouwd zodat deze belasting niet meegenomen hoeft te worden.

### 3.6.11 Overige belastingen

De belasting van eventueel aanwezige verlichtingsmasten, bewegwijzering, kabels en andere kleine elementen wordt dusdanig klein geacht dat deze verwaarloosd kunnen worden als belasting voor deze representatieve toepassings situatie.

## 4. Eisen, wensen en randvoorwaarden

In dit programma van eisen worden alle eisen, wensen en randvoorwaarde behandeld die van belang zijn bij het ontwerpen van een variant. De hier gedefinieerde wensen zijn tevens gebruikt worden om de verschillende varianten die volgen uit de variantenstudie te beoordelen. Ook zal er aandacht zijn voor de specifieke normen waar het ontwerp aan moet voldoen. Daarnaast wordt een overzicht gegeven van de belastingen op de totale constructie.

### 4.1 Eisen

#### 4.1.1 Geschikt voor de toepassingssituaties

Het ontwerp moet geschikt zijn voor toepassing als overspanning van een snelweg en als overspanning van een kanaal. Dit heeft tot gevolg dat het ontwerp moet voldoen aan een aantal normen en richtlijnen die gelden in Nederland. De belastingen die werken op het brugdek zijn ook gedefinieerd in de omschrijving van deze toepassingssituatie.

Dit heeft tot gevolg dat de ontwerplevensduur 100 jaar is en de gevolgklasse CC3. Ook moet de oplossing bestand zijn tegen botsingen met vrachtwagens en schepen. Aangezien het ontwerp ook moet voldoen aan de richtlijnen van Rijkswaterstaat betekend dit ook dat het ontwerp moet voldoen aan de zeeg eis zoals vermeld in de ROK, art. 7.4.1.

#### 4.1.2 Geschikt voor fabrieksmatige productie

Het ontwerp moet bestaan uit zoveel mogelijk gelijksoortige elementen die zo eenvoudig en goedkoop mogelijk op een fabrieksmatige en gestandaardiseerde manier zijn te produceren. Hierbij moet gedacht worden aan eenzelfde standaardiseerbaarheid zoals dat mogelijk is bij de huidige liggertypen en dat het ontwerp bestaat uit zo veel mogelijk vergelijkbare elementen.

#### 4.1.3 Variabele breedte

Het ontwerp moet geschikt zijn voor wegdekken met verschillende breedtes, dus niet alleen de breedte zoals deze is gedefinieerd in de toepassingssituatie. Dit is van belang om een oplossing te vinden die zo breed mogelijk toegepast kan worden in werkelijke situaties.

### 4.2 Wensen

#### 4.2.1 Constructie

De constructie zal zo efficiënt mogelijk gebruik moeten maken van het materiaal. Ook is het van belang dat de constructiehoogte beperkt blijft dit om de kosten van op- en afritten zo beperkt mogelijk te houden. Ook vanuit esthetisch oogpunt heeft een slanke constructie de voorkeur.

#### 4.2.2 Productie

Het ontwerp dient uit zoveel mogelijk gelijkvormige elementen te bestaan, dit om zo effectief mogelijk gebruik te maken van de prefabricage in de fabriek. Ook is de wens dat de elementen zo eenvoudig mogelijk te produceren zijn met zo veel mogelijk gestandaardiseerde bekistingvormen.

#### 4.2.3 Vromvrijheid

Om de toepasbaarheid van het systeem zo breed mogelijk te maken moet het brugdek zo vrij mogelijk ingedeeld kunnen worden. Hierbij moet gedacht worden aan de vrijheid om het gebruik van het brugdek vrij in te delen en de vrijheid om het brugdek met bijvoorbeeld een kruisingshoek te bouwen.

#### 4.2.4 Transport

De prefab elementen van het ontwerp moeten zo eenvoudig en gemakkelijk mogelijk te transporteren zijn. Om het mogelijk maken dat het ontwerp praktisch overal toegepast kan worden is het van belang dat dit transport ook over de openbare weg plaats kan vinden.

#### 4.2.5 Montage

De oplossing dient een zo eenvoudig mogelijke bouwmethode te hebben. Hierbij moet gedacht worden aan zo eenvoudig mogelijk hijskranen en ander hulpmiddelen. Ook moet deze methode zo weinig mogelijk hinder voor de omgeving geven en het kruisend verkeer. Een noodzakelijke afsluiting moet zo kort mogelijk duren en bijvoorbeeld in de nacht uit te voeren zijn.

#### 4.2.6 Duurzaamheid

In het ontwerp is waar mogelijk gestreefd worden naar een ontwerp dat zo minmogelijk schadelijke gevolgen heeft voor mens en milieu en bijvoorbeeld een zo laag mogelijk koolstofdioxide uitstoot tijdens de levensduur van de constructie. Dit zal zich vooral vertalen naar een zo minimaal mogelijk materiaal gebruik tijdens de productie.

Een ander mogelijkheid om het ontwerp te verduurzamen is te streven naar circulair ontwerp. Hierbij kan het brugdek op een hoogwaardige manier opnieuw ingezet worden, zonder gerecycled te hoeven worden. Dit streven naar circulair bouwen is ook een streven van de Rijksoverheid. Hierbij is het doel om voor 2050 de volledige Nederlandse economie circulair te maken. Rijkswaterstaat heeft zelf als doel om voor 2030 volledig circulair te werken [16]. Hiermee wordt bedoeld dat al het afval hoogwaardig hergebruikt wordt, zodat er een gesloten afvalstroom ontstaat. Dit betekent voor de te ontwerpen varianten vooral dat het brugdek eenvoudig te demonteren moet zijn en hergebruikt kan worden om een nieuw viaduct te bouwen. Tijdens de ontwerpfase is er daarom geprobeerd om een ontwerp te ontwikkelen dat zoveel mogelijk beantwoord aan deze duurzaamheidsdoelstellingen.

#### 4.2.7 Kosten

Het ontwerp moet een zo laag mogelijke integrale kostprijs hebben. Hiermee wordt bedoeld dat de totale prijs van het brugdek, zowel de aanleg van het brugdek, de aanleg van de constructies daaromheen als de instandhouding een zo laag mogelijke kostprijs hebben. Deze wens is indirect beschouwd in de voorgaande eisen, een efficiënte constructie met een eenvoudige productie gemakkelijke montage en transport zal ook een constructie zijn met een relatief lage kostprijs.

### 4.3 Randvoorwaarde

#### 4.3.1 Fabriek

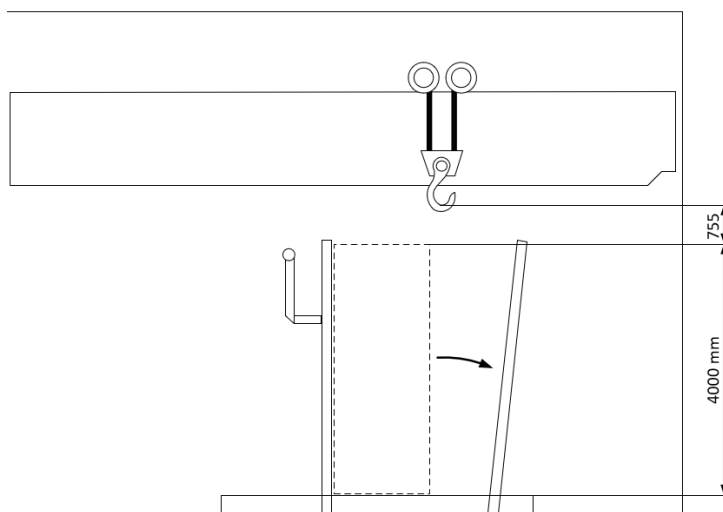
Een van de doelen van Spanbeton is om groter overspanningen te produceren, zonder daarvoor de fabriek steeds te hoeven vergroten. Daarom moet het ontwerp te voldoen aan de randvoorwaarden die gesteld worden door de fabriek. Hierbij moet gedacht worden aan een maximaal hijsgewicht voor de beton elementen, maximaal aantal voorspanstrengen (de maximale spankracht) en de maximale hoogte van de productiehal. Hieronder wordt een overzicht gegeven van de belangrijkste grenzen van de fabriek van Spanbeton.

Maximaal hijsgewicht = 170 [ton]	<i>(180 [ton] zonder hijsmiddelen)</i>
Maximale spankracht = 2250 [ton]	<i>(102 strengen Ø 15,7 Y1860S7)</i>
Maximale lengte elementen = 60 [m]	<i>(Kleine uitzonderingen mogelijk)</i>
Maximale hoogte = 4,0 [m]	<i>(gewenst: kleiner dan 3,2 meter)</i>

De maximale hoogte van de elementen wordt door veel verschillende factoren beïnvloed. Allereerst de maximale hoogte tot waar de bovenloopkranen in de productiehal kunnen hijsen en de noodzakelijke hijsmiddelen spelen een belangrijke rol. Ook heeft de gebruikte bekisting en hoe deze openkapt invloed op de maximale hoogte. Tenslotte wordt de maximale hoogte

ook beïnvloed door de gebruikte stortkar, de installatie die noodzakelijk is om het beton te kunnen storten.

De maximale hoogte is als volgt bepaald  $5355 \text{ mm}$  (maximale hoogtehijshaak) –  $700 \text{ mm}$  (minimale hoogte hijsmiddelen) –  $300 \text{ mm}$  (vloer spanbaan) –  $300 \text{ mm}$  (vloer bekisting) =  $4055 \text{ mm}$  hierbij moet opgemerkt worden dat er is gerekend met een bekisting die bij opening zeer laag is om te voorkomen dat deze in botsing komt met het element. Ook is de bekistingsvloer lager aangenomen dan op dit moment gebruikelijk is en zullen er speciale lage lorries noodzakelijk zijn. Het kan ook noodzakelijk zijn om de deur van de productiehal te vergroten. Tenslotte zal er ook een speciale, extra dunne of in hoogte verstelbare, stortkar noodzakelijk zijn om deze elementhoogte goed te kunnen storten. Het verdient zeker de aanbeveling om voor alle element hoogtes groter dan 3,2 meter uitgebreid te controleren en na te meten of deze daadwerkelijk geproduceerd kunnen worden in de huidige fabriek. Deze 3,2 meter is als volgt berekend:  $5355 \text{ mm}$  (maximale hoogte hijshaak) –  $1000 \text{ mm}$  (hoogte hijsmiddelen) –  $1150 \text{ mm}$  (transportlorrie)  $\approx 3200 \text{ mm}$ .



*Figuur 4-1 een schets van de hijs haakhoogte en maximale elementhoogte. De zij wand van de bekisting zal hierbij of helemaal wegenomen moeten worden om het element uit de bekisting te halen*

#### 4.3.2 Transport

Om te zorgen dat het ontwerp flexibel en op verschillende locaties ingezet kan worden is het doel dat de geprefabriceerde elementen over de weg te transporteren zijn. Om de grenzen van transport over de weg vast te stellen is overleg gevoerd met de vaste transporteur van Spanbeton, transportbedrijf Van der Meijden, ook uit Koudenberg aan den Rijn. Dit bedrijf heeft veel ervaring met ligger transport en is dus bekend met de vergunningsprocedures, wetgeving en de organisatie die bij een dergelijk transport kom kijken. Opgemerkt moet worden dat er niet direct maximale dimensies voor de elementen te noemen zijn, de maximale afmetingen hangen sterk samen met bijvoorbeeld de eindbestemming. Voor elk transport moet dus een aparte route gepland worden en een aparte vergunning aangevraagd worden bij de wegbeheerders. Het is dus ook niet mogelijk om harde buiten grenzen aan te geven wat betreft het maximale lengte, hoogte, breedte en het minimale gewicht. Maar er is wel een praktisch maximum aangegeven dat als houvast dient tijdens het ontwerpproces.

Voor het maximale gewicht is geen wettelijke begrenzing, 160 tot 170 ton ligger gewicht wordt door van der Meijden als praktisch maximum aangehouden. Omdat bij een hoger gewicht het plannen van een geschikte route zeer lastig wordt. Hierbij moet opgemerkt worden dat dit maximale eigengewicht kleiner wordt voor kortere elementen, de belasting wordt dan immers over een kleiner oppervlakte gespreid. Ook zijn er geen vrachtwagens op de markt die geschikt zijn om de combinatie, die dan zwaarder wordt dan 250 ton, te trekken.

Ook voor de maximale lengte is geen wettelijk maximum. Toch wordt 60 meter als een praktisch grens aangehouden. Bij langere liggers wordt het steeds lastiger om de combinatie onder controle te houden. Ook moeten er dan bijzonder veel aanpassingen gedaan worden aan de wegen, zoals het verwijderen van lantaarnpalen en het leggen van rijplaten in de



bochten. Door Van der Meijden worden langere ligger transporten dan 60 meter ook als onverantwoord gezien omdat de combinatie steeds lastiger te besturen zal zijn op de snelweg.

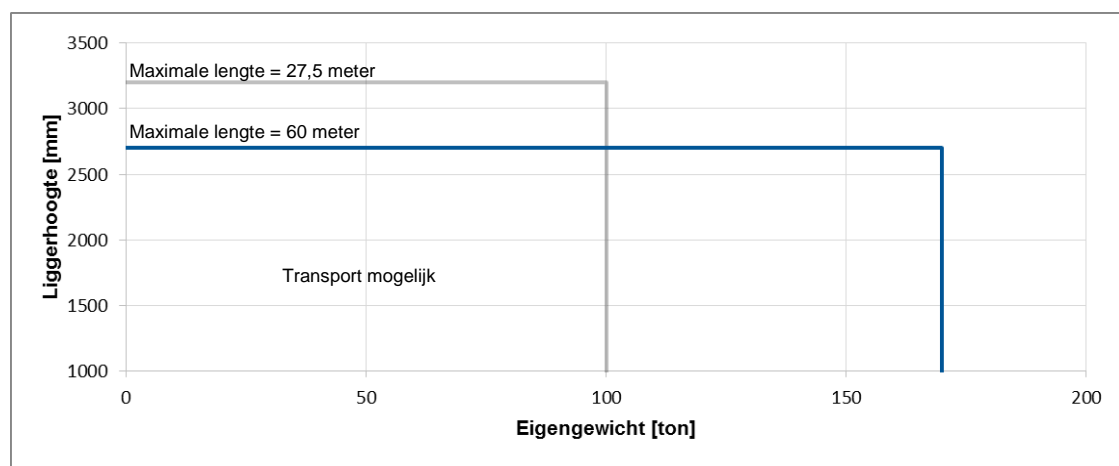
De maximale hoogte van de elementen is ook sterk afhankelijk van de eindbestemming, een laag viaduct vlak voor de bestemming kan immers al een belemmering zijn voor het transport. De hoogte van de totale combinatie mag maximaal 4,3 meter zijn, met een trailer hoogte van 1,6 meter geeft dat een maximale element hoogte van 2,7 meter. Hierbij moet opgemerkt worden dat een kortere elementlengte kan zorgen voor een groter maximale hoogte. Bij een kortere ligger kan een lagere trailer gebruikt worden (1,1 meter) en er bestaat tevens minder risico dat een combinatie vast loopt op bijvoorbeeld een aquaduct met steile hellingen.

De maximale breedte van een transport is ook niet begrensd, maar een transport breder dan 4 meter op de autosnelweg, of breder dan 3,5 meter op het onderliggende wegennet heeft begeleiding nodig en heeft beperkte rijtijden [17]. Ook wordt het voor extreem brede elementen steeds lastiger om de eindbestemming te bereiken omdat er meer aanpassingen aan de route noodzakelijk zijn om bijvoorbeeld de bochten te kunnen maken.

Eventueel bestaat ook de mogelijkheid om een transport zonder vergunning samen te stellen. Hiervoor is dan ook geen extra transport begeleiding nodig om de vrachtwagen. Hiervoor mag de totale combinatie niet langer zijn dan 27,5 meter, niet breder dan 3,5 meter, niet hoger dan 4 meter en niet zwaarder dan 100 ton.

In het algemeen moet opgemerkt worden dat voor dergelijke bijzondere transporten altijd uitvoerig onderzoek gedaan moet worden naar de mogelijke route. Eventueel moeten kunstwerken fysiek opgemeten worden om te controleren of het mogelijk is dit kunstwerk te passeren. Dit heeft soms tot gevolg dat er omgereden wordt om bepaalde kunstwerken niet te hoeven kruisen. Ook komt het voor dat een transport de opdracht krijgt om een kunstwerk in het midden van het wegdek te berijden om zo de belasting te spreiden over het volledige viaduct. Afhankelijk van de situatie kunnen de hier vermelde maximum waarden dus hoger of lager uitvallen.

Maximaal gewicht = 170 [ton]	<i>(minder bij korte lengte)</i>
Maximale lengte = 60 [m]	<i>(officieel onbegrensd)</i>
Maximale hoogte = 3,2 [m]	<i>(2,7 meter voor lange elementen)</i>
Maximale breedte = 5 [m]	<i>(onbegrensd, maar kleiner dan 4 meter is aan te raden)</i>



Figuur 4-2 een grafiek die het globale verband tussen de maximale elementlengte, elementhoogte en het eigengewicht weergeeft, voor de standaard transport beschikbare trailers.

Een alternatief, indien transport over de weg niet mogelijk is, is het transport over het water. Dit heeft als cruciaal nadeel dat niet alle locaties te bereiken zijn over het water, zeker voor snelwegen zal dit vaak geen geschikte oplossing zijn. Een mogelijke oplossing is dan om een combinatie van beide vervoermiddelen te gebruiken om de bouwlocatie te bereiken, maar dit zal aanzienlijk duurder uitvallen. Het belangrijkste voordeel van transport over het water is dat

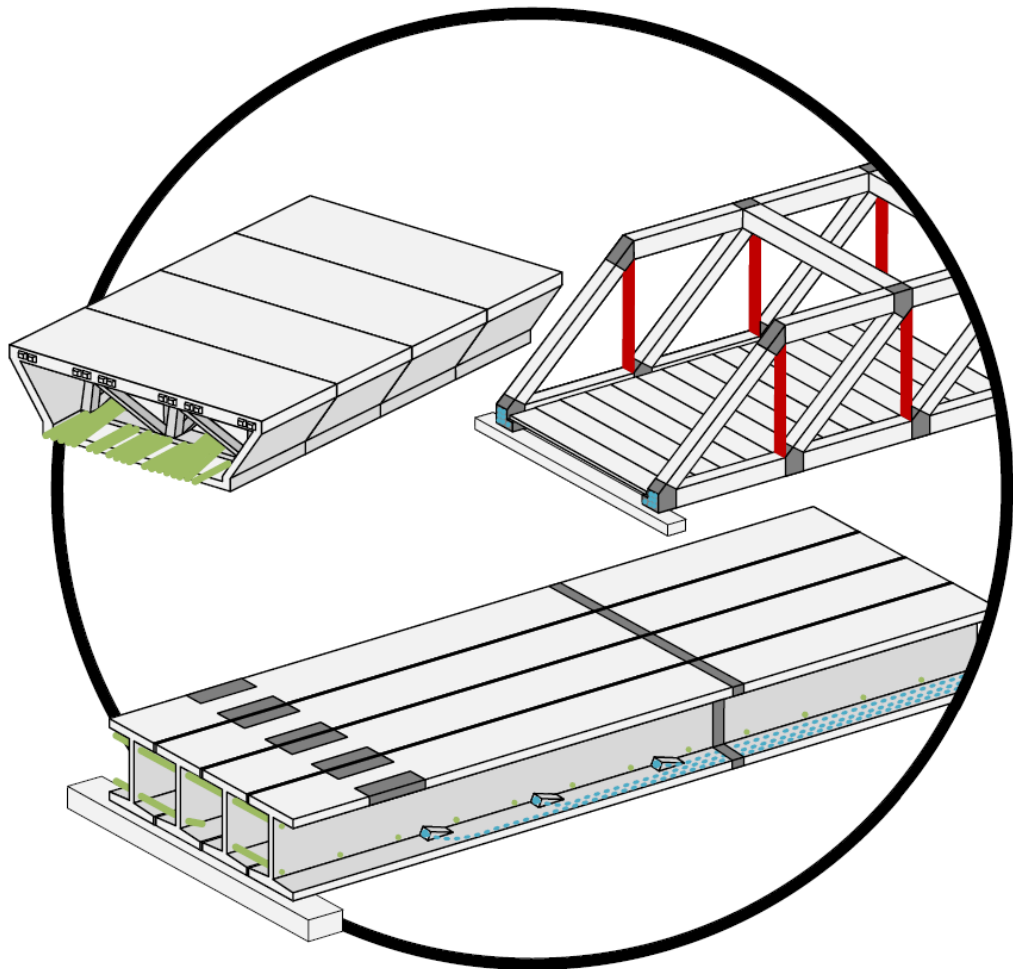
er veel langere en zwaardere betonnen elementen vervoerd kunnen worden, ook de maximale hoogte zal minder snel een probleem zijn [18].

#### **4.4 Maximale constructiehoogte**

In de opgestelde eisen, wensen en randvoorwaarden komt duidelijk naar voren dat de maximale elementhoogte een eis is die vanuit meerdere richtingen zeer belangrijk is. Tijdens het ontwerpproces zal hier veel aandacht voor moeten zijn omdat een beperking van deze hoogte op meerder fronten kan leiden tot een aanzienlijke kostenbesparing. Denk hierbij aan de kosten voor de op- en afritconstructies, het transport en noodzakelijke aanpassingen aan de infrastructuur van Spanbeton.

## Deel II: De variantenstudie

---



*Het tweede deel van het rapport is de variantenstudie. In dit deel wordt met behulp van het opgestelde programma van eisen, wensen en randvoorwaarde eerst verschillende varianten ontworpen. De varianten zijn vervolgens onderling vergeleken om de meest geschikte oplossing te vinden.*

---

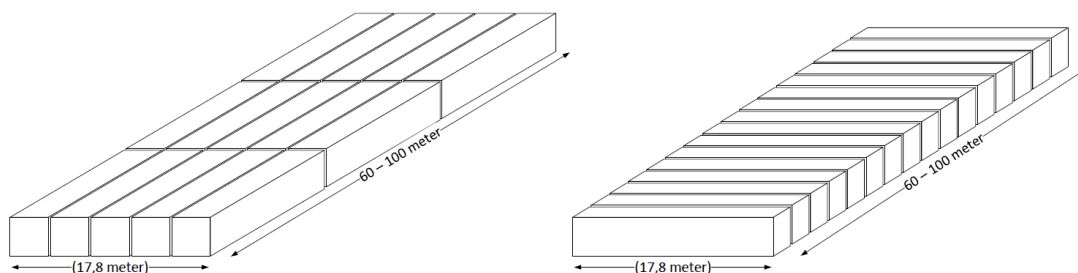
## 5. Opzet van de variantenstudie

Om een prefab betonnen brug geschikt voor overspanningen van ongeveer 60 tot 100 meter te bouwen zijn uiteraard veel mogelijke oplossingen. De voorwaarde dat de brug statisch bepaald moet zijn verkleint het aantal mogelijke oplossingsrichtingen echter aanzienlijk. Er zijn 4 mogelijke basis oplossingen opgesteld, dit zijn:

- |                             |   |   |
|-----------------------------|---|---|
| 1. Samengestelde liggerbrug | } | Varianten geschetst in hoofdstuk 2 en 3 |
| 2. Segmentbrug              |   |   |
| 3. Boogbrug                 | } | Varianten geschetst in hoofdstuk 4      |
| 4. Vakwerkbrug              |   |   |

Hierbij hebben de samengestelde liggerbrug, een liggerbrug met liggers opgebouwd uit meerdere liggerdelen in de lengterichting en de segmentbrug ongeveer dezelfde opbouw in de eindfase, beide oplossingen bestaan uit een orthotrope plaat waarbij het verkeer bovenop de constructie rijdt. De boog- en vakwerkbrug hebben ook een vergelijkbare opbouw, een rijvloer die aan beide zijden ondersteund is door een vakwerk- of boog constructie die de belasting in de lengterichting afdraagt naar de opleggingen.

### 5.1 Samengestelde ligger- en segmentbrug

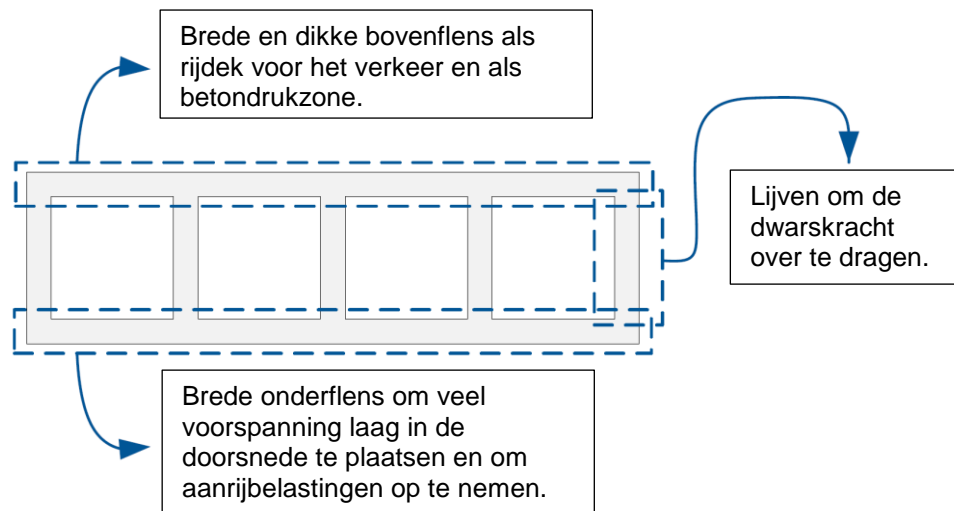


*Figuur 5-1 een schets met de opbouw in prefab elementen van een samengestelde liggerbrug (links) en een segmentbrug (rechts).*

De constructie van de gecombineerde ligger en de segmentbrug verschillen in de eindsituatie weinig van elkaar. Beide type bruggen dragen de belasting als een plaat, waarbij het verkeer bovenop de constructie aanwezig is. Het belangrijkste verschil tussen de twee typen is hoe de constructie verdeeld is in geprefabriceerde elementen. Bij een segmentbrug lopen de voegen tussen de prefab elementen alleen in de dwarsrichting van het brugdek. Bij de gecombineerde liggerbrug lopen er zowel voegen in de dwars als in de lengterichting van het brugdek. Deze opbouw heeft gevolgen voor de mogelijke bouwmethode, het transport en de te gebruiken voorspannsystemen.

Voor beide type oplossingen zullen ook de doorsnede weinig van elkaar verschillen. De ideale doorsnedevorm<sup>1</sup> bestaat voor beide type uit een bovenflens die dient als rijdek en als beton drukzone, een onderflens over de volledige breedte van het brugdek. Hierdoor is de onderzijde in staat om zware aanrijbelastingen op te nemen en kan er voorspanstaal over de volledige breedte worden aangebracht om zoveel mogelijk staal zo laag mogelijk in de doorsnede te positioneren. Dit is noodzakelijk om een zo slank mogelijke constructie te bouwen, die in Nederland gewenst is. Deze onder- en bovenflens moeten vervolgens zijn verbonden door lijven om de dwarskracht over te kunnen dragen Deze doorsnede is geschetst in Figuur 5-2.

<sup>1</sup> De hier beschreven ideale doorsnede is gebaseerd op een gastcollege gegeven door C. Quartel voor het vak Concrete Bridges aan de TU Delft in het collegejaar 2017/2018.



Figuur 5-2 een schets van de ideale doorsnedeform met een onder- en bovenflens verbonden door meerdere lijven.

De samengestelde liggerbrug en in mindere mate de segmentbrug lijken constructief gezien sterk op de bestaande liggerbruggen. Beide oplossing dragen de nuttige belasting af als een orthotrope plaat naar de opleggingen. De vraag is dus hoe een constructietype, dat nu al tegen de maximale grenzen aan loopt, geschikt kan worden gemaakt voor grotere overspanningen en dat met een minimale constructiehoogte. Door bij deze oplossing te streven naar een minimale constructiehoogte wordt geprobeerd om twee voordelen te behalen: transport over de weg blijft, ook voor de lange overspanningen, mogelijk en de kosten voor op- en afrit constructies kunnen beperkt blijven.

### 5.1.1 Ontwerpstrategie

Uit proefberekeningen met een fictief I-vormig profiel is vast komen te staan dat bij overspanningen van 100 meter ongeveer 70% van het buigende moment in de individuele ligger eigengewicht is (een samenvatting van deze berekening is toegevoegd als bijlage A). De meest effectieve manier om de gewenste overspanning mogelijk te maken is daarom het verminderen van het eigengewicht van de constructie.

Een tweede mogelijkheid om de belasting op de constructie te verminderen is het vergroten van de dwarsstijfheid van het brugdek. Hierdoor zal de belasting meer gespreid worden over het brugdek zodat de individuele liggers ontlast worden. Opgemerkt moet worden dat het vergroten van de dwarsstijfheid niet een grote toename van het eigengewicht van de constructie mag veroorzaken om te voorkomen dat de voordelen van deze betere spreiding teniet gedaan worden.

Tenslotte kan de constructiehoogte verminderd worden door het toepassen van hogesterktebeton in de drukzone en meer staal in de trek zone om zo met een kleinere constructiehoogte en dus een kleinere arm een gelijke momentcapaciteit te bereiken.

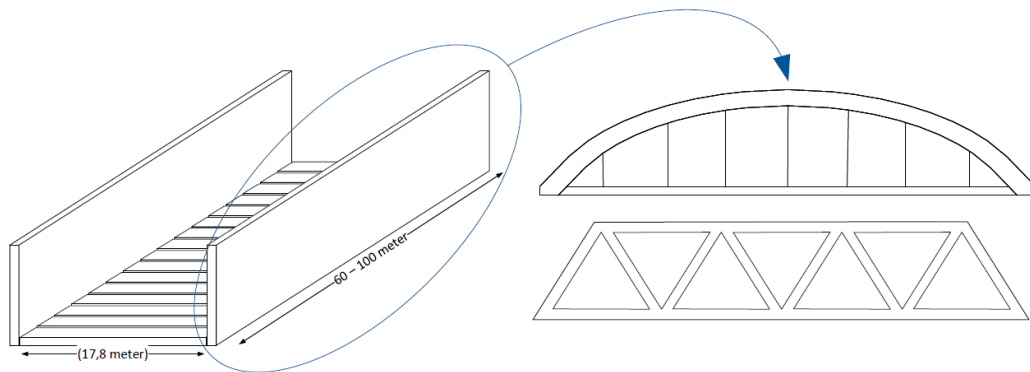
De gevolgde ontwerpstrategie is hieronder samengevat. Hierbij heeft de eerste gepresenteerde maatregel de grootste voorkeur.

1. Eigengewicht van de constructie verminderen.
  - a. Dekking minimaliseren in dikte en lengte<sup>2</sup>.
  - b. Geen constant profiel over de volledige lengte van de overspanning.
  - c. Smallere liggerlijven door toepassen hogesterktebeton (tot C90/105).
  - d. Vergroten werkende breedte voor minder liggerlijven per meter.
2. Beter spreiding van de belasting.
  - a. Verhogen van de dwarsbuigstijfheid.

<sup>2</sup> Met de lengte van de dekking wordt bedoeld de totale omtrek van de constructie, deze moet immers voorzien worden van betondekking.

- b. Verhogen van de torsiestijfheid.
  - c. Verhogen van de dwarsafschuifstijfheid.
3. Vergroten trek- en druksterkte van de druk- en trekzones.
  - a. Toepassen hogesterktebeton (tot C90/105) voor een sterkere betondrukzone.
  - b. Toepassen (nog) meer voorspanning in de trek zone.
  - c. Toepassen drukwapening in de drukzone.

## 5.2 Boog- en vakwerkbrug



Figuur 5-3 een schets van de opbouw van een boog- en vakwerkbrug in prefab elementen.

Een andere mogelijke oplossing is een prefab betonnen vakwerkbrug of boogbrug. Hierbij wordt niet de totale constructiehoogte zo klein mogelijk gemaakt maar wordt de rijvloer zo laag mogelijk geplaatst en aan de zijkanten ondersteund door een vakwerk of boogconstructie. Ook op deze manier kan bespaard worden op de kosten van op- en afritconstructies. De vakwerk- en boogconstructie zullen hierbij in een aantal kleine prefab elementen verdeeld worden om deze transporteerbaar te houden. Dit heeft wel tot gevolg dat deze randconstructie op of nabij de bouwlocatie samengesteld moeten worden tot een totale constructie.

In veel situaties waar in Nederland een overspanning van 60 tot 100 meter is overbrugd is op dit moment een stalen vakwerk of boogbrug toegepast. De geschetste varianten zijn dus prefab betonnen varianten van de op dit moment toegepaste oplossingen in staal.

### 5.2.1 Ontwerpstrategie

In tegenstelling tot de samengestelde ligger- en segmentbrug is de vakwerk- en boogbrug niet ontworpen met als doel een zo slank mogelijke constructie, het doel is slechts een zo laag mogelijk brugdek ten opzichte van de onderzijde van de constructie. Juist het verhogen van de totale constructiehoogte kan gebruikt worden om het materiaalgebruik en dus ook het eigengewicht van de constructie te verminderen.

Het belangrijkste probleem bij dit type oplossingen is de verbinding tussen de prefab elementen zijn. De vakwerk of boogconstructies die het brugdek in de lengterichting moeten dragen moeten opgebouwd worden uit kleine elementen anders zijn deze niet te transporteren vanaf de fabriek naar de bouwlocatie. Alleen met verbindingen die eenvoudig en betrouwbaar te maken zijn op de bouwlocatie kan een prefab betonnen vakwerk of boogbrug een bruikbare oplossing zijn.

## 5.3 Bestaande bruggen

De eerste stap om de deel varianten voor een prefab betonnen brug te schetsen is het bestuderen van bestaande brug oplossingen. De eerste conclusie die hieruit getrokken kan worden is dat er bijna geen statisch bepaalde prefab betonnen bruggen zijn met een overspanning van ongeveer 100 meter. Helemaal niet als ook nog de eis voor een grote slankheid van de constructie meegenomen wordt. Hieronder zijn verschillende bruggen en soorten bruggen beschreven die op hun eigen manier relevant zijn voor het onderzoek of als inspiratie hebben gediend voor de beschreven deelvarianten.

### 5.3.1 Liggerbruggen

#### Brug over het van Starckenborghkanaal

De langste prefab betonnen liggerbrug van Nederland is op dit moment de brug over het van Starckenborghkanaal in Friesland. De liggers van dit viaduct hebben een lengte van 68 meter en zijn uitgevoerd als kokerliggers die onderling verbonden zijn door middel van dwarsvoorspanning tot een brugdek [19]. De liggers zijn uitgevoerd in de hoogste, door de NEN-EN norm toegestane betonsterkteklasse van C90/105. Zover bekend zijn de gebruikte liggers de langste prefab betonnen liggers ter wereld [20].

#### Gesplitste liggerbrug (Spliced girder bridge)

Een methode om langer overspanningen dan 60 meter mogelijk te maken is het bouwen van een zogenaamde spliced girder bridge. Met dit type liggerbrug zijn overspanningen van ongeveer 60 tot 80 meter mogelijk [21]. Bij dit type brug bestaat uit een prefab middenligger deze wordt opgehangen aan twee prefab randliggers, die gemonteerd zijn op de ondersteunende pijlers. Vervolgens worden de liggers door middel van een natte knoop verbonden en met doorgaande voorspanning tot een statisch onbepaalde constructie gevormd. In Nederland is dit type constructie zover bekend niet toegepast al lijken bijvoorbeeld de Louis Raemaekersbrug in Roermond en de brug in de A35 over het Twentekanaal nabij Almelo er sterkt op. Het belangrijkste verschil is dat de koppeling tussen de liggers is uitgevoerd als een scharnier oplegging in plaats van als een moment vaste verbinding.

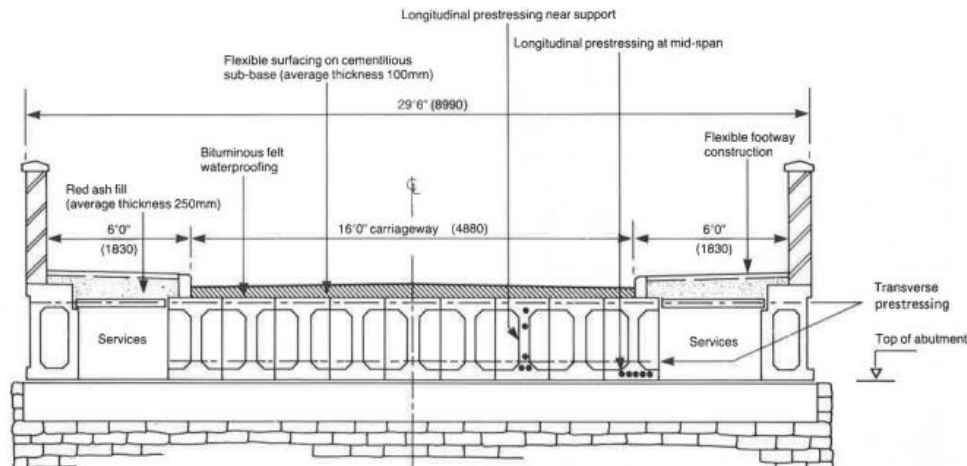
Dit type constructie is dus een statisch onbepaalde oplossing en kan dus niet direct gebruikt worden als mogelijk alternatief. Maar de gebruikte koppeltechniek door middel van een natte knoop, om de twee prefab delen met elkaar te verbinden, kan als voorbeeld dienen hoe dit op een eenvoudige manier kan gebeuren.



Figuur 5-4 een Spliced girder bridge tijdens de bouw.

#### Ynys-y-Gwas bridge

De Ynys-y-Gwas bridge was een prefab betonnen segmentbrug in Wales, Groot-Brittannië. De brug is gebouwd in 1953 en ingestort in 1985. Deze brug is niet bijzonder vanwege de overspanning, deze bedroeg slechts 18,3 meter. Maar het ontwerp van deze brug lijkt wat betreft de doorsnede sterk op een aantal beschreven combinatieligger deelvarianten, namelijk de combinatie kokerliggerdoorsnede. Ook zijn de I-vormige ligger elementen zowel in de lengterichting als in de dwarsrichting aan elkaar gemaakt met behulp van voorspanning met nagerekt staal.



Figuur 5-5 een dwarsdoorsnede tekening van de opbouw van de Ynys-y-Gwas bridge.

Uit onderzoek naar het instorten van deze brug is gebleken dat de belangrijkste oorzaak voor het instorten corrosie aan de voorspankabels is geweest. Deze corrosie is veroorzaakt door het slecht injecteren van de voorspankanalen. Ook het onvoorziene gebruik van strooizout en een onvoldoende waterdichtheid van het brugdek hebben bijgedragen aan de corrosie van de voorspankabels [22].

De gelijkenis tussen deze ingestorte brug en een aantal geschetste varianten hoeft niet direct een rede zijn om deze varianten af te wijzen. Deze brug is immers gebouwd in een periode dat er veel minder ervaring was met voorgespannen beton en door het toepassen van de huidige normen en regels kan een deel van de oorzaken worden weggenomen. Bijvoorbeeld het dikke asfaltpakket, van 140 mm, dat Rijkswaterstaat eist volgens ROK art. 5.2.3 [5], voorkomt dat strooizout de constructie in kan trekken. Hierdoor is een belangrijke oorzaak van het instorten van deze brug al weggenomen voor de toekomstige oplossing. Maar het is goed om te beseffen wat de risico's kunnen zijn van liggers met voegen in de lengterichting van het brugdek op de voorspanning en dat het juist injecteren van de voorspankanalen essentieel is voor een voldoende duurzame constructie.

## 5.3.2 Segmentbruggen

### Hartelfietsbrug

In Nederland zijn de afgelopen tientallen jaren bijzonder weinig betonnen segmentbruggen gebouwd. Een uitzondering is de Hartelfietsbrug gebouwd over het Hartelkanaal nabij Spijkenisse [23]. Deze brug is gebouwd als uitgebouwde kokerbrug. De segmenten zijn tegen elkaar aangestort op een in hoogte verlopende bekisting. Op deze manier is geprobeerd om een zo goed mogelijke aansluiting tussen de segmenten mogelijk te maken. Vervolgens zijn de segmenten stuk voor stuk tot een constructie verbonden met lijm en voorspanning.

Deze brug is vooral een goed voorbeeld hoe een betonnen brug opgebouwd uit prefab segmenten recent in Nederland gebouwd is. Ook de gebruikte techniek voor het maken van de voegen, lijmen samen met segmenten die tegen elkaar aan zijn gestort (match-cast) is een voorbeeld voor wat praktisch mogelijk is.





*Figuur 5-6 de Hartelfietsbrug over het Hartelkanaal*

### **Butterfly segmentbrug**

Een opmerkelijk type segmentbrug is het Okegawa Viaduct nabij Tokio in Japan. De hier gebruikte betonnen segmenten hebben vliedervormige lijven gemaakt uit hogesterktebeton en voorzien van voorspanning met voorgerekt staal. Het viaduct heeft overspanningen met een lengte van 45 meter. De bijzonder segmentvorm maakt een lichte constructie mogelijk. Een nadeel van deze bouwmethode is dat de gebruikte externe voorspanning beschermd moet worden tegen het uv-licht van de zon. De hier beschreven brug laat zien dat er veel mogelijk is om de segmenten zo licht mogelijk te maken en zo gewicht in de brug te besparen. Dit type constructie is vooral interessant vanwege het bijzonder gebruik van voorspanning in de lijven van de segmenten, deze zijn schuin voorgespannen door middel van voorspanning met voorgerekt staal om de dwarskrachtweerstand te vergroten.

### **Batu 6 bridge**

De Batu 6 bridge is een prefab betonnen segmentbrug over de Sungai Perak rivier in Maleisië. Deze brug heeft een overspanning van 100 meter en is gebouwd met behulp van ultra hogesterktebeton versterkt met vezels [24]. Hierdoor is er geen dwarskracht wapening in de lijven noodzakelijk. Opgemerkt moet worden dat de druksterkte van dit betonmengsel aanzienlijk hoger ligt dan wat maximaal is toegestaan volgens NEN-EN 1992-1-1, de sterkte C90/105. De segmenten zijn door middel van een hijskraan op een tijdelijke ondersteuning geplaatst, vervolgens zijn de segmenten samengespannen tot een brugdek.

## **5.3.3 Boog- en vakwerkbruggen**

### **Spoorbrug over de Dieze**

Een voorbeeld van een prefab betonnen vakwerkbrug is de spoorbrug over de Dieze in Den Bosch [25]. De tweesporige overspanningen zijn hierbij in het midden versterkt door een geprefabriceerd betonnen vakwerk. De grootse overspanning van deze brug is 50 meter. Het vakwerk is hierbij op een voorgespannen kokerligger gemonteerd. Aan deze kokerligger is vervolgens een geprefabriceerde schaal gemonteerd die dient als brugdek. De vakwerkdelen zijn geprefabriceerd in de fabriek en vervolgens op de bouwplaats door middel van natte knopen aan elkaar verbonden. Opvallend is het gebruik van stalen elementen voor de trekstaven in het vakwerk.



*Figuur 5-7 een foto van de vakwerkconstructies van de spoorbrug over de Dieze in aanbouw.*

## De WILD-brücke

De WILD-brücke is een betonnen boogbrug gebouwd in Oostenrijk met behulp van ultra hogesterktebeton [26]. De betonnen elementen waar de boog uit is opgebouwd zijn geprefabriceerd en op de bouwlocatie verbonden door middel van mortelverbindingen en externe voorspanning. De staafelementen zijn hol van binnen zodat er ruimte is om de voorspanning binnenin aan te brengen. De brug is gebouwd over een kloof en heeft een overspanning van 157 meter.

## 5.4 Uitwerking van de deelvarianten

Voor elk van de mogelijke oplossingen zijn deelvarianten ontwikkeld voor delen van de constructie. Deze deelvarianten zijn geschetst en omschreven in de hoofdstukken 6, 7 en 8. Ook is per deelvariant een aantal belangrijke en onderscheidende voor- en nadelen beschreven. In hoofdstuk 6 en 7 zijn de varianten samengestelde liggerbrug en segmentbrug beschreven. In hoofdstuk 8 is de varianten voor de boog- en vakwerkbrug omschreven, deze twee oplossingen zijn in een hoofdstuk beschreven omdat een aanzienlijk deel van de deelvarianten voor beide oplossingen gebruikt kan worden, denk hierbij bijvoorbeeld aan oplossingen voor het brugdek en voor de montage. De deelvarianten kunnen in veel gevallen onderling gecombineerd worden om tot een samengestelde variant te komen. Uiteraard is dit niet altijd mogelijk of leidt dit tot zeer onaantrekkelijke of onnodig ingewikkelde constructie. In deze gevallen wordt dit zoveel mogelijk aangegeven. Ook wordt per variant een aantal suggesties gedaan voor montagemethode die toegepast kunnen worden voor de specifieke variant.

Vanuit deze deelvarianten zijn vervolgens 5 samengestelde varianten geformuleerd die door middel van een multicriteria-analyse (MCA) met elkaar zijn vergeleken. Deze samengestelde varianten dienen een aantal deeloplossingen beter te onderzoeken. Maar het is uiteraard mogelijk om delen van deze varianten te gebruiken voor de oplossing. Tenslotte zijn in hoofdstuk 9 de conclusies en de aanbevelingen volgend uit de variantenstudie geformuleerd.

### 5.4.1 Schetsen

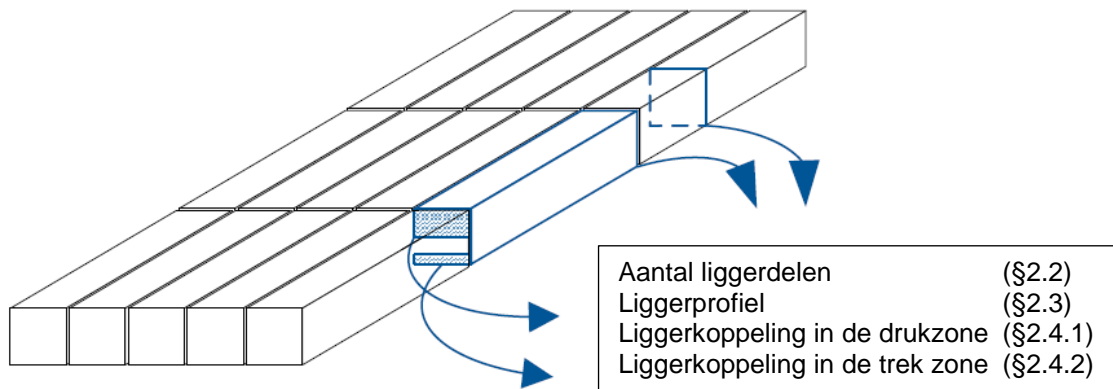
Voor elke oplossing zijn varianten geschetst voor delen van de constructie. Eventuele maten in de schetsen zijn indicatief. In de schetsen van de varianten zijn soms ter illustratie delen van andere varianten overgenomen. Dit betekent niet dat deze gecombineerd moeten worden maar dient om een algemeen beeld te krijgen van de constructie opbouw. De varianten zijn zowel geschetst op een zo gelijkvormige manier, waarbij de volgende kleuren zijn aangehouden voor verschillende constructieonderdelen en materialen:

Onderdeel:	Kleur/ arcering:
Prefab beton	
Prefab beton (om onderscheid aan te geven)	
In-situ beton	
Wapeningsstaal of stalen onderdelen	
Voorspanning met voorgerekt staal	
Voorspanning met nagerekt staal	
Externe voorspanning	
Voorspanning met behulp van staven	
EPS (expanded polystyreen)/ gewicht besparende vulmateriaal	
Modelwand/ bekistingwand	

## 6. Samengestelde liggerbrug

### 6.1 Algemeen

Een mogelijke oplossing om een prefab betonnen brug van 100 meter te bouwen is simpelweg het combineren van twee of meerdere liggers tot een langere ligger. In deze situatie is het mogelijk om een combinatie van voorspanning met voorgerekt staal en nagerekt staal te gebruiken. In dit hoofdstuk zijn mogelijke oplossingen geschetst voor de verschillende onderdelen van de constructie zoals in Figuur 6-1 geschetst. Deze deeloplossingen kunnen gecombineerd worden tot een mogelijke oplossing, deze samengestelde varianten zijn beschreven in de laatste paragraaf.



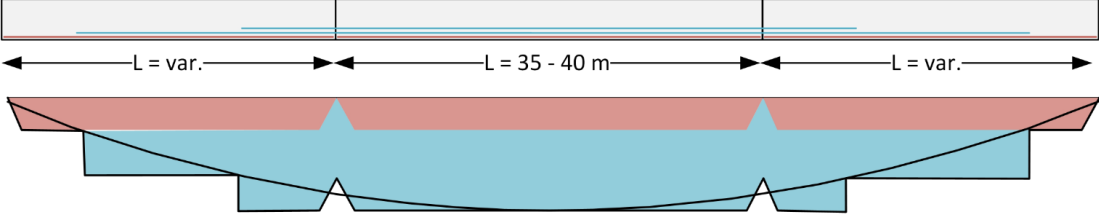
Figuur 6-1 Een schets van de opbouw van een samengestelde liggerbrug met aangegeven voor welke constructiedelen oplossingen geschetst zijn.

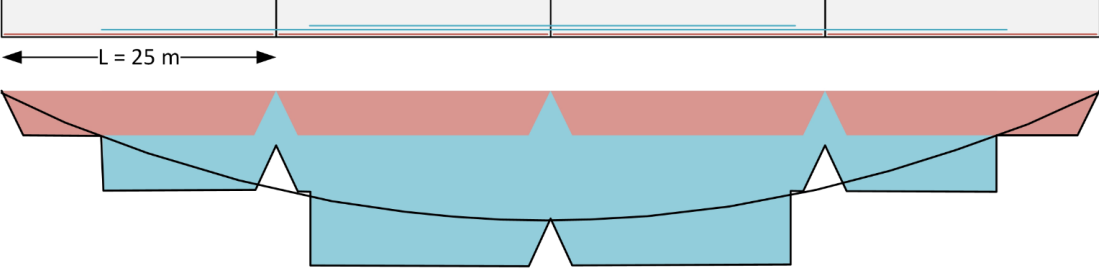
### 6.2 Aantal liggerdelen

De ligger kan op een aantal manieren in verschillende delen verdeeld worden, het gekozen aantal liggerdelen hangt sterk samen met het gekozen verloop van de voorspanning. Er zijn vijf varianten beschreven, de ligger opdelen in drie, vier en vijf stukken allemaal als combinatie van voorspanning met voor- en nagerekt staal. Een variant met alleen voorspanning met nagerekt staal en een variant met doorgekoppelde voorspanning. Voor alle vijf de varianten is het verloop van de voorspanning geschetst over de liggerlengte, tevens is een parabool geschetst die als benadering dient voor het maximale buigende moment in de doorsnede en dus de theoretisch ideale voorspankracht in de doorsnede. Hierbij valt op dat in de situatie met vier liggerdelen, er een dip in de voorspanning is, exact in de doorsnede met het maximale buigende moment. In een alternatief bestaand uit twee liggerdelen treedt dit zelfde probleem op. De varianten met een koppeling halverwege de overspanning hebben allemaal dit probleem en zijn dus een stuk minder geschikt als oplossing.

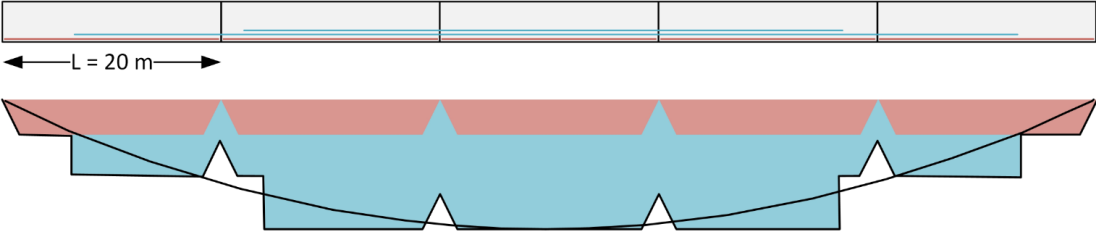
In al de beschreven varianten zal de voorspanning alleen horizontaal in de onderflens geplaatst worden en dus niet door het lijf omhoog gebogen worden. Deze keuze is gemaakt om te voorkomen dat de voorspankanalen de dikte van het lijf zullen bepalen.

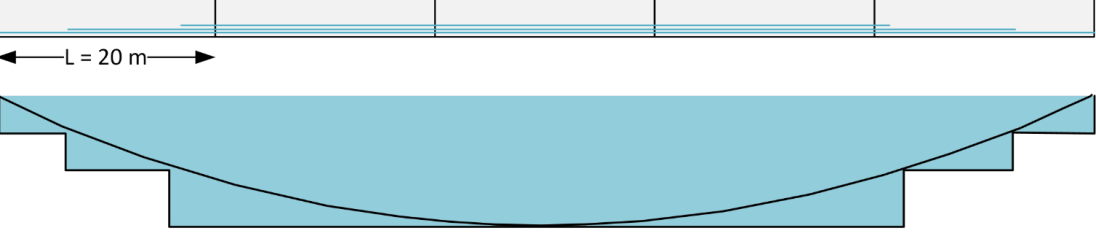
<b>1.</b>	<b>3 liggerdelen</b>
De ligger wordt opgedeeld in drie delen waarbij het middelste deel een lengte heeft van 40 of 35 meter, de twee einddelen hebben een variabele lengte die aangepast wordt aan de overspanning van het brugdek.	
<i>Voordelen:</i>	<i>Nadelen:</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Voorspanning benadert het verloop</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>De liggerdelen kunnen maximaal 35</li> </ul>

<p>van de momentenlijn redelijk goed.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Relatief weinig liggerdelen noodzakelijk voor een overspanning.</li> </ul>	<p>tot 40 meter worden om deze transporteerbaar te houden.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Deze relatief lange liggers hebben een lagere maximale hoogte als deze getransporteerd moeten worden over de openbare weg.</li> </ul>
	

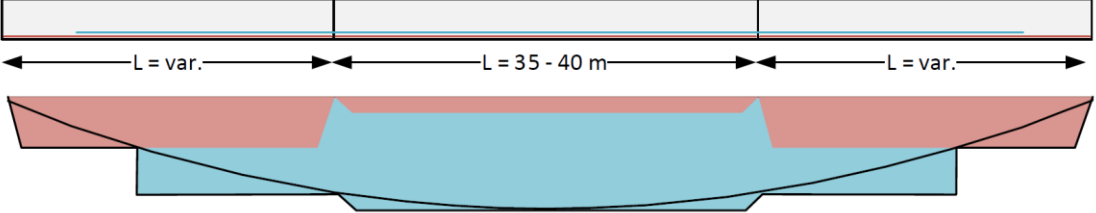
<p><b>2. 5 liggerdelen</b></p>	
<p>De ligger wordt opgedeeld in vier delen, waarbij de delen bij een overspanning van 100 meter een lengte zullen hebben van 25 meter, voor kortere overspanningen kan de lengte van beide einddelen variëren.</p>	
<p><i>Voordelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• De prefab liggerdelen zijn korter en daardoor minder zwaar dan voor een ligger in 3 delen en daardoor makkelijker te vervoeren.</li> </ul>	<p><i>Nadelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Er is een dip in de voorspanning in de maatgevende middendoorsnede voor het buigende moment in de lengterichting.</li> <li>• Een verbinding, potentieel een zwakke plek, is geplaatst in de zwaarst belaste doorsnede.</li> <li>• Deze liggers zijn net te lang om eventueel te transporteren zonder begeleiding.</li> </ul>
	

<p><b>3. 5 liggerdelen</b></p>	
<p>De ligger wordt opgedeeld in vijf delen, waarbij de delen bij een overspanning van 100 meter een lengte zullen hebben van 20 meter, voor kortere overspanningen kan de lengte van beide einddelen variëren.</p>	
<p><i>Voordelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• De liggerdelen zijn kort genoeg om eventueel te transporteren zonder begeleiding.</li> </ul>	<p><i>Nadelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Er is een dip in de voorspanning nabij de maatgevende middendoorsnede.</li> <li>• Meer prefab elementen nodig om een</li> </ul>

<ul style="list-style-type: none"> <li>De liggerdelen zijn niet te zwaar voor transport over de openbare weg, ook bij grote liggerbreedtes (zie hiervoor bijlage B4).</li> </ul>	<p>totale ligger samen te stellen.</p>
	

4.	<p><b>5 liggerdelen zonder voorspanning met voorgerekt staal</b></p>
<p>De ligger wordt opgedeeld in 5 delen die alleen voorgespannen worden met voorspanning met nagerekt staal. Hierdoor kan de voorspanning de theoretisch ideale voorspanning beter volgen. Maar het gebrek aan voorspanning met voorgerekt staal is mogelijk een probleem bij het transport van de liggerdelen. Een eventueel alternatief is om de delen licht voor te spannen om deze eenvoudiger te transporteren, deze voorspanning draagt dan maar zeer beperkt bij aan de uiteindelijke constructie.</p>	
<p><i>Voordelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Voorspanning kan de ideale gewenste voorspanning beter volgen.</li> <li>Liggerdelen zijn kort genoeg om te transporteren zonder begeleiding.</li> </ul>	<p><i>Nadelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Transport van de liggerdelen is mogelijk een probleem door gebrek aan sterkte van de ligger zonder voorspanning.</li> <li>Meer voorspanning met nagerekt staal noodzakelijk vergeleken met de andere drie varianten.</li> </ul>
	

5.	<p><b>3 liggerdelen met door gekoppelde voorspanning.</b></p>
<p>Omdat zelfs de meest efficiënte combinatie van voorspanning met voor- en nagerekt staal niet bijzonder efficiënt is, is er gekeken of dit opgelost kan worden door voorspanning die de liggerdelen verbindt te verankeren aan de voorspanning die in de fabriek is aangebracht. Hiervoor is een bijzonder verbinding in de trekzone noodzakelijk. Deze zijn geschetst als variant 4 en 5 voor de trek zone. In de hier geschetste variant wordt de voorspanning met voorgerekt staal doorgetrokken door het midden liggerdeel en verankerd in het tegenoverliggende eind deel. Het middendeel wordt hierbij relatief licht voorgespannen met voorgerekt staal, dit dient slechts om het transport te vereenvoudigen en om de top van het parabolische momentenverloop te voorzien van voorspanning.</p>	

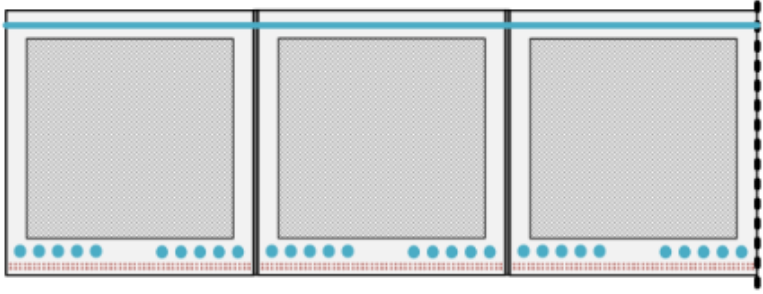
<p><i>Voordelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Efficiënt verloop van de voorspanning mogelijk, zodat de onderflens dunner en dus lichter gemaakt kan worden.</li> </ul>	<p><i>Nadelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Afhankelijk van de gebruikte koppeling in de trek zone is een lastigere koppeling noodzakelijk.</li> </ul>
	

### 6.3 Liggerprofiel

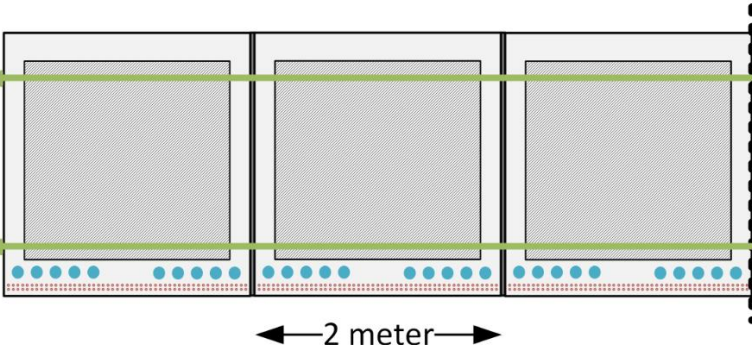
Er zijn veel verschillende mogelijkheden wat betreft de keuze voor de doorsnedeform, het liggerprofiel. De meest voor de hand liggende keuze als liggerprofiel voor een brug met een overspanning van 60 tot 100 meter is de kokerligger met dwarsvoorspanning (bij Spanbeton bekend als de SKK ligger). Met dit type liggerprofiel worden nu immers ook de grootste overspanningen met de kleinste constructiehoogte bereikt. Dit liggerprofiel is geschetst als variant 1.

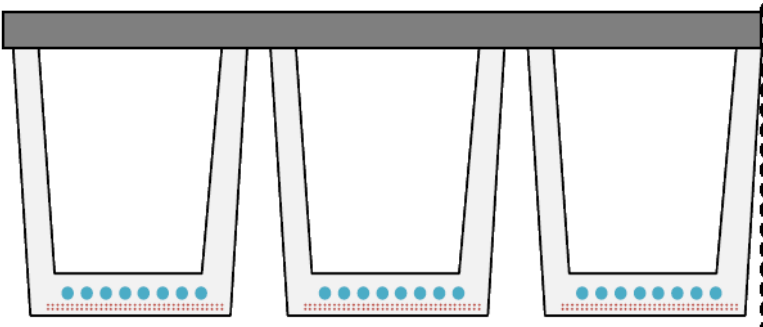
Maar de liggerdelen als standaard kokerligger met dwarsvoorspanning zijn lastig te koppelen tot een samengestelde ligger. De voorspanning in de lengterichting kan namelijk niet verankerd worden in de ligger. Een verankering zou in deze gevallen namelijk de flenzen of de lijven van de koker doorsnijden wat een ernstige verzwakking van deze delen zou betekenen. De enige constructief logische plek zou in de koker zijn, maar deze locatie is uiteraard niet te bereiken tijdens de montage. Ook de massieve einden van de kokerligger dragen bij aan een hoog eigengewicht van de totale constructie, iets wat juist voorkomen moet worden. Een mogelijke oplossing voor dit probleem is een U-vormige ligger die voorzien kan worden van een in-situ druklaag, liggerprofiel 3. De binnenzijde van de koker kan nu bereikt worden om de koppeling tussen de liggers te maken. Maar de in-situ druklaag zorgt wel voor een minder hoge betonsterkte, precies op de plek waar deze het meest effectief is, iets wat zal bijdragen aan een lager slankheid van de brug.

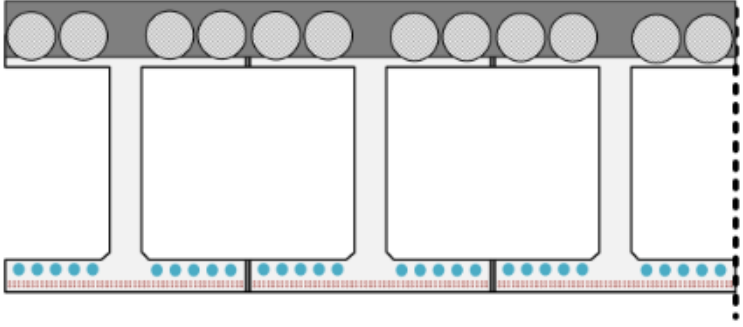
Een andere mogelijke manier om deze voorspanning te verankeren is om deze te plaatsen op de onderflens van een I-vormig profiel. Door zowel de onder als de bovenflens te verbinden door middel van dwarsvoorspanning kan van twee I-vormige profielen een koker doorsnede worden gevormd, de combinatie kokerligger. Deze heeft zowel een grote torsiestijfheid als een grote dwarsbuigstijfheid. De liggerprofielen 5 t/m 9 zijn variaties op dit idee.

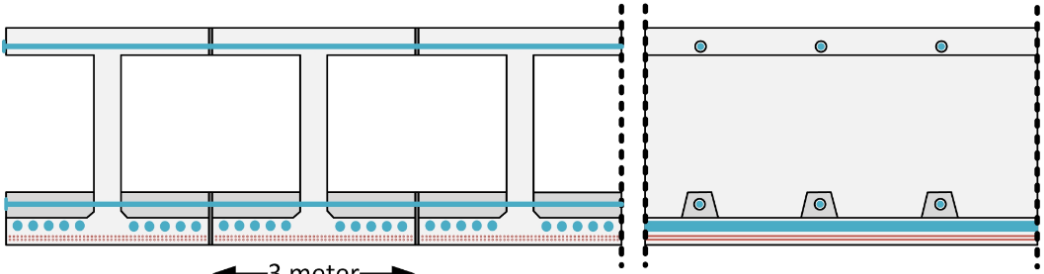
<p><b>1. Kokerliggers met dwarsvoorgespannen brugdek</b></p>	
<p>Kokerliggers, in de lengterichting voorgespannen door voorspanning met voorgerekt staal en (doorlopend) voorspanning met nagerekt staal. In de dwarsrichting is het brugdek verbonden door dwarsvoorspanning.</p>	
<p><i>Voordelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bestaande liggerdoorsnede die is toegepast voor de grootste prefab</li> </ul>	<p><i>Nadelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• De voorspanning met nagerekt staal in de lengterichting is lastig, zo niet</li> </ul>

<p>ligger overspanningen in Nederland [19]. Er is dus veel ervaring, met het gebruik van dergelijke liggers.</p>	<p>onmogelijk te verankeren in de ligger koppen.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Massieve kokereinden resulteren in een relatief hoog eigengewicht.</li> </ul>
--	---

<h2>2. Kokerliggers met externe dwarsvoorspanning</h2>	
<p>Kokerliggers, in de lengterichting voorgespannen door voorspanning met voorgerekt staal en (doorlopend) voorspanning met nagerekt staal. In de dwarsrichting verbonden door externe voorspanning</p>	
<p><i>Voordelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Constructie is stijver in de dwarsrichting en zal dus voor een betere belastingspreiding zorgen dan de standaard kokerligger met een dwarsvoorgespannen brugdek.</li> <li>• Betondrukzone wordt niet, of lager in de ligger, doorsneden door voorspankanalen.</li> </ul>	<p><i>Nadelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Randligger moet versterkt worden om de krachten van de voorspankabels op te vangen.</li> <li>• De voorspanning met nagerekt staal in de lengterichting is lastig, zo niet onmogelijk te verankeren in de ligger koppen.</li> <li>• Massieve kokereinden resulteren in een relatief hoog eigengewicht.</li> </ul>

<h2>3. U-ligger met druklaag</h2>	
<p>Een u vormige ligger waar een i-situ druklaag op gestort wordt. Deze druklaag verbindt de liggers tot een massief brugdek met een hoge torsiestijfheid.</p>	
<p><i>Voordelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Eenvoudige koker constructie waarbij de voorspanning die de ligger koppelt wel eenvoudig geplaatst kan worden.</li> </ul>	<p><i>Nadelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• In-situ druklaag is lastiger te maken in hogesterktebeton, dit resulteert in een minder sterke beton drukzone.</li> <li>• De voorspanning is minder effectief in deze doorsnede.</li> </ul>

4. I-ligger met bollendruklaag	
<p>Een verhoogde versie van de huidige railbalkliggers van Spanbeton. Deze variant wordt voorzien van gewicht besparende bollen. Hierdoor kan de druklaag dikker worden wat zorgt voor een betere belasting spreiding, terwijl het eigengewicht niet of nauwelijks toeneemt.</p>	
<p><i>Voordelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dikker brugdek zal zorgen voor beter belasting spreiding dan de huidige railbalkliggers.</li> <li>• Eenvoudige constructie, die goed aansluit bij bouw praktijk van de huidige railbalkliggers.</li> </ul>	<p><i>Nadelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kunststof bollen verzwakken de drukzone van het beton.</li> <li>• Voorspanning niet effectief in de druklaag en dus in totaal minder efficiënt.</li> <li>• Mogelijkheid van bezwijken op pons door een lokale wielbelasting.</li> <li>• Maatschappelijke acceptatie twijfelachtig na instorten parkeergarage Eindhoven.</li> </ul>

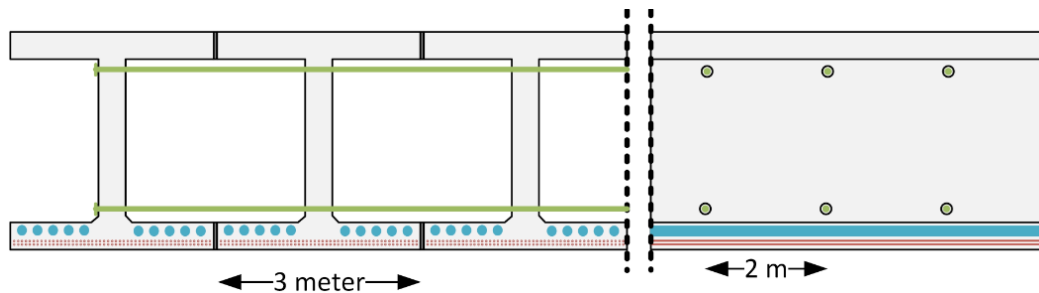
5. Combinatie kokerliggerligger	
<p>De combinatie kokerliggerligger bestaat uit I-vormige profielen met een breedte van ongeveer 3 meter die door middel van dwars voorspanning tegen elkaar worden gespannen om zo een samengestelde kokerconstructie te vormen. Door deze constructie zal de verkeersbelasting beter gespreid worden over de liggers. Door de koppeling is de constructie stijf in torsie, stijf voor buiging in de dwarsrichting maar slap voor afschuiving in de dwarsrichting. Tevens wordt door de grote effectieve breedte het aantal dwarskracht lijven gereduceerd en dus de lengte van de betondekking vermindert.</p>	
	
<p><i>Voordelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dwars en torsie stijve constructie zorgt voor goede spreiding van de verkeersbelasting over de verschillende liggers.</li> <li>• Grote effectieve breedte zorgt voor minder prefab elementen per brugdek.</li> </ul>	<p><i>Nadelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Betonnen dammetjes voor dwarsvoorspanning zorgen voor een ingewikkelde betonvorm die lastig te produceren is.</li> <li>• Lastig geschikt te maken voor een brugdek met een niet rechte kruisingshoek.</li> </ul>



- Dubbel zoveel dwarsvoorspanning noodzakelijk vergeleken met traditionele kokerliggers.

## 6. Combinatie kokerligger met externe voorspanning

Vergelijkbaar met de combinatie kokerliggerligger alleen is de dwarsvoorspanning extern geplaatst voor een eenvoudigere productie en gewichtsbesparing door het weglaten van de dammetjes voor de voorspankanalen. De voegen tussen de I-liggers zullen gemaakt worden als een mortelvoeg.



### Voordelen:

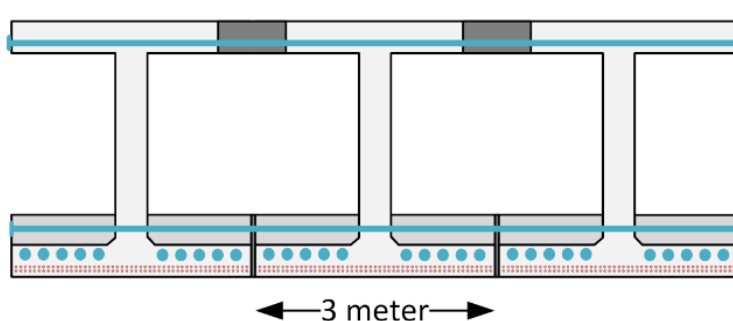
- Eenvoudigere productie dan de combinatie kokerliggerligger.
- Lager eigengewicht dan combinatie kokerligger.
- Beton drukzone wordt niet, of lager, doorsneden door voorspankanalen.
- Makkelijker geschikt te maken voor een brugdek met kruisingshoek.

### Nadelen:

- Randligger moet versterkt worden om de krachten van de voorspankabels op te vangen.
- Deze voeg, zonder doorlopend wapeningsstaal heeft een strenge eis wat betreft de minimale voorspanning.

## 7. Combinatie kokerligger met toegang door bovendeck

Vergelijkbaar met de combinatie kokerligger, alleen is de bovenflens versmald (met een gat van 1 meter) zodat na het plaatsen van de ligger makkelijker toegang te krijgen is tot de holle ruimte. Hierdoor kan er eenvoudig aan de binnenzijde van de koker gewerkt worden om bijvoorbeeld de voorspanning in de lengterichting te spannen.



### Voordelen:

- Makkelijker toegang tot holle ruimtes tijdens montage en voorspannen brugdek.

### Nadelen:

- Betondrukzone is gedeeltelijk in-situ en dus minder effectief en met een lagere betonsterkte klasse

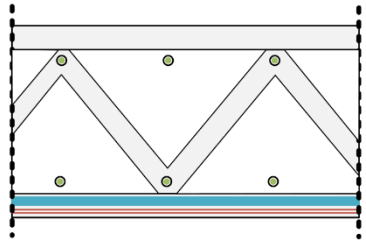
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dwars en torsie stijve constructie zorgt voor goede spreiding van de verkeersbelasting over de verschillende liggers.</li> <li>• De ligger is lichter tijdens de montage, dan de standaard combinatie kokerliggers.</li> </ul>	<p>uitgevoerd.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Onzeker of een dergelijke brede voeg mogelijk is zonder doorgaande wapening.</li> </ul>
---	---

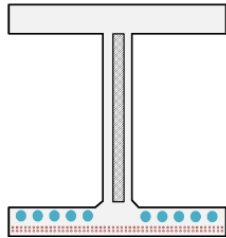
<h3>8. Vakwerk combinatie kokerligger</h3>	
<p>Afgeleid van de combinatie kokerligger de lijven van de I-ligger worden opgesplitst om in een V-vorm een vakwerk te vormen in de lengterichting. De ruimte tussen de V vormige lijven wordt opgevuld met EPS blokken of kunnen hol in twee fase gestort worden.</p>	
<p><i>Voordelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Zeer goed spreiding van de belasting door hoge torsiestijfheid, hoge buigstijfheid en hoge afschuif stijfheid in de dwarsrichting.</li> </ul>	<p><i>Nadelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• De holle ruimtes zijn minder geschikt voor werkzaamheden zoals het monteren van de voorspanning in de lang en dwarsrichting.</li> <li>• Doorsnede resulteert in een hoger eigengewicht dan combinatie kokerliggerdoorsnede (zie hiervoor bijlage B3).</li> <li>• Vorm lastig in hoogte schaalbaar.</li> </ul>

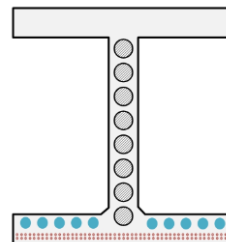
<h3>9. Combinatie kokerligger met in-situ druklaag</h3>	
<p>Een combinatie kokerligger variant waarbij de dwarsvoorgespannen bovenflens is vervangen door een in-situ druklaag. Hierdoor is het profiel minder zwaar en hoog tijdens het transport.</p>	
<p><i>Voordelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Zeer goede spreiding van de belasting door hoge torsiestijfheid en hoge buigstijfheid.</li> <li>• Holle ruimte tussen de liggers is zeer gemakkelijk toegankelijk voor het samenstellen van de totale ligger.</li> </ul>	<p><i>Nadelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Voorspanning minder effectief vergeleken met volledig geprefabriceerde profielen.</li> <li>• De druklaag kan zeer waarschijnlijk niet in de hoogste betonsterkteklasse uitgevoerd worden.</li> </ul>

<ul style="list-style-type: none"> <li>Ligger zal lichter zijn als deze getransporteerd moet worden.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Door de lage betonsterkteklasse van de druklaag kan er minder slank gebouwd worden.</li> </ul>
---	---

### 6.3.1 Gewicht besparende maatregelen

<b>1. Vakwerk liggerlijf</b>	
<p>De dwarskracht lijven van de liggers kunnen uitgevoerd worden als vakwerk in beton op locaties waar de dwarskracht minimaal is. Eventueel kan dit gecombineerd worden met de vakwerkcombinatieligger om een volledig prefab betonnen ruimtevakwerk ligger te produceren.</p>	
<p><i>Voordelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Kan leiden tot een aanzienlijke gewichtsbesparing.</li> </ul>	<p><i>Nadelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>De vakwerkvorm kan alleen met een relatief ingewikkelde bekisting geproduceerd worden.</li> <li>Lastig in hoogte schaalbaar.</li> </ul>

<b>2. Liggerlijf gevuld met EPS</b>	
<p>De dwarskracht lijven van de liggers kunnen in delen met een minimale dwarskracht gevuld worden met EPS platen om zo het totale gewicht van de constructie te verminderen. Dit kan bijvoorbeeld in drie tot vier diktestappen over de ligger uitgevoerd worden, om zo alleen materiaal te hebben op die plekken waar het noodzakelijk is.</p>	
<p><i>Voordelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Besparing op het eigengewicht van de ligger mogelijk.</li> <li>Eenvoudig in productie vanwege constante bekistingsvorm.</li> </ul>	<p><i>Nadelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Beide lijven zullen belast worden op buiging, iets wat lastig is te voorzien van wapening, door de beperkte breedte.</li> </ul>

<b>3. Liggerlijf gevuld met bollen/ buizen</b>	
<p>De dwarskracht lijven van de liggers kunnen in delen met een minimale dwarskracht gevuld worden met kunststof bollen of buizen om zo het totale gewicht van de constructie te verminderen. Hierbij voordeel van kunststofbollen ten opzichten van een EPS blok dat de buigstijfheid van het lijf minder achteruitgaat ten opzichten van een massief lijf.</p>	
<p><i>Voordelen:</i></p>	<p><i>Nadelen:</i></p>

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gewichtsbesparing.</li> <li>• Eenvoudig in productie vanwege constante bekistingsvorm.</li> <li>• Resulteert in een buig stijver ligger lijf ten opzichten van EPS blokken.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bollen vorm is minder efficiënt voor het afdragen van de dwarskracht in de lengterichting van de ligger.</li> </ul>
---	--

<b>4. Afslanken liggerlijven en bovenflens</b>	
<p>De doorsnede van de ligger kan variëren over de lengte van de overspanning. Met bijvoorbeeld een smal lijf daar waar weinig dwarskracht is en een verdikte bovenflens op de plekken waar het buigende moment het grootst is.</p>	
<p><i>Voordelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kan leiden tot een aanzienlijke gewichtsbesparing voor de volledige constructie.</li> </ul>	<p><i>Nadelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Minder aantrekkelijk voor de productie omdat het afstellen van de bekistingsvorm veel werk kost.</li> <li>• Dunne liggerlijven verminderen dwarsbuigingsstijfheid van het brugdek.</li> <li>• Het verdunnen van de lijven is niet altijd mogelijk omdat er dan onvoldoende ruimte is om de beugelwapening te plaatsen.</li> </ul>

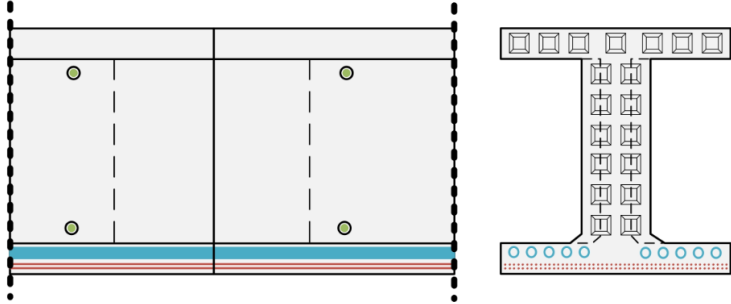
<b>5. Stalen liggerlijf</b>	
<p>Om gewicht te besparen kunnen de lijven van de ligger uitgevoerd worden met een stalen lijf om hiermee gewicht te besparen. Het idee is dat een stalen liggerlijf beter is in het opnemen van de schuifspanning dan een gewapend betonnen liggerlijf. Eventueel kan er gekozen worden voor een variant met een sandwichconstructie, twee stalen platen onderling verbonden, met een dunne laag beton ertussen. Een ander mogelijkheid die vanuit duurzaamheid de voorkeur heeft is een stalen lijf omhullen met een betonnen schil om deze te beschermen tegen corrosie.</p>	
<p><i>Voordelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kan leiden tot een aanzienlijke gewichtsbesparing door het verminderen van de hoeveelheid</li> </ul>	<p><i>Nadelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Risico op uitknikken van de plaat (plate buckling).</li> <li>• Stalen plaat kan effectiviteit</li> </ul>

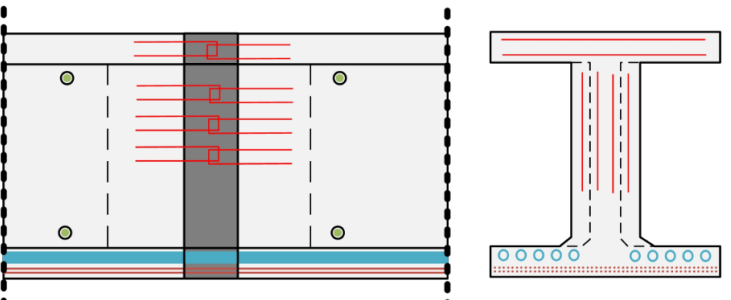
<p>beton.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Minder bekisting noodzakelijk indien de sandwichconstructie is toegepast.</li> </ul>	<p>voorspanning beïnvloeden.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Duurzaamheidsproblemen door onvoldoende hechting tussen het beton en het staal, of het bloot komen te liggen van de stalen plaat.</li> </ul>
---	--

## 6.4 Liggerkoppeling

De uitwerking van de liggerkoppeling is opgesplitst in twee delen. De koppeling in de drukzone, dus tussen het beton. Deze koppeling moet tevens de dwarskracht kunnen overdragen. En de koppeling in de trek zone, dit beschrijft hoe en wat voor soort voorspannsysteem gebruikt kan worden om de liggers onderling te koppelen.

### 6.4.1 Drukzone

1.	<b>Maatvast kopschot</b>
<p>Liggereinde met dwarskrachtanden, waarbij de betonnen dwarskrachtanden gevormd worden door een geprofileerd zeer maatvast kopschot. De liggers kunnen vervolgens met een dikke lijm of mortelvoeg met elkaar worden verbonden.</p>	
<p><i>Voordelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>De liggers zijn onderling uitwisselbaar.</li> <li>De verbinding kan demontabel gemaakt worden door gebruik te maken van een niet hechtende mortelvoeg.</li> </ul>	<p><i>Nadelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>De maatvastheid van het kopschot en daardoor de pasvorm van de verbinding is onzeker, zeker als met een lijmvoeg wordt gewerkt.</li> <li>Schuinste liggereind niet of nauwelijks aan te passen om zeegverschillen te corrigeren.</li> </ul>

2.	<b>Natte knoop</b>
<p>Ligger einde met uitstekende wapening en geprofileerde koppen, koppeling wordt op of nabij de eindlocatie gestort om een massieve ligger te vormen. Mogelijkerwijs kan de betonsterkte verhoogd worden door gebruik te maken van omsloten wapening. Ook kan de verharding van het beton versneld worden door deze te verwarmen tijdens het uitharden.</p>	

<p><i>Voordelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• De liggers zijn onderling uitwisselbaar.</li> <li>• Eenvoudige verbinding met een goede maakbaarheid.</li> <li>• Zeeg van de ligger is te corrigeren op de bouwlocatie.</li> <li>• Als de voeg doorsnede wordt door betonstaal geldt een minder zware eis ten aanzien van de minimale voorspanning in de doorsnede volgens NEN-EN 1992-2 7.3.1 [27].</li> </ul>	<p><i>Nadelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Deze verbinding kost meer werk op of nabij de bouwplaats.</li> <li>• Zettingsvrije steunpunten zijn noodzakelijk om deze verbinding precies te kunnen maken.</li> </ul>
---	---

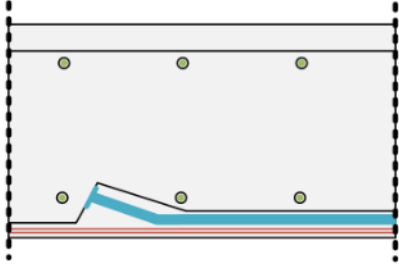
<b>3. Stalen plaat met profilering</b>	
<p>Op de kop van de ligger wordt een stalen plaat, eventueel van roestvaststaal, ingestort die door middel van uitstekende gelaste stekken aan het beton verbonden is. De andere zijde van de plaat is voorzien van profilering die perfect past op de plaat op het aansluitende andere liggereinde.</p>	
<p><i>Voordelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Eenvoudige koppeling die zeer weinig tijd kost om te maken op de bouwlocatie.</li> </ul>	<p><i>Nadelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hoge verwachte kostprijs stalenplaat.</li> <li>• Het onbeschermd staal kan gaan corroderen en is daarom een duurzaamheidsrisico.</li> <li>• Moeilijke detaillering met betonnen rand om de stalen plaat.</li> <li>• Vermoeiing kan een probleem zijn voor de gelaste details in de plaat.</li> <li>• Schuinte liggereind niet aan te passen om de zeeg te corrigeren.</li> </ul>

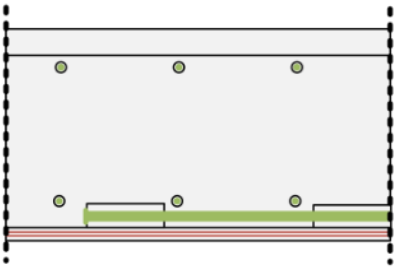
<b>4. Prefab betonnen kop blok</b>	
<p>Het ligger eind wordt gevormd door een apart gestort betonnen 'lego' blok voorzien van dwarskracht tanden. Dit eind blok is eerder apart gestort tegen het eind blok van de te koppelen ligger. Doordat de kop blokken tegen elkaar gestort zijn is sluiten de koppen perfect op elkaar aan. De liggers kunnen vervolgens met lijm, of zelf als een droge voeg met elkaar worden verbonden.</p>	

<p><b>Voordelen:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Maatvastheid gegarandeerd door het tegen elkaar aan storten van de kopblokken.</li> <li>• Kwaliteit dwarskracht tanden beter te garanderen door een aparte, meer kleinschalige productie.</li> <li>• Eenvoudige koppeling die weinig tijd kost tijdens de montage.</li> </ul>	<p><b>Nadelen:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Drie 'verbindingen' per verbinding (ligger-blok, blok-blok, blok-ligger).</li> <li>• Liggers niet onderling uitwisselbaar.</li> <li>• Schuine liggereind niet of nauwelijks achteraf aan te passen om zeeg te corrigeren.</li> </ul>

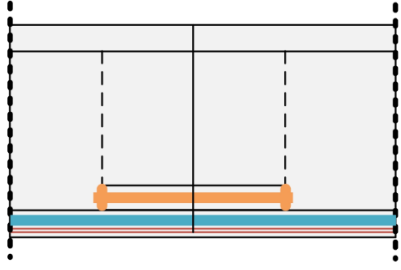
<p><b>5. Prefab koppel dwarsdrager</b></p>	
<p>De koppeling tussen de ligger wordt gevormd door een prefab blok met vertanding aan beide kanten. De ligger worden vervolgens tegen dit koppelblok aan gestort. Deze koppelblokken kunnen door middel van dwarsvoorspanning tot een prefab dwarsdrager gevormd worden. De voegen kunnen gevuld worden met lijm of een mortel.</p>	
<p><b>Voordelen:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dwarsdrager zorgt voor extra dwarsstijfheid en dus een betere spreiding van de belasting.</li> <li>• Goede aansluiting tussen onderdelen door het tegen elkaar aanstorten van de onderdelen.</li> </ul>	<p><b>Nadelen:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dwarsdrager zorgt voor extra eigengewicht.</li> <li>• Liggers zijn niet uitwisselbaar.</li> <li>• Prefab dwarsdrager resulteert in zeer kleine uitvoeringstoleranties voor het brugdek.</li> <li>• Meer verbindingen noodzakelijk om tot een totaal brugdek te komen.</li> </ul>

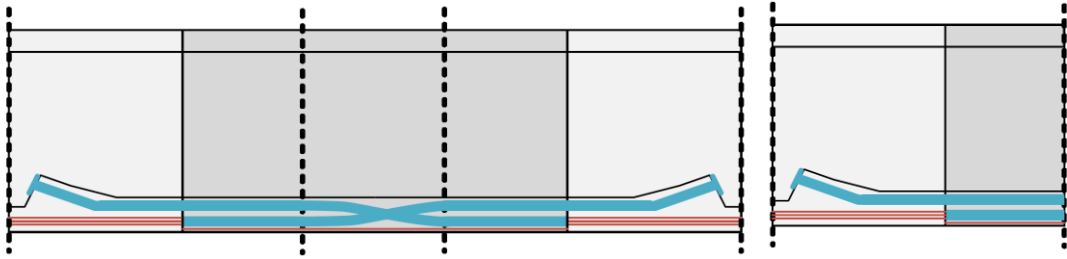
## 6.4.2 Trek zone

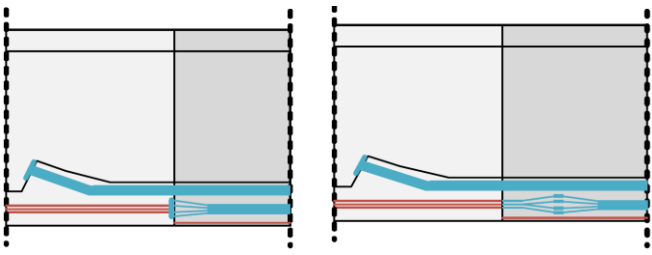
1.	<b>Voorspanning met nagerekt staal</b>	
<p>De liggerdelen worden door voorspanning met nagerekt staal met elkaar verbonden. De voorspanning kan verankerd worden in een betonnen verankeringsblok dat geplaatst is op de onderflens van de I-liggers.</p>		
<p><i>Voordelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Gewichtsbesparing mogelijk door verlagen trekflens achter verankering.</li> <li>• Recht verloop van het verloop zorgt voor weinig wrijvingsverliezen tijdens het spannen.</li> </ul>		<p><i>Nadelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Extra eigengewicht voor verankering, dit wordt versterkt omdat de technische toelatingen met betrekking tot de verankering alleen geschreven zijn voor lage betonsterkteklasse.</li> </ul>

2.	<b>Externe voorspanning</b>	
<p>De externe voorspanning wordt verankerd in een betonnen blok. De voorspankabel zal door afbuigpunten geleid worden om de kabel recht te houden. Dit gebeurt ook ter plaatse van de koppeling tussen de liggers.</p>		
<p><i>Voordelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Meer geschikt voor circulaire toepassing, door eenvoudigere demontage in lengterichting.</li> <li>• Gewichtsbesparing doordat omhulling door beton niet noodzakelijk is.</li> <li>• Zeer weinig wrijvingsverliezen bij het spannen.</li> </ul>		<p><i>Nadelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Voorspanning kan minder laag in de doorsnede geplaatst worden.</li> <li>• Minder gunstig in uiterste grenstoestand, doordat staal rek zich verdeeld over de volledige kabellengte. Waardoor de voegen openklappen en de torsiestijfheid van het brugdek sterk afneemt.</li> </ul>



3. Voorspanstaven	
<p>De koppeling tussen de liggerdelen kan ook gemaakt worden met behulp van voorspanstaven. Deze staven worden dan over een kleine lengte gebruikt specifiek om de dip in de voorspankracht ter plaatse van de koppeling te voorkomen.</p>	
	
<p><i>Voordelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mogelijke oplossing om de voorspanning efficiënter te verdelen over de ligger.</li> <li>• Kan gebruikt worden om de voorspanningsdip zoals beschreven in paragraaf 2.2 tegen te gaan.</li> </ul>	<p><i>Nadelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Staaf kan niet gebogen worden en dus minder laag in de doorsnede geplaatst worden.</li> <li>• Kan alleen gebruikt worden in combinatie met andere doorgaande voorspanning, zie hiervoor bijlage B2.</li> </ul>

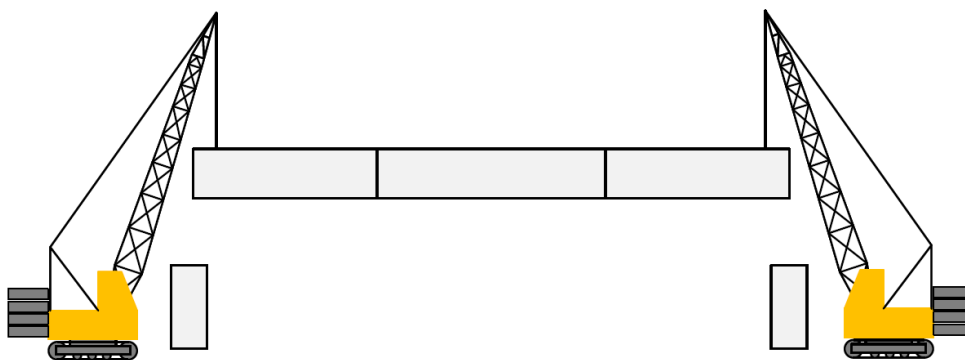
4. Door getrokken voorspanstrengen	
<p>Omdat de combinatie van voorspanning met voorgerekt staal en met nagerekt staal zorgt voor een inefficiënt verloop van de voorspanning in de doorsnede, is gekeken of de voorspanning met voorgerekt staal doorgekoppeld kan worden om zo de betonspanningsdip bij de koppelingen zoals deze geschetst is voor het verschillende aantal liggerdelen te voorkomen. Hiervoor worden de strenguiteinden van de eindliggerdelen niet afgeslepen maar juist extra lang gemaakt, zodat bij het samenstellen van de complete ligger deze strengen gebruikt worden om het middelste liggerdeel voor te spannen. Deze strengen worden dan verankerd in het tegenoverliggende liggerdeel. Dit betekent wel dat de eindliggerdelen samen met uitstekende strengen van ongeveer 50 tot 60 meter lengte geproduceerd en getransporteerd moeten worden. Het voorspankracht verloop van deze variant is geschetst als variant 5 voor het aantal liggerdelen.</p>	
	
<p><i>Voordelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Efficiënter gebruik van voorspanstaal in de ligger mogelijk.</li> <li>• Mogelijk minder dikke onderflens mogelijk, doordat er minder staal noodzakelijk is.</li> </ul>	<p><i>Nadelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Maken van de koppeling kan lastiger worden door de ingewikkelde detaillering.</li> <li>• De koppelmethode kan lastiger worden tijdens de uitvoering.</li> <li>• Het is onzeker of het combineren van twee voorspansystemen is toegestaan volgens de geldende normen.</li> </ul>

5. Door gekoppelde voorspanning met ankers	
<p>De koppeling tussen de liggers kan lastig worden om te maken met de uitstekende strengen zoals geschetst voor variant 4. Eventueel kan ook besloten worden de voorspanning te koppelen door middel van bestaande verankersystemen. Hierbij kan gekozen worden voor een doorkoppelanker dat zit in de rand van het prefab liggereind deel of voor het doorkoppelen van de individuele strengen.</p>	
<p><i>Voordelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Efficiënter gebruik van voorspanstaal in de ligger mogelijk.</li> </ul>	<p><i>Nadelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Maken van de koppeling kan lastiger worden door de ingewikkelde detaillering.</li> <li>• De verankeringen zijn beproefd voor een lagere vermoeingssterkte vergeleken met de voorspanstrengen [28, p. 23].</li> <li>• De verankeringssystemen maken een dikkere onderflens noodzakelijk vergeleken met variant 4.</li> <li>• Door slip in de verankering zal de voorspankracht lokaal sterk dalen.</li> </ul>

## 6.5 Transport en montage

Indien gekozen wordt voor een ligger in drie of vier delen zal hoogst waarschijnlijk het transport van de liggerdelen kritisch worden. Omdat deze delen langer zijn dan 22 meter kunnen deze, met het huidige materiaal, alleen op een hogere vrachtwagen vervoerd worden. Dit betekent dat de gewenste elementhoogte op 2,8 meter ligt, iets wat waarschijnlijk niet gehaald zal worden met de huidige betonsterkteklasse. Ook zal het gewicht van deze liggerdelen tegen de grens van het maximale gewicht aan liggen. Indien gekozen wordt om de ligger op te delen in 5 delen spelen deze beschreven problemen minder omdat de liggerdeel lengte dan minder dan 20 meter wordt. Een oplossing voor deze maximale hoogte van 2,8 meter is het ontwikkelen van een nieuw type vrachtwagen die speciaal voor de maximale hoogte van 3,2 meter per liggerdeel geschikt is.

### 6.5.1 Montage als ligger



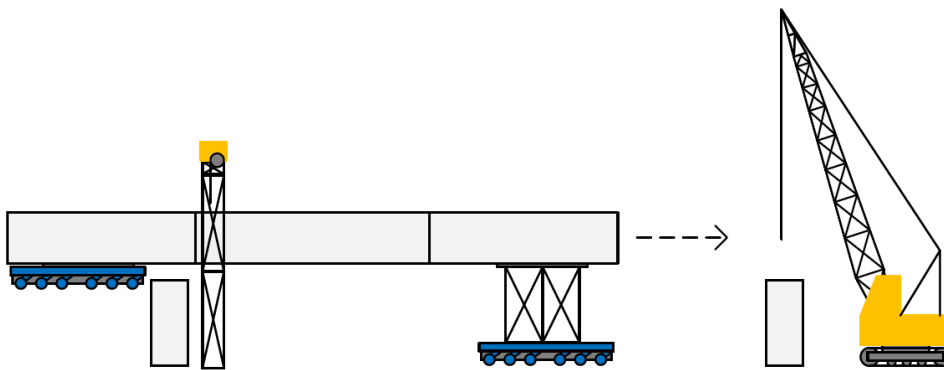
Figuur 6-2 een schets van de bouwmethode: montage als ligger.

Een mogelijke montagemethode om het brugdek samen te stellen is de montage als traditionele prefab ligger. Hierbij worden de liggerdelen nabij de bouwlocatie samengesteld tot

een complete ligger voor de volledige overspanning. De ligger kan vervolgens met twee hijskranen, op dezelfde manier als nu voor de liggers gebruikelijk is gemonteerd worden. Hierdoor zijn er wel twee extreem sterke en dus dure kranen noodzakelijk om het geschatte ligger gewicht van ongeveer 400 tot 500 ton te kunnen dragen. Dit enorme gewicht dat gehesen moet worden is het grootste nadeel van de bouwmethode. Maar ook een slechte ondergrond kan een probleem zijn zowel voor het samenstellen van de liggers als voor de extreem zware hijskranen. Het belangrijkste voordeel is dat de constructie met minimale hinder en bijzonder snel gebouwd kan worden. Als alle liggerdelen gekoppeld zijn tot een ligger zou dit viaduct van 100 meter in slechts een nacht over een snelweg gebouwd kunnen worden.

Ook voor een kanaalbrug is dit een aantrekkelijke bouwmethode. De meest logische keuze is dan om een of twee drijvende bokken te gebruiken die de gecombineerde liggers op hun plaats kunnen leggen. Ook een kanaalbrug is op deze manier relatief snel te bouwen.

### 6.5.2 Inrijden ligger vanaf landhoofd

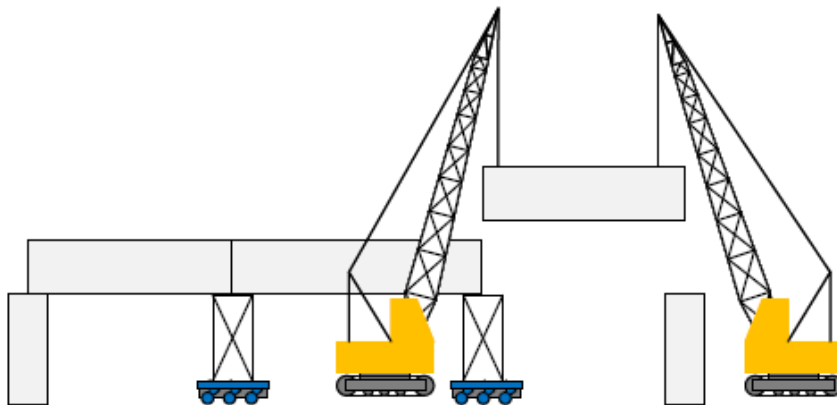


*Figuur 6-3 een schets van de bouwmethode: inrijden ligger vanaf landhoofd, met geschetst in donkerblauw de SPMT's.*

Een andere mogelijke montagemethode is om de liggers achter het landhoofd van de brug samen te stellen en vervolgens met behulp van SPMT's vanaf het landhoofd over de weg te rijden. SPMT's zijn platte voertuigen met onafhankelijk gestuurde wielen die gecombineerd kunnen worden om zo extreem zware en grote lasten te vervoeren. Tenslotte is er alleen een relatief lichte hijskraan of portaalkraan noodzakelijk om de ligger op de opleggingen te plaatsen. Ook met deze bouwmethode kan het brugdek relatief snel en met weinig hinder gebouwd worden. De snelweg of het kanaal hoeft immers alleen afgesloten te worden als de ligger ingereden en op de opleggingen geplaatst wordt.

Deze bouwmethode is uiteraard ook mogelijk voor een kanaalbrug. Alleen zal de brug dan naar de overkant gevaren moeten worden met een ponton in plaats van gereden met de SPMT's.

### 6.5.3 Samenstellen van de ligger op eindlocatie



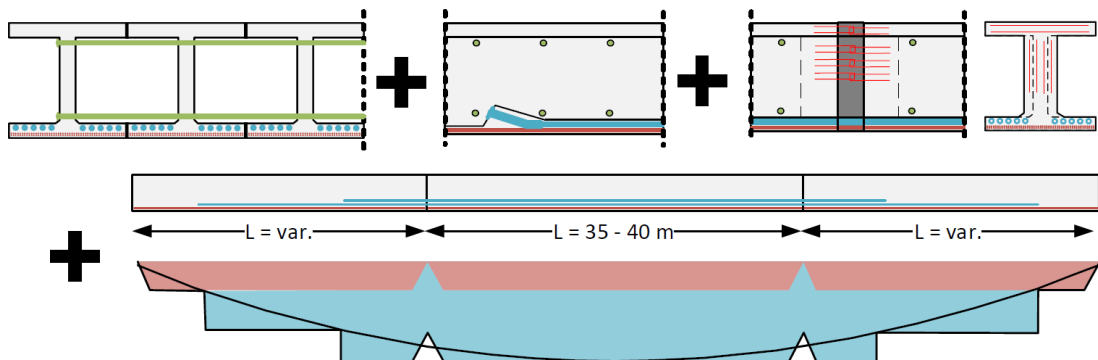
Figuur 6-4 een schets van de bouwmethode: samenstellen ligger op eindlocatie.

Tenslotte kunnen de liggerdelen ook gemonteerd worden op hulpconstructies boven de weg. Dit heeft als belangrijkste voordeel dat het maximaal te hijsen gewicht een stuk lager is en er dus eenvoudigere kranen gebruikt kunnen worden, ook is geen bouwterrein in de omgeving benodigd om de liggerdelen samen te stellen. Hiervoor zijn wel tijdelijke hulpconstructies op de snelweg noodzakelijk, maar indien deze verrijdbaar worden gemaakt kan met deze bouwmethode toch relatief snel gebouwd worden. Tenslotte is het van belang dat de verbindingen tussen de ligger snel gemaakt kunnen worden anders moet de snelweg alsnog lang afgesloten worden, iets wat juist voorkomen moet worden. Deze bouwmethode kan niet gebruikt worden om een kanaal te overbruggen, daar kunnen immers zeer moeilijk hulpconstructies geplaatst worden.

## 6.6 Samengestelde varianten van de samengestelde liggerbrug

Met behulp van de beschreven deeloplossingen voor een mogelijke prefab betonnen samengestelde liggerbrug zijn twee varianten samengesteld die vergeleken zullen worden met de andere opgestelde varianten om een mogelijke oplossing te vinden om een prefab betonnen brug te bouwen met een overspanning tot ongeveer 100 meter.

### 6.6.1 Variant 1: 3-delige samengestelde liggerbrug



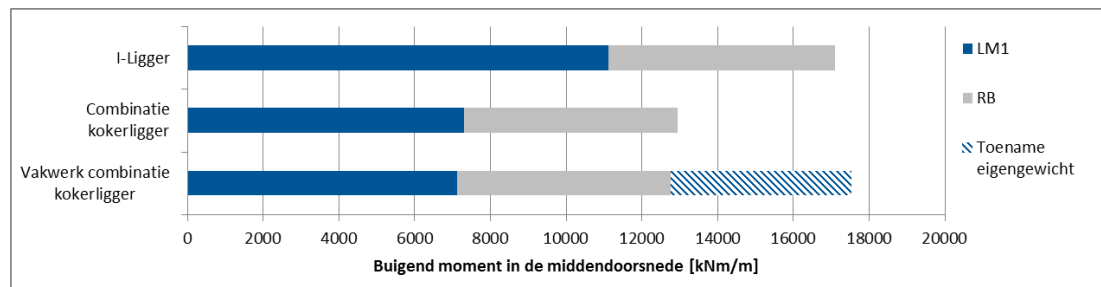
Figuur 6-5 een schets van de verschillende deeloplossingen die gecombineerd zijn om variant 1 (zonder door gekoppelde voorspanning) te vormen.

De totale ligger zal opgedeeld worden in 3 liggerdelen. Omdat hierdoor de meest efficiënte combinatie van de voorspanning met voor- en nagerekt staal in de lengterichting mogelijk is. Er zal geprobeerd worden het middelste liggerdeel zo lang mogelijk te maken, dit om de koppeling tussen de liggerdelen zo ver mogelijk uit het midden te plaatsen. Hierbij mag het middelste liggerdeel niet zwaarder worden dan 170 ton om deze transporteerbaar te houden. Dit is het geval bij een liggerlengte van 35 tot 40 meter, met een effectieve liggerbreedte van 2 meter (zie hiervoor bijlage B1).

Een nadeel van deze smalle breedte is dat er relatief veel lijven in het brugdek aanwezig zullen zijn waarvoor een minimale breedte van 200 mm geldt volgens NEN 1992-2 NB 9.2 (101) [27], hierdoor is het niet goed mogelijk om de doorsnede te laten variëren over de overspanningslengte en kan het eigengewicht minder geoptimaliseerd worden. Indien noodzakelijk voor de montage zal de bovenflens versmald zijn bij de liggereinden zodat de voorspanning met nagerekt staal in de holle ruimte eenvoudig bereikt kan worden.

De liggerdoorsnede voor variant 1 zal bestaan uit een de I-vormige doorsnede van de combinatie kokerligger met externe voorspanning. Deze koker heeft als voordeel dat de voorspanning in de lengterichting eenvoudig in de onderflens gemonteerd kan worden, dit in tegenstelling tot meer traditionele kokerliggers.

Het samengestelde brugdek is tevens goed in het spreiden van de belasting, alleen de vakwerkcombinatie kokerligger zal hierin, door de hoge dwarsafschuiftijfheid, beter presteren. Maar deze extra spreiding van de belasting weegt niet op tegen het hogere eigengewicht van dit type doorsnede (zie hiervoor bijlage B3). De keuze voor de combinatie kokervariant met externe voorspanning is gemaakt vanwege de verwachting dat dit type voorspanning zorgt voor een laag eigengewicht en om het viaduct demontabel te maken in de dwarsrichting.



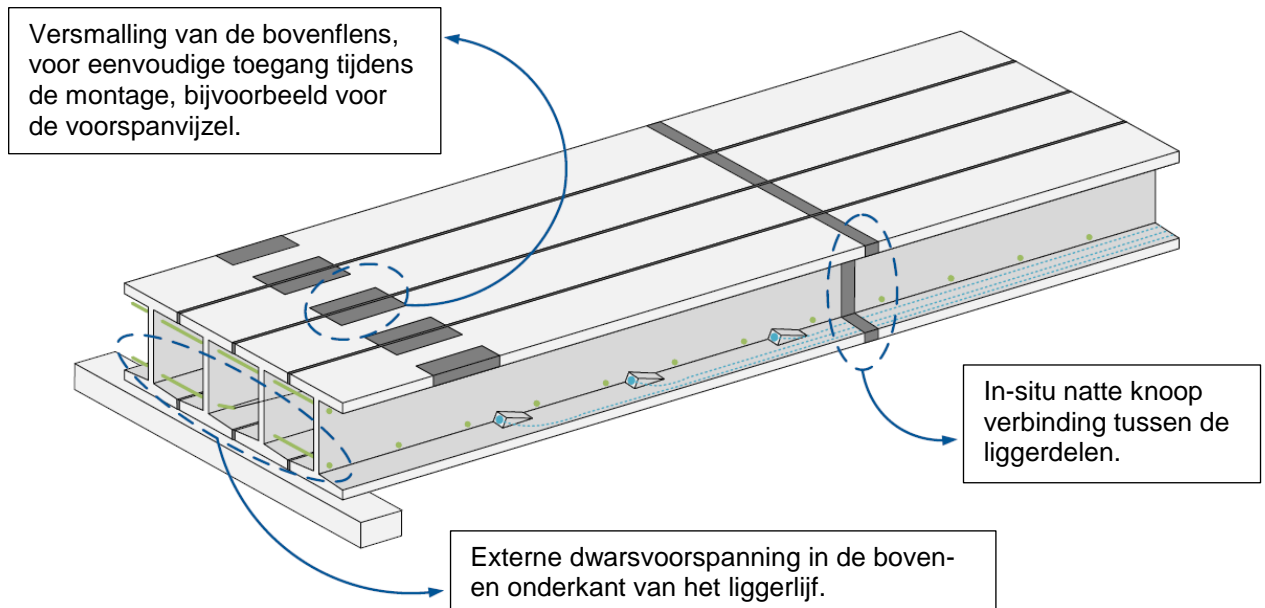
Figuur 6-6 Een vergelijking van het maximale buigende moment in de randligger voor een brugdek opgebouwd uit vakwerk combinatie kokerliggers, combinatie kokerliggers en I-liggers. Hierin is LM1 der verkeersbelasting en RB de rustende belasting.

Opgemerkt moet worden dat deze betere belastingspreiding niet zal leiden tot minder gebruik van voorspanstaal, de belasting moet immers op een ander manier, via torsie en dwarsbuiging, afgedragen worden aan de opleggingen en hiervoor is juist extra staal noodzakelijk. Maar deze spreiding zorgt wel dat het buigend moment in de lengterichting verminderd zodat hiervoor een kleinere arm en dus een slankere constructie, voldoende is. Een alternatief voor het hoge eigengewicht van de te transporteren liggerdelen is de combinatie kokerligger met een in situ druklaag. Door het ontbreken van het brugdek is deze liggerdoorsnede aanzienlijk lichter. Maar de voorspanning zal minder effectief zijn in deze doorsnede, zodat meer constructiehoogte noodzakelijk is om geschikt te zijn voor dezelfde belasting. Hierdoor zal ook de profielhoogte moeten stijgen wat ook weer probleem kan zijn voor het transport. Hierbij mag de uitstekende beugelwapening niet vergeten worden om de hoogte voor het transport te bepalen.

De doorsnede vorm zal variëren over de lengte van het liggers, dit om gewicht te besparen. Het eigengewicht van de constructie zou nog verder verminderd kunnen worden door het toepassen van en stalen ligger lijf of een ruimte vakwerk. Maar hier is van afgezien omdat beide deeloplossingen ook weer eigen, nog grotere nadelen hebben.

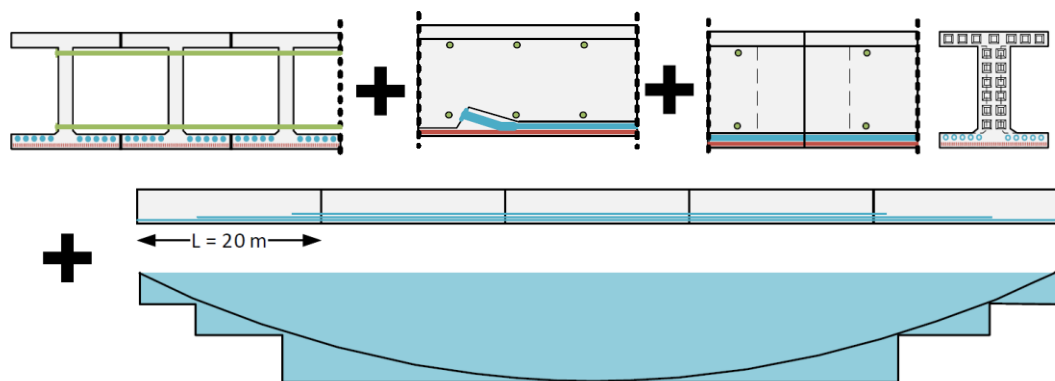
De liggerkoppeling in de drukzone zal gemaakt worden met behulp van een natte knoop verbinding met een dikte van ongeveer een halve meter, hierdoor is er doorgaand wapeningsstaal in de voeg. Zodat er een lagere eis geldt wat betreft de minimale voorspanning in de doorsnede. Door deze lagere eis kan er voorspanstaal bespaard worden, dit heeft tevens het voordeel dat de onderflens dunner gemaakt kan worden. Wat weer bijdraagt aan een vermindering van het eigengewicht. Een ander voordeel van deze verbinding is de mogelijkheid om zeegverschillen bij het samenstellen van de liggers te corrigeren. Het belangrijkste nadeel van de natte knoop verbinding is dat het relatief veel tijd kost om de verbinding te maken. Maar omdat er slechts twee verbindingen per ligger gemaakt hoeven te worden wordt dit als een relatief klein nadeel gezien.

Voor de koppeling in de trekzone zal gebruik worden gemaakt van variant 1, koppeling met behulp van nagerekt staal. Deze koppeling heeft als voordeel dat deze relatief eenvoudig aan te brengen is in de doorsnede, dit in tegenstelling tot variant 4 en 5 en dat de torsiestijfheid van het brugdek behouden blijft, ook in de uiterste grenstoestand.



Figuur 6-7 een schets van de beschreven variant 1: de 3-delige samengestelde liggerbrug.

### 6.6.2 Variant 2: 5-delige samengestelde liggerbrug



Figuur 6-8 een schets van de verschillende deeloplossingen die gecombineerd zijn om variant 2 te vormen.

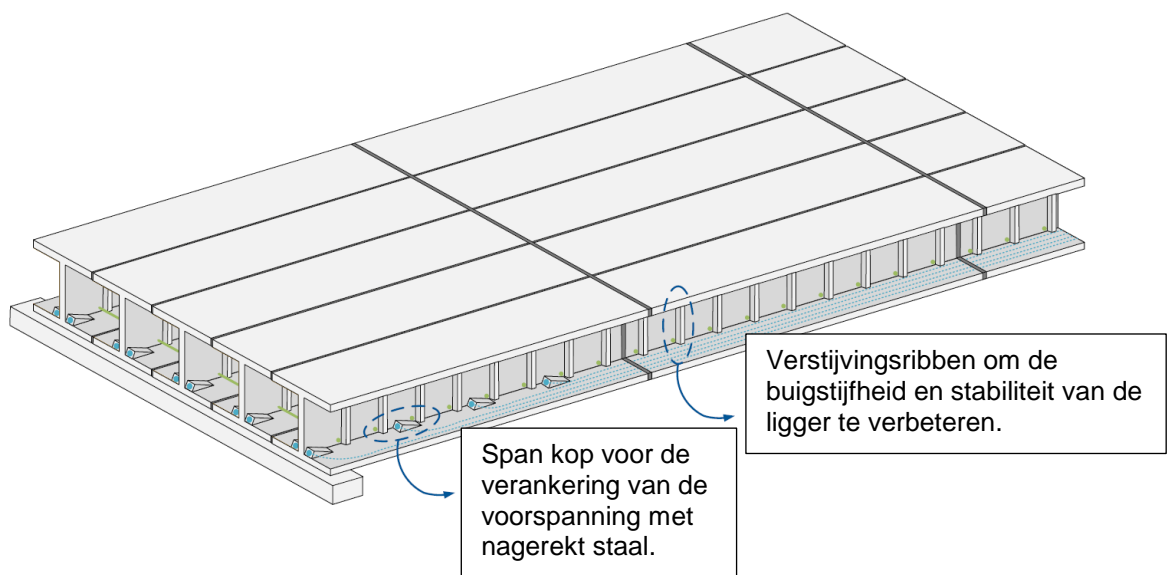
In deze variant is gekozen voor het opdelen van de totale ligger in 5 delen. Hierdoor daalt het eigengewicht per liggerdeel, wat het transport van de delen vereenvoudigt. De liggerdelen zullen minimaal voorgespannen worden met voorgerekt staal. Deze voorspanning heeft als doel om de liggers ongescheurd te kunnen transporteren en kan eventueel een heel klein beetje mee helpen voor het maximale buigend moment in de middendoorsnede.

Ook bij deze variant is gekozen voor de combinatie kokerligger bestaand uit I-vormige profielen die door middel van externe voorspanning met elkaar worden verbonden tot een constructie die effectief de belasting spreid in de dwarsrichting. Afwijkend van de eerste variant is er voor gekozen om de liggers een werkende breedte van 3 meter te geven. Dit heeft als voordeel dat het aantal lijven in het totale brugdek verminderd kan worden, hierdoor kan de dikte van deze lijven beter geoptimaliseerd worden afhankelijk van de maximale dwarskracht. Tevens worden deze lijven van ribben voorzien om de buigstijfheid van te verhogen en de wapening voor deze buiging eenvoudig te kunnen plaatsten. Op deze manier stijgt het eigengewicht per ligger, maar zal het eigengewicht per meter brugdekbreedte juist

dalen, wat zorgt voor een lagere totale belasting door het eigengewicht van de constructie. Omdat de liggerlengte in deze variant maximaal 20 meter is, zal het eigengewicht per liggerdeel lager liggen, wat voordelig is voor het transport (zie hiervoor bijlage B4).

De liggerkoppeling zal gemaakt worden met behulp van een mortelvoeg. Dit maakt het mogelijk om de ligger relatief snel samen te stellen, met weinig werk op de bouwplaats. Doordat de ligger slechts licht voorgespannen is, zal de zeeg klein zijn en zullen dus de zeegverschillen ook minimaal zijn. Omdat de zeegverschillen minimaal zijn, is ook geen dikke voeg of natte knoop verbinding nodig om deze te corrigeren. Om deze voeg te kunnen maken zullen de koppen voorzien worden van profilering. Om deze profilering precies te maken is een maatvast kopschot noodzakelijk. Maar kleine afwijkingen zijn te corrigeren door de voeg zodat de productie niet teveel bemoeilijkt wordt door de gewenste nauwkeurigheid. Dit in tegenstelling tot bijvoorbeeld de stalen plaat verbinding en de prefab kop blok verbinding, die bijzonder nauwkeurig geplaatst moeten worden.

In de lengterichting zullen de liggerdelen verbonden worden door voorspanning met nagerekt staal. Deze voorspanning zal het grootste deel van de belasting dragen. Om de opslag, transport en montage van de liggerdelen te vereenvoudigen zullen de liggerdelen licht voorgespannen worden met voorgerekte staal, hierdoor wordt scheurvorming voorkomen. De koppeling in de trekzone wordt gemaakt door middel van voorspanning met nagerekt staal. Doordat er geen doorgaande wapening in de mortelvoeg aanwezig is geldt hiervoor wel een strenge eis met betrekking tot de minimale voorspanning in de voeg [27] [5].

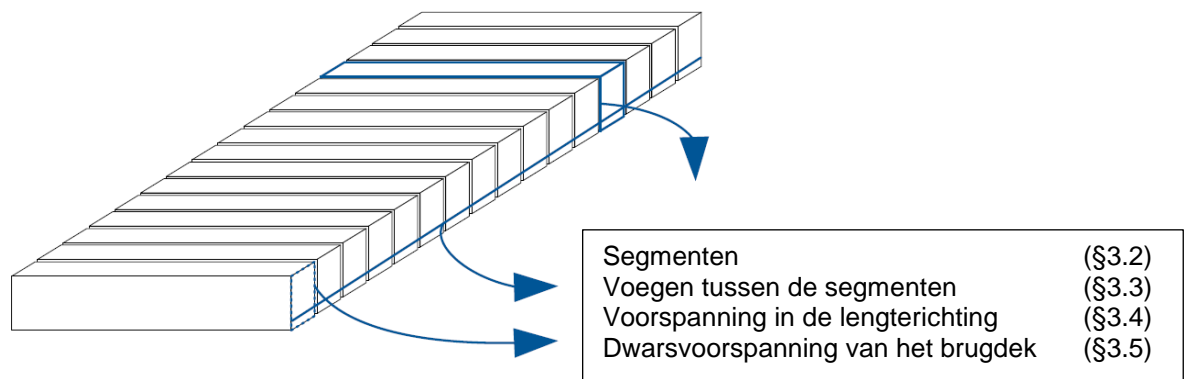


Figuur 6-9 een schets van de beschreven variant 1: de 5-delige samengestelde liggerbrug.

## 7. Segmentbrug

### 7.1 Algemeen

De tweede mogelijke oplossing die verkend is, is de segmentbrug. Deze bestaat uit geprefabriceerde segmenten die in de lengterichting voorgespannen worden om een compleet brugdek te vormen. In dit hoofdstuk zijn mogelijke oplossingen geschetst voor de verschillende onderdelen van de constructie zoals in Figuur 7-1 geschetst. Ook deze deeloplossingen kunnen gecombineerd worden tot een mogelijke oplossing. Deze samengestelde varianten zijn beschreven in de laatste paragraaf.



*Figuur 7-1 Een schets van de opbouw van een segmentbrug met aangegeven voor welke constructiedelen oplossingen geschetst zijn.*

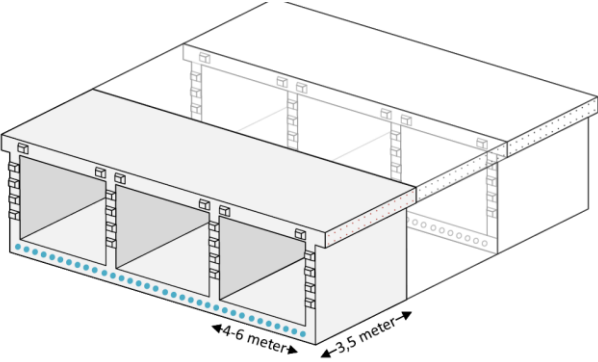
### 7.2 Segmenten

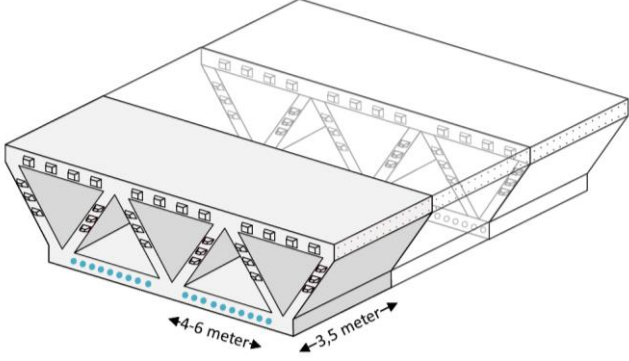
De koppeling tussen de segmenten moet snel en eenvoudig gemaakt kunnen worden. Daarom is een lijm, mortel of droge voeg daarvoor de meest logische keuze. Een betonvoeg, eventueel met uitstekende wapening is niet aantrekkelijk omdat dit relatief veel werk kost om te maken. In paragraaf 3.3 zijn verschillende mogelijkheden geschetst om deze voeg mogelijk te maken. De keuze hierin hangt ook sterk samen met de verdere opbouw van het segment.

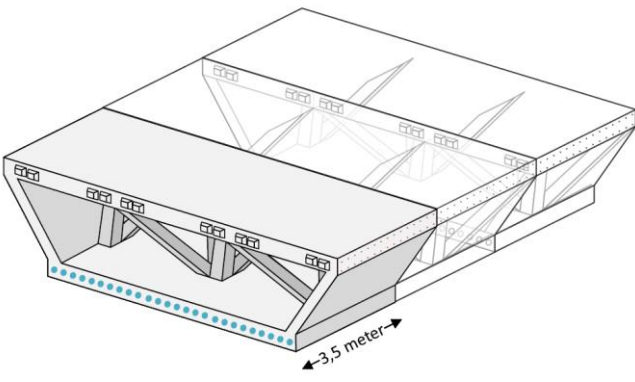
De geschetste segmenten hebben allemaal meerdere cellen, dit om ervoor te zorgen dat de bovenflens volledig als betondrukzone benut wordt en dat delen niet buiten de effectieve breedte vallen. Met een brugdekbreedte van 17,8 meter resulteert dit in een doorsnede met ongeveer vier kokercellen. Dit is een groot verschil met bestaande segmentbruggen die veelal buiten Nederland zijn gebouwd. De belangrijkste oorzaak van deze keuze is de wens om zo slank mogelijk te bouwen, met een constructiehoogte minder dan 3,2 meter bij een overspanning van 100 meter (dus een slankheid van 31,25). Dit verschilt sterk met bestaande segmentbruggen die veel minder slank gebouwd zijn, daarvoor is het gebruikelijk om te ontwerpen met een slankheid van 12 tot 25 [29].

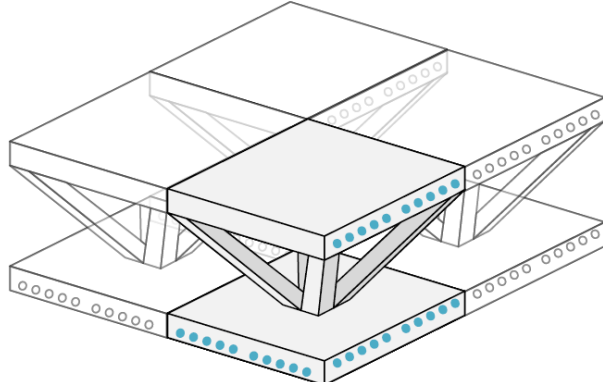
De segmenten zullen allemaal een maximale breedte van 3,5 meter hebben zodat de breedte geen belemmering is om deze zonder begeleiding over de weg te vervoeren. Als het eigengewicht van de segmenten te groot wordt voor eenvoudig transport kan deze breedte verminderd worden tot bijvoorbeeld 3 of 2,5 meter.



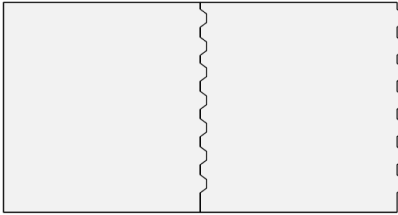
<b>1. Kokersegment</b>		
<p>Een kokersegment met meerdere cellen. Hierbij varieert de breedte en het aantal cellen afhankelijk van de totale breedte van het brugdek. De segmenten worden voorzien van dwarskracht tanden op de lijven en de bovenflens.</p>		
<p><i>Voordelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kokers zijn relatief eenvoudig toegankelijk voor montage voorspankabels en andere werkzaamheden.</li> <li>• Externe voorspanning kan eenvoudig door de kokers omhoog gebogen worden.</li> </ul>	<p><i>Nadelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lastig schaalbaar uit te voeren in de dwarsrichting.</li> <li>• Dwarsstijfheid afschuifstijfheid van deze doorsnede is relatief klein.</li> </ul>	

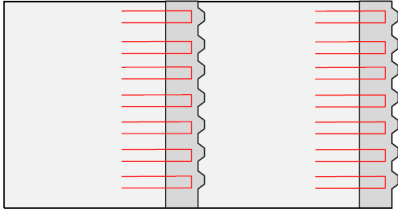
<b>2. Kokervakwerksegment</b>		
<p>Een kokersegment waarbij de lijven van de doorsnede onder een hoek zijn geplaatst om samen een vakwerk in de dwarsrichting te vormen. Deze variant zorgt voor een betere spreiding van de belasting vergeleken met het standaard kokersegment, ook in een situatie met alleen externe voorspanning. Maar de holleruimte zijn minder toegankelijk voor werkzaamheden, zeker voor kleine constructiehoogtes.</p>		
<p><i>Voordelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Goede spreiding van de belasting, in de uiterste grenstoestand ook bij een segment met alleen externe voorspanning, als de voegen open gaan staan.</li> </ul>	<p><i>Nadelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kokers zijn lastig toegankelijk voor montage voorspankabels en andere werkzaamheden.</li> <li>• Minder ruimte in onderflens voor plaatsing voorspankabels.</li> <li>• Segmenten zijn lastig te schalen in de hoogte en breedte.</li> </ul>	

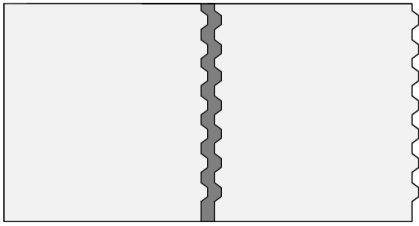
3. Kokersegment met ruimte vakwerk	
<p>Een kokersegment voorzien van een intern geplaatst ruimtevakwerk. Hierdoor is er meer ruimte in de koker voor werkzaamheden en om externe voorspankabels omhoog te buigen. Dwarskrachttanden kunnen alleen op de bovenflens geplaatst worden waar de vakwerkstaven van de aanliggende segmenten op elkaar aansluiten. De randen zijn wel uitgevoerd als dicht lijf om de torsiestijfheid en het uiterlijk te verbeteren. Eventueel kan het interne vakwerk apart geproduceerd worden in beton of met behulp van stalen buisprofielen.</p>	
<p><i>Voordelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Meer ruimte voor werkzaamheden binnen de koker vergeleken met het kokervakwerk segment.</li> <li>• Meer ruimte om externe vakwerkkabels omhoog te buigen vergeleken met het kokervakwerk segment.</li> </ul>	<p><i>Nadelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Minder ruimte voor dwarskracht tanden doordat er minder lijven zijn om deze tanden op te plaatsen.</li> <li>• Segmenten zijn lastig te schalen in de hoogte en breedte.</li> </ul>

4. Modulair vakwerksegment	
<p>Een modulair vierkant vakwerk segment. Deze segmenten kunnen zo samengesteld worden tot een brugdek. In tegenstelling tot de andere varianten heeft dit segment voegen zowel in de lengterichting als in de dwarsrichting van het brugdek. Een mogelijke techniek om het vakwerk te produceren is om een EPS blok als verloren bekisting te gebruiken en hier de staven in uit te boren. Ook kan het vakwerk met behulp van stalen buisprofielen geproduceerd worden.</p>	
<p><i>Voordelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Relatief kleine bekisting noodzakelijk om de segmenten te produceren</li> <li>• De kleine segmenten zijn eenvoudig te transporteren.</li> </ul>	<p><i>Nadelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Intern vakwerk is lastig en alleen met een zeer ingewikkelde bekisting te produceren, of moet uitgevoerd worden in staal.</li> <li>• Extreem veel voegen in de totale constructie.</li> </ul>

### 7.3 Voegen tussen de segmenten

1.	<b>Match-cast</b>
<p>Een mogelijke productiemethode is om de segmenten tegen elkaar aan te stort. Hierbij dient de rand van het vorige segment als mal voor het volgende segment. Door dat deze vlakken tegen elkaar aan zijn gestort hebben ze een bijna perfecte pasvorm. Deze methode kan op twee manieren uitgevoerd worden, de 'long line' methode, waarbij de complete brug in segmenten achter elkaar geproduceerd wordt. En de 'short line' methode, waarbij de segmenten steeds opschuiven. De laatste methode heeft hier de voorkeur vanwege het kleinere ruimtegebruik.</p>	
	
<p><i>Voordelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lijmvoeg is relatief snel te maken op de bouwlocatie</li> </ul>	<p><i>Nadelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pasvorm onzeker bij het gebruik van dwarsvoorspanning met voorgerekt staal.</li> <li>• Risico op het buigen, het 'bowing effect', van de segmenten door temperatuur effecten tijdens het stort. Bij een segmentdikte/breedte verhouding groter dan 6 tot 7 [30] [31].</li> </ul>

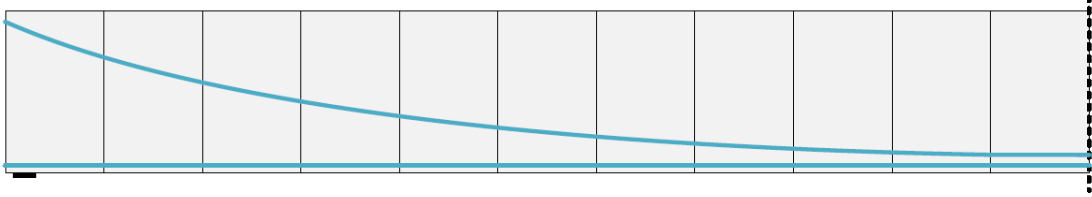
2.	<b>Tweede fase betonvoeg</b>
<p>De segmenten kunnen ook in twee fasen worden gestort. Hierbij wordt eerst het grootste segment deel apart gestort, in een zijde steken hierbij wapeningsstekken uit. Vervolgens wordt de betonvoeg tegen het volgende segment aangestort om zo een perfecte pasvorm te krijgen. Deze procedure maakt het mogelijk om het grootste deel van het segment voor te spannen met nagerekt staal, zonder dat de vervorming door het voorspannen de pasvorm van de voeg beïnvloed.</p>	
	
<p><i>Voordelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Maatvastheid meer zeker in vergelijking met de standaard match-cast methode, vooral bij het gebruik van dwarsvoorspanning in het segment.</li> </ul>	<p><i>Nadelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ingewikkelde bekistingsvorm noodzakelijk om ruimte te laten voor uitstekende wapeningsstekken.</li> <li>• Meer werk noodzakelijk per segment.</li> </ul>

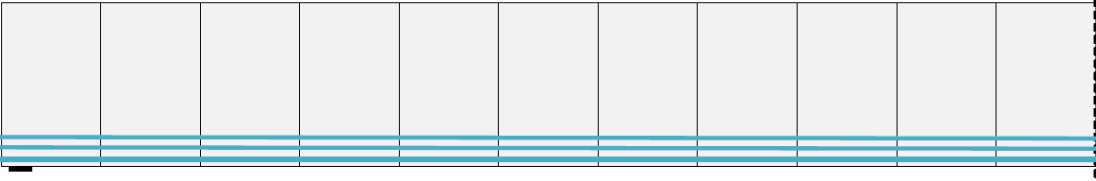
<b>3.</b>	<b>Mortelvoeg</b>	
<p>Een mogelijkheid is om de contactvlakken van de segmenten te storten met een maatvaste bekisting. Om de dan onvermijdelijke maatafwijkingen te corrigeren kan gebruik worden gemaakt van een mortelvoeg die 5 tot 10 centimeter dik zal zijn.</p>		
<p><i>Voordelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Eventueel circulair te maken door gebruik te maken van onthechtingsmiddel tussen de mortelvoeg en het segment.</li> </ul>	<p><i>Nadelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Het maken van deze mortelvoeg zal relatief veel werk zijn op de bouwplaats. Zeker aangezien dit voor de tientallen segmenten waar een brugdek uit zal bestaan moet gebeuren.</li> </ul>	

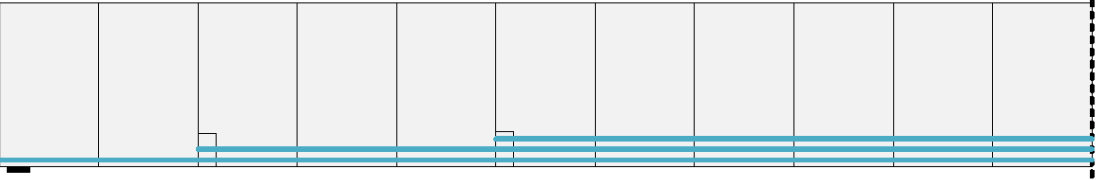
## 7.4 Voorspanning in de lengterichting

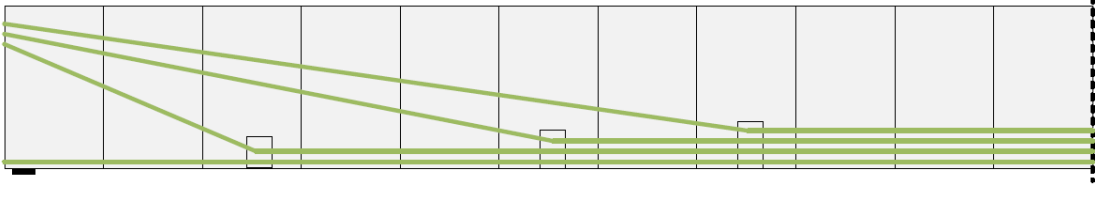
Voor het verloop van de voorspanning om de segmenten aan elkaar te spannen zijn veel varianten mogelijk. De belangrijkste keuze is voor interne of externe voorspanning, waarbij deze beiden hun eigen voor- en nadelen hebben.

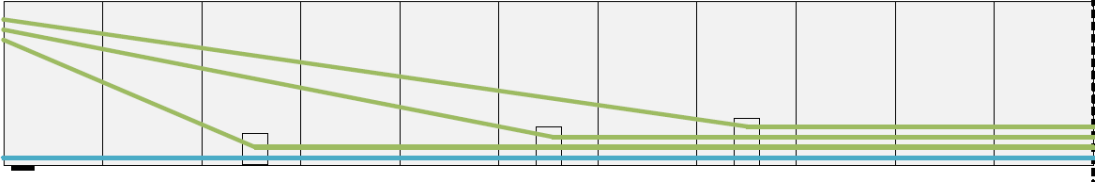
Voor kokerliggers is het gebruikelijk om de interne voorspanning nabij de oplegging omhoog te buigen. Hierdoor draagt de voorspanning ook een deel van de dwarskracht. Het grote nadeel van deze oplossing is dat de dikte van de lijven nu bepaald wordt door de benodigde ruimte voor de voorspankanalen. Daarom is deze oplossing in slechts een variant beschreven.

<b>1.</b>	<b>Opgebogen voorspanning</b>	
<p>De segmenten kunnen verbonden worden door middel van voorspanning met nagerekt staal. Hiervoor zijn voorspankanalen opgenomen in de doorsnede. Nadat de segmenten tegen elkaar zijn geplaatst worden de voorspankabels door de kanalen getrokken en aangespannen. Vervolgens worden de kanalen geïnjecteerd met grout. Een deel van de kabels volgt een opgebogen traject om trek in de bovenflens nabij de oplegging te voorkomen.</p>		
		
<p><i>Voordelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Voorspanning draagt ook bij aan de dwarskracht capaciteit van de constructie.</li> </ul>	<p><i>Nadelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dikte voorspankanaal beïnvloed de dikte van de lijven en kan dus zorgen voor een toename van het eigengewicht.</li> <li>• Alle segmenten hebben een uniek verloop van het voorspankanaal wat de productie moeilijker maakt.</li> <li>• In de voegen (zonder doorgaande wapening) geldt een eis voor een minimale betondrukspanning.</li> </ul>	

2.	<b>Horizontale voorspanning over de volledige bruglengte</b>	
<p>De segmenten kunnen verbonden worden door middel van voorspanning met nagrekt staal. Hiervoor zijn voorspankanalen opgenomen in de onderflens van de doorsnede. De voorspankabel loopt door over de complete doorsnede om zo alle segmenten zoveel mogelijk gelijkvormig te kunnen produceren.</p>		
		
<p><i>Voordelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Alle segmenten hebben een gelijk verloop van de voorspankabel wat de productie vereenvoudigd.</li> <li>• De dikte van de lijven wordt niet bepaald door de voorspankanalen.</li> </ul>		<p><i>Nadelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• In de voegen (zonder doorgaande wapening) geldt een eis voor een minimale drukspanning in de gebruikstoestand, zodat er meer voorspanstaal benodigd is.</li> <li>• De segmenten zullen zeer waarschijnlijk bovenin op trek bezwijken nabij de oplegging.</li> <li>• Zeer waarschijnlijk te weinig ruimte in de kop om de verankering te kunnen plaatsen.</li> </ul>

3.	<b>Horizontale voorspanning verdeeld over de bruglengte</b>	
<p>De segmenten kunnen verbonden worden door middel van voorspanning met nagrekt staal. Hiervoor zijn voorspankanalen opgenomen in de onderflens van de doorsnede. De voorspankabel is verankerd in een aantal segmenten nabij de oplegging waar minder voorspanning benodigd is. Hierdoor wordt een voorspanningsverloop gemaakt vergelijkbaar met het onthechten van strengen bij voorspanning met voorgerekt staal.</p>		
		
<p><i>Voordelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• De dikte van de lijven wordt niet bepaald door de voorspankanalen.</li> <li>• De onderflens kan dunner worden nabij de oplegging, om op deze manier gewicht te besparen.</li> <li>• Recht voorspankanaal verloop zal de voorspanverliezen door wrijving beperken.</li> </ul>		<p><i>Nadelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• In de voegen (zonder doorgaande wapening) geldt een eis voor een minimale drukspanning in de gebruikstoestand, zodat er meer voorspanstaal benodigd is.</li> <li>• Verankering van de voorspankabels zal leiden tot een toename van het eigengewicht van dat segment.</li> </ul>

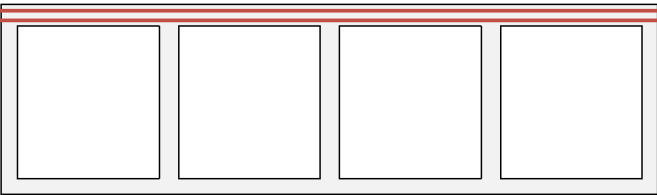
<b>4.</b>	<b>Externe voorspanning</b>
<p>Een ander manier om de segmenten voor te spannen in de lengterichting is met behulp van externe voorspankabels. Deze kabels worden op een aantal punten door zadels afgebogen. Dit type voorspanning is zeer geschikt voor een kokersegment met een intern vakwerk omdat de voorspanning een deel van de dwarskracht sterkte op zich neemt terwijl het open vakwerk voldoende ruimte heeft om de kabels door de doorsnede te leiden. Dit type voorspanning is echter zeer lastig te gebruiken in het kokervakwerksegment omdat er nauwelijks ruimte is om deze kabels omhoog te leiden.</p>	
	
<p><i>Voordelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• De dikte van de lijven wordt niet bepaald door de voorspankanalen.</li> <li>• De onderflens kan dunner gemaakt worden omdat er geen voorspankanalen in opgenomen hoeven te worden.</li> <li>• Voorspanning draagt bij aan het opnemen van de dwarskracht nabij de opleggingen.</li> <li>• Meer geschikt voor een mogelijk hergebruik van de segmenten (circulariteit) door de relatief eenvoudige demontage.</li> </ul>	<p><i>Nadelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Stijfheid en belastingspreiding van de constructie neemt af in de uiterste grenstoestand door het openklappen van de voegen.</li> <li>• Het voorspanstaal zal minder efficiënt gebruikt kunnen worden in de uiterste grenstoestand omdat de rek zich verdeeld over de volledige lengte van de kabel.</li> <li>• De voorspanning zal hoger in de doorsnede geplaatst worden.</li> </ul>

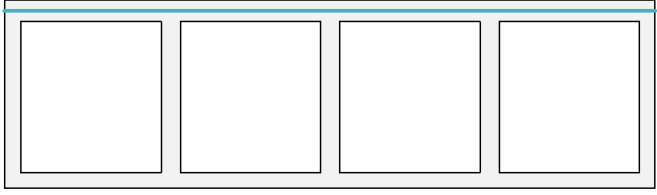
<b>5.</b>	<b>Combinatie externe en interne voorspanning</b>
<p>De segmenten kunnen ook voorgespannen worden door een combinatie van externe voorspanning buiten de doorsnede en interne voorspanning door voorspankanalen. Hierbij kan een relatief dunne onderflens voorzien worden van interne voorspanning terwijl daarboven door zadels de externe voorspankabels worden geleid. Dit heeft als voordeel dat de belastingspreiding van de constructie niet afneemt in de uiterste grenstoestand door het openklappen van de voegen. De betondoorsnede kan toch gereduceerd worden doordat niet alle voorspanning door de doorsnede geleid hoeft te worden.</p>	
	
<p><i>Voordelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• De dikte van de lijven wordt niet bepaald door de voorspankanalen.</li> <li>• De onderflens kan dunner worden omdat er minder voorspanning door geleid hoeft te worden.</li> </ul>	<p><i>Nadelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Een gedeelte van de voorspanning zal minder laag in de doorsnede gepositioneerd worden.</li> <li>• In de voegen (zonder doorgaande wapening) geldt een eis voor een</li> </ul>

<ul style="list-style-type: none"> <li>De externe voorspanning draagt bij aan het opnemen van de dwarskracht.</li> </ul>	<p>minimale drukspanning om openklappen van de voegen te voorkomen.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Onderflens zal relatief dik worden om ruimte te bieden voor de voorspankanalen en de noodzakelijke dekking.</li> </ul>
--	---

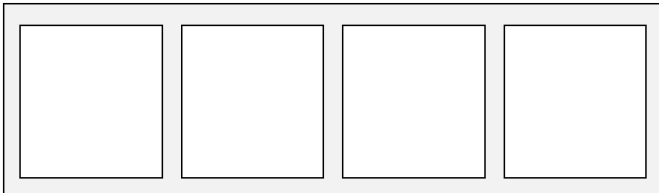
## 7.5 Voorspanning in de dwarsrichting

De bovenflens van de segmenten kan voorgespannen worden om zo het brugdek te versterken. De keuze om juist de dwarsrichting door middel van deze voorspanning voor te spannen is een logische keuze vanuit het principe dat de verankering het duurste onderdeel van de voorspansystemen is. Bij een lange overspanning zijn dus extreem veel ankers nodig indien de dwarsrichting voorgespannen wordt door middel van voorspanning met nagerekt staal.

<b>1. Dwarsvoorspanning met voorgerekt staal in het brugdek</b>	
<p>De bovenflens van de rijvloer kan voorgespannen door middel van voorspanning met voorgerekt staal. Hierdoor wordt de stijfheid in de dwarsrichting verbeterd en kan de bovenflens dunner en dus lichter gemaakt worden. Eventueel kan er voor gekozen worden om ook de onderflens voor te spannen om zo de belastingspreiding te verbeteren door de constructie stijver te maken.</p>	
<p><i>Voordelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Efficiënt gebruik van de voorspanningssystemen omdat er zo weinig mogelijk voorspanankers gebruikt hoeven te worden terwijl de constructie wel in twee richtingen voorgespannen kan zijn.</li> <li>Dwarsvoorspanning versterkt de drukzone.</li> </ul>	<p><i>Nadelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Voorspanning beïnvloedt de vorm van de segmenten en dus de pasvorm. Dit kan problematisch zijn bij segmenten die tegen elkaar aan zijn gestort of als er verschillen ontstaan in de vervorming van de segmenten tijdens de opslag.</li> <li>Onzeker of de segmenten te produceren zijn met bestaande spanbanen vanwege de grote hoek waarmee de strengen omhoog gebogen moeten worden.</li> </ul>

<b>2. Dwarsvoorspanning met nagerekt staal in het brugdek</b>	
<p>Het brugdek kan ook voorgespannen worden met behulp van nagerekt staal. Hiervoor worden tijdens het storten van de segmenten voorspankanalen opgenomen in de bovenflens.</p>	

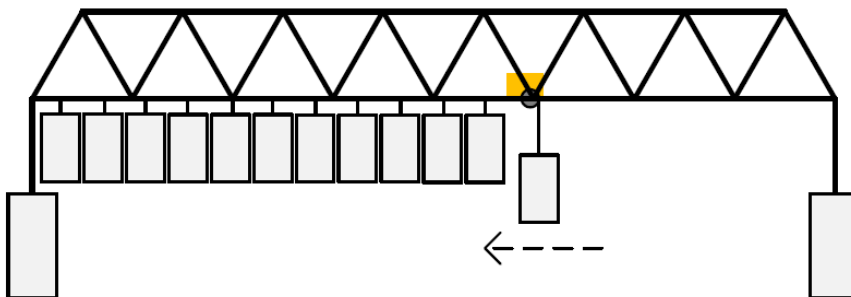
<p><i>Voordelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Voorgespannen constructie met minder maatvastheidsproblemen vergeleken met de eerste variant.</li> </ul>	<p><i>Nadelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Voorspankanalen verzwakken de betondrukzone.</li> <li>• Voorspannen beïnvloeden de maatvastheid van de segmenten.</li> </ul>
--	--

<b>3. Traditioneel gewapend betonnen brugdek</b>	
<p>Een brugdek zonder voorspanning in de dwarsrichting van het brugdek.</p>	
<p><i>Voordelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Naar verwachting een betere pasvorm van de segmenten, vergeleken met de voorgespannen alternatieven.</li> </ul>	<p><i>Nadelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dikkere bovenflens noodzakelijk om zelfde sterkte te halen als de voorgespannen varianten, waardoor het eigengewicht toeneemt.</li> <li>• Minder stijf gedrag van de segmenten in de dwarsrichting.</li> </ul>

## 7.6 Transport en montage

De transporteerbaarheid van de segmenten zal sterk afhangen van de breedte van het te bouwen brugdek. Zolang deze breedte kleiner is dan 22 meter zal het vervoer vermoedelijk geen probleem zijn. Dan kan er gebruik worden gemaakt van een relatief eenvoudige en lage trailer. Voor brugdekken die breder zijn wordt dit een ander verhaal.

### 7.6.1 Montage met een portaal



*Figuur 7-2 een schets van de bouwmethode waarbij het brugdek gemonteerd wordt hangend aan een portaal boven de weg of het water.*

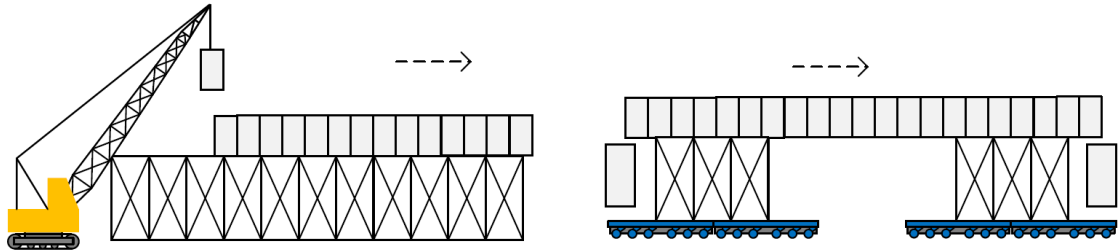
Een mogelijke bouwmethode voor een segmentbrug is de montage met behulp van een portaal. Deze methode is buiten Nederland veel toegepast voor de bouw van snelwegviaducten uit prefab betonnen segmenten. Bij deze methode worden de segmenten een voor een opgehesen en aan het portaal gehangen vervolgens worden de voegen gevuld en wordt het brugdek voorgespannen. Hierbij kunnen de segmenten zowel van achter het landhoofd als van onder het portaal aangevoerd worden.

Het voordeel van deze bouwmethode is dat er geen zware kranen of verkeersmiddelen nodig zijn. De complete montage van het brugdek gebeurt op de bouwlocatie. Het nadeel is dat de bouw pas kan beginnen als dit portaal is gebouwd is op de bouwlocatie, iets wat voor een



overspanning van 100 meter al een groot bouwwerk is. Ook zal de kruisende snelweg tijdens het ophijzen en samenstellen van de segmentbrug afgesloten moeten zijn omdat het niet veilig is om dan verkeer onder de brug door te laten rijden. Hierdoor kan deze bouwmethode nog voor relatief veel hinder zorgen.

### 7.6.2 Inrijden compleet brugdek

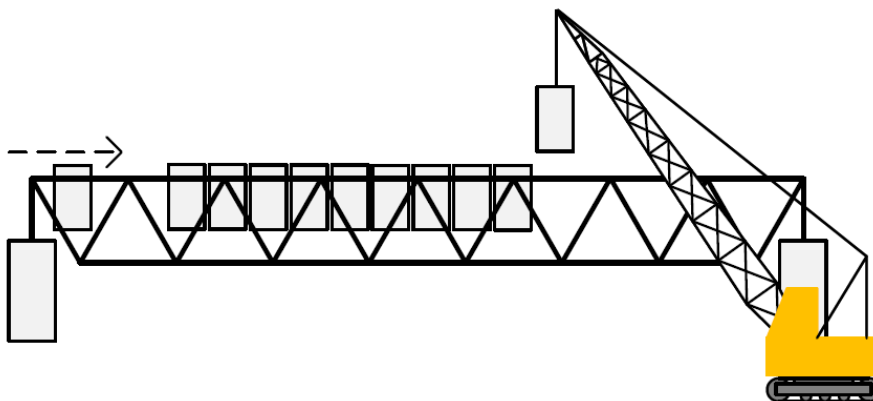


*Figuur 7-3 een schets van de bouwmethode waarbij het brugdek in een keer naar de eindlocatie wordt getransporteerd.*

Een ander mogelijke bouwmethode voor een segmentbrug is het brugdek vooraf op een terrein nabij de bouwlocatie de prefab segmenten te combineren tot een brugdek. Het complete brugdek kan vervolgens met behulp van SPMT's naar de bestemming worden gereden. Voor een kanaalbrug zou dan de plaatsing kunnen gebeuren vanaf het water met behulp van pontons.

Het voordeel van deze bouwmethode is dat het brugdek relatief eenvoudig, zonder tijdsdruk in elkaar gezet kan worden. Ook kan hiervoor een relatief lichte hijskraan gebruikt worden. Tenslotte hoeft de kruisende snelweg maar kort afgesloten te worden tijdens de montage. Maar het belangrijkste nadeel is dat het brugdek vervolgens in een keer verplaatst moet worden. Iets wat vanwege het grote eigengewicht van dergelijke overspanningen wel mogelijk is maar zeker niet gemakkelijk. Ook moet hiervoor waarschijnlijk ook een tijdelijke weg aangelegd worden om het brugdek te verplaatsen, dit om te voorkomen dat het brugdek wegzakt in de bodem.

### 7.6.3 Montage op een hulpconstructie



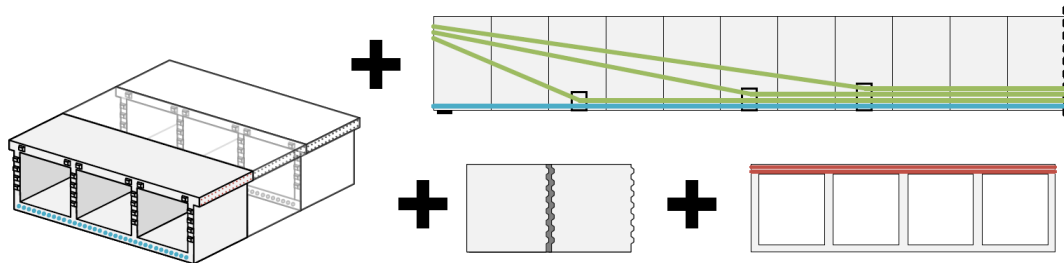
*Figuur 7-4 een schets van de bouwmethode waarbij het brugdek wordt geplaatst op een tijdelijke ondersteuningsconstructie.*

Tenslotte kan de brug ook samengesteld worden op een hulpconstructie. De segmenten kunnen hierbij met een relatief lichte kraan geplaatst worden of over de hulpconstructie aangevoerd worden vanaf een van de landhoofden. Deze hulpconstructie kan eventueel extra tussensteunpunten hebben op de snelweg om de kosten hiervan te verminderen. Het belangrijkste nadeel van de bouwmethode is dat de snelweg afgesloten moet zijn tijdens het bouwen van deze hulpconstructie en tijdens het samenstellen van het brugdek. Ook voor een kanaalbrug is deze bouwmethode geschikt zolang een lange afsluiting van het water geen probleem is.

## 7.7 Samengestelde varianten van segmentbrug

Met behulp van de beschreven deeloplossingen voor een mogelijke prefab betonnen segmentbrug zijn twee varianten samengesteld die vergeleken zullen worden met de andere alternatieven om een mogelijke oplossing te vinden om een prefab betonnen brug te bouwen met een overspanning tot ongeveer 100 meter.

### 7.7.1 Variant 3: Kokersegment met gecombineerde voorspanning



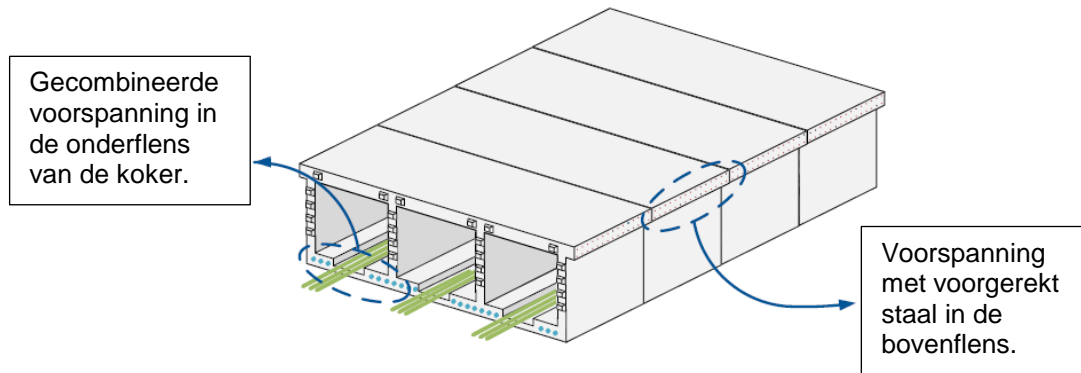
*Figuur 7-5 een schets van de verschillende deeloplossingen die gecombineerd zijn om variant 3 te vormen.*

Voor deze variant is gekozen voor het kokersegment omdat deze doorsnede relatief eenvoudig te produceren is. Vergeleken met de eerder beschreven samengestelde liggervarianten kunnen de lijven van de doorsnede beter gespreid worden over de doorsnede om een betere balans te vinden tussen het eigengewicht van de constructie en het maximaal benutten van de druksterkte van het hogesterktebeton. Ook kan deze doorsnede relatief eenvoudig in de breedte richting geschaald worden, zeker vergeleken met de andere geschetste oplossingen, waarbij de schuine vakwerkenwanden voor iedere breedte verandering, anders afgesteld moeten worden.

De voegen tussen de segmenten zullen gestort worden in een zeer maatvaste bekisting. De onvermijdelijke kleine maatverschillen zullen opgevangen worden door gebruik te maken van een mortelvoeg of een zeer dikke lijmvoeg. Deze mortelvoeg moet tevens de maatverschillen veroorzaakt door het spannen van de segmenten in dwarsrichting corrigeren. Deze voeg heeft als nadeel dat het maken relatief veel tijd zal kosten, maar alleen op deze manier is het gebruik van dwarsvoorspanning met voorgerekt staal mogelijk.

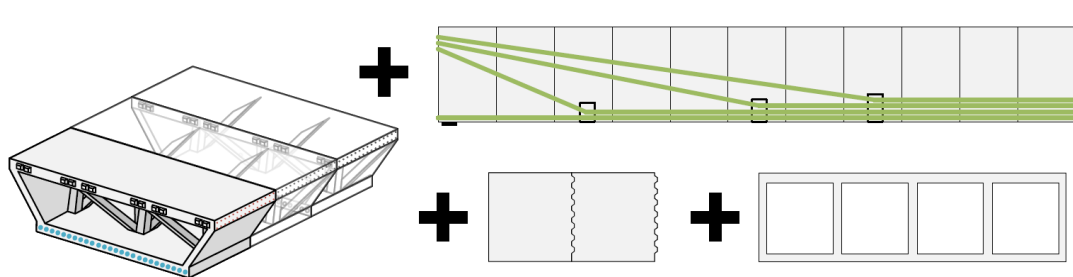
De segmenten zullen in de lengterichting voorgespannen worden door een combinatie van externe voorspanning en interne voorspanning met nagerekt staal. Deze twee typen voorspanning zullen zo gecombineerd worden om een balans te vinden tussen de minimale drukspanning die vereist is in de voegen zonder doorgaande wapening en uiterste grenstoestand. Hierbij heeft het gebruik van externe voorspanning de voorkeur omdat hierdoor een grote vermindering van het eigengewicht te behalen valt. Door het gebruik van hechtende voorspanning zullen de voegen tussen de segmenten niet openklappen in de uiterste grenstoestand waardoor de spreiding van de belasting over het brugdek niet verloren gaat.

Het brugdek, de bovenflens van de doorsnede en eventueel de onderflens zullen voorzien worden van voorspanning in de dwarsrichting met voorgerekt staal. Door de voorspanning kan de lokale wielbelasting op dit brugdek beter gespreid worden zonder de dikte hiervan teveel te moeten vergroten. Deze voorspanning zal tevens de dwarsstijfheid vergroten, door de buigstijfheid van de bovenflens te vergroten. Het voordeel van deze oplossing voor het brugdek is dat het brugdek in twee richtingen voorgespannen is, terwijl het aantal (dure) naspanankers, dat noodzakelijk is voor de constructie zo laag mogelijk is.



Figuur 7-6 een schets van de beschreven variant 3: Kokersegment met gecombineerde voorspanning.

### 7.7.2 Variant 4: Ruimte vakwerk segment met externe voorspanning



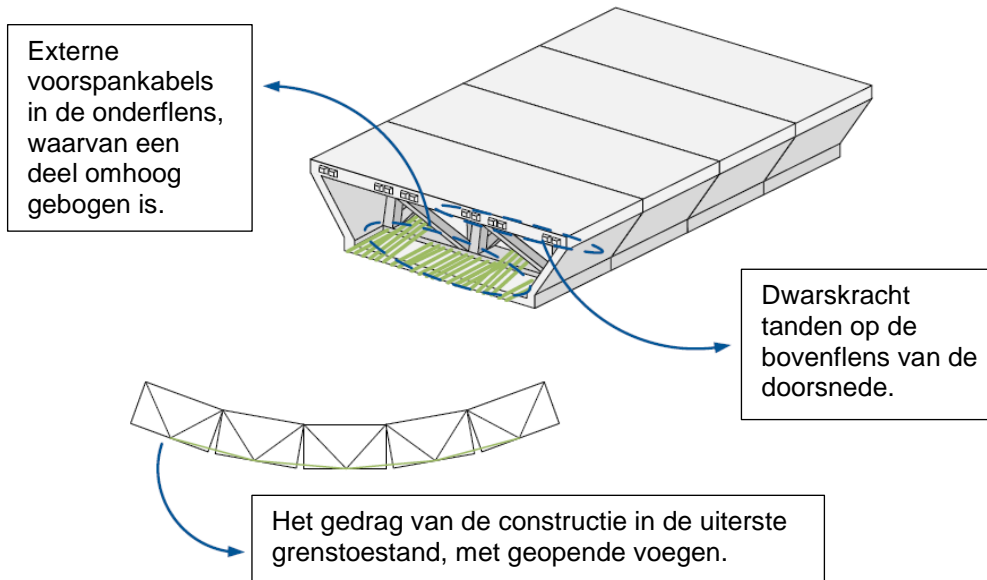
Figuur 7-7 een schets van de verschillende deeloplossingen die gecombineerd zijn om variant 4 te vormen.

Als segmentdoorsnede is gekozen voor het kokersegment met een intern ruimte vakwerk. Dit segment is gekozen vanuit de verwachting dat het hierdoor mogelijk is om een bijzonder licht segment te bouwen. Het interne vakwerk zou eventueel uitgevoerd kunnen worden als stalen vakwerk om zo de productie te versimpelen. Door de open interne structuur is er tevens voldoende ruimte om de externe voorspankabels omhoog te laten lopen. Omdat in de uiterste grenstoestand de voegen tussen de segmenten open gaan staan en dus de torsiestijfheid van het brugdek sterk afneemt [32] [33, p. 34] Zal de dwarspreiding van de belasting voornamelijk gebeuren door middel van buiging van de interne vakwerkligger. Dit vakwerk dient tevens om de afbuigpunten van de externe voorspanning te ondersteunen. Deze afbuigpunten zullen geplaatst worden op de kruising van de vier vakwerkstaven in de onderflens.

De segmenten zullen gestort worden volgens de match-cast methode om een zo goed mogelijke pasvorm van de segmenten te krijgen. Hierdoor kunnen de voegen tussen de segmenten met een dunne lijnvoeg gemaakt worden. Dit heeft als voordeel dat het samenstellen van de constructie relatief snel zal gaan. Om de pasvorm van de segmenten te kunnen garanderen is er voor gekozen om het brugdek niet voor te spannen in de dwarsrichting omdat dit de pasvorm negatief kan beïnvloeden, voorspannen is immers ook voor vervormen en beïnvloed dus de maatvastheid.

Zoals vermeld is gekozen om in deze variant uitsluitend externe voorspanning toe te passen. Hierdoor worden de afmetingen van de doorsnede niet beïnvloed door de noodzaak om voldoende ruimte te hebben voor de voorspankanalen. Voornamelijk de onderflens van de doorsnede kan hierdoor dunner gemaakt worden. De hoop is dat deze vermindering van het eigengewicht opweegt tegen hogere plaatsing van de voorspankabels en het verlies aan dwarspreiding van de belasting bij het openklappen van de voegen in de uiterste grenstoestand. De externe voorspankabels zullen in ieder segment door een afbuigpunt geleid worden. Hierdoor draagt het interne vakwerk ook bij aan de afdracht van de dwarskracht in de uiterste grenstoestand als de voegen openklappen.

Vergeleken met bestaande segmentbruggen gebouwd buiten Nederland, is het belangrijkste verschil de brede onderflens. Deze keuze is gemaakt om ruimte te bieden om extra voorspanning zo laag mogelijk in de doorsnede te kunnen plaatsten. Om de druk- en trekzone op de juiste manier met elkaar te verbinden dient het ruimtevakwerk in de segmenten. Hierdoor kan de volledige bovenflens gebruikt worden als drukzone en hoeft deze niet gereduceerd te worden met een effectieve breedte. Deze keuzes zijn gemaakt om voor de grote overspanningen slanker te kunnen bouwen dan voor de segmentbruggen gebruikelijk is.

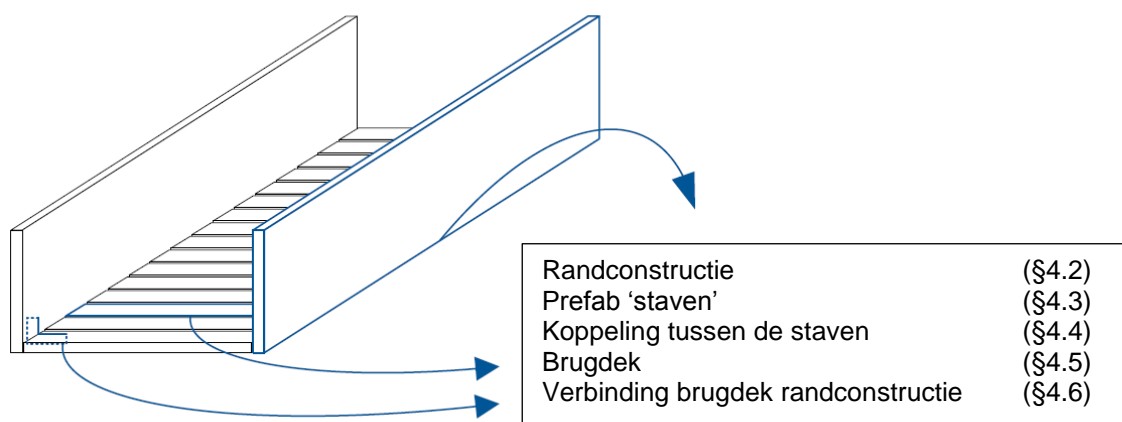


Figuur 7-8 een schets van de beschreven variant 4: Ruimte vakwerk segment met externe voorspanning en het gedrag van de constructie in de uiterste grenstoestand.

## 8. Boog- en vakwerkbrug

### 8.1 Algemeen

Een boog of vakwerkbrug is een andere, minder traditionele mogelijkheid om een prefab betonnen brug van 100 meter te bouwen. Globaal gezien wordt de brug hiervoor opgebouwd uit twee randconstructie, die uitgevoerd zijn als vakwerkconstructie of boogconstructie. Deze twee randconstructies dragen de belasting in de lengterichting van het brugdek. Dit brugdek wordt tussen de twee randconstructies gemonteerd om de hoogte van het brugdek zo laag mogelijk te maken. Zoals eerder opgemerkt hebben de vakwerk- en boogbrug een soortgelijke opbouw, daarom worden ze beide besproken in hetzelfde hoofdstuk. In dit hoofdstuk zijn mogelijke oplossingen geschetst voor de verschillende onderdelen van de constructie zoals in Figuur 8-1 geschetst. Deze deeloplossingen kunnen gecombineerd worden tot een mogelijke variant, deze gecombineerde varianten zijn beschreven in de laatste paragraaf.



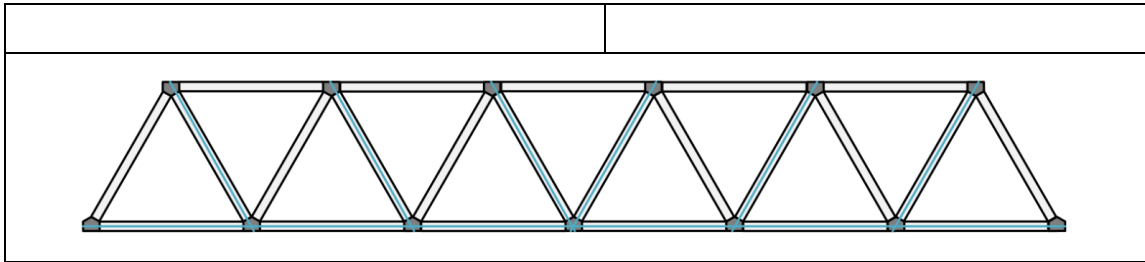
Figuur 8-1 Een schets van de opbouw van een boog of vakwerkbrug met aangegeven voor welke constructiedelen oplossingen geschetst zijn.

In Figuur 8-1 is de algemene opbouw van de brugoplossing geschetst. Opgemerkt moet worden dat in deze schets eventueel aanwezige stabiliteitsverbanden zijn weggelaten. Deze stabiliteitsverbanden zijn noodzakelijk om de stabiliteit van de boog- of vakwerkconstructie te waarborgen.

### 8.2 Randconstructie

Voor de randconstructie, die de belasting in de lengterichting zal dragen zijn verschillende varianten geschetst. Deze deelvarianten zijn varianten van een boogbrug of een vakwerkbrug. In elke variant zal de randconstructie opgebouwd worden uit een aantal relatief kleine prefab elementen omdat deze constructies onmogelijk als een geheel geproduceerd en getransporteerd kunnen worden.

<b>1. Betonnen vakwerk</b>	
Een mogelijke manier om de randconstructie op te bouwen is een volledig betonnen vakwerk. Hierbij zijn de elementen die op trek worden belast voorgespannen met nagerekt staal.	
<p><i>Voordelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Volledig betonnen constructie maakt een duurzame constructie mogelijk.</li> <li>• Constante vakwerkform zorgt voor gelijke staaf- en knoop elementen.</li> </ul>	<p><i>Nadelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Verankering van de voorgespannen schuine staven in de knoop kan lastig uit te voeren zijn.</li> </ul>



## 2. Vakwerk met gebogen bovenrand

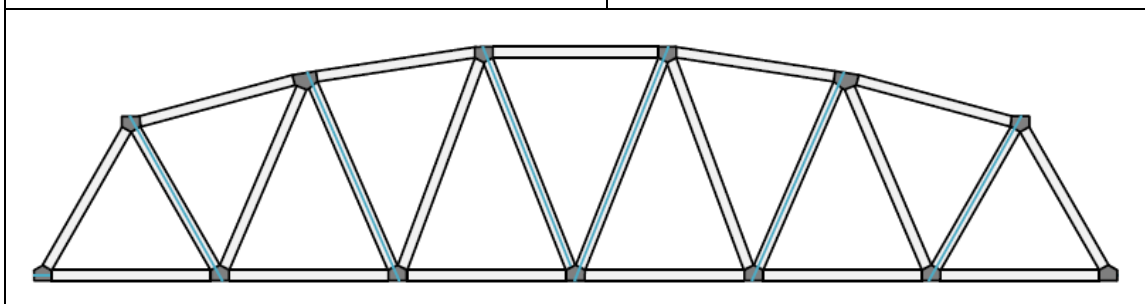
Een volledig betonnen vakwerk waarbij de hoogte van de bovenrand varieert over de lengte van de randconstructie. Zo volgt de randconstructie optimaal de krachtswerking in het vakwerk.

*Voordelen:*

- Efficiëntere constructie omdat de hoogte varieert met de grote van het buigend moment.

*Nadelen:*

- Lastiger in de uitvoering door meer gecompliceerde constructie.
- Knopen zijn verschillend en dus lastiger te prefabriceren.



## 3. Staal en beton vakwerk

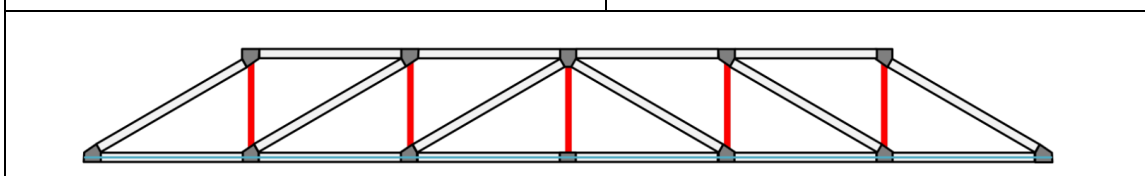
Een mogelijke vormgeving van de randconstructie is vakwerk waarbij betonnen staven de drukelementen vormen. De onderste trekstaaf is een voorgespannen betonnen ligger opgebouwd uit balk vormige elementen. De trekstaaf is voorgespannen door middel van voorspanning met nagerekt staal. De verticale trekstaven zijn uitgevoerd als stalen trekelementen.

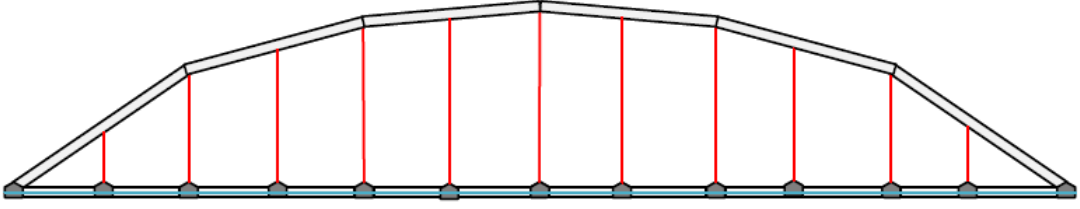
*Voordelen:*

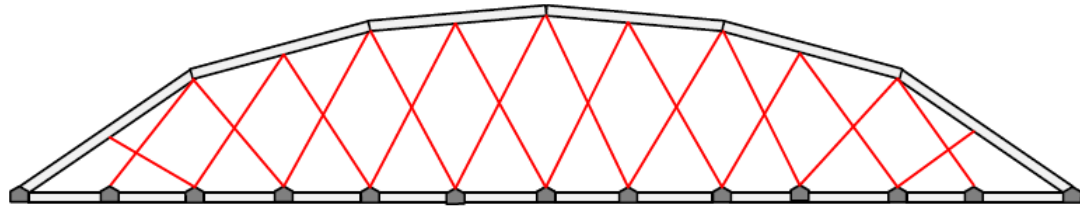
- Druksterkte beton wordt optimaal gebruikt in de druk diagonalen.

*Nadelen:*

- Stalen onderdelen moeten beschermd worden tegen corrosie.



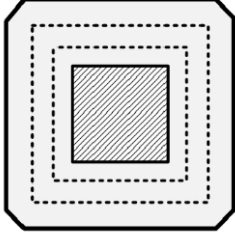
<b>4.</b>	<b>Boogbrug</b>
<p>Naast het vakwerk is ook een boogbrug een mogelijk optie voor de randconstructie. De boogbrug heeft een trekstang ter hoogte van het dek. Deze trekstang zal voorgespannen worden. de hangers van de hier geschetste boog lopen loodrecht naar beneden richting de trekstang en het brugdek.</p>	
<p><i>Voordelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Minder staaf elementen nodig vergeleken met vakwerk.</li> </ul>	<p><i>Nadelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Boog of onderste trekstaaf moet ook geschikt zijn voor opnemen van buiging.</li> <li>• Stalen onderdelen moeten beschermd worden tegen corrosie</li> </ul>
	

<b>5.</b>	<b>Netwerkboogbrug</b>
<p>Een alternatief voor de standaard boogbrug zoals eerder geschetst is de netwerkboogbrug. Hierbij lopen de hangers niet recht naar beneden vanaf de boog maar kruisen elkaar en lopen schuin naar het brugdek. Het voordeel van deze constructie is dat de boog zich stijver gaat gedragen onder de variabele belastingen.</p>	
<p><i>Voordelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Stijvere constructie, vergeleken met de eerder geschetste boogbrug.</li> </ul>	<p><i>Nadelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Boog of onderste trekstaaf moet ook geschikt zijn voor opnemen van buiging.</li> <li>• Verbindingen worden moeilijker om te maken door samenkomen meerdere trekstaven.</li> <li>• Meer trekstaven noodzakelijk vergeleken een standaard boogbrug.</li> <li>• Stalen onderdelen moeten beschermd worden tegen corrosie</li> </ul>
	

### 8.3 Prefab staven

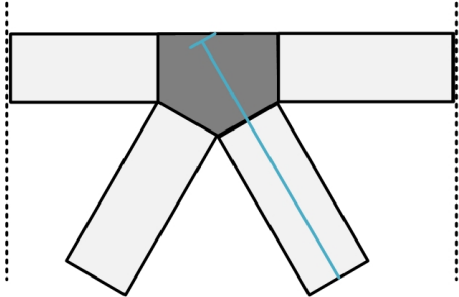
Zowel het vakwerk als de boog kunnen van prefab betonnen staven gebouwd worden. Hieronder is een mogelijk ontwerp gegeven van een dergelijke staaf. Er zijn uiteraard veel meer alternatieve staaf vormen mogelijk, maar omdat dit type voldoende is om de

verschillende varianten te ontwerpen en omdat de staven niet het constructieonderdeel zullen zijn waar deze oplossing op wordt afgewezen is slechts een oplossing beschreven.

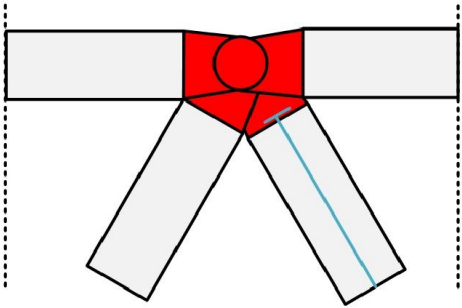
<b>1. Prefab koker staaf</b>	
<p>De druk staven voor de boog en vakwerk constructie kunnen gemaakt worden van kokervormige elementen die afhankelijk van de krachten op de staaf gevuld worden met in grote variërende EPS blokken. De staven kunnen eenvoudig in verschillende lengten geproduceerd worden om deze geschikt te maken voor verschillende overspanningen. Eventueel kunnen de staaf elementen voorzien worden van voorspankanalen om als trekstaaf te dienen.</p>	

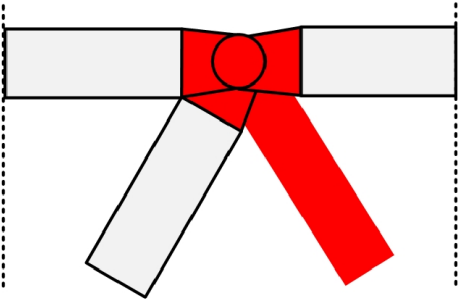
## 8.4 Koppeling tussen de staven

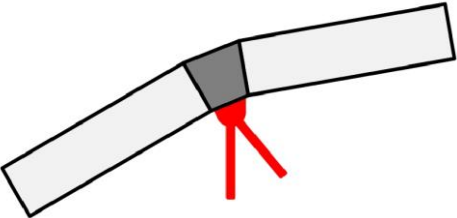
De koppelingen tussen de staven van de randconstructie hebben grote invloed op de maakbaarheid van het ontwerp. Deze bepalen immers in grote mate hoe eenvoudig de randconstructies samengesteld kunnen worden. Niet elke hieronder geschetste variant is geschikt voor zowel toepassing in een boogbrug als in een vakwerkbrug. Dit is daarom aangegeven per deelvariant.

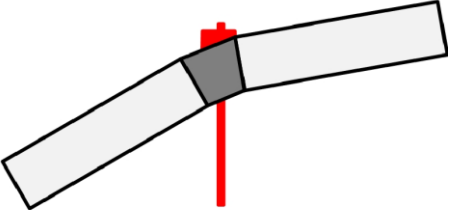
<b>1. Natte knoop (boog en vakwerk)</b>	
<p>Een mogelijke verbinding om de prefab betonnen staven van het vakwerk te verbinden is een natte knoop. De staven worden hierbij voorzien van uitstekende wapening. Op de bouwlocatie wordt vervolgens de verbinding gestort. De trekstaven kunnen hierbij door middel van voorspanning met nagerekt staal voorgespannen worden.</p>	
<p><i>Voordelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Corrigeren van maatafwijkingen mogelijk.</li> <li>• De volledige verbinding is uitgevoerd in beton.</li> </ul>	<p><i>Nadelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lastig uit te voeren in hogesterktebeton.</li> <li>• Verankering van trekstaaf kan lastige te verwerken zijn in de knoop.</li> <li>• Het maken van de verbinding kost veel werk op de bouwlocatie.</li> </ul>

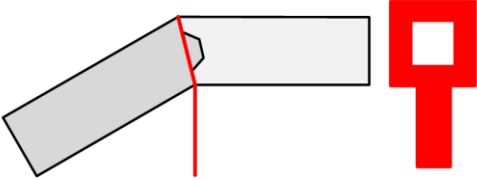


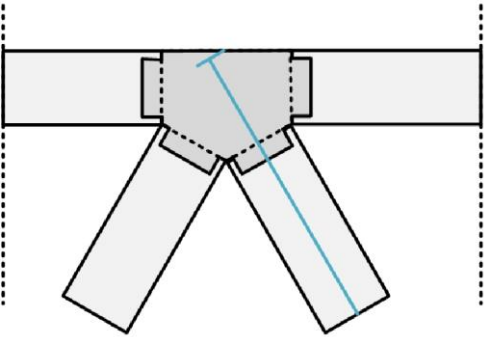
<b>2. Scharnierknoop met voorgespanntrekstaaf (vakwerk)</b>	
<p>Een stalen scharnierverbinding waarbij op de koppen van de prefab betonnen staafelementen stalen platen worden in gestort die vervolgens door middel van een stalen pen verbonden worden tot een scharnierende verbinding. De voorspanning van de betonnen trekelementen kan dan gelijk in of op deze stalenplaten verankerd worden.</p>	
<p><i>Voordelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Relatief weinig werk op bouwplaats noodzakelijk.</li> </ul>	<p><i>Nadelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Stalen onderdelen moeten beschermd worden tegen corrosie.</li> <li>• Verbinding staal-voorgespannen beton kan lastig te produceren zijn.</li> </ul>

<b>3. Scharnierknoop met trekelement (vakwerk)</b>	
<p>Een stalen scharnierverbinding waarbij op de koppen van de prefab betonnen staafelementen stalen platen worden in gestort die vervolgens door middel van een stalen pen verbonden worden tot een scharnierende verbinding. Hierbij is het trekelement uitgevoerd als stalen trekstaaf</p>	
<p><i>Voordelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Relatief weinig werk op bouwplaats noodzakelijk.</li> </ul>	<p><i>Nadelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Stalen onderdelen moeten beschermd worden tegen corrosie.</li> </ul>

<b>4. Natte knoop met scharnier trekelement (boog en vakwerk)</b>	
<p>Een natte knoop verbinding tussen de drukstaven waarbij in de verbinding een stalen oog is ingestort waaraan vervolgens de trekelementen scharnierend bevestigd kunnen worden.</p>	
<p><i>Voordelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Corrigeren van maatafwijkingen mogelijk.</li> <li>• Trekstaven kunnen eenvoudig onder verschillende hoeken geplaatst worden.</li> </ul>	<p><i>Nadelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lastig uit te voeren in hogesterktebeton.</li> <li>• Het maken van de verbinding kost veel tijd op de bouwlocatie.</li> </ul>

<b>5. Natte knoop met bovenop verankerd trekelement (boog)</b>		
<p>Een natte knoop verbinding geschikt voor een betonnen boog waarbij het trekelement verankerd wordt bovenop de betonnen boog. De trekstaaf is vervolgens door een sparing in de samengestelde boog naar beneden, richting het brugdek geleid.</p>		
<p><i>Voordelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Corrigeren van maatafwijkingen mogelijk.</li> </ul>	<p><i>Nadelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lastig uit te voeren in hogesterktebeton.</li> <li>• Het maken van de verbinding kost veel werk op de bouwlocatie.</li> </ul>	

<b>6. Noppen verbinding (boog)</b>		
<p>Een verbinding waarbij de betonnen druk elementen door middel van dwarskracht tanden op elkaar aansluiten. Het trekelement heeft een oog waarmee deze om de dwarskracht tanden verankerd wordt. De voegen worden vervolgens met mortel of lijm gevuld voor een optimale krachtsoverdracht.</p>		
<p><i>Voordelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Verbinding zonder in-situ beton, dus relatief snel te maken op de bouwplaats.</li> </ul>	<p><i>Nadelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Corrigeren van maatafwijkingen niet mogelijk.</li> <li>• Het is onzeker of de verbinding voldoende sterk is om de krachten over te dragen.</li> <li>• Lastige corrosie bescherming voor stalen onderdelen.</li> </ul>	

<b>7. Prefab koppellement (vakwerk)</b>		
<p>Een mogelijke verbinding bestaat uit een geprefabriceerd koppelstuk waar de standaard staaf elementen overheen geschoven worden. de voeg wordt vervolgens gevuld met lijm of een hoge sterkte mortel om een optimale krachtsoverdracht te krijgen.</p>		

<p><i>Voordelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Verbinding zonder in-situ beton, dus relatief snel te maken op de bouwplaats.</li> </ul>	<p><i>Nadelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Koppelstukken kunnen lastig te produceren zijn, door de complexe geometrie.</li> <li>• Corrigeren van maatafwijkingen lastig.</li> </ul>
--	--

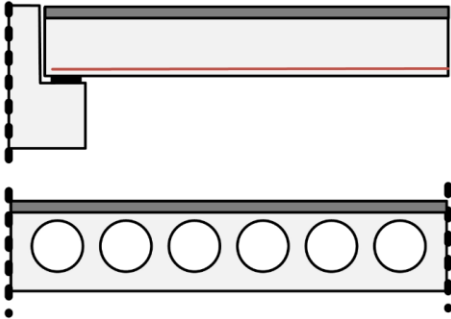
## 8.5 Brugdek

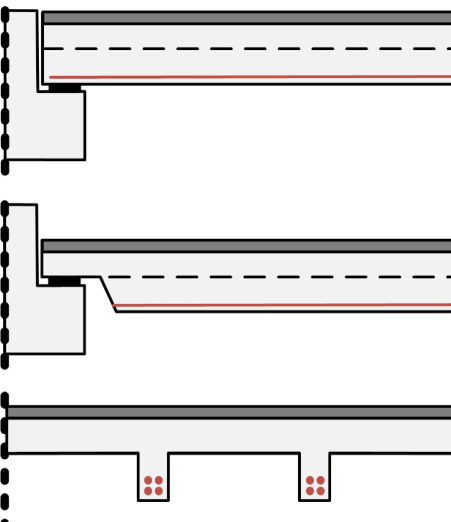
Mogelijke oplossingen om het brugdek te bouwen, kunnen toegepast worden bij zowel de boogbrug als de vakwerkbrug. De keuze voor een bepaald brugdek zal sterk samenhangen met de keuze hoe het brugdek met de staven van de randconstructie verbonden zal worden. In de onderstaande schetsen is slechts een suggestie gegeven hoe deze verbinding mogelijk gemaakt kan worden, hiervoor is de prefab L-vormige koker als basis genomen, maar uiteraard kunnen ook de andere oplossingen toegepast worden voor het brugdek.

<b>1. Brugdek van volstortliggers</b>	
<p>Het brugdek kan opgebouwd worden uit geprefabriceerde voorgespannen volstortliggers, een bestaande techniek die op dit moment gebruikt wordt voor overspanningen tot ongeveer 25 meter.</p>	
<p><i>Voordelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Het gebruik van bestaande ligger profiel versimpelt de bouwmethode.</li> <li>• Brugdek kan met de huidige techniek geproduceerd worden.</li> </ul>	<p><i>Nadelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Resulteert in een massief en dus relatief zwaar brugdek.</li> <li>• Opleglengte kan te kort zijn voor deze voorgespannen liggers.</li> </ul>

<b>2. Brugdek van breedplaten</b>	
<p>Het brugdek kan opgebouwd worden uit geprefabriceerde breedplaten die nu veel worden toegepast voor gebouwen. Door deze constructie kan eenvoudige een vaste verbinding tussen de randligger en het brugdek gemaakt worden. Een nadeel is dat deze platen ondersteund moeten worden tijdens de constructie van het brugdek.</p>	
<p><i>Voordelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Goede koppeling tussen randligger en brugdek mogelijk door in-situ</li> </ul>	<p><i>Nadelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Platen moeten ondersteund worden tijdens de constructie.</li> </ul>

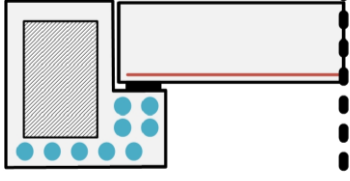
<p>constructie.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Onzeker of deze platen, met gelaste tralie wapening, geschikt zijn voor de wisselende zware verkeersbelasting (vermoeiing).</li> <li>• Resulteert in een massief en dus relatief zwaar brugdek.</li> </ul>
---------------------	---

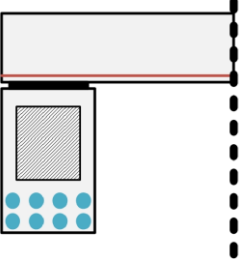
<p><b>3. Brugdek van kanaalplaten</b></p>	
<p>Het brugdek kan opgebouwd worden uit geprefabriceerde kanaalplaten. De bovenzijde van de platen wordt voorzien van een gewapende druklaag om een optimale spreiding van de belasting over de platen mogelijk te maken.</p>	
<p><i>Voordelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Eenvoudige constructie en gemakkelijke montage mogelijk.</li> <li>• Relatief lichte brugdekconstructie mogelijk.</li> </ul>	<p><i>Nadelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Alleen geschikt voor smalle brugdekken (tot ongeveer 10 meter).</li> <li>• Onzeker of deze platen geschikt zijn voor de zware asbelasting van de vrachtwagens.</li> </ul>

<p><b>3. Brugdek van TT-liggers</b></p>	
<p>Het brugdek kan opgebouwd worden met een speciaal ontworpen voorgespannen betonnen TT-liggers. De platen worden aan de bovenzijde van een druklaag voorzien om een vlak en egaal brugdek te krijgen. Eventueel kan de oplegging van het brugdek op de randligger zo worden uitgevoerd dat deze nog lager ten opzichten van de onderzijde van de constructie komt te liggen.</p>	
<p><i>Voordelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Snelle montage op de bouwplaats.</li> <li>• Mogelijkheid tot verlaagde ligging brugdek.</li> <li>• Relatief lichte brugdekconstructie mogelijk.</li> </ul>	<p><i>Nadelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Nieuw ligger profiel noodzakelijk om het brugdek te produceren.</li> </ul>

## 8.6 Verbinding brugdek randconstructie

Zoals eerder opgemerkt in paragraaf 8.5 hangt de keuze voor een bepaald type brugdek sterk samen met de welke oplossing gebruikt wordt om het brugdek aan de randconstructie te verbinden. In deze paragraaf zijn hiervoor drie mogelijke varianten beschreven.

<b>1. Prefab L-vormige koker</b>	
<p>Een mogelijke koppeling tussen het brugdek en de randconstructie is de toepassing van een koker met een L-vormige doorsnede om zo een oplegging van het brugdek mogelijk te maken. De randconstructie moet voor deze situatie torsiestijf zijn omdat het brugdek een aanzienlijk torsiebelasting op de randligger zal veroorzaken.</p>	
<p><i>Voordelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Relatief laag geplaatst brugdek mogelijk.</li> </ul>	<p><i>Nadelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• De koker moet een aanzienlijke torsie belasting kunnen weerstaan.</li> <li>• Alle voorspanning in de onderstaaf van het vakwerk moet door trekstaaf gaan.</li> </ul>

<b>2. Prefab koker</b>	
<p>Een mogelijke koppeling tussen het brugdek en de randconstructie is de toepassing van een koker waarbij het brugdek op de koker zal worden bevestigd. Deze variant zal minder torsie in de koker veroorzaken. Maar het brugdek komt erdoor hoger te liggen. De verbinding tussen de ondertrekstaaf en de rest van de constructie wordt hierdoor wel lastiger omdat deze door het brugdek heen moet.</p>	
<p><i>Voordelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Relatief weinig torsie in de kokerligger die de onder staaf vormt.</li> </ul>	<p><i>Nadelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Brugdek komt hoger te liggen.</li> <li>• Lastige verbinding tussen trekstaaf en rest van de constructie, doordat het brugdek in de weg zit.</li> </ul>

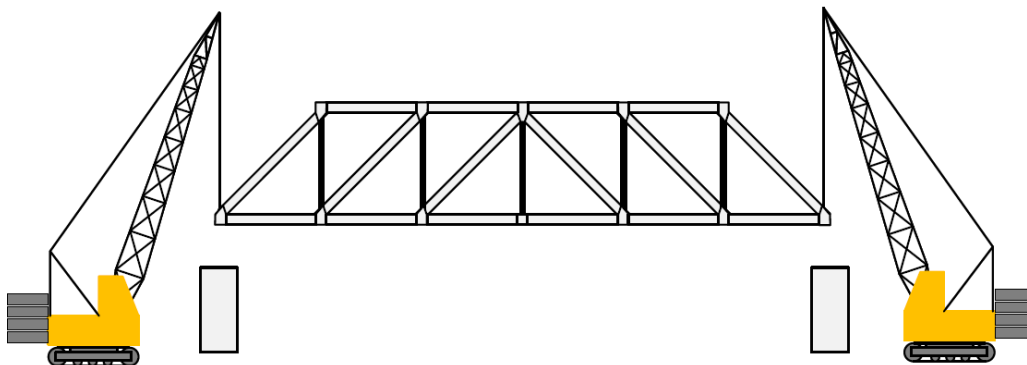
<b>3. Prefab koker met natte knoop</b>	
<p>Een mogelijke verbinding tussen de randconstructie en het brugdek is een natte knoop. Hierbij wordt het brugdek in-situ gestort op een betonnen schil. De onderlinge verbinding wordt gemaakt met behulp van wapeningstekken. Dit heeft als voordeel dat een deel van de trekstaaf ook door het brugdek kan worden gelegd.</p>	

<p><i>Voordelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lage plaatsing van het brugdek mogelijk.</li> <li>• Trekstaaf van de boog of het vakwerk kan ook deels in brugdek gepositioneerd worden.</li> </ul>	<p><i>Nadelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Veel in-situ beton noodzakelijk om de verbinding te maken.</li> <li>• Ingewikkelde productie van de randkoker door uitstekende wapeningsstekken.</li> </ul>
---	---

## 8.7 Transport en montage

Transport van de onderdelen voor de randconstructie, zoals de staven en de koppelstukken zal relatief eenvoudig zijn. Het zijn immers kleine onderdelen zodat deze efficiënt en hoogstwaarschijnlijk zonder begeleiding getransporteerd kunnen worden. Zolang het brugdek niet breder wordt dan 22 meter zal dit ook gelden voor de brugdekelementen. Als het brugdek breder wordt dan 22 meter is extra begeleiding voor de transporten noodzakelijk en kunnen deze prefab delen niet meer op de meest eenvoudige manier getransporteerd worden.

### 8.7.1 Randconstructie plaatsen door middel van hijskranen

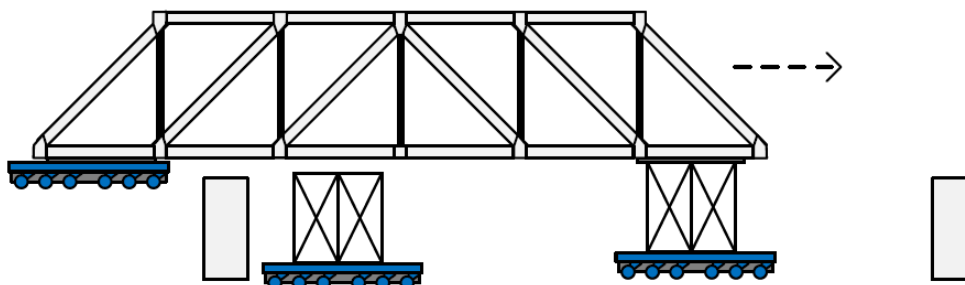


*Figuur 8-2 een schets van de bouwmethode: randconstructie plaatsen door middel van hijskranen.*

De bouw van deze brugoplossing start met het samenstellen van de twee randconstructies op een bouwterrein nabij de eindlocatie. Als deze randconstructies compleet zijn kunnen ze vervolgens naar de bouwlocatie vervoerd worden en door middel van zeer zware kranen over de snelweg of het kanaal gehesen worden om geplaatst te worden op de opleggingen.

Nadat de randconstructie geplaatst is en de stabiliteit van deze is verzekerd kan begonnen worden met het plaatsen van het brugdek. Dit kan met relatief eenvoudige hijskranen gebeuren, omdat deze brugdekelementen relatief licht uitgevoerd kunnen worden. Wel zal ook hiervoor de snelweg vanwege de veiligheid afgesloten moeten zijn, maar indien dit in de nacht gebeurd is dit een minder groot probleem wat betreft de optredende hinder.

### 8.7.2 Randconstructie inrijden



*Figuur 8-3 een schets van de bouwmethode: randconstructie inrijden met behulp van SPMT's.*

Een andere mogelijke methode om de randconstructie te plaatsen op de fundering is gebruik te maken van SPMT's of pontons hierbij kan de randconstructie vanaf het landhoofd aangevoerd worden en op de fundering geplaatst worden. Indien het brugdek over een kanaal gebouwd moet worden, wordt dit uiteraard uitgevoerd met behulp van pontons. Deze hier

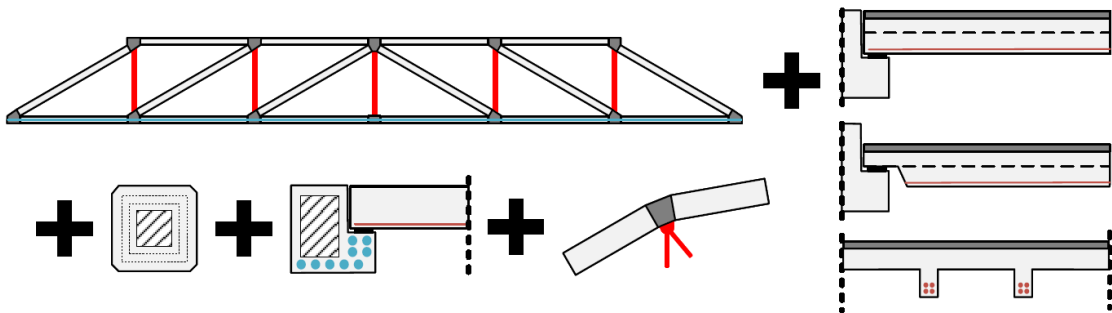
omschreven bouwmethode is vergelijkbaar met bouwmethode zoals die op dit moment worden toegepast voor stalen boogbruggen.

Nadat de randconstructies geplaatst zijn en de stabiliteit verzekerd is wordt het brugdek gemonteerd. Dit gebeurt op een vergelijkbare manier zoals geschetst in paragraaf 8.7.1.

## 8.8 Samengestelde variant van de boog- en vakwerkbrug

Met behulp van de beschreven deeloplossingen voor een mogelijke prefab betonnen vakwerk of boogbrug is een variant samengesteld die vergeleken zal worden met de andere alternatieven om een mogelijke oplossing te vinden om een prefab betonnen brug te bouwen met een overspanning tot ongeveer 100 meter.

### 8.8.1 Variant 5: Staal en beton vakwerk



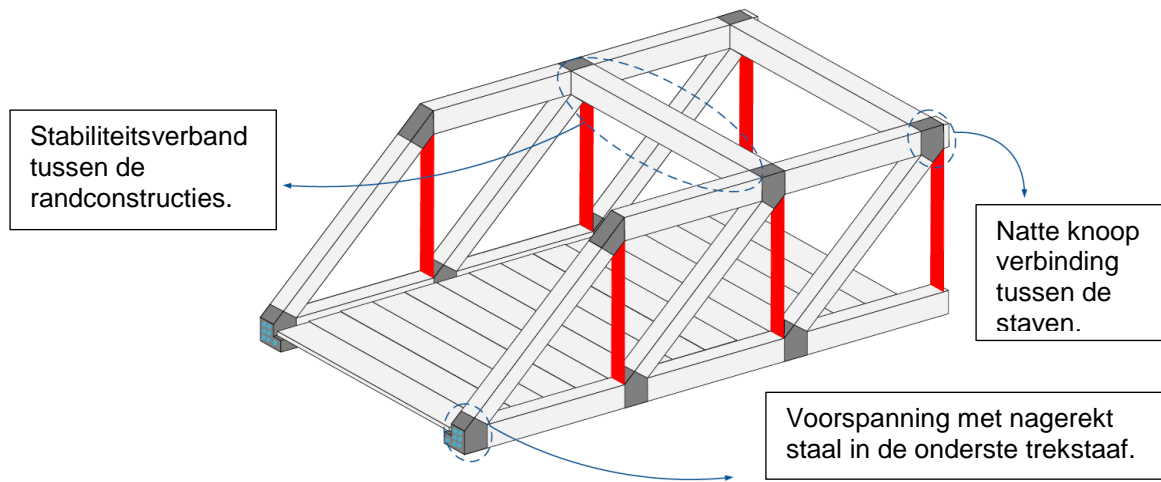
*Figuur 8-4 een schets van de verschillende deeloplossingen die gecombineerd zijn om variant 5 te vormen.*

Er is gekozen voor een staal en beton vakwerk waarbij de prefab betonnen staaf onderdelen met behulp van natte knopen aan elkaar worden verbonden. Dit type randconstructie bestaat uit zoveel mogelijk gelijkvormige onderdelen wat de productie versimpeld. Hierdoor is ook het maken van de natte knopen eenvoudiger, dezelfde bekisting kan immers hergebruikt worden. De mogelijke duurzaamheidsproblemen van de stalen trekelementen worden als minder problematisch gezien dan een eventueel trekelement in voorgespannen beton dat een aanzienlijk hoger eigengewicht zal hebben.

De mogelijke staafverbindingen zijn grofweg in te delen in twee categorieën die beide hun eigen voor- en nadelen hebben. Een deel van de verbindingen is snel te maken, bijvoorbeeld de noppenverbinding, maar heeft bijzonder weinig tolerantie in de uitvoering, waardoor er een groot risico bestaat dat deze uiteindelijk niet zullen passen. Het andere deel van de verbindingen is juist bijzonder veel werk om te maken, bijvoorbeeld de natte knoop verbinding. Maar deze verbindingen hebben wel het voordeel dat maatafwijkingen gecompenseerd kunnen worden. Er is besloten om voor de natte knoop verbinding te kiezen omdat er ervaring is met een dergelijke constructie vorm in Nederland [25] en omdat er een hoge zekerheid is dat deze verbinding werkelijk passend gemaakt kan worden.

Met betrekking tot het brugdek is gekozen voor het toepassen van TT-liggers. Dit omdat deze deel variant resulteert in een relatief licht brugdek en er ook veel vertrouwen is in de maakbaarheid van deze toepassing. Ook kan dit type brugdek relatief snel gebouwd worden zonder veel hinder voor het kruisende verkeer, iets wat bijvoorbeeld niet geldt voor het brugdek opgebouwd uit breedplaten.

De koppeling tussen het brugdek en de randconstructie zal gemaakt worden met behulp van een L-vormige kokerligger. Deze deelvariant resulteert in een zo laag mogelijk brugdek, zeker in combinatie met het brugdek van TT liggers. Op deze manier wordt het grootste sterke punt van deze variant, een lagen ligging van het brugdek, nog extra versterkt.



*Figuur 8-5 een schets van de beschreven variant 5: staal en beton vakwerk.*



## 9. Analyse van de varianten

In dit hoofdstuk worden de 5 samengestelde varianten geanalyseerd. Hierbij zullen de samengestelde varianten een cijfer krijgen tussen de 1 en de 5 per beoordelingspunt, hierbij is 1 het laagste en 5 het hoogste score. Deze onderdelen waar de varianten op beoordeeld worden zijn afgeleid uit de wensen uit het programma van eisen, wensen en randvoorwaarde, zoals beschreven in hoofdstuk 4. Deze cijfers zijn niet bedoeld om een variant als een voldoende of onvoldoende te beoordelen maar dienen om de prestaties van de variant in relatie tot de andere varianten weer te geven. Een overzicht van deze cijfers, met een wegingsfactor is gepresenteerd in paragraaf 9.6. Door middel van dit overzicht kunnen de opgestelde varianten vergeleken worden. De volgende 6 beoordelingspunten zijn gebruikt voor de analyse:

1. Constructie: Is dit een efficiënte constructie wat betreft vorm en materiaal gebruik?
2. Productie: is de variant eenvoudig te produceren?
3. Vormvrijheid: kan met deze variant elke gewenste brugdekform gemaakt worden?
4. Transport: kunnen de prefab elementen eenvoudig getransporteerd worden?
5. Montage: Is deze variant eenvoudig te monteren?
6. Duurzaamheid: Is deze variant demontabel en zo circulair her te gebruiken?

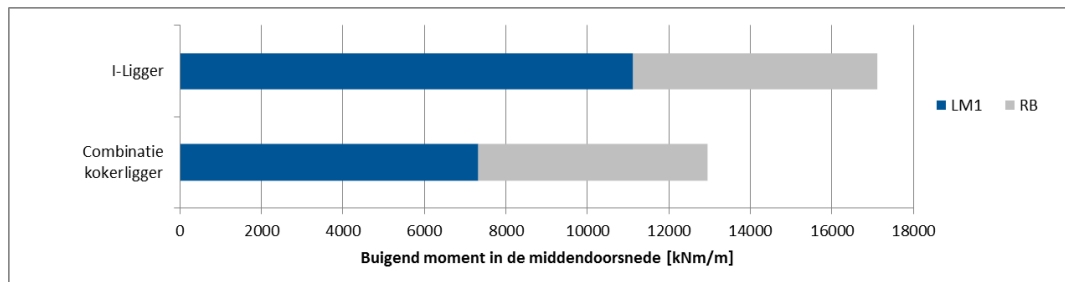
Voor verschillende varianten is het eigengewicht van de elementen berekend aan de hand van geschatte dimensies, dit om een inzicht te krijgen in de invloed van verschillende parameters op de transporteerbaarheid van de prefab elementen. In de tabellen zijn de resultaten van deze berekening gepresenteerd, de berekende gewichten zijn conservatief, de dimensies zijn ruim geschat en er is gerekend met een soortelijke massa voor het beton van  $26 \text{ kN/m}^3$ . Dit verhoogde eigengewicht is gebruikt vanwege het hogere soortelijke gewicht van het hogesterktebeton en omdat verwacht wordt dat er dermate veel wapening in de doorsnede toegepast zal worden dat de gebruikelijke  $25 \text{ kN/m}^3$  niet meer voldoende is. De gebruikte kleuren in de tabellen geven een indicatie van de transporteerbaarheid van de prefab elementen, maar voor een definitieve variant zal dit zeker nog beter gecontroleerd moeten worden.

Omschrijving:	Kleur:
Transport mogelijk zonder begeleiding	
Transport mogelijk	
Risico dat het element te zwaar wordt voor transport	
Transport over de weg niet mogelijk	

### 9.1 Variant 1: 3-delige samengestelde liggerbrug

#### 9.1.1 Constructie

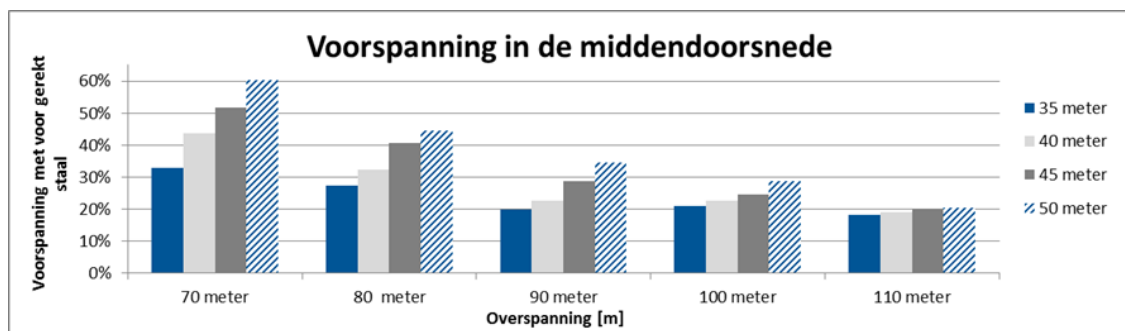
Bij de start van de variantenstudie is bepaald dat het verminderen van het eigengewicht van de constructie de meest effectieve methode is om een slanke overspanning van 100 meter met prefabbeton mogelijk te maken. Uiteindelijk blijkt dat ook voor deze variant, de 3-delige samengestelde liggerbrug, 70% van het buigende moment in de middensdoorsnede veroorzaakt wordt door het eigengewicht. Dit komt niet om dat het onmogelijk is om op het eigengewicht te besparen, maar vooral doordat de betere belastingspreiding van deze variant zorgt voor een daling van ongeveer 25% van het buigend moment door de variabele belastingen. Hierdoor daalt het buigende moment door het eigengewicht niet in relatieve zin, maar wel in absolute zin.



Figuur 9-1 een diagram dat het verschil in buigend moment tussen een standaard I-ligger en variant 1 voor de verkeers- en rustende belasting laat zien.

Vergeleken met de varianten 2, 3 en 4 zal deze variant het hoogste eigengewicht hebben, dit komt omdat de liggerbreedte relatief klein is, waardoor de lijfbreedte van de ligger minder goed geoptimaliseerd kan worden voor de betreffende belasting. Deze relatief grote belasting door het eigengewicht is de grootste belemmering voor een overspanning van 100 meter met de gewenste slankheid. Maar voorlopige berekeningen tonen aan dat het net mogelijk is om met deze variant een 100 meter brug met een maximale constructiehoogte van 3,2 meter te bouwen.

Deze constructie is vooral aantrekkelijk in situaties waar het gebruik van voorgerekt staal gemaximaliseerd kan worden. Dit voorgerekt staal heeft als belangrijkste voordeel dat deze vrijer verdeeld kan worden over de onderflens dan voorspanning met nagerekt staal. Hierdoor kan de vorm van de onderflens beter geoptimaliseerd worden voor zowel de belastingen in de lengterichting als in dwarsrichting. Hoeveel voorgerekt staal er in de doorsnede gebruikt kan worden is afhankelijk van de lengte van het middelste liggerdeel in verhouding tot de totale lengte van de overspanning. Daarom zal deze variant het meest geschikt zijn voor de kleinere overspanningen (ongeveer 80 tot 90 meter). Dit omdat het middelste liggerdeel, rekening houdend met transport waarschijnlijk niet langer kan zijn dan 35 meter (zie hiervoor paragraaf 9.1.4).



Figuur 9-2 een diagram met het geschatte percentage voorspanning met nagerekt staal afhankelijk van de overspanning en de lengte van het middelste liggerdeel voor de 3-delige liggerbrug.

Een ander nadeel van deze variant vergeleken met variant 3, het kokersegment met gecombineerde voorspanning, is de grote hoeveelheid voorspanning met nagerekt staal die noodzakelijk is zowel de lengterichting van het brugdek als in de dwarsrichting van het brugdek. In variant 3 zijn de voorspanningssystemen efficiënter verdeeld over het brugdek.

Samengevat zal deze variant het meest geschikt zijn voor de korte overspanningen (80 tot 90 meter) dan voor de langste overspanningen van 100 meter. Maar voorlopig berekeningen laten zien dat een overspanning van 100 meter mogelijk is, zeker omdat een aantal aannames nog conservatief zijn (bijvoorbeeld een aangenomen soortelijke massa van beton van  $26 \text{ kN/m}^3$ ) en deze met betere berekeningen waarschijnlijk nog geoptimaliseerd kunnen worden.

Cijfer: 4

### 9.1.2 Productie

De productie van de prefab elementen zal betrekkelijk eenvoudig zijn. De liggers kunnen geproduceerd worden op manier die sterk lijkt op de huidige liggerproductie. Het belangrijkste verschil is de enorme hoogte, meer dan 3 meter, die werkzaamheden aan bijvoorbeeld de

wapeningkooien ingewikkelder zullen maken. Maar zeker vergeleken met de elementen van variant 3 en 4, de segmentbruggen, zijn de elementen van deze variant relatief eenvoudig te produceren.

Cijfer: 5

### 9.1.3 Vormvrijheid

De vormvrijheid van deze variant is zeer goed, zeker vergeleken met de segmentbrug varianten. Doordat het brugdek zowel in de lengte als breedte richting is opgebouwd uit prefab elementen kan in principe elke breedte van het brugdek gebouwd en getransporteerd worden. Wel moet opgemerkt worden dat zeer smalle brugdekken, kleiner dan 10 meter, het onzeker is of de gewenste overspanning gehaald kan worden. Bij zeer smalle brugdekken is er immers minder brugdekbreedte waar de belasting over gespreid kan worden, iets waar deze variant juist gebruik van maakt om de verkeersbelasting te dragen.

Een ander voordeel voor deze variant vergeleken met de varianten 3 en 4 is de mogelijkheid om relatief eenvoudig bruggen met een niet rechte kruisingshoek te maken. Hiervoor moeten de gaten in de lijven onder een hoek geplaatst worden om schuine externe dwarsvoorspanning mogelijk te maken.

Cijfer: 5

### 9.1.4 Transport

Om een inzicht te krijgen of de prefab liggerdelen van de 3-delige liggerbrug te transporteren zijn is een overzicht gemaakt van de gewichten per liggerdeel voor verschillende overspanningen en dus de profielhoogtes. Ook is de lengte van het middelste liggerdeel gevarieerd. Hierbij is het streven om een zo groot mogelijk middendeel te hebben, omdat dan het gebruik van voorspanning met voorgerekt staal geoptimaliseerd kan worden (een samenvatting van deze berekening is toegevoegd als bijlage B1).

Overspanning:	70 meter*	80 meter*	90 meter	100 meter	110 meter
<b>Lengte middelste liggerdeel:</b>					
25 meter	95 [ton]	110 [ton]			
30 meter	115 [ton]	132 [ton]	137 [ton]		
35 meter	134 [ton]	139 [ton]	160 [ton]	167 [ton]	
40 meter	153 [ton]	159 [ton]	183 [ton]	191 [ton]	196 [ton]
45 meter	172 [ton]	179 [ton]	205 [ton]	215 [ton]	220 [ton]
50 meter	191 [ton]	299 [ton]	228 [ton]	238 [ton]	245 [ton]
55 meter	210 [ton]	219 [ton]	251 [ton]	262 [ton]	269 [ton]

\* Voor de overspanningen van 70 en 80 meter is gerekend met een dunnere onder- en bovenflens van 280 en 300 mm.

Tabel 9-1 een overzicht van de gewichten voor de middelste liggerdelen voor verschillende overspanningen en lengtes van het middelste liggerdeel, de doorgestreepte opties zijn niet mogelijk in drie delen.

In het overzicht valt op dat voor een overspanning van 100 meter, alleen 35 meter een geschikte liggerlengte voor het middelste liggerdeel is. Anders wordt het gewicht te hoog voor transport, of zijn de liggerdelen te kort om de overspanning te vormen. Deze liggerdelen van 167 ton voor een overspanning van 100 meter zitten op de grens van wat mogelijk is voor transport over de weg. Maar als gewicht meer geoptimaliseerd wordt, is de overspanning van 100 meter waarschijnlijk mogelijk.

Ook moet opgemerkt worden dat de voor de liggerdelen met een hoogte groter dan 2,8 meter zeer waarschijnlijk een nieuwe trailer combinatie ontwikkeld moet worden, omdat deze anders te hoog dreigt te worden voor de meeste viaducten. Omdat er op dit moment al lagere trailers

bestaan, zij het voor liggers met een lager eigengewicht en lengte, wordt dit als mogelijk beschouwd.

Aan de hand van dit overzicht kan geconcludeerd worden dat de 3-delige samengestelde liggerbrug van uit het oogpunt van transport het meest geschikt is voor overspanningen onder de 90 meter, anders bestaat er het risico dat de delen te zwaar worden voor transport en moet er een nieuwe, lagere trailer voor ontwikkeld worden.

Cijfer: 3
-----------

### 9.1.5 Montage

Voor de montage van de 3-delige samengestelde liggerbrug zijn verschillende mogelijkheden beschreven, al deze mogelijkheden zijn in principe mogelijk zonder extreme hinder. Het zal van de omgeving, het transport en hoe veel hinder acceptabel is afhangen welke montagemethode het meest geschikt is.

Het monteren van de complete samengestelde ligger met behulp van hijskranen is zeker mogelijk. Maar deze samengestelde liggers zullen ongeveer 400 tot 500 ton wegen, bij een overspanning van 100 meter. Door het extreem grote gewicht van deze liggers zullen hiervoor extreem zware en dure hijskranen noodzakelijk zijn. Deze hijskranen zullen moeten hijsen met een relatief korte arm om het gewicht te kunnen dragen. Ondanks deze nadelen biedt deze methode wel de mogelijkheid om een brugdek met een grote overspanning binnen zeer korte tijd te bouwen. Bij het hijsen van deze 100 meter lange liggers treden geen kantelstabiliteitsproblemen op, de brede onder- en bovenflens maken de hoge ligger voldoende stijf.

De montagemethode: het samenstellen van de ligger op tijdelijke ondersteuning heeft niet het nadeel dat er extreem zware kanen noodzakelijk zijn. De montage kan met eenvoudigere, meer conventionele kranen gebeuren. Maar deze methode zal meer hinder geven en dus niet voor elk snelwegviaduct mogelijk zijn. De duur van deze montage wordt nog extra verlengd door de natte knoopverbinding die tussen de liggers gemaakt moet worden. Maar als er een verbinding ontwikkeld wordt die snel te maken is en de verharding bijvoorbeeld versneld wordt door de verbinding te verhitten, kan deze verbinding toch met voldoende snelheid gemaakt worden. Tenslotte is gebleken uit voorlopige berekeningen dat deze voeg al volledig onder druk staat in de bruikbaarheidsgrenstoestand om voldoende sterkte in de uiterste grenstoestand te halen. Daarom is het misschien toch mogelijk deze voeg zonder doorgaande wapening uit te voeren en op deze manier sneller te kunnen bouwen.

Vergeleken met de andere varianten scoort de 3-delige samengestelde liggerbrug zeer goed op het gebied van montage, dit is niet omdat de montagemethoden bijzonder goedkoop of eenvoudig zullen zijn. De montage van een brug met een dergelijke overspanning zal ook niet snel gemakkelijk zijn. Maar omdat er veel verschillende geschikt montagemethoden zijn kan per situatie gekozen worden welke methode het meest geschikt is.

Cijfer: 5
-----------

### 9.1.6 Duurzaamheid

Door het gebruik van externe voorspanning in de dwarsrichting, om de liggers onderling tot een brugdek te verbinden. Is er de mogelijkheid om het brugdek demontabel te maken in de dwarsrichting. Hiervoor moeten de voegen tussen de liggers gemaakt worden zonder aanhechting, zodat bij het demonteren, deze voeg eenvoudig te verwijderen is. Ook mag er geen in-situ eind dwarsdrager aanwezig zijn in het brugdek.

In de lengterichting zijn de liggers door de natte knoop verbinding en de voorspanning met aanhechting praktisch niet te demonteren. Eventueel zouden de individuele liggers na demontage hergebruikt kunnen worden, maar hierbij zal het vervoer van deze 100 meter lange liggers alleen over zeer korte afstanden, of over het water mogelijk zijn.

Cijfer: 3
-----------

### 9.1.7 Conclusie

Samengevat is de 3-delige samengestelde liggerbrug zeker een geschikte variant. De productie van deze prefab liggerdelen is relatief eenvoudig. De diverse geschikte montagemethoden zorgen ervoor dat deze variant toegepast kan worden in zeer diverse situaties. Maar deze variant is wel meer geschikt voor de overspanningen van ongeveer 80 meter dan de overspanningen van 100 meter, dan wordt het relatief hoge eigengewicht van deze variant te overheersend bij de gewenste slankheid. Al laten voorlopige berekeningen zien dat een overspanning van 100 meter mogelijk is.

## 9.2 Variant 2: 5-delige samengestelde liggerbrug

### 9.2.1 Constructie

Wat betreft het eigengewicht van de constructie zal variant 2, de 5-delige samengestelde liggerbrug, tussen variant 1 en 3 in zitten. Door de grotere liggerbreedte van 3 meter zullen er minder lijven noodzakelijk zijn, zodat de dikte van de lijven beter geoptimaliseerd kan worden over de lengte van het brugdek. Op deze manier kan het totale gewicht van de constructie verminderd worden en is dus een grotere en slankere overspanning mogelijk.

Deze variant zal beter geoptimaliseerd zijn voor de langere overspanningen dan variant 1, dit komt omdat door de groter afstand tussen de lijven een dikkere bovenflens noodzakelijk is voor de lokale belastingen. Deze dikke bovenflens is ook noodzakelijk om voldoende betondruk te kunnen leveren om met een kleine arm een grote momentcapaciteit te hebben. Gecombineerd met het relatief lagere eigengewicht maakt deze variant meer geschikt voor de langste overspanning dan variant 1.

Een nadeel van deze variant is dat er praktisch gezien alleen voorspanning met nagerekt staal gebruikt wordt, dit is minder aantrekkelijk omdat deze vorm van voorspanning minder gemakkelijk in te passen is in de onderflens en vanwege de hogere kosten van deze oplossing. Voor de korte overspanningen (70 tot 90 meter) is deze variant dus minder geschikt dan variant 1, omdat bij deze variant de combinatie van voorspanning met voor- en nagerekt staal beter geoptimaliseerd kan worden dan bij variant 2.

Cijfer: 4
-----------

### 9.2.2 Productie

De productie van deze segmenten zal vergelijkbaar zijn met de productiemethode voor variant 1, de 3-delige samengestelde liggerbrug. Het belangrijkste verschil is de liggerlengte die een stuk korter is, hierdoor kan er gewerkt worden met een kortere en dus eenvoudigere bekisting. De ribben die op de lijven geplaatst zijn, zullen echter deze bekisting wel ingewikkelder maken om te produceren.

De brede onderflens van 3 meter kan een probleem geven met het storten, omdat deze om zo efficiënt mogelijk te zijn zo vlak mogelijk uitgevoerd moet worden. Dit probleem kan opgelost worden, door bijvoorbeeld rustig te storten waardoor de lucht goed uit het beton kan ontsnappen, of het storten van de ligger in twee fasen (zoals in het verleden is toegepast voor kokerliggers).

Cijfer: 4
-----------

### 9.2.3 Vormvrijheid

De vormvrijheid van de 5-delige liggerbrug is vergelijkbaar met die van de 3-delige liggerbrug, dit is ook logisch omdat ze op het zelfde doorsnede principe gebaseerd zijn. Een nadeel van de brede liggerdelen is dat de breedte hierdoor gaat variëren in stappen van 3 meter, zodat niet eenvoudig iedere brugdekbreedte gemaakt kan worden. Maar dit kan opgelost worden met een speciaal in breedte aanpasbare randligger, waarbij bijvoorbeeld de flenzen in breedte kunnen variëren om een traploos verloop van de brugdekbreedtes mogelijk te maken.

Cijfer: 5
-----------

### 9.2.4 Transport

Net als voor de 3-delige samengestelde liggerbrug is een globale berekening gemaakt van de maximale gewichten van de liggerdelen. Hierbij is gevarieerd in de lengte van de overspanning en dus de constructiehoogte en de liggerbreedte. Deze berekening is uitgevoerd voor 20 meter lange liggerdelen en 25 meter lange liggerdelen.

Overspanning:	70 meter* (4 liggerdelen)	80 meter* (4 liggerdelen)	90 meter (5 liggerdelen)	100 meter (5 liggerdelen)	110 meter (6 liggerdelen)
Breedte van het liggerdeel / flens dikte:					
2000 mm/ 200 mm	82 [ton]	80 [ton]	90 [ton]	95 [ton]	98 [ton]
2250 mm/ 200 mm	84 [ton]	87 [ton]	100 [ton]	104 [ton]	107 [ton]
2500 mm/ 200 mm	91 [ton]	95 [ton]	109 [ton]	113 [ton]	115 [ton]
2750 mm/ 230 mm	102 [ton]	105 [ton]	120 [ton]	124 [ton]	127 [ton]
3000 mm/ 250 mm	111 [ton]	115 [ton]	132 [ton]	137 [ton]	140 [ton]
* Voor de overspanningen van 70 en 80 meter is gerekend met een dunnere onder- en bovenflens van 280 en 300 mm.					

Tabel 9-2 een overzicht van de gewichten voor de middelste liggerdelen met een standaard lengte van 20 meter voor verschillende overspanningen en breedtes van de ligger.

Overspanning:	70 meter* (3 liggerdelen)	80 meter* (4 liggerdelen)	90 meter (4 liggerdelen)	100 meter (4 liggerdelen)	110 meter (5 liggerdelen)
Breedte van het liggerdeel / flens dikte:					
2000 mm/ 200 mm	95 [ton]	100 [ton]	114 [ton]	119 [ton]	122 [ton]
2250 mm/ 200 mm	105 [ton]	109 [ton]	125 [ton]	130 [ton]	133 [ton]
2500 mm/ 200 mm	114 [ton]	118 [ton]	136 [ton]	141 [ton]	144 [ton]
2750 mm/ 230 mm	127 [ton]	132 [ton]	151 [ton]	157 [ton]	160 [ton]
3000 mm/ 250 mm	138 [ton]	143 [ton]	165 [ton]	171 [ton]	175 [ton]
* Voor de overspanningen van 70 en 80 meter is gerekend met een dunnere onder- en bovenflens van 280 en 300 mm.					

Tabel 9-3 een overzicht van de gewichten voor de middelste liggerdelen met een standaard lengte van 25 meter voor verschillende overspanningen en breedtes van de ligger.

Uit de berekening volgt dat de 20 meter lange, 3 meter brede liggerdelen voor een overspanning van 100 meter op de grens zitten van wat te transporteren is over de weg. Liggerdelen van 25 meter zijn dus ook geen aantrekkelijke oplossing voor deze variant, om een overspanning van 100 meter te bouwen. Het voordeel van deze 20 meter lange, 3,2 meter hoge liggerdelen is wel dat deze op meer traditionele trailers vervoerd kunnen worden, dit in tegenstelling tot de liggerdelen van variant 1.

Maar over het algemeen zijn deze elementen eenvoudiger te transporten dan de liggerdelen van de 3-delige prefab liggerbrug, zelfs voor een overspanning van 100 meter. Mocht het eigengewicht van de liggerdelen toch te hoog worden kan eventueel overgeschakeld worden op een smallere liggerbreedte van 2,5 of 2,75 meter. Maar dit zal zorgen voor een minder efficiënte constructie.

Cijfer: 5

### 9.2.5 Montage

Zoals beschreven in de vorige paragraaf zal het gewicht per liggerdeel van de 5-delige samengestelde liggerbrug lager zijn dan voor 3-delige samengestelde liggerbrug. Maar het totale gewicht van een samengestelde ligger zal juist toenemen, voor een overspanning van 100 meter zal dit 600 tot 700 ton zijn. Dergelijke gewichten zijn technisch gezien nog steeds te hijsen, maar praktisch gezien is dit in Nederland, niet realistisch. Het is dit dus aantrekkelijker om deze gecombineerde liggers per stuk in te rijden met behulp van SPMT's of te varen met behulp van pontons in het geval van een brug over het water.

Montage met behulp van tijdelijke ondersteuning zal ook voor deze variant een mogelijkheid zijn. Het voordeel van deze variant in combinatie met deze montagemethode is het lagere eigengewicht per liggerdeel, hierdoor zijn lichtere kranen voldoende voor de montage. Maar er moeten ook meer koppelingen gemaakt worden in de lengterichting van het viaduct, zodat dit meer tijd kost en er ook meer risico is op vertragingen bij het uitvoeren van deze montagemethode.

Samenvattend zal de montage van de 5-delige liggerbrug mogelijk zijn en op dezelfde manieren uitgevoerd kan worden als voor de 3-delige samengestelde liggerbrug. Maar de montage zal door het grote gewicht van de samengestelde liggerdelen zeker niet eenvoudig zijn. Toch scoort deze variant beter op het gebied van montage dan variant 3 en 4, de segmentbruggen. Dit komt omdat er net als bij variant 1 meerdere montagemethoden praktisch toepasbaar zijn. Hierdoor kan per situatie gekozen worden welke montagemethode het meest geschikt is.

Cijfer: 4
-----------

### 9.2.6 Duurzaamheid

Deze variant zal net zo demontabel zijn de 3-delige liggerbrug, dit betekent dat het brugdek gedemonteerd kan worden in de in de dwarsrichting, maar dat de gecombineerde liggers niet gedemonteerd kunnen worden zonder deze te slopen. Variant 1 en 2 score daarom gelijk op het onderwerp duurzaamheid.

Cijfer: 3
-----------

### 9.2.7 Conclusie

Vergeleken met variant 1 zal deze variant meer geschikt zijn voor de grootse overspanningen, van 100 meter. Deze variant is meer geschikt door de besparing op het eigengewicht en omdat de prefab liggerdelen voor de 100 meter brug waarschijnlijk eenvoudiger te transporteren zijn. Tegelijkertijd is deze variant lastiger te monteren. Een ander nadeel is dat er praktische gezien alleen voorspanning met nagerekt staal gebruikt wordt, iets wat de dikte van de onderflens en dus het eigengewicht negatief zal beïnvloeden.

## 9.3 Variant 3: Kokersegment met gecombineerde voorspanning

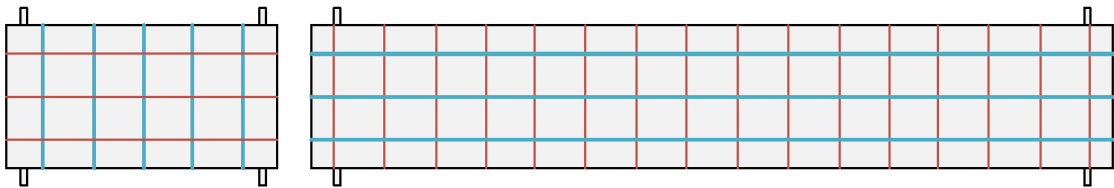
### 9.3.1 Constructie

De opbouw van de doorsnede en de krachtsafdracht van deze constructie is in de eindsituatie goed vergelijkbaar met de samengestelde liggerbruggen. Het belangrijkste verschil is het lagere eigengewicht van de constructie. Deze vermindering is mogelijk door de mogelijkheid om de lijven efficiënter in de doorsnede te spreiden en door het gebruik van externe voorspanning, waardoor er minder beton noodzakelijk is in de lijven en in de onderflens van de constructie. Deze daling in eigengewicht maakt het ook mogelijk om de bovenflens minder dik te maken. Geschat wordt dat de totale constructie ongeveer 15 tot 20% lichter zal zijn dan de 3-delige samengestelde liggerbrug, de zwaarste berekende variant.

Vergeleken met variant 4, heeft deze variant het voordeel dat de torsiestijfheid van de constructie niet afneemt in de uiterste grenstoestand, hierdoor wordt de belasting betere gespreid over het volledige brugdek. Hierdoor is het maximale buigende moment per meter brugdek lager dan voor variant 4.

De segmenten worden in de lengterichting alleen verbonden door middel van de voorspanning, er is dus geen doorlopende betonstaalwapening tussen de segmenten. Daarom geldt er een minimale drukspannings-eis in deze voegen bij de karakteristieke belasting. Variant 3 kan aan deze eis voldoen door de externe voorspanning die in de doorsnede geplaatst wordt. \dit heeft als voordeel dat hierdoor relatief weinig eigengewicht wordt toegevoegd aan de constructie.

Vergeleken met variant 1 en 2 worden de gekozen voorspanssystemen, voorspanning met voorgerekt staal, voorspanning met nagerekt staal en de externe voorspanning daar gebruikt waar deze het beste tot hun recht komen. De verankering van de voorspanning is hierbij het meest ingewikkelde onderdeel, voor de 100 meter lange brugdekken zal er bij variant 1 en 2 dus bijzonder veel verankeringen voor de voorspanning in de dwarsrichting noodzakelijk zijn. Het is dus logischer om het brugdek in de dwarsrichting voor te spannen met voorgerekt staal omdat dan het aantal verankeringen geminimaliseerd wordt.



*Figuur 9-3 links een schets van een brugdek met een korte overspanning er zijn relatief weinig verankeringen noodzakelijk voor de dwarsvoorspanning, rechts een brugdek met een lange overspanning er zijn relatief veel verankeringen noodzakelijk voor de dwarsvoorspanning.*

Cijfer: 5

### 9.3.2 Productie

De productie van de prefab kokersegmenten zal ingewikkelder zijn dan de productie van de bestaande liggerprofielen. Dit komt bijvoorbeeld door de meer ingewikkelde vorm, maar ook omdat de bekisting die gebruikt wordt voor ieder brugdek aangepast moet worden om de verschillende brugdekbreedtes te kunnen produceren. Een mogelijke oplossing voor dit probleem is het ontwikkelen van een modulaire bekisting die eenvoudig aangepast kan worden aan de gewenste brugdekbreedtes.

Een ander nadeel van deze productiemethode is dat de bekisting een grote maatvastheid moet hebben. Een kleine doorbuiging, door het gewicht van het beton is nog acceptabel, deze kan worden gecorrigeerd door de voeg die later gegoten wordt. Maar als deze doorbuigen te groot wordt kan dit de aansluiting negatief beïnvloeden en de koppeling tussen de segmenten onmogelijk maken.

Een ander vraagstuk dat opgelost moet worden om de productie van deze segmenten mogelijk te maken is of de voorspanstrengen door middel van een standaard spanbaan voorgespannen kunnen worden. Daarvoor moeten de strengen immers meer dan 3,2 meter omhoog gebogen worden, dit kan een probleem worden indien er veel strengen noodzakelijk zijn in de bovenflens van de segmenten.

Samenvatten zal de productie van de segmenten voor deze variant absoluut mogelijk zijn maar zeker niet eenvoudig, zeker als dit vergeleken wordt met de samengestelde ligger varianten die wat betreft de productiemethode veel meer vergelijkbaar zijn met de bestaande prefab liggers.

Cijfer: 2

### 9.3.3 Vormvrijheid

Met deze variant kunnen alle vormen rechthoekige brugdekken gebouwd worden. Alleen voor extreem brede brugdekken kan het transport een probleem worden, maar in tegenstelling tot variant 4, kan dit opgelost worden door simpelweg dunnere segmenten te gebruiken.

Vergeleken met variant 1 en 2 zijn brugdekken met een niet rechte kruisingshoek bijzonder lastig te produceren, maar voor de gewenste lange overspanningen wordt verwacht dat dit geen bijzonder grote beperking is.



Cijfer: 4

### 9.3.4 Transport

Voor het transport zijn vooral de maximale gewichten per segment van belang. Uit de onderstaande tabellen blijkt dat een breed brugdek, meer dan 20 meter, alleen vervoerd kan worden bij segmentdiktes van 2500 mm of dunner. Dit betekent dat er voor deze brede brugdekken, die zeker voor zullen komen, meer segmenten en dus ook meer voegen nodig zijn om het brugdek te maken. Vergeleken met variant 4 kunnen al deze segmenten wel geproduceerd worden, een kleine maatafwijking kan gecorrigeerd worden door de mortelvoeg. Hierdoor is zowel het transport, als de bouw van deze variant voor de te verwachten brugdekbreedtes mogelijk.

De relatief kleine breedte van de segmenten heeft tevens als voordeel dat het transport van de segmenten makkelijker zal zijn. Ook is er in dit geval minder risico dat de dwarskracht tanden op de segmenten beschadigd raken tijdens het transport. Dit is voor deze variant ook een minder groot probleem omdat de mortelvoeg kleine beschadigingen aan de dwarskracht tanden, door het transport, kan corrigeren.

Overspanning:	70 meter	80 meter	90 meter	100 meter	110 meter
Breedte van het brugdek:					
10 meter	55 [ton]	58 [ton]	61 [ton]	64 [ton]	66 [ton]
15 meter	80 [ton]	83 [ton]	87 [ton]	92 [ton]	95 [ton]
17,8 meter	96 [ton]	101 [ton]	105 [ton]	112 [ton]	115 [ton]
20 meter	110 [ton]	115 [ton]	121 [ton]	129 [ton]	133 [ton]
25 meter	134 [ton]	141 [ton]	148 [ton]	156 [ton]	162 [ton]
30 meter	159 [ton]	167 [ton]	175 [ton]	184 [ton]	190 [ton]

Tabel 9-4 een overzicht van de gewichten per segment voor verschillende brugdekbreedtes en overspanning met een segmentdikte van 3000 mm.

Segmentdikte:	1500 mm	2000 mm	2500 mm	3000 mm	3500 mm
Breedte van het brugdek:					
10 meter	32 [ton]	43 [ton]	54 [ton]	64 [ton]	75 [ton]
15 meter	46 [ton]	61 [ton]	77 [ton]	92 [ton]	108 [ton]
17,8 meter	56 [ton]	74 [ton]	93 [ton]	112 [ton]	130 [ton]
20 meter	64 [ton]	86 [ton]	107 [ton]	129 [ton]	150 [ton]
25 meter	78 [ton]	104 [ton]	130 [ton]	156 [ton]	183 [ton]
30 meter	92 [ton]	132 [ton]	147 [ton]	184 [ton]	205 [ton]

Tabel 9-5 een overzicht van de gewichten per segment voor verschillende brugdekbreedtes en segmentdiktes voor een overspanning van 100 meter.

Cijfer: 4

### 9.3.5 Montage

De gekozen methode om de segmenten samen te stellen, een mortelvoeg, heeft als nadeel dat dit bijzonder veel bouwtijd kost, zowel om de mortel te gieten als om de mortel te laten uitharden. Het samenstellen van de segmenten door middel van een portaalconstructie, is dus absoluut geen realistische montagemethode voor deze variant omdat zolang het brugdek niet compleet is kruisend verkeer niet mogelijk is. Een ander groot nadeel van een dergelijke portaalconstructie is dat deze eerst opgebouwd moet worden, voor een stalen vakwerkportaal met een lengte van 100 meter is dit al een grote bouwopdracht. En ook tijdens het opbouwen

van dit portaal zal kruisend verkeer niet mogelijk zijn. Samenvattend geeft deze bouwmethode te veel hinder om een praktische mogelijkheid voor de montage te kunnen zijn.

De tijd die het kost om een dergelijk portaal op te bouwen is ook de reden dat dergelijke bouwmethodes vooral worden toegepast voor (snelweg) viaducten, waarbij meerdere kilometers lang dezelfde overspanning gebouwd wordt en het montageportaal steeds per overspanning opschuift om de volgende overspanning te bouwen. Deze bouwmethode is dus niet geschikt voor het bouwen van een enkele overspanning.

De enige andere montagemethode die dan overblijft, is om het brugdek samenstellen nabij de eindlocatie en vervolgens al rijdend of varend naar de bestemming te brengen. Maar hiervoor is zeer zwaar materiaal noodzakelijk, dit omdat het geschatte totale gewicht van een brugdek met een overspanning van 100 meter en een breedte van 17,8 meter ongeveer 4000 ton is. Deze variant is dus eigenlijk niet geschikt om een overspanning over een snelweg of kanaal te bouwen tenzij afsluiten van de snelweg of het kanaal tijdens de bouw geen probleem is.

Cijfer: 2
-----------

### 9.3.6 Duurzaamheid

Doordat de langsvorspanning geïnjecteerd is kan deze niet, of met bijzonder veel moeite verwijderd worden. Dit brugdek is dus praktisch niet demontabel en na gebruik is de enige mogelijkheid om de constructie volledig te slopen. Het enige voordeel van deze constructie op het gebied van duurzaamheid is het lagere eigengewicht wat resulteert in minder materiaalgebruik.

Cijfer: 2
-----------

### 9.3.7 Conclusie

Het grote voordeel van deze constructie zit in de eindsituatie. Door de gekozen voorspanningssystemen worden de types voorspanning daar gebruikt waar deze het beste tot hun recht komen. Ook is het eigengewicht van deze variant beter te optimaliseren vergeleken met variant 1 en 2. Maar het grote nadeel van deze variant is de bouwmethode die bijzonder lang zal duren door alle mortelvoegen die tussen de segmenten gemaakt moeten worden. Hierdoor is de enige geschikte methode om dit brugdek samen te stellen, het bouwen nabij de eindlocatie en het vervolgens naar de eindbestemming te vervoeren. Een bijzonder kostbaar proces, wat niet altijd mogelijk zal zijn vanwege problemen met de ondergrond en het gebrek aan een geschikte locatie waar het brugdek samengesteld kan worden.

## 9.4 Variant 4: Ruimte vakwerk segment met externe voorspanning

### 9.4.1 Constructie

Een nadeel van deze variant en alle segment varianten is het gebrek aan doorlopend wapeningsstaal in de voegen tussen de segmenten. Dit heeft tot gevolg dat onder de karakteristieke belasting combinatie deze voegen onder een minimale drukspanning van 1 N/mm<sup>2</sup> moeten blijven staan, dit volgt uit een combinatie van NEN-EN 1992-2 NB [27] en ROK [5]. Toch wordt verwacht dat dit niet maatgevend zal worden voor het ontwerp van de constructie. Doordat gerekend wordt met CC3 en er dus een relatief groot verschil is tussen de karakteristieke belastingcombinatie en de belastingcombinatie in de uiterste grenstoestand zal deze eis naar verwachting maatgevend zijn.

Hierbij zal de externe voorspanning een groot nadeel zijn, omdat de staalspanning in deze kabels maar beperkt zal toenemen na het openklappen van de voegen, de rek verdeeld zich over de volledige kabellengte. Hierdoor wordt de momentcapaciteit in de uiterste grenstoestand waarschijnlijk maatgevend door de beperkte hoogte van de constructie. Een ander bijkomend probleem in de uiterste grenstoestand is het afnemen van de belastingspreiding door het openklappen van de voegen, waardoor het buigende moment waarmee gerekend wordt voor die situatie nog hoger zal liggen.

Deze beschreven nadelen worden gedeeltelijk gecompenseerd door het lager eigengewicht van de brug, maar uit proefberekeningen blijkt dat dit nauwelijks effectief is. Om bezwijken van de betondrukzone te voorkomen zal deze verdikt moeten worden. Hierdoor zal deze

constructie niet veel efficiënter worden dan variant 1. Een beschrijving van de gebruikte proefberekening is toegevoegd als bijlage B7

Cijfer: 4

#### 9.4.2 Productie

De segmenten zullen tegen elkaar aan worden gestort, om de pasvorm van de voeg te garanderen. Bij deze productiemethode is ook een ander fenomeen van belang, het 'bowing effect'. Dit betekent dat het als mal dienende segment zal vervormen door de hydratatiwarmte van het pas gestorte segment. Hierdoor zal het gestorte segment in een gebogen vorm verhard, terwijl het ander segment weer recht zal trekken na afkoeling. Deze vorm afwijking zorgt voor kieren tussen de segmenten en een ongelijke drukspanning in de segmenten en dient daarom voorkomen te worden. Dit effect speelt vooral een rol bij segmenten met een breedte/dikte verhouding groter dan 6-7 [30], Maar er is ook onderzoek dat een grote verhouding veilig acht [31]. Toch is de lage grens aangehouden, dit vanwege het gebrek aan ervaring met dergelijke segmenten in Nederland maar ook omdat de segmenten zijn ontworpen voor hogesterktebeton, bij de verharding van dit mengsel komt relatief gezien meer warmte vrij, zodat het risico op deze buiging groter wordt geacht.

In de onderstaande tabellen zijn de gewichten van de segmenten berekend met verschillende afmetingen, de gewichten per segment zijn gemarkeerd op de gebruikelijke wijze. De segmenten waarbij het 'bowing effect' te groot wordt zijn weggestreept omdat deze niet gebruikt kunnen worden. Hierdoor blijkt dat een segmentdikte van 3000 mm het meest geschikt is voor de segmenten, anders is er het risico dat deze te zwaar worden voor transport. Maar met deze segmentdikte kunnen alleen relatief smalle brugdekken gebouwd worden, anders wordt het segment te zwaar voor transport.

Natuurlijk kan met extra maatregelen geprobeerd worden dit effect te voorkomen, denk hierbij bijvoorbeeld aan koeling, speciale warmte dekens of het storten van de segmenten in een rij, de zogenaamde long line methode. Maar al deze maatregelen zullen het productie proces ingewikkelder maken.

<b>Overspanning:</b>	<b>70 meter</b>	<b>80 meter</b>	<b>90 meter</b>	<b>100 meter</b>	<b>110 meter</b>
<b>Breedte van het brugdek:</b>					
<b>10 meter</b>	63 [ton]	66 [ton]	68 [ton]	71 [ton]	73 [ton]
<b>15 meter</b>	89 [ton]	91 [ton]	93 [ton]	96 [ton]	98 [ton]
<b>17,8 meter</b>	102 [ton]	105 [ton]	107 [ton]	110 [ton]	112 [ton]
<b>20 meter</b>	<del>114 [ton]*</del>	<del>116 [ton]*</del>	<del>119 [ton]*</del>	<del>121 [ton]*</del>	<del>124 [ton]*</del>
<b>25 meter</b>	<del>135 [ton]*</del>	<del>138 [ton]*</del>	<del>140 [ton]*</del>	<del>132 [ton]*</del>	<del>145 [ton]*</del>
<b>30 meter</b>	<del>179 [ton]*</del>	<del>167 [ton]*</del>	<del>169 [ton]*</del>	<del>172 [ton]*</del>	<del>174 [ton]*</del>
* Segmenten met een breedte/ dikte verhouding groter dan 7					

Tabel 9-6 een overzicht van de mogelijke segmenten en met een variërende brugdekbreedte en variërende overspanning bij een vaste breedte van 3000 mm.

<b>Segmentdikte:</b>	<b>1500 mm</b>	<b>2000 mm</b>	<b>2500 mm</b>	<b>3000 mm</b>	<b>3500 mm</b>
<b>Breedte van het brugdek:</b>					
<b>10 meter</b>	<del>35 [ton]*</del>	47 [ton]	58 [ton]	71 [ton]	81 [ton]
<b>15 meter</b>	<del>48 [ton]*</del>	<del>64 [ton]*</del>	80 [ton]	96 [ton]	111 [ton]
<b>17,8 meter</b>	<del>55 [ton]*</del>	<del>74 [ton]*</del>	<del>92 [ton]*</del>	110 [ton]	127 [ton]
<b>20 meter</b>	<del>61 [ton]*</del>	<del>83 [ton]*</del>	<del>101 [ton]*</del>	<del>121 [ton]*</del>	140 [ton]
<b>25 meter</b>	<del>73 [ton]*</del>	<del>100 [ton]*</del>	<del>118 [ton]*</del>	<del>145 [ton]*</del>	<del>169 [ton]*</del>
<b>30 meter</b>	<del>86 [ton]*</del>	<del>114 [ton]*</del>	<del>143 [ton]*</del>	<del>172 [ton]*</del>	<del>199 [ton]*</del>

\* Segmenten met een breedte/ dikte verhouding groter dan 7

*Tabel 9-7 een overzicht van de mogelijke segmenten en met een variërende brugdekbreedte en variërende segmentdikte bij een vaste overspanning van 100 meter.*

Andere nadelen van dit type segment zijn de ingewikkelde detaillering van het vakwerk binnen in het segment. Vergeleken met prefab liggers zal dit bijzonder veel extra werk zijn en het is daarom ook de vraag of het mogelijk is om per dag een segment in dezelfde bekisting te produceren. Een mogelijke oplossing voor dit probleem is om het vakwerk apart te prefabriceren en daar later de rest van het segment omheen te storten.

Cijfer: 1

#### 9.4.3 Vormvrijheid

Zoals geconstateerd bij de berekening van de segmentgewichten is het produceren van segmenten breder dan 17,8 meter niet mogelijk, dit omdat deze segmenten te zwaar worden voor transport of een te kleine dikte hebben waardoor deze niet tegen elkaar aan gestort kunnen worden zonder een te grote vervorming. Daarom is het niet mogelijk om brede brugdekken te bouwen met deze oplossing. Eventueel kan in deze situaties ervoor gekozen worden om het viaduct op te delen in twee aparte brugdekken, een veel gebruikte oplossing voor segmentbruggen die buiten Nederland gebouwd zijn. Maar dit is toch een grote beperking op de brede toepasbaarheid van deze variant, want het wordt zeker verwacht dat er vraag zal zijn naar de bredere brugdekken.

Cijfer: 2

#### 9.4.4 Transport

Zoals eerder is opgemerkt kan een deel van de segmenten, specifiek de segmenten voor een breed brugdek niet getransporteerd worden doordat deze of niet te produceren zijn door een te grote vervorming, of niet te transporteren door het grote gewicht van de in dikte toegenomen segmenten.

Een ander nadeel van deze dikke segmenten is ook dat het risico steeds groter wordt dat deze beschadigd raken tijdens het transport, ze zullen dan immers meer uitsteken naar de zijkanten van de vrachtwagencombinatie. Mocht dit gebeuren dan is de kans groot dat de kwetsbare zijkanten, met de dwarskracht tanden beschadigd raken. Beschadigingen aan deze dwarskrachtanden kunnen eigenlijk niet hersteld worden, de gebruikte lijmlaag kan immers alleen kleine oneffenheden van enkele millimeters compenseren. Mede hierom zullen altijd meer tanden op de kop aangebracht moeten worden dan strikt noodzakelijk voor de belasting in de uiterste grenstoestand.

Samenvattend zijn de segmenten van variant 4 eigenlijk niet geschikt om te vervoeren, tenzij het brugdek een relatief kleine breedte heeft, dan is de kans juist een stuk groter dat deze eenvoudig te vervoeren zijn, doordat deze op eenvoudige bestaande trailers getransporteerd kunnen worden. Dit geldt overigens niet specifiek voor variant 4 maar voor alle mogelijke varianten waarbij segmenten tegen elkaar aan worden gestort.

Cijfer: 2

#### 9.4.5 Montage

Net als voor variant 3, het kokersegment met gecombineerde voorspanning, is de montage met behulp van een portaal geen aantrekkelijke bouwmethode om deze segmentbrug samen te stellen. Pas bij een groot aantal overspanningen achter elkaar zal deze bouwmethode aantrekkelijk worden. De gebruikte voegmethode, de lijmvoeg, maakt montage met een portaal wel aantrekkelijker dan voor variant 3, maar het ophijsen, lijmen en voorspannen van de 30 tot 40 segmenten zal nog steeds meerdere dagen werk zijn, zodat deze bouwmethode nog steeds bijzonder veel hinder geeft voor het onderdoorgaande verkeer.

De enige ander geschikte mogelijkheid om een dergelijke constructie samen te stellen is om het brugdek te monteren nabij de bouwlocatie en vervolgens in te varen of te rijden. Deze

montage nabij de eindlocatie zal wel sneller gaan, dan bij variant 3, omdat de lijmvoegen minder tijd kosten.

Cijfer: 3

#### 9.4.6 Duurzaamheid

Het gebruik van alleen externe voorspanning in de lengterichting maakt het mogelijk om de voorspanning te demonteren. Maar de gelijmde voegen voorkomen dat het brugdek echt demontabel is. Daarvoor moet of gewerkt worden met verwijderbare lijm, of met droge voegen, dus zonder enige vulling. Maar zelfs als dat mogelijk is kan alleen een brugdek met de zelfde breedte weer teruggebouwd worden.

Cijfer: 3

#### 9.4.7 Conclusie

Samenvattend is deze variant, het ruimtevak werk segment met externe voorspanning vooral geschikt is voor brugdekken die niet breed zijn, anders worden de segmenten of te zwaar voor transport, of hebben een te grote kans op maatafwijkingen door het 'bowing effect'. Ook de montagemethode zijn beperkt. Tenzij meerdere overspanningen achter elkaar worden gebouwd is deze variant geen aantrekkelijke oplossing. De variant is dus vooral geschikt voor een viaduct met een groot aantal gelijke overspanningen en een beperkte brugdekbreedte.

### 9.5 Variant 5: Staal en beton vakwerk

#### 9.5.1 Constructie

Een belangrijk nadeel aan de grote randconstructie is dat deze beschermd moeten worden tegen aanrijdingen. Dit geldt zowel voor het stabiliteitsverband boven het brugdek als de vakwerkstaven van de randconstructie. Deze elementen zijn kritisch voor de constructie, als een van deze bezwijkt, zal het hele brugdek bezwijken. Een aanrijding van deze onderdelen mag niet leiden tot het instorten van de complete constructie. Het gevolg is dus dat deze elementen extra sterk zullen moeten worden uitgevoerd om te voorkomen dat deze bezwijken in geval van een ongeluk, of dat er zware beschermingsconstructies rondom noodzakelijk zijn.

Een ander nadeel van de plaatsing van het brugdek in onderzijde van de constructie is dat deze niet als betondrukzone kan dienen, het materiaal kan dus minder effectief gebruikt worden.

Samenvattend is deze constructie geen slimme oplossing. Het is vooral een bestaande stalen brug constructie die bijna direct in beton is vertaald, het is daarom sterk de vraag of deze variant de oplossing is die een 100 meter brug in prefab beton mogelijk maakt.

Cijfer: 1

#### 9.5.2 Productie

De constructie bestaat uit relatief kleine onderdelen, de drukstaven, de L-vormige kokerligger en de TT-liggers. Deze onderdelen zijn allemaal eenvoudig te produceren door simpelweg een standaardbekisting te gebruiken die door middel van kopschotten op maat wordt gemaakt voor het specifieke viaduct. Deze onderdelen hebben allemaal een relatief korte lengte en een relatief laag gewicht zodat de productie in eenvoudige fabriekshallen mogelijk is. Maar het nadeel is wel dat er bijzonder veel losse onderdelen en ook verschillende soorten onderdelen nodig zijn. Denk hierbij aan de staven, de trekelementen, de randliggers en de TT-liggers voor het brugdek.

Cijfer: 4

#### 9.5.3 Vormvrijheid

Het belangrijkste voordeel van deze variant is de mogelijkheid om het brugdek zeer laag in de constructie te plaatsen, ongeveer een halve meter vanaf de onderzijde van de constructie. Dit

heeft tot gevolg dat de op- en afrit constructies van deze oplossing een stuk eenvoudiger kunnen zijn. Ook zal hierdoor de oplossing in meer situaties toepasbaar zijn.

Een groot nadeel van dit type constructie is dat deze eigenlijk niet geschikt is voor brede viaducten, naarmate de breedte van het viaduct toeneemt, zal de vloerconstructie steeds zwaarder moeten zijn, om deze belasting te kunnen afdragen naar de randconstructies. Hierdoor zal het eigengewicht ook toenemen. Deze constructie is dus veel minder geschikt voor brede brugdekken, maar dit is juist wat verwacht wordt voor de toekomstige snelweg viaducten. Daarom is deze oplossing dus minder geschikt voor gebruik als snelwegviaduct.

Cijfer: 1
-----------

#### 9.5.4 Transport

Transport is de enge categorie waar deze variant bijzonder goed op scoort, doordat de onderdelen relatief klein zijn, kunnen ze eenvoudig en met relatief weinig moeite getransporteerd worden. Ook zijn hier nauwelijks onzekerheden wat betreft de vraag of transport van de onderdelen werkelijk mogelijk is over de openbare weg, iets wat niet voor de andere varianten geldt. Maar een nadeel is wel dat er bijzonder veel transporten nodig zullen zijn om alle onderdelen naar de bouwlocatie te vervoeren.

Cijfer: 5
-----------

#### 9.5.5 Montage

De montage van dit brugdek, of eigenlijk het opbouwen van het complete brugdek zal zeer veel werk kosten op of nabij de bouwplaats. Aangezien de kruisende snelweg of het te overbruggen kanaal niet afgesloten mag worden moeten de randconstructies op een apart terrein nabij de bouwlocatie samengesteld worden. Dit betekent dat er een terrein nabij de bouwlocatie beschikbaar moet zijn, anders is deze bouwmethode niet mogelijk. Het plaatsen van de randconstructies op de eindlocatie zal vervolgens bijzonder lastig zijn, de constructies zijn immers zo zwaar dat nauwelijks te verplaatsen zijn met bijvoorbeeld hijskranen. Het samenstellen van deze variant kan eigenlijk alleen gebeuren op de bouwlocatie, met tijdelijke ondersteuning, iets wat bijzonder veel hinder veroorzaakt. Daarom is deze variant niet geschikt als oplossing om een 100 meter brug te bouwen over een snelweg of kanaal.

Cijfer: 1
-----------

#### 9.5.6 Duurzaamheid

Door de verschillende natte knoop verbindingen in de randconstructie is deze constructie niet te demonteren. Eventueel zou het brugdek, de TT-liggers hergebruikt kunnen worden, deze worden immers niet vast verbonden maar slechts op een oplegblok gelegd. Maar de rest van de constructie is dus niet her te gebruiken, daarom scoort deze variant bijzonder slecht op het gebied van duurzaamheid.

Cijfer: 1
-----------


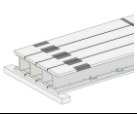


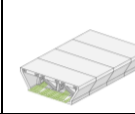
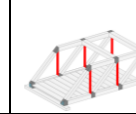
#### 9.5.7 Conclusie

Samenvattende is deze variant bijzonder ongeschikt als snelwegviaduct, dit komt door het feit dat de constructie ongeschikt is voor de gewenste brugdekbreedte, een montagemethode heeft die veel tijd kost en eigenlijk alleen met veel hinder voor het kruisende verkeer gebouwd kan worden. Ook is het sterk de vraag of Rijkswaterstaat, de meest waarschijnlijke opdrachtgever voor dergelijke constructies, zit te wachten op deze grote betonnen vakwerkconstructies.

De constructie is zeker interessant om te bouwen, maar zeker niet de oplossing om een overspanning tot ongeveer 100 meter in prefab beton te bouwen. Daarom is besloten geen extra berekeningen te maken om deze variant te analyseren en volledig te focussen op de andere 4, meer geschikt, varianten.

## 9.6 De multicriteria-analyse

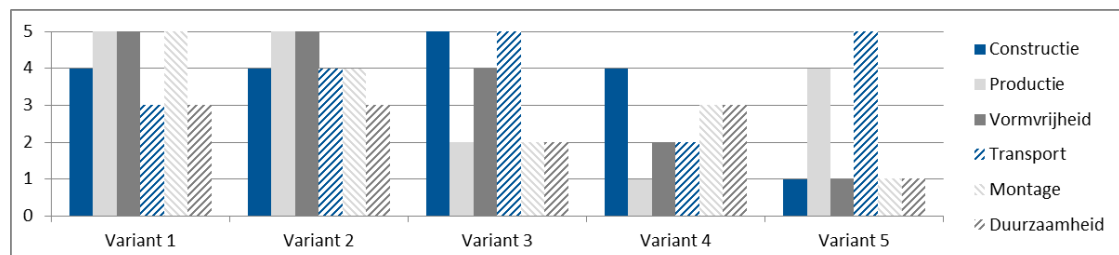
Elke variant heeft voor de verschillende criteria een cijfer gekregen, deze cijfers worden in de onderstaande tabel gecombineerd met een wegingsfactor die aangeeft hoe belangrijk het punt is voor het gecombineerde cijfer dat uiteindelijk de geschiktheid van de betreffende variant aangeeft.

Variant:		Variant 1	Variant 2	Variant 3	Variant 4	Variant 5
Wegingsfactor: 						
Constructie	25%	4	4	5	4	1
Productie	20%	5	5	2	1	4
Vormvrijheid	15%	5	5	4	2	1
Transport	15%	3	4	5	2	5
Montage	20%	5	4	2	3	1
Duurzaamheid	5%	3	3	2	3	1
<b>Totaal:</b>		<b>4,35</b>	<b>4,3</b>	<b>3,5</b>	<b>2,55</b>	<b>2,2</b>

Tabel 9-8 een overzicht van de multicriteria-analyse, met de totale score per variant.

Bij de multicriteria-analyse moet opgemerkt worden dat variant 4 op de beoordelingspunten vormvrijheid, transport en montage, beter zou scoren indien de brugdekbreedte relatief smal (minder dan 15 meter) is. Maar deze smalle brugdekken zijn juist niet wat verwacht wordt, omdat voor de breder wordende snelwegen juist bredere brugdekken noodzakelijk zullen zijn. Ook zal variant 4 dan nog zeker niet een betere totale score hebben dan variant 1 en 2, dit omdat er geen geschikte montagemethode voor beschikbaar is.

Variant 5 komt duidelijk als slechtste uit de vergelijking, het is zelfs de vraag of deze variant aan de gestelde eisen zal voldoen, maar aangezien er besloten is geen extra berekeningen te maken om deze variant te analyseren kan dit niet met volledige zekerheid gezegd worden.



Figuur 9-4 de resultaten van de multicriteria-analyse voor de varianten per beoordelingspunt.

Variant 1 en 2 hebben een bijna gelijke score, dit is ook logisch, de varianten lijken sterk op elkaar. In de praktijk zal vooral de gewenste overspanning bepalen welke variant het meest geschikt is, beide varianten kunnen gebruikt worden voor de gewenste overspanningen, maar variant 1 is meer geschikt voor de overspanningen van ongeveer 80 tot 90 meter, maar wordt bij een overspanning van 100 meter misschien te zwaar voor transport. Variant 2 heeft een minder eenvoudige montage, voor elke overspanningslengte, maar het is minder onzeker of deze variant nog te transporten is bij overspanningen van 100 meter.

Variant 1 en 2 zijn dus de duidelijke winnaars van de multicriteria-analyse. Maar het is goed om te beseffen dat deze varianten eigenlijk delen zijn van dezelfde familie aan oplossingen. Waarbij, afhankelijk van de overspanning, de plaatselijke omstandigheden en de gewenste bouwmethode, de meest geschikte oplossing meer op variant 1 of 2 zal lijken.

## 9.7 Evaluatie van de multicriteria-analyse

Variant 1 en 2, beide variaties op de samengestelde liggerbrug scoren het beste in de multicriteria-analyse. Nu is de vraag of deze ontwerpen ook werkelijk voldoen aan de gestelde eisen en de meest geschikte oplossing zijn om een prefab betonnen brug van 100 meter te bouwen.

In hoofdstuk 4 zijn de eisen wensen en randvoorwaarden beschreven waar de oplossing aan moet voldoen en wat gewenst wordt van een geschikte oplossing. De oplossing moet geschikt zijn voor de toepassingssituaties. Dit geldt voor beide varianten, wel zal er bij een kanaalbrug minder keuze zijn wat betreft de montagemethode. Voor de montagemethode is het van belang dat deze met zo weinig mogelijk hinder voor het kruisende verkeer uitgevoerd kan worden. Dit is ook mogelijk bij beide varianten met de opmerking dat de hinder wel meer zal zijn dan wat nu gebruikelijk is voor een brugdek bestaand uit prefab liggers, dit door de lengte en het gewicht van de totale samengestelde liggers.

De montage moet ook uit te voeren zijn met zo eenvoudig mogelijke hijskranen, dit zal voor beide varianten lastig zijn. Voor beide varianten zijn immers bijzonder grote hijskranen noodzakelijk om deze te plaatsen zonder tijdelijke ondersteuning. Tegelijk moet opgemerkt worden dat deze montagemethode nog steeds het beste voldoet van de 5 varianten zodat geconcludeerd wordt dat voor de montage van een prefab betonnen brugdek met een lengte van 60 tot 100 meter het niet mogelijk is om zonder hinder voor het kruisende verkeer met lichte hijskranen te werken.

In het programma van eisen, wensen en randvoorwaarde is ook beschreven dat het brugdek een zo groot mogelijke vormvrijheid moet hebben. Hier voldoen de oplossingen goed aan, praktisch elke breedte is mogelijk en ook brugdekken met niet rechte kruisingshoeken kunnen gebouwd worden. De vormvrijheid van de oplossingen is dus goed.

In totaal voldoen de twee varianten dus goed aan de eisen, wensen en randvoorwaarde die opgesteld zijn. Er is dus geconcludeerd worden dat de varianten die als winnaar uit de multicriteria-analyse komen dus een geschikte oplossing is om prefab betonnen brugdekken van 60 tot 100 meter te bouwen.

## **9.8 Evaluatie van de variantenstudie**

In de variantenstudie zijn verschillende mogelijke brugdekoplossingen onderzocht en ontworpen. Nu is de vraag in of alle mogelijke varianten voor een prefab betonnen brugdekoplossing met een overspanning van 60 tot 100 meter onderzocht zijn.

Verschillende oplossingen zijn onderzocht, de meest waarschijnlijke oplossingen, een liggerbrug en een segmentbrug. Maar ook minder waarschijnlijke oplossingen zoals een betonnen vakwerkbrug of een betonnen boogbrug. Aangezien gesteld is dat de constructie statisch bepaald moet zijn zullen dit de vier beschikbare type oplossingen zijn.

Oplossingen die niet beschreven zijn in de variantenstudie zijn bijvoorbeeld een onderspannen ligger, deze zal zeer gevoelig zijn voor aanrijdingen tegen de onderzijde. Ook is er geen oplossing in de variantenstudie opgenomen waarbij de voegen tussen de prefab delen, de ligger horizontaal doorsnijden. Hiervoor is gekozen omdat dit zal leiden tot lange en lastig te maken voegen in de constructie.

Geconcludeerd is dus dat in de varianten studie niet alle mogelijke varianten opgenomen zijn. Maar dat wel dat voldoende breed gezocht is naar verschillende oplossingen en de meest geschikte varianten onderzocht zijn, zodat de resultaten van de variantenstudie voldoende betrouwbaar zijn.

## **9.9 Conclusie van de variantenstudie**

Uit de analyse van de varianten volgt dat variant 5, het staal en beton vakwerk, zeker geen geschikte oplossing is voor een prefab betonnen brug met een overspanning tot ongeveer 100 meter. De constructie kan geproduceerd worden maar is absoluut niet aantrekkelijk. Ook uitvoeringstechnisch is deze variant zeker niet aan te raden, door de vele lastige verbindingen en het gebrek aan een bouwmethode zonder hinder voor het kruisende verkeer.

Ook de segmentbruggen, variant 3 en 4, zijn geen aantrekkelijke oplossingen voor een prefab betonnen viaduct met een overspanning van 60 tot 100 meter. Het lager eigengewicht van deze constructie zal zorgen voor een meer economisch materiaal gebruik dan bij variant 1 en 2, maar voor beide varianten is geen geschikte montagemethode beschikbaar die de hinder voor het kruisende verkeer minimaliseert. Montage met behulp van een portaal is pas zinvol als er veel gelijke overspanningen direct achter elkaar gebouwd moeten worden. De enige geschikte bouwmethode die overblijft, is het samenstellen van de constructie nabij



bouwlocatie en vervolgens de constructie rijdend of varend te transporteren naar de definitieve locatie. Dit zal zeker niet eenvoudig zijn door het grote eigengewicht van de totale constructie.

Ook vanuit het oogpunt van de productie zijn de segmentbrugoplossingen niet aantrekkelijk. De segmenten zijn lastiger te produceren dan de samengestelde liggervarianten, door de ingewikkelde vorm. Sommigen brede segmenten van variant 4 zullen zelfs niet voldoende maatvast te produceren zijn, doordat deze zullen gaan buigen tijdens het match-cast proces door de hydratatiwarmte. De brede segmenten zullen ook lastig te transporteren zijn doordat deze te zwaar worden voor transport. Terwijl juist verwacht wordt dat de steeds breder wordende snelwegen zullen vragen om brede brugdekken. Kortom de vormvrijheid van deze varianten is minder goed dan die voor variant 1 en 2

Uit de Multicriteria-analyse volgt dat variant 1 de meest geschikte oplossing is voor prefab betonnen brug met een overspanning van 60 tot ongeveer 100 meter. Maar het verschil in totale score met variant 2 is zo klein dat beide varianten even geschikt zijn als oplossing. Hierbij moet wel opgemerkt worden dat welke van de twee varianten het meest aantrekkelijk is sterk afhankelijk is van de benodigde overspanning, de omgeving en de gewenste montagemethode. Variant 2 zal waarschijnlijk iets meer geschikt zijn voor de langste overspanning van 100 meter, terwijl variant 1 meer geschikt is voor de overspanningen tot ongeveer 90 meter.

Maar er is wel een risico dat de prefab elementen voor een 100 meter overspanning van variant 1 en 2 te zwaar en te hoog worden voor transport over de weg, dit zal sterk afhangen van eindbestemming en de geschiktheid van de route. Het is ook noodzakelijk om voor het transport deze elementen een nieuwe sterkere en lagere trailer te ontwikkelen. Alleen de prefab elementen voor een 100 meterbrug van variant 3 zijn zeker te transporteren, indien gekozen wordt voor zeer smalle segmenten. Deze oplossing zal wel zorgen voor een nog onaantrekkelijkere bouwmethode.

Besloten is om een combinatie van variant 1 en 2 uit te werken, omdat deze optie het beste voldoet aan de gestelde wensen en het beste uit de multicriteria-analyse komt. Hierbij zal de doorsnede en voorspanning van variant 1 gebruikt worden in combinatie met de ribben en de mortelvoeg van variant 2. Hiermee wordt verwacht dat een overspanning van 100 meter net mogelijk zal zijn, maar grotere overspanningen, van bijvoorbeeld 120 meter zijn dat zeker niet.

De belangrijkste voordelen van deze combinatie van variant 1 en 2 zijn:

- Er zijn verschillende praktisch toepasbare montagemethoden beschikbaar zodat afhankelijk van de omgeving, de maximale hinder en het budget de optimale methode gekozen kan worden.
- Indien de totale liggers met grote hijskranen gemonteerd wordt kan een brugdek met een 100 meter overspanning bijzonder snel opgebouwd worden.
- De liggeronderdelen zijn relatief eenvoudig te produceren, zeker als dit vergeleken wordt met bijvoorbeeld segmenten van variant 3 en 4.
- De vormvrijheid van deze oplossing is bijzonder goed. Scheve kruisingshoeken zijn mogelijk en het brugdek kan eenvoudig opgebouwd worden in verschillende brugdekbreedtes.
- Het brugdek kan demontabel in de dwarsrichting uitgevoerd worden om zo een (bijna) circulair viaduct mogelijk te maken.
- Voor korte overspanningen (minder dan 80 meter) zijn constructies met een slankheid van ongeveer 40 mogelijk.

Deze variant heeft ook een aantal nadelen en risico's, deze staan hieronder vermeld. Deze nadelen en risico's krijgen bij het uitwerken van deze variant extra aandacht.

- Voor deze variant is bijzonder veel voorspanning die aangebracht wordt op de bouwlocatie noodzakelijk, zowel in de lengterichting als in de dwarsrichting van het brugdek.
- Het eigengewicht van deze oplossing is relatief hoog, deze grote belasting door het eigengewicht is het grootste risico wat betreft de vraag of een 100 meter overspanning mogelijk is.

- De randligger moet versterkt worden om bestand te zijn tegen de krachten veroorzaakt door de dwarsvoorspanning, het risico is dat het eigengewicht van deze randligger teveel toeneemt om de 100 meter overspanning mogelijk te maken.
- De dwarsafschuiving veroorzaakt relatief grote buigende momenten in de niet voorgespannen lijven van de ligger. Het kan lastig worden de lijven van de ligger voldoende sterk te maken, zeker op locaties waar de drukdiagonaal in het lijf maximaal wordt belast.
- De verankering van de voorspanning met nagerekt staal kan veel eigengewicht toevoegen aan de constructie, dit omdat de gegeven splejtwapening rondom de verankering alleen bepaald is voor de lagere betonsterkteklasse.

# 13. Conclusie en aanbevelingen

## 13.1 Conclusie

Tijdens het onderzoek is gezocht naar de volgende stap in prefab betonnen brugdekken, met als doel een overspanning van 100 meter mogelijk te maken. Dergelijke brugdekken kunnen gebruikt worden om de steeds breder wordende snelwegen in Nederland te overbruggen zonder tussensteunpunten, zodat de weg eronder vrij indeelbaar is. Ook het overspanningen van kleine rivieren en grote kanalen behoren tot de mogelijkheden, bijvoorbeeld het overspannen van het Amsterdam-Rijnkanaal.

Deze nieuwe brugdekoplossing moet te bouwen zijn met zo weinig mogelijk hinder voor het kruisende verkeer. Ook is het van belang dat de constructiehoogte zo klein mogelijk is om de op- en afritconstructies zo klein mogelijk te houden. Gerelateerd aan de constructiehoogte is het van belang dat de maximale hoogte van de prefab elementen beperkt blijft tot 3,2 meter om te voorkomen dat deze tijdens het transport in aanrijding komen met de bestaande viaducten. De prefab elementen mogen maximaal 170 ton wegen, om deze te kunnen transporteren over de openbare weg. Het is ook van belang te vermelden dat de beperkingen voor het transport van de elementen sterk afhankelijk is van de exacte bouwlocatie, zodat onderzoek noodzakelijk is om de grenzen die gelden voor een specifiek situatie vast te stellen.

Uit de variantenstudie blijkt dat een prefab betonnen segmentbrug niet de oplossing is om deze overspanningen te bouwen. De meest geschikte bouwmethode, het brugdek samenstellen terwijl de segmenten hangen aan een portaal, is alleen zinvol als er veel gelijke overspanningen achter elkaar gebouwd moeten worden. Ook kunnen deze segmenten alleen voldoende maatvast geproduceerd worden voor brugdekken smaller dan 18 meter. De segmenten van bredere brugdekken zullen voor grotere breedtes dusdanig vervormen door de hydratatiewarmte dat een gelijmde voeg niet meer mogelijk is.

De meest geschikte oplossing om de grote overspanningen te bouwen is de samengestelde liggerbrug. Bij dit type brug wordt het brugdek opgedeeld in 2 meter brede liggers die elk weer bestaan uit 3 liggerdelen. Deze delen zijn los naar de bouwlocatie te transporteren over de openbare weg. De 3 liggerdelen worden vervolgens met elkaar verbonden tot een totale ligger door middel van een mortelvoeg en voerspanning met nagerekt staal. Deze oplossing is het meest geschikt omdat verschillende bouwmethoden mogelijk zijn die het mogelijk maken het brugdek te plaatsen met relatief weinig hinder voor het kruisende verkeer.

Het meest geschikte liggerprofiel voor deze samengestelde liggerbrug is I-vormig. Door middel van externe dwarsvoerspanning worden de flenzen van de ligger met elkaar verbonden om een stijf brugdek, bestaand uit meerdere kokers vormen. Dit brugdek zal de belasting zeer goed spreiden over de individuele liggers. Vergeleken met een standaard railbalkligger zal het maximale buigend moment per ligger met 25% afnemen. Hierdoor kan er slanker worden gebouwd, zodat de liggerdelen over de weg te transporteren zijn.

De prefab liggerdelen worden onderling verbonden tot een totale ligger met behulp van een mortelvoeg. Deze voeg is het meest geschikt omdat het mogelijk is om afwijkingen in de opbuiging van de voorgespannen liggerdelen te corrigeren, hierdoor kan gegarandeerd worden dat de prefab delen van het brugdek aan elkaar passen. De relatief lange verhardingstijd van deze voeg is een minder groot probleem omdat het slecht twee voegen per ligger betreft. Ook de voegen tussen de liggers worden gemaakt met behulp van mortel. Deze voegen zijn vergelijkbaar met wat toegepast wordt tussen de onderflenzen van de bestaande railbalkliggers.

Het ontwerp is in de basis voor alle overspanningen van 60 tot 100 meter gelijk. Wel zal de gebruikte voerspanning in de lengterichting sterk veranderen voor de overspanning. Voor een relatief korte overspanning van 70 meter zal 25 tot 35 % van de voerspanning in de fabriek worden aangebracht. Voor een brug met een overspanning van 100 meter zal dit slechts 10% zijn. Dezelfde basis oplossing is dus geschikt voor de overspanningen van 60 tot 100 meter, maar hetzelfde ontwerp zal wel veranderen naar gelang de overspanning.

De liggerdelen van de samengestelde liggerbrug zijn over de weg te transporteren, maar voor constructiehoogtes groter dan 3 meter, zoals voor een overspanning van 100 meter, zal een speciale lagere trailer noodzakelijk zijn om te voorkomen dat de liggerdelen botsen met bestaande viaducten. Ook kan het noodzakelijk zijn de randliggers te versmallen om deze zo lichter te maken. Overspanningen groter dan 100 meter zullen lastig worden omdat de liggerdelen dan te hoog, te lang en te zwaar zijn om deze te transporteren over de openbare weg.

De oplossing is geschikt als overspanning van een snelweg en een kanaal, het belangrijkste verschil tussen deze twee toepassingssituaties zal de gebruikte bouwmethode zijn. De liggers van een kanaal brug zullen altijd op een apart terrein samengeteld moeten worden uit de liggerdelen. Vervolgens worden deze door middel van zware hijskranen of pontons op de eindlocatie geplaatst. Voor een snelwegviaduct kan ook gebruik worden gemaakt van een bouwmethode waarbij de liggerdelen boven de snelweg, op ondersteuning, samengevoegd worden tot een totale ligger. Hierdoor zijn er geen zware en dure kranen nodig voor het opbouwen van het brugdek.

Het ontwerp van de samengestelde liggerbrug kan geproduceerd worden in de fabriek van Spanbeton, ook voor een overspanning van 100 meter. In het algemeen zullen de beperkingen die gelden voor het transport over de weg maatgevend zijn boven de beperkingen van de fabriek van Spanbeton.

De kostprijs van het brugdek per kubieke meter beton zal fors hoger zijn vergeleken met de bestaande prefab liggeroplossingen, maar tegelijkertijd zal de oplossing relatief weinig beton per vierkante meter brugdek gebruiken. Vergeleken met bestaande overspanningen in staal is het mogelijk dat de ontworpen oplossing een vergelijkbare of lagere kostprijs zal hebben, maar meer onderzoek is hiervoor noodzakelijk.

Met de samengestelde liggerbrug is het dus mogelijk om overspanningen van 100 meter te bouwen. Deze oplossing kan met de bestaande techniek geproduceerd worden en volgens de geldende normen en richtlijnen voor een snelwegviaduct. Vergeleken met bestaande alternatieven in staal heeft de oplossing als voordeel dat deze meer geschikt is voor brede brugdekken en dus meer geschikt is voor steeds breder wordende snelwegen.

Ook kortere overspanningen van bijvoorbeeld 80 meter zijn mogelijk met deze oplossing, de goede spreiding van de belasting over het brugdek maakt het dan mogelijk om slank te bouwen. voor een overspanning van 80 meter is een constructiehoogte van 2,1 meter voldoende.

Samengevat kan dus geconcludeerd worden dat prefab betonnen brugdekken voor overspanningen van 60 tot 100 meter het beste gebouwd kunnen worden met de ontworpen oplossing, de samengestelde liggerbrug. Hiermee zijn lange en slanke brugdekken mogelijk waarbij de liggerdelen over de weg te transporteren zijn.

## 13.2 Aanbevelingen

Door middel van dit onderzoek is het ontwerp van de samengestelde liggerbrug ontworpen. Er wordt aangeraden om het onderzoek naar dit type brugdekoplossing en hoe deze geoptimaliseerd kan worden zeker voort te zetten, omdat de oplossing haalbaar is, er brugdekken mogelijk zijn die nu niet zonder veel hinder gebouwd kunnen worden en omdat de eerste globale kostenberekeningen laten zien dat de oplossing een concurrerend alternatief kan zijn.

### 13.2.1 Aanbevelingen voor de samengestelde liggerbrug

Om het beschreven ontwerp te kunnen bouwen zal nog meer onderzoek noodzakelijk zijn. Dit onderzoek zal zich het beste kunnen richten op de openstaande technische problemen die de haalbaarheid kunnen beïnvloeden:

- De sterkte van de voegmortel voor de voeg tussen de liggerdelen.
- Het risico op scheurvorming in de eerste voeg tussen de liggers.
- De detaillering van de verankering van de voerspanning.
- De rekenmethode voor de spanningscontrole van de rib ter plaatse van de voeg tussen de liggerdelen.

- De gewenste slanke vijzels of vijzels met een voorzetstuk voor de dwarsvoorspanning.

Ook de beschreven optimalisaties moeten onderzocht worden om het ontwerp efficiënter, makkelijker te produceren en dus ook goedkoper te maken. Dit betreft de volgende punten:

- De minimale dikte van het liggerlijf.
- De gebruikte asfaltverharding op het brugdek.
- De eisen die gelden voor de het toetsen van de drukspanning in de voegen tussen de ligger.
- Optimaliseren van de dekking en tussenafstanden van de voorspanning in de onderflens.
- Testen van de verankering van de voorspanning met de gebruikte hoge betonsterkteklasse.

Vervolgonderzoek naar het optimale ontwerp van de samengestelde liggerbrug kan zich daarna het beste richten op volgende drie onderdelen:

### **Optimaliseren van het ontwerp en de rekenmethode**

De volgende stap om het ontwerp te verbeteren zal zich het beste kunnen richten op het constructieve gedrag van het vierendeel vakwerk, of raamwerk, dat de liggers vormen. De buigende momenten en dwarskrachten in deze onderdelen worden nu bepaald uit het orthotroop plaatmodel en de liggerberekening beschreven onder de lokale effecten. De hieruit volgende waarden zijn waarschijnlijk te conservatief. Gezocht moet dus worden naar een betere schematisering. Waarschijnlijk is het raamwerkmodel met verende ondersteuning hiervoor het meest geschikt. In deze verbeterde schematisering zal dan ook de dwarsvoorspankracht meegenomen kunnen worden, om de combinatie van de effecten door de aangrijpende voorspankracht samen met de lokale effecten beter te beschouwen. Ook zal de stijfheid van de delen van de ligger en de voegen beter bepaald kunnen worden om zo een beter inzicht te krijgen in het gedrag van de constructie en het mogelijke ontstaan van trekspanningen in deze voegen tijdens het spannen van de dwarsvoorspanning.

Met dit betere beeld van de buigende momenten in deze voegen kan de benodigde dwarsvoorspanning beter bepaald worden en vermoedelijk ook gereduceerd worden. Ook kan dan onderzocht worden of het verbreden van de ribben in de veldliggers gebruikt kan worden om de dwarsvoorspanning te verminderen. Met de aangepaste dwarsvoorspanning kan nagedacht worden over het verbeteren van de randligger. Deze randligger is op dit moment maatgevend voor de constructiehoogte van het brugdek. Dus met een meer geoptimaliseerde randligger zouden efficiëntere en mogelijk ook slankere constructies mogelijk zijn. Dit ontwerp van de randligger kan dan gelijk verbeterd worden voor het opnemen van stootbelastingen, specifiek het verticale component van de opwippende giek. Tenslotte moet dan ook de verankering van de dwarsvoorspanning in deze randligger verbeterd worden zodat deze eenvoudiger de krachten op kan nemen en zodat er minder snel scheurvorming zal optreden in de eerste voeg. Hierdoor kan dan ook voorkomen worden dat de eerste voeg tussen de bovenflenzen verlaagd hoeft te worden, waardoor dit kwetsbare detail vermeden kan worden.

### **Het nut van een gestandaardiseerde oplossing**

Een van de sterke punten van de prefab industrie is het verlagen van de kosten door in grotere aantallen steeds hetzelfde te produceren. Voor de kortere overspanningen, die vaker voorkomen is dit lonend gebleken. Onderzocht moet worden of er voldoende vaak brugdekken van 60 meter en groter gebouwd moeten worden, zo dat het zinvol is om hier een gestandaardiseerd product, vergelijkbaar met de huidige liggeroplossingen, voor te ontwikkelen.

Indien dit niet het geval is kan de samengestelde liggerbrug nog steeds een economische oplossing zijn maar dan zal het zinvol zijn elk brugdek meer als een uniek project te beschouwen waarbij bepaalde onderdelen, bijvoorbeeld de voeg tussen de liggerdelen, specifiek ontworpen worden voor de situatie waar dit brugdek gebouwd moet worden. De vraag is dus wat de juiste mate van standaardisatie is die past bij de herhalingsijd van een brugdek met een overspanning van 60 tot 100 meter.

### **Vergelijking met bestaande alternatieven**

In de evaluatie van de samengestelde liggerbrug is kort onderzoek gedaan naar de mogelijke kostprijs van de ontworpen oplossing. Om een beter beeld te krijgen van kostprijs van de samengestelde liggerbrug in relatie tot de concurrerende oplossingen zal er voor deze bestaande oplossingen een alternatief ontwerp van de samengestelde liggerbrug opgesteld moeten worden. Dit alternatieve ontwerp kan dan getoetst worden met behulp van het ontwikkelde Excel programma. Door vervolgens de kosten tussen de bestaande brug en de samengestelde liggerbrug te vergelijken kan een betere inschatting gemaakt worden van de economische haalbaarheid van de oplossing. Ook zal er dan specifiek gekeken moeten worden naar de gekozen bouwmethode om zo te bepalen welke bouwmethode in de praktijk het meeste voor zal komen en of het ontwerp daarop aangepast moet worden.

#### **13.2.2 Algemene aanbevelingen voor lange overspanningen in prefab beton**

Om steeds groter overspanningen in prefab beton mogelijk wil maken is het aan te raden dat geïnvesteerd wordt in de mogelijkheid om hogere prefab elementen te produceren en te transporteren. Hierbij moet gedacht worden aan stortfaciliteiten die hogere bekistingen aankunnen en trailers met een lagere totale hoogte zodat grotere elementen zonder aanrijdingen met bestaande viaducten getransporteerd kunnen worden.

Investeren in de productiemogelijkheden voor zwaardere en lagere prefab beton elementen is om de langere overspanningen mogelijk te maken niet direct noodzakelijk. Een grotere elementlengte en gewicht is immers niet of nauwelijks meer over de openbare weg te transporteren en deze zullen dus in de lengterichting opgedeeld moeten worden.

# Literatuurlijst

- [1] Haitsma beton, „Wanssum havenbrug,” 2018. [Online]. Available: <https://www.haitsma.nl/projecten/wanssum-havenbrug/>. [Geopend 19 november 2018].
- [2] Nederlandse bruggenstichting, „Bruggendatabase,” [Online]. Available: <http://www.bruggenstichting.nl/index.php/informatief/bruggen-database> . [Geopend 26 oktober 2018].
- [3] N. Hartman, J. Manhoudt en J. Terband, „Fly-over van de A5 over de A4,” *Cement*, pp. 68-72, 2004.
- [4] Rijkswaterstaat, „Meer duidelijkheid over nieuwe bruggen en knooppunt Hooipolder,” 24 mei 2018. [Online]. Available: <https://www.rijkswaterstaat.nl/nieuws/2018/05/meer-duidelijkheid-over-nieuwe-bruggen-en-knooppunt-a27-hooipolder.aspx>. [Geopend 29 november 2018].
- [5] Rijkswaterstaat, *RTD 1001 Richtlijn Ontwerp Kunstwerken (ROK) versie 1.4*, 2017.
- [6] Rijkswaterstaat, „Richtlijn Ontwerp Autosnelwegen (ROA),” 2017. [Online]. Available: <http://publicaties.minienm.nl/documenten/roa-2017-rws-gpo>. [Geopend 4 November 2018].
- [7] Actueel Hoogtebestand Nederland, „AHN-viewer,” 2015. [Online]. Available: <https://ahn.arcgisonline.nl/ahnviewer/> . [Geopend 7 november 2018].
- [8] Nederlands Normalisatie-instituut, *NEN 1991-2 Belastingen op constructies: Verkeersbelasting op bruggen*, 2015.
- [9] Nederlands Normalisatie-instituut, *Nationale bijlage NEN-EN 1991-1+C1*, 2011.
- [10] Rijkswaterstaat, *RTD 1009 Richtlijn voor het ontwerp van asfalt wegverhardingen op betonnen en stalen brugdekken, nieuwe versie*, 2017.
- [11] Gwwkosten.nl, „Gwwkosten.bl,” [Online]. Available: [http://www.gwwkosten.nl/Wegbebakening,\\_geleiderail,\\_wegverlichting,\\_terreininrichting/Geleiderail/Benodigde\\_materialen\\_voor\\_geleiderail\\_op\\_betonnen\\_kunstwerk,\\_1-zijdig,\\_verzinkt\\_staal/kostengegevens-Kostenkengetallen/2920008.htm](http://www.gwwkosten.nl/Wegbebakening,_geleiderail,_wegverlichting,_terreininrichting/Geleiderail/Benodigde_materialen_voor_geleiderail_op_betonnen_kunstwerk,_1-zijdig,_verzinkt_staal/kostengegevens-Kostenkengetallen/2920008.htm). [Geopend 2 november 2018].
- [12] Nederlands Normalisatie-instituut, *Nationale bijlage NEN-EN 1991-1-1-4 + A1 + C1*, 2011.
- [13] Nederlands Normalisatie-instituut, *NEN-EN 1991-1-4 belastingen op constructies: windbelasting +A1 +C2*, 2011.
- [14] Nederlands Normalisatie-instituut, *NEN-EN 1991-1-7 belastingen op constructies: Buitengewone belastingen*, 2011.
- [15] Nederlands Normalisatie-instituut, *Nationale bijlage NEN-EN 1991-1-7 + C1*, 2011.
- [16] Rijkswaterstaat, „Circulaire economie,” [Online]. Available: <https://www.rijkswaterstaat.nl/zakelijk/innovatie-en-duurzame-leefomgeving/duurzame-leefomgeving/circulaire-economie/index.aspx> . [Geopend 13 November 2018].
- [17] Rijksdienst voor het wegverkeer (RDW), „Rijttijden en transportbegeleiding autosnelwegen,” 2018. [Online]. Available: <https://www.rdw.nl/zakelijk/branches/transporteurs/incidentele-ontheffing/rijttijden-en-transportbegeleiding/rijttijden-en-transportbegeleiding-autosnelwegen>. [Geopend 27 November 2018].
- [18] Rijkswaterstaat, „Richtlijn Vaarwegen,” december 2017. [Online]. Available: [https://staticresources.rijkswaterstaat.nl/binaries/richtlijnen-vaarwegen-2017\\_tcm21-127359.pdf](https://staticresources.rijkswaterstaat.nl/binaries/richtlijnen-vaarwegen-2017_tcm21-127359.pdf). [Geopend 5 November 2018].
- [19] M. Schoer en P. de Boer, „Recordoverspanning in prefab beton,” *Cement*, pp. 12-18, 2015.
- [20] Haitsma Beton, „Zuidhorn, brug Van Starckenborghkanaal,” [Online]. Available: <https://www.haitsma.nl/projecten/zuidhorn-brug-van-starckenborghkanaal-1>. [Geopend 2 januari 2019].
- [21] J. Huang, „Spliced Decked Precast Girders To Accelerate Bridge Construction,” *PCI*, 2008.
- [22] R. Woodward, „Collapse of a Segmental Post-Tensioned,” *Transportation Research Record*, nr. 1211, pp. 38-59, 1989.

- [23] A. van der Horst, T. Wolvekamp, J. van Kempen, H. van den Brink en J. Stroo, „Geribbelde en gelijmde moten,” *Cement*, pp. 56-60, 2012.
- [24] Y. L. VOO, S. J. Fosters en M. F. A. Hassan, „The Current State of Art of Ultra-High Performance Concrete Bridge Construction in Malaysia,” Kuala Lumpur, Malaysia, 2014.
- [25] W. van den Berg, J. de Vos en H. Bongers, „Balanceren op de grenzen van prefab,” *Cement*, vol. 2014, pp. 20-27, 2014.
- [26] „Boogbrug in uhsb,” *Cement*, pp. 62-65, 2010.
- [27] Nederlands Normalisatie-instituut, *Nationale bijlage bij NEN-EN 1992-2+C1 Eurocode 2: Ontwerp en berekening van betonconstructies - Betonnen bruggen- Regels voor ontwerp, berekening en detaillering*, 2016.
- [28] Österreichisches Institut für Bautechnik (OIB), „ETA-13/0815, Bonded Post-Tensioning Kits for Prestressing of Structures with 3 to 55 Strands,” Wenen, 2018.
- [29] A. Mishra en R. Singh, „Optimization of Slenderness Ratio of Prestressed Box Girder Bridge using High Strength Concrete,” juni 2018. [Online]. Available: <https://www.irjet.net/archives/V5/i6/IRJET-V5I6297.pdf>. [Geopend 5 februari 2019].
- [30] T. Duclos, B. Djessas, F. Chebbi en R. Leonard, „Réunion Island's New Coastal Road: A Viaduct with a wide Precast Deck and Piers,” *Structural Engineering International*, vol. 28, nr. 2, pp. 111-117, 2018.
- [31] R. Abendah, *Temperature Induced Deformations in Match-Cast Segments and their Effects on Precast Segmental Bridges.*, Göttingen: Cuvillier Verlag, 2006.
- [32] J. Huang, *Extern vorgespannte Segmentbrücken unter kombinierter Beanspruchung aus Biegung, Querkraft und Torsion.*, Karlsruhe, 1994.
- [33] Nederlands Normalisatie-instituut, *NEN-EN 1992-2+C1 Eurocode 2: Ontwerp en berekening van betonconstructies - Betonnen bruggen- Regels voor ontwerp, berekening en detaillering*, 2011.
- [34] Dywidag-Systems International, *Dywidag Bonded Post-Tensioning Systems using Strands*.
- [35] Cerema, „ETA-13/0979, DYWIDAG External and Internal Unbonded Strand Post-Tensioning System for 3 to 37 Strands,” Paris, 2018.
- [36] Nederlands Normalisatie-instituut, *NEN 2889 betonelementen - maximaal toelaatbare maatafwijkingen*, 1990.
- [37] Latexfalt, „Elastofalt® EP,” [Online]. Available: <https://www.latexfalt.com/index.php/wegen-en-betonprotectie/betonbescherming/elastofalt-ep>. [Geopend 20 april 2019].
- [38] Nederlands Normalisatie-instituut, *NEN-EN 13369 Algemeen bepalingen voor voorafvervaardigde betonproducten*, 2018.
- [39] Pagel spezial-beton, „Hogesterkte gietmortel K90,” april 2019. [Online]. Available: [https://www.pagel.com/all/pdf/nl/v1\\_hf\\_nl.pdf](https://www.pagel.com/all/pdf/nl/v1_hf_nl.pdf). [Geopend 17 juni 2019].
- [40] Bruil, „PI-blad Bruil GTM100 gietmortel,” [Online]. Available: <https://www.bruil.nl/downloads/cacb355a47ac37c9ddf20d590690b53c>. [Geopend 17 juni 2019].
- [41] Mammoet, „TDS - Liebherr LTM 1750-9.1,” 6 November 2015. [Online]. Available: <https://www.mammoet.com/siteassets/equipment/cranes/mobile-cranes/all-terrain-cranes/lm-1750-9.1/datasheet-ltm-1750-9.1.pdf>. [Geopend 26 April 2019].
- [42] Mammoet, „TDS - Liebherr LTM 1500 - 8.1,” 6 november 2015. [Online]. Available: <https://www.mammoet.com/siteassets/equipment/cranes/mobile-cranes/all-terrain-cranes/lm-1500-8.1/datasheet-ltm-1500-8.1.pdf>. [Geopend 29 April 2019].
- [43] Mammoet, „TDS - Liebherr LR 1600-2,” 6 November 2015. [Online]. Available: <https://www.mammoet.com/siteassets/equipment/cranes/crawler-cranes/lr-1600-2/datasheet-lr-1600-2.pdf>. [Geopend 26 April 2019].
- [44] Scheuerle, „SPMT - Standard versions,” [Online]. Available: <https://www.scheuerle.com/products/spmt/standard-versions.html>. [Geopend 26 April 2019].
- [45] J. Blaauwendraad, *Plates and FEM : Surprises and Pitfalls*, London: Springer, 2010.
- [46] P. Hoogenboom, „Aantekeningen over wringing,” 26 oktober 2014. [Online]. Available: <http://homepage.tudelft.nl/p3r3s/dictaatwringing.pdf>. [Geopend 28 Februari 2019].
- [47] J. Walraven en C. Braam, *Collegedictaat Prestressed concrete*, Delft: TU Delft, 2015.
- [48] „European Assessment Document - EAD-160004-00-0301,” European Organisation for



- Technical Assessment, Brussel, 2016.
- [49] Ooms Producten, [Online]. Available: <https://ooms.nl/specialismen/bijzondere-asfaltconstructies/>. [Geopend 2019 Mei 8].
- [50] Cobouw, „Cobouw,” 5 september 2001. [Online]. Available: [https://www.cobouw.nl/bouwbreed/nieuws/2001/09/enneus-heermabrug-geopend-101189653?vakmedianet-approve-cookies=1&\\_ga=2.98534364.29226372.1557926762-1776482375.1557926762](https://www.cobouw.nl/bouwbreed/nieuws/2001/09/enneus-heermabrug-geopend-101189653?vakmedianet-approve-cookies=1&_ga=2.98534364.29226372.1557926762-1776482375.1557926762). [Geopend 15 mei 2019].
- [51] Seco, „Secobrug over de IJssel - Zwolle,” [Online]. Available: <https://www.seconed.nl/portfolio-item/brug-over-de-ijssel-zwolle/>. [Geopend 15 Mei 2019].
- [52] A. Bruggeling, Prefabricage in beton, Amsterdam/ Brussel: Agon Elsevier, 1977.

Naast de hier vermelde openbare bronnen moeten ook de technische richtlijnen van Spanbeton en de uitwerking hiervan in talloze Excel programma's vermeld worden als bron van informatie en naslagwerk bij het samenstellen van de rekenmethode gebruikt voor het toetsen van de ontworpen oplossing.

# Afbelldingenlijst

De schetsen in dit rapport zijn een eigen ontwerp en gemaakt met Microsoft Visio professional. De afbeeldingen van raamwerk- en plaatberekeningen zijn gemaakt met SCIA Engineer de grafieken en diagrammen zijn gemaakt met Microsoft Excel. Met uitzondering van de onderstaande figuren:

- Figuur 1-1 beschikbaar via: [https://nl.wikipedia.org/wiki/Knooppunt\\_Oudenrijn#/media/File:Knooppunt\\_Oudenrijn\\_-\\_RWS\\_421399.jpg](https://nl.wikipedia.org/wiki/Knooppunt_Oudenrijn#/media/File:Knooppunt_Oudenrijn_-_RWS_421399.jpg) [Geopend 19 mei 2018]
- Figuur 1-2 eigen foto, gemaakt op 17 oktober 2018
- Figuur 1-3 eigen foto, gemaakt op 11 november 2018
- Figuur 2-1 [Geopend 29 oktober 2018] Schermafbeelding afkomstig van Google Maps
- Figuur 2-2 beschikbaar via: <https://www.wegenwiki.nl/Bestand:Doesburgbrug.jpg> [Geopend 26 oktober 2018]
- Figuur 2-3 beschikbaar via: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SpoorDev.jpg> [Geopend 29-10-2018]
- Figuur 2-4 eigen foto, gemaakt op 17 november 2018
- Figuur 2-5 Schermafbeelding afkomstig van Google Maps. [Geopend 29 november 2018]
- Figuur 2-6 beschikbaar via: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:20130504\\_Maastricht\\_Kennedybrug\\_04.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:20130504_Maastricht_Kennedybrug_04.JPG) [Geopend 29 november 2018]
- Figuur 2-7 eigen foto, gemaakt op 17 november 2018
- Figuur 2-8 beschikbaar via: <https://www.1limburg.nl/maasbrug-roermond-krijgt-naam-van-tekenaar> [geopend 26 oktober 2018]
- Figuur 2-9 beschikbaar via: [https://www.wegenwiki.nl/Bestand:Polbrug\\_Zutphen.jpg](https://www.wegenwiki.nl/Bestand:Polbrug_Zutphen.jpg) [geopend 29 november 2018]
- Figuur 2-10 beschikbaar via: <https://nl.wikipedia.org/wiki/Bestand:Enneus-heermabrug.jpg> [geopend 29 november 2018]
- Figuur 5-4 C. Rudie, J. Poulson, T. Molas, V. Ryzhikov, „The Replacement of the I-10 Bridges over Escambia Bay,” PCI, 2008.
- Figuur 5-5 beschikbaar via: <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1989/1211/1211-005.pdf>. [Geopend 3 Januari 2019].
- Figuur 5-6 eigen foto, gemaakt op 17 november 2018.
- Figuur 5-7 beschikbaar via: <https://www.bd.nl/den-bosch-e-o/liggers-spoorbrug-naar-den-bosch~a7c42cc6/>. [Geopend 24 Januari 2019].
- Figuur 10-20 Afbellding afkomstig uit de brochure van DSI [34]
- Figuur 10-48 beschikbaar via: <https://www.spanbeton.nl/nl/references/item/n201-schiphol-rijk/> [Geopend 27 April 2019]
- Figuur 10-50 beschikbaar via: <https://www.liebherr.com/en/sgp/products/mobile-and-crawler-cranes/crawler-cranes/lr-crawler-cranes/details/lr17502.html> [Geopend 29 April 2019]
- Figuur 10-51 beschikbaar via: <https://www.liebherr.com/en/sgp/products/mobile-and-crawler-cranes/mobile-cranes/lm-mobile-cranes/details/lm150081.html> [Geopend 29 April 2019]

Figuur 10-52 beschikbaar via: <https://www.liebherr.com/en/sgp/products/mobile-and-crawler-cranes/mobile-cranes/lm-mobile-cranes/details/lm175091.html>  
[Geopend 29 april 2019]

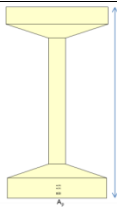

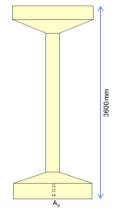
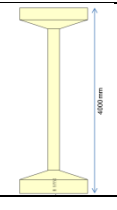
Figuur 10-53 beschikbaar via: <https://www.scheuerle.com/products/self-propelled-transporters/spmt.html> <https://www.scheuerle.com/products/spmt/spmt-f.html>  
[geopend 29 april 2019]

# Bijlage

## Bijlage A - Test constructiehoogte

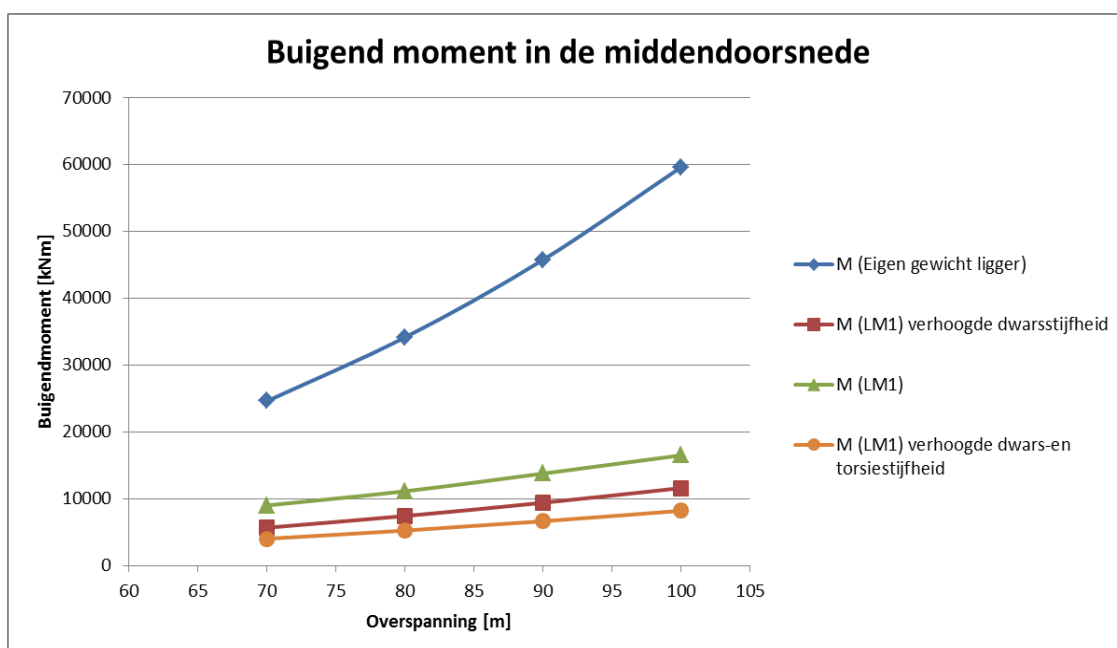
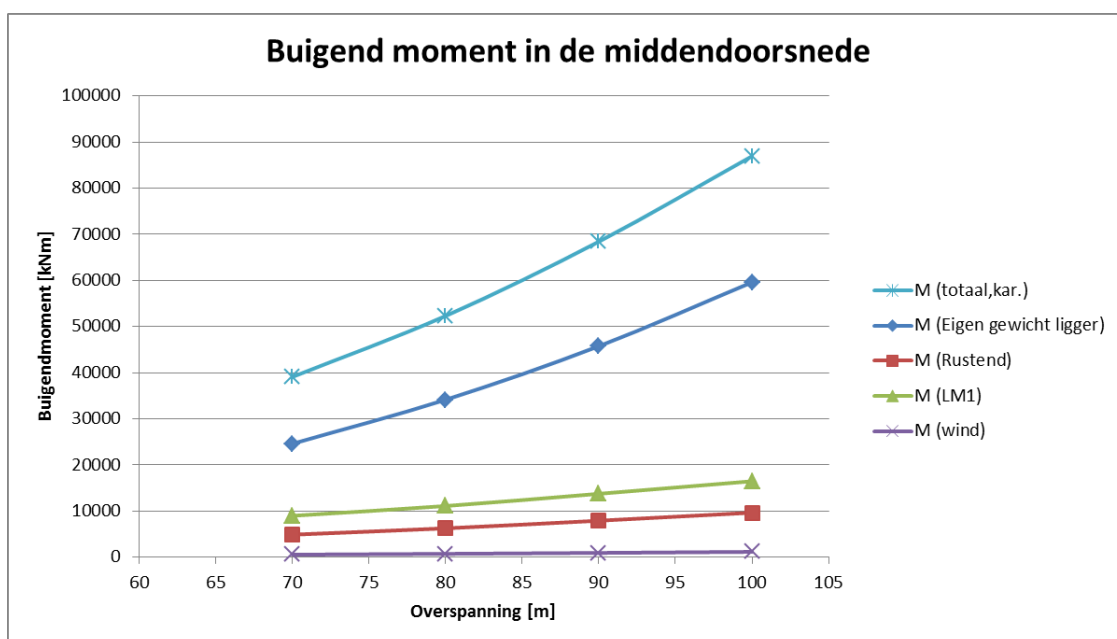
Om een inzicht te krijgen in de constructiehoogte voor een betonnen (ligger) brug is een proefberekening gemaakt voor een overspanning van 70, 80, 90 en 100 meter. Hierbij is de gebruikelijke rekenmethode van Spanbeton gehanteerd, de belasting is aangenomen zoals die in de ontwerpsituatie is gedefinieerd. Hiervoor is steeds een conservatieve slankheid van  $L/25$  aangehouden, dit geeft voor een overspanning van 100 meter een constructiehoogte van 4 meter. Het gebruikte profiel is gebaseerd op de hoge railbalken van Spanbeton waarbij de in het werk gestorte druklaag is verwaarloosd. Ook is de onderflens dikker gemaakt om ruimte te bieden aan de verwachte extra voorspanstrengen die benodigd zijn. Alle profielen hebben een werkende breedte van 1,5 meter.

Vervolgens is het maatgevende buigend moment bepaald uit de krachtsverdeling berekening. Vervolgens is bepaald hoeveel voorspanstrengen er noodzakelijk zijn om te voldoen aan de eisen in de uiterste grenstoestand (ULS) en de bruikbaarheidsgrenstoestand (SLS) en voor de vermoeiingsbelasting. Hierbij is uitgegaan van een betonsterkteklasse van C70/85, deze sterkte klasse voldeed voor alle overspanningen met uitzondering van de 100 meter. Maar met een hogere betonsterkte klasse of een meer geoptimaliseerde doorsnede kan deze ligger wel voldoen.

<b>Overspanning van 70 meter</b>		
D <sub>11</sub>	58031 [MNm]	
D <sub>22</sub>	204 [MNm]	
D <sub>12</sub>	41 [MNm]	
D <sub>33</sub>	135 [MNm]	
D <sub>44</sub>	6602 [MN/m]	
D <sub>55</sub>	3537 [MN/m]	
92 strengen noodzakelijk		
Constructiehoogte: 2800 mm		
<b>Overspanning van 80 meter</b>		
D <sub>11</sub>	81128 [MNm]	
D <sub>22</sub>	204 [MNm]	
D <sub>12</sub>	41 [MNm]	
D <sub>33</sub>	138 [MNm]	
D <sub>44</sub>	7545 [MN/m]	
D <sub>55</sub>	3537 [MN/m]	
110 strengen noodzakelijk		
Constructiehoogte: 3200 mm		
<b>Overspanning van 90 meter</b>		
D <sub>11</sub>	108679 [MNm]	
D <sub>22</sub>	204 [MNm]	
D <sub>12</sub>	41 [MNm]	
D <sub>33</sub>	142 [MNm]	
D <sub>44</sub>	7488 [MN/m]	
D <sub>55</sub>	3537 [MN/m]	
128 strengen noodzakelijk		
Constructiehoogte: 3600 mm		
<b>Overspanning van 100 meter</b>		
D <sub>11</sub>	140902 [MNm]	
D <sub>22</sub>	204 [MNm]	
D <sub>12</sub>	41 [MNm]	
D <sub>33</sub>	145 [MNm]	
D <sub>44</sub>	9431 [MN/m]	

D <sub>55</sub>	3537 [MN/m]	
156 strengen noodzakelijk (met hogere betonsterkte klasse om te voldoen bezwijken van de betondrukzone te voorkomen)		
Constructiehoogte 4000 mm		

De resultaten voor de buigende momenten in de ligger in de maatgevende midden doorsnede zijn weergegeven in de onderstaande grafiek. Hier zijn de karakteristieke waarde van de verschillende componenten van het buigend moment weergegeven. Wat opvalt, is dat het eigengewicht van de ligger 60 tot 70% van het karakteristiek buigend moment levert. Door te besparen op het eigengewicht van de constructie kan dus aanzienlijk bespaard worden op de constructiehoogte en het te gebruiken (voorspan) staal. Door de dwarsstijfheid te vergoten kan het buigende moment door de nuttige belasting meer gespreid worden over de verschillende liggers en dus effectief naar beneden gebracht worden. maar deze extra spreiding mag dan uiteraard niet voor veel extra eigengewicht zorgen.



Met deze resultaten kan geconcludeerd worden dat om een overspanning langer dan 60 meter mogelijk te maken het van belang is om het eigengewicht zo veel mogelijk te reduceren. Het vergroten van de dwarsstijfheid van het brugdek kan bijdragen aan een vermindering van

het maximale buigende langs moment maar dit is pas echt effectief als eerst het eigengewicht gereduceerd wordt en dit ook niet teveel toeneemt door het verbeteren van de dwarsstijfheid.

## Bijlage B1 - Eigengewicht 3 liggerdelen

Om een inzicht te krijgen wat de ideale lengte van de liggerdelen is om de 3-delige combinatieliggerbrug te bouwen is met behulp van een geschatte doorsnede een berekening gemaakt van het gewicht van de liggerdelen. Hierbij is het doel om een zo lang mogelijk middendeel te hebben, dan kan immers de voorspanning zo efficiënt mogelijk in de doorsnede geplaatst worden. Maar voor het transport is een maximaal gewicht van 160 ton per liggerdeel.

De doorsnede bestaat uit een I-vormig profiel met een breedte van 2000 mm, de bovenflens heeft een dikte van 350 mm en de onderflens een dikte van 320 mm. ook is de onderflens afgeschuind met een hoek van ongeveer 5,7 graden (1:10). Ook zijn in de onderflens gaten aangebracht voor de voorspan kanalen. Dit betreft 8 kanalen met een diameter van 122 mm voldoende voor 27 voorspanstrengen Y1860S7 Ø15,7 per voorspankanaal [28, p. 30], dus 216 strengen per ligger. Voor de bepaling van het eigengewicht is gerekend met deze doorsnede continue over de volledige ligger lengte. De hoogte van het profiel is berekend met de formule  $l_{th}/32$ . Tevens is gerekend is met een soortelijke massa van beton van  $26 \text{ kN/m}^3$ . Indien een element lengte onvoldoende is om de overspanning te halen is deze waarde doorgestreept. Groene mogelijkheden zijn zeker te transporteren, waarde tussen de 150 en 170 ton zijn gemarkeerd als geel, kritisch en rode opties zijn zeker te zwaar voor transport

Voor de korter over spanningen, 70 en 80 meter is het mogelijk het profiel lichter uit te voeren, met een dunner gemaakte onder- en bovenflens. Dit is mogelijk omdat het buigende moment in de doorsnede kwadratisch stijgt afhankelijk van de overspanning lengte, terwijl de hoogte lineair stijgt met de overspanningslengte, er is dus een kleiner kracht in de druk en trek zone noodzakelijk om de gewenste momentcapaciteit te leveren. Daarom is dezelfde berekening herhaald voor de 70 en 80 meter overspanning, maar dan met een bovenflens dikte van 300 mm en een onderflens dikte van 280 mm.

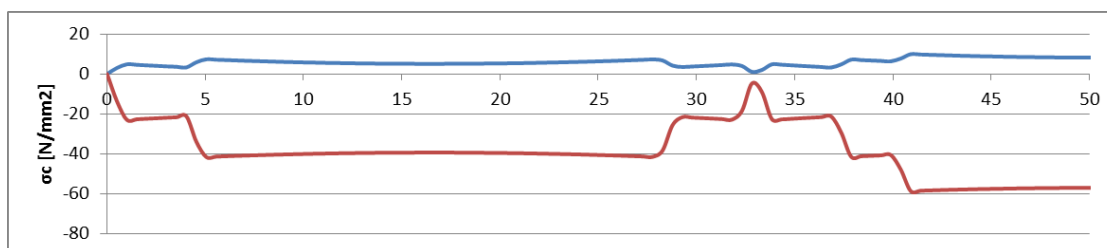
Overspanning:	70 meter*	80 meter*	90 meter	100 meter	110 meter
Lengte middelste liggerdeel:					
25 meter	95 [ton]	110 [ton]			
30 meter	115 [ton]	132 [ton]	137 [ton]		
35 meter	134 [ton]	139 [ton]	160 [ton]	167 [ton]	
40 meter	153 [ton]	159 [ton]	183 [ton]	191 [ton]	196 [ton]
45 meter	172 [ton]	179 [ton]	205 [ton]	215 [ton]	220 [ton]
50 meter	191 [ton]	299 [ton]	228 [ton]	238 [ton]	245 [ton]
55 meter	210 [ton]	219 [ton]	251 [ton]	262 [ton]	269 [ton]

\* Voor de overspanningen van 70 en 80 meter is gerekend met een dunnere onder- en bovenflens van 280 en 300 mm.

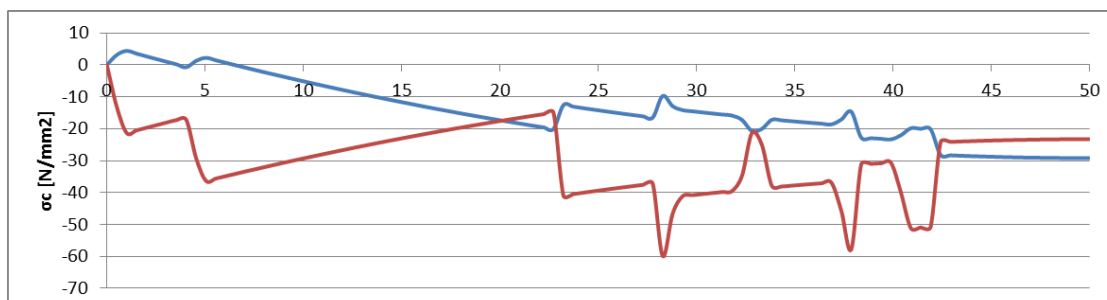
## Bijlage B2 - Ligger koppeling met voorspanstaven

Een mogelijk koppelmethode voor de combinatieliggerbrug is met behulp van span staven zoals deze beschreven is als variant 3 voor de trek zone. Dit lijkt een geschikte koppelmethode omdat lokaal bij de koppeling waar geen voorspanning heerst door het voorgerekte staal heerst toch voldoende drukspanning gerealiseerd kan worden. om te controleren of deze variant mogelijk is een doorsnede berekening gemaakt voor een 100 meter combinatieliggerbrug met een profiel hoogte van 3200 mm. de spanningen in de onder- en bovenkant van de flens zijn getekend. Voor het spannen van de individuele liggerdelen, de voorspanning tijden het maken van de koppeling en onder de karakteristieke belasting. in deze berekening is conservatief uitgegaan van een on gescheurde doorsnede in de

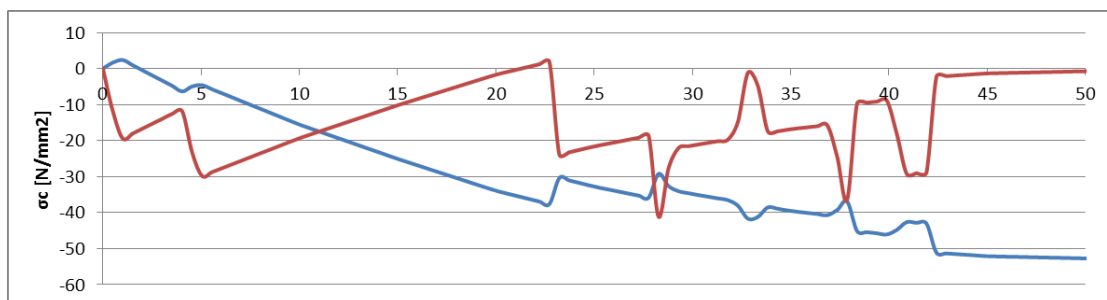
bruikbaarheidsgrenstoestand. In de grafiek geldt rood is de betonspanning aan de onderzijde van het profiel, blauw is de betonspanning aan de bovenzijde van het profiel



Figuur 0-1 een grafiek van de betonspanningen bij het spannen van het voorgerekte staal, de splitsing tussen de liggerdelen ligt op 33 meter en slechts de helft van de constructie is geplot.



Figuur 0-2 een grafiek van de betonspanningen bij het spannen van de spanstaven.



Figuur 0-3 een grafiek van de betonspanningen onder der karakteristieke belasting combinatie

Uit deze grafiek kan een aantal dingen geconcludeerd worden over de mogelijke koppeling alleen met spanstaven op de locatie van de koppeling tussen de liggerdelen. Omdat de spanstaven alleen over een korte lengte aangebracht worden zal de volledige momentcapaciteit in de midden doorsnede geleverd moeten worden door de voorspanning met voorgerekte staal. Maar de benodigde hoeveelheid voorspanstaal (in dit voorbeeld 210 strengen Y1860S7 Ø15,7) kan niet worden in gebracht in de fabriek. In Figuur 0-1 is echter te zien dat deze hoeveelheid voorspanstaal leidt tot een overschrijding van de maximale beton trekspanning en de maximale beton druk spanning. De oorzaak hiervan ligt in de beperkt lengte van de liggerdelen zodat er slecht een relatief klein buigend moment door het eigengewicht in de individuele liggerdelen aanwezig is. Dit eigengewicht kan dus veel minder gebruikt worden om de betonspanningen door het eigengewicht onder controle te houden. Alleen al hierom is de koppeling, alleen met spanstaven niet mogelijk.

	Voorspanning			Onthechting [m]	
	z [mm]	aantal	Ap [mm]	xstart	xeind
1	62	70	10500	0	33
2	62	70	10500	33	68
3	75	70	10500	4	29
4	75	70	10500	37	64
5	75	70	10500	40	60
9	200	80	12000	23	42

10

200	80	12000	28	38
-----	----	-------	----	----

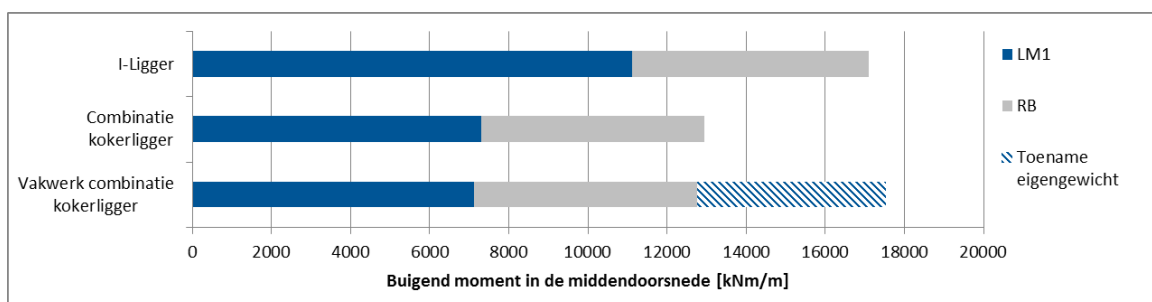
### Bijlage B3 - Vakwerkcombinatiekoker en D<sub>55</sub>

De vakwerk combinatie kokerligger zoals geschetst voor de ligger doorsnede heeft de mogelijkheid om een zeer goede belasting spreiding te realiseren door de grote dwarsafschuifstijfheid. Tegelijkertijd bestaat het risico dat door de schuine lijven zoveel extra gewicht wordt toegevoegd dat het voordeel van de betere belastingspreiding teniet gedaan wordt. Om dit te controleren zal de vakwerkcombinatie kokerligger vergeleken worden met de combinatie kokerligger met externe voorspanning. In beide gevallen wordt ervanuit gegaan dat de dwarsvoorspanning is gerealiseerd door middel van externe voorspanning en dat daarom voor deze berekening geen extra gewicht voor dit in rekening gebracht hoeft te worden.

De orthotrope stijfheden voor de combinatie kokerligger doorsnede zijn bepaald volgens bijlage C1. De orthotrope stijfheden voor de vakwerk combinatie kokerligger zijn op dezelfde manier bepaald met uitzondering van de D<sub>55</sub>, deze is geschat door simpelweg de bestaande D<sub>55</sub> met een factor 100 te vermenigvuldigen, zodat deze van dezelfde orde grote wordt als de D<sub>44</sub>. Deze verandering zorgt voor slechts een minimale verlaging van het maximale buigend moment. Deze D<sub>55</sub> heeft dus bijzonder weinig invloed op de spreiding van de belasting. Een exacte berekening van deze D<sub>55</sub> is dus niet nodig om aan te tonen dat de hoge dwarsafschuifstijfheid van de vakwerk combinatie kokerligger niet zinvol is om het maximale buigende moment in de ligger te verminderen. Terwijl deze dubbel lijven wel zullen zorgen voor een gewichtstoename van de constructie, dit is in de onderstaande grafiek in het groen geplot. Daaruit kan geconcludeerd worden dat de vakwerkcombinatiekoker effectief een hoger maximaal buigend moment in de midden doorsnede zal hebben dan een standaard I-ligger.

Combinatie kokerligger		I-ligger zonder doorverbonden onderflens		Vakwerk combinatie kokerliggers	
D <sub>11</sub>	66191 [MNm]	D <sub>11</sub>	66191 [MNm]	D <sub>11</sub>	69605 [MNm]
D <sub>22</sub>	60141 [MNm]	D <sub>22</sub>	81 [MNm]	D <sub>22</sub>	60141 [MNm]
D <sub>12</sub>	12028 [MNm]	D <sub>12</sub>	16 [MNm]	D <sub>12</sub>	12028 [MNm]
D <sub>33</sub>	14541 [MNm]	D <sub>33</sub>	44 [MNm]	D <sub>33</sub>	15661 [MNm]
D <sub>44</sub>	4848 [MN/m]	D <sub>44</sub>	4848 [MN/m]	D <sub>44</sub>	7660 [MN/m]
D <sub>55</sub>	29 [MN/m]	D <sub>55</sub>	2651 [MN/m]	D <sub>55</sub>	2900 [MN/m]

De dikte van de lijven van de vakwerkcombinatiekokerligger is geschat op 160 mm, dezelfde dikte die nu toegepast wordt op de lijven van de kokerliggers. Deze dikte is gemeten in de horizontale richting.



In het algemeen is dus te stellen dat het vergroten van de dwarsafschuifstijfheid, de D<sub>55</sub> in het orthotrope plaat model. Bijzonder weinig invloed heeft op spreiding van de belasting. Toch moet deze waarde nauwkeurig bepaald worden, dit om uiteindelijk de krachten door de dwarsafschuiving goed te voorspellen. Het vergroten van de dwarsafschuifstijfheid, door bijvoorbeeld de dikte van het lijf in de combinatiekokerligger moet dus alleen gebeuren om te garanderen dat deze krachten voldoende kunnen worden afgedragen door de constructie.

### Bijlage B4 - Eigengewicht 5 liggerdelen

Om een inzicht te krijgen wat de ideale lengte van de liggerdelen is om de 5-delige combinatieliggerbrug te bouwen is met behulp van een geschatte doorsnede een berekening



gemaakt van het gewicht van de liggerdelen. Hierbij is het doel om een zo lang mogelijk middendeel te hebben, dan kan immers de voorspanning zo efficiënt mogelijk in de doorsnede geplaatst worden. Maar voor het transport is een maximaal gewicht van 160 ton per liggerdeel, voor deze relatief korte segmenten zal een gewicht tussen de 120 en 160 ton als kritisch worden gemarkeerd, door de relatief beperkte lengte van 20 meter kan de belasting immers minder gespreid worden.

De doorsnede bestaat uit een I-vormig profiel met een breedte variabele breedte, de bovenflens heeft een dikte van 350 mm en de onderflens een dikte van 320 mm. De lijf dikte is zo gekozen dat  $V_{ed} < FR_{d,max}$  (de betondrukdiagonaal bezwijkt niet bij een hoek van 21,8 graden). De onderflens is afgeschuind met een hoek van ongeveer 5,7 graden (1:10). Ook zijn in de onderflens gaten aangebracht voor de voorspan kanalen. Dit betreft 8 kanalen met een diameter van 122 mm voldoende voor 27 voorspanstrengen Y1860S7 Ø15,7 per voorspankanaal [28, p. 30]. Voor de bepaling van het eigengewicht is gerekend met deze doorsnede continue over de volledige ligger lengte. De hoogte van het profiel is berekend met de formule  $lengte\ overspanning/32$ . Tevens is gerekend is met een soortelijke massa van beton van  $26\text{ kN/m}^3$ . Indien een element lengte onvoldoende is om de overspanning te halen is deze waarde doorgestreept. Groene mogelijkheden zijn zeker te transporteren, waarde tussen de 120 en 160 ton zijn gemarkeerd als geel, kritisch en rood gemarkeerde opties zijn zeker te zwaar voor transport. Liggerdelen met een gewicht lager tot 100 ton hebben nog als extra voordeel dat deze zeer waarschijnlijk zonder begeleiding vervoerd kunnen worden.

<b>Overspanning:</b>	<b>70 meter*</b>	<b>80 meter*</b>	<b>90 meter</b>	<b>100 meter</b>	<b>110 meter</b>
<b>Breedte van het liggerdeel / flens dikte:</b>	<b>(4 liggerdelen)</b>	<b>(4 liggerdelen)</b>	<b>(5 liggerdelen)</b>	<b>(5 liggerdelen)</b>	<b>(6 liggerdelen)</b>
<b>2000 mm/ 200 mm</b>	82 [ton]	80 [ton]	90 [ton]	95 [ton]	98 [ton]
<b>2250 mm/ 200 mm</b>	84 [ton]	87 [ton]	100 [ton]	104 [ton]	107 [ton]
<b>2500 mm/ 200 mm</b>	91 [ton]	95 [ton]	109 [ton]	113 [ton]	115 [ton]
<b>2750 mm/ 230 mm</b>	102 [ton]	105 [ton]	120 [ton]	124 [ton]	127 [ton]
<b>3000 mm/ 250 mm</b>	111 [ton]	115 [ton]	132 [ton]	137 [ton]	140 [ton]

\* Voor de overspanningen van 70 en 80 meter is gerekend met een dunnere onder- en bovenflens van 280 en 300 mm.

Dezelfde berekening is herhaald voor een liggerdeel lengte van 25 meter, zodat een overspanning van 100 meter uit 4 delen zal bestaan.

<b>Overspanning:</b>	<b>70 meter*</b>	<b>80 meter*</b>	<b>90 meter</b>	<b>100 meter</b>	<b>110 meter</b>
<b>Breedte van het liggerdeel / flens dikte:</b>	<b>(3 liggerdelen)</b>	<b>(4 liggerdelen)</b>	<b>(4 liggerdelen)</b>	<b>(4 liggerdelen)</b>	<b>(5 liggerdelen)</b>
<b>2000 mm/ 200 mm</b>	95 [ton]	100 [ton]	114 [ton]	119 [ton]	122 [ton]
<b>2250 mm/ 200 mm</b>	105 [ton]	109 [ton]	125 [ton]	130 [ton]	133 [ton]
<b>2500 mm/ 200 mm</b>	114 [ton]	118 [ton]	136 [ton]	141 [ton]	144 [ton]
<b>2750 mm/ 230 mm</b>	127 [ton]	132 [ton]	151 [ton]	157 [ton]	160 [ton]
<b>3000 mm/ 250 mm</b>	138 [ton]	143 [ton]	165 [ton]	171 [ton]	175 [ton]

\* Voor de overspanningen van 70 en 80 meter is gerekend met een dunnere onder- en bovenflens van 280 en 300 mm.

### Bijlage B5 - Eigengewicht segmenten variant 3

Om een inzicht te krijgen in het vermoedelijke gewicht per segment voor de variant 3 is een berekening gemaakt voor de segmentgewichten bij verschillende overspanningen. Hierbij is gekozen om de overspanning en de breedte van het brugdek te laten variëren. De hoogte van de segmenten is geschat met de formule: lengte overspanning/32. Aangenomen is dat de bovenflens een dikte heeft van 300 mm, de onderflens een dikte van 200 millimeter dit is geschat aan de hand van de minimale waarde van 150 mm + de extra ruimte die noodzakelijk is voor de interne voorspankanalen [9, p. 18]. De lijven hebben een geschatte breedte van 400. De breedte van de holle ruimte varieert afhankelijk van de brugdekbreedte, het aantal holle ruimte wordt zo gekozen dat de breedte van deze holle ruimte rond de 4 meter is, hierdoor hoeft de effectieve breedte van de bovenflens niet gereduceerd te worden vanwege "shear lag". De dikte van de segmenten is gelijk gehouden op 3000 mm. in de volgende tabel zal deze breedte variëren en zal de overspanning gelijk blijven. Er is gerekend met een soortelijke massa voor beton van 26 kN/m<sup>3</sup>. Groene mogelijkheden zijn zeker te transporteren, waarde tussen de 100 en 140 ton zijn gemarkeerd als geel, kritisch en rode opties zijn zeker te zwaar voor transport.

Overspanning:	70 meter	80 meter	90 meter	100 meter	110 meter
Breedte van het brugdek:					
10 meter	55 [ton]	58 [ton]	61 [ton]	64 [ton]	66 [ton]
15 meter	80 [ton]	83 [ton]	87 [ton]	92 [ton]	95 [ton]
17,8 meter	96 [ton]	101 [ton]	105 [ton]	112 [ton]	115 [ton]
20 meter	110 [ton]	115 [ton]	121 [ton]	129 [ton]	133 [ton]
25 meter	134 [ton]	141 [ton]	148 [ton]	156 [ton]	162 [ton]
30 meter	159 [ton]	167 [ton]	175 [ton]	184 [ton]	190 [ton]

Tenslotte is een gelijkwaardige berekening herhaald voor de segmenten, hierbij is de overspanning en dus de segment hoogte constant gehouden, terwijl de dikte van de segmenten is gevarieerd.

Segmentdikte:	1500 mm	2000 mm	2500 mm	3000 mm	3500 mm
Breedte van het brugdek:					
10 meter	32 [ton]	43 [ton]	54 [ton]	64 [ton]	75 [ton]
15 meter	46 [ton]	61 [ton]	77 [ton]	92 [ton]	108 [ton]
17,8 meter	56 [ton]	74 [ton]	93 [ton]	112 [ton]	130 [ton]
20 meter	64 [ton]	86 [ton]	107 [ton]	129 [ton]	150 [ton]
25 meter	78 [ton]	104 [ton]	130 [ton]	156 [ton]	183 [ton]
30 meter	92 [ton]	132 [ton]	147 [ton]	184 [ton]	205 [ton]

### Bijlage B6 - Eigengewicht segmenten variant 4

Om een inzicht te krijgen in het vermoedelijke gewicht per segment voor de variant 3 is een berekening gemaakt voor de segmentgewichten bij verschillende overspanningen. Hierbij is gekozen om de overspanning en de breedte van het brugdek te laten variëren. De hoogte van de segmenten is geschat met de formule: lengte overspanning/32. Aangenomen is dat de bovenflens een dikte heeft van 420 mm (deze extra dikte is noodzakelijk om bezwijken van de betondrukzone te voorkomen, zie bijlage F2), de onderflens een dikte van 225 mm. Deze is geschat met behulp van de minimale waarde van 150 mm volgens NEN-EN 1992-2 NB [33, p. 18], een extra marge van 25 mm voor de afbuigpunten. En een marge van 50 mm om de interne vakwerken te simuleren. De rand lijven hebben een geschatte breedte van 500. Aangenomen is dat de lijven recht lopen, de onder en bovenflens van de doorsnede zijn dus even lang. De dikte van de segmenten is gelijk gehouden op 3000 mm. in de volgende tabel zal deze breedte variëren en zal de overspanning gelijk blijven. Er is gerekend met een

soortelijke massa voor beton van 26 kN/m<sup>3</sup>. Groene mogelijkheden zijn zeker te transporteren, waarde tussen de 100 en 140 ton zijn gemarkeerd als geel, kritisch en rode opties zijn zeker te zwaar voor transport.

De segmenten van variant 4, de ruimtevakwerk segmentbrug Deze segmenten worden tegen elkaar aangestort zodat er rekening gehouden moet worden met het 'bowing effect'. Hierbij vervormen de segmenten die als mal dienen door de hydratatie warmte van het vers gestorte beton dit speelt vooral een rol bij segmenten waarbij de verhouding tussen de breedte en de dikte groter wordt dan 6 – 7. Segmenten waarbij dit het geval is zijn gemarkeerd omdat deze niet geproduceerd kunnen worden zonder extra maatregelen.

Overspanning:	70 meter	80 meter	90 meter	100 meter	110 meter
Breedte van het brugdek:					
10 meter	63 [ton]	66 [ton]	68 [ton]	71 [ton]	73 [ton]
15 meter	89 [ton]	91 [ton]	93 [ton]	96 [ton]	98 [ton]
17,8 meter	102 [ton]	105 [ton]	107 [ton]	110 [ton]	112 [ton]
20 meter	<del>114 [ton]*</del>	<del>116 [ton]*</del>	<del>119 [ton]*</del>	<del>121 [ton]*</del>	<del>124 [ton]*</del>
25 meter	<del>135 [ton]*</del>	<del>138 [ton]*</del>	<del>140 [ton]*</del>	<del>132 [ton]*</del>	<del>145 [ton]*</del>
30 meter	<del>179 [ton]*</del>	<del>167 [ton]*</del>	<del>169 [ton]*</del>	<del>172 [ton]*</del>	<del>174 [ton]*</del>

\* Segmenten met een breedte/ dikte verhouding groter dan 7

Tenslotte is een gelijkwaardige berekening herhaald voor de segmenten, hierbij is de overspanning en dus de segment hoogte constant gehouden, terwijl de dikte van de segmenten is gevarieerd. Hierdoor is gelijk te zien dat een dikte van 3 meter de meest logische keuze is wat betreft het 'bowing effect' en het transport van de segmenten. Het nadeel is wel dat met dit segment geen brede brugdekken gebouwd kunnen worden.

Segmentdikte:	1500 mm	2000 mm	2500 mm	3000 mm	3500 mm
Breedte van het brugdek:					
10 meter	<del>35 [ton]*</del>	47 [ton]	58 [ton]	71 [ton]	81 [ton]
15 meter	<del>48 [ton]*</del>	<del>64 [ton]*</del>	80 [ton]	96 [ton]	111 [ton]
17,8 meter	<del>55 [ton]*</del>	<del>74 [ton]*</del>	<del>92 [ton]*</del>	110 [ton]	127 [ton]
20 meter	<del>61 [ton]*</del>	<del>83 [ton]*</del>	<del>101 [ton]*</del>	<del>121 [ton]*</del>	140 [ton]
25 meter	<del>73 [ton]*</del>	<del>100 [ton]*</del>	<del>118 [ton]*</del>	<del>145 [ton]*</del>	<del>169 [ton]*</del>
30 meter	<del>86 [ton]*</del>	<del>114 [ton]*</del>	<del>143 [ton]*</del>	<del>172 [ton]*</del>	<del>199 [ton]*</del>

\* Segmenten met een breedte/ dikte verhouding groter dan 7

## Bijlage B7 - Gevolgen openklappen voegen

Voor variant 4 is een globale proefberekening gemaakt om te controleren of het mogelijk is om een segmentbrug te bouwen van 100 meter met een constructiehoogte van 3,2 meter

Indien een segmentbrug alleen is voorgespannen door middel van externe niet hechtende voorspanning zullen de voegen tussen de segmenten openklappen in de uiterste grenstoestand. Dit openklappen zorgt voor een sterke afname van de torsiestijfheid van het brugdek. De doorsnede wordt gecontroleerd voor een 2 meter breed stuk van het brugdek, waarbij alleen de onder- en bovenflens geschematiseerd zijn met een dikte van 320 en 150 mm.

Geschat wordt dat het buigende moment door LM1 en RB 20% zal toenemen vergeleken met de brekende waarde voor de combinatie kokerligger. Geschat is dat het buigend moment door het eigengewicht met 25% zal afnemen ten opzichten van de combinatie kokerligger, het eigengewicht wordt dus niet vanuit het doorsnede oppervlakte brekend, om het gewicht van

de randlijven, het ruimtevakwerk en de afbuigpunten niet te verwaarlozen, de 25% is een schatting die volgt uit de tegengewicht berekeningen voor de prefab elementen.

De doorsnede is gecontroleerd door middel van spandrsn waarbij aangenomen wordt dat de spanning in het voorspanstaal maximaal 50 N/mm<sup>2</sup> kan toenemen na decompressie volgens NEN-EN 1992-1-1 NB.

Uit de berekening volgt dat de gekozen dikte van de doorsnede te groot is, maar door deze te laten toenemen tot 420mm kan evenwicht gevonden worden, maar in dit geval zal het segmentgewicht ook toenemen, zodat transport een groter probleem dreigt te worden voor brede brugdekken. Of ingeval van een kleinere segmentdikte het 'bowing effect'

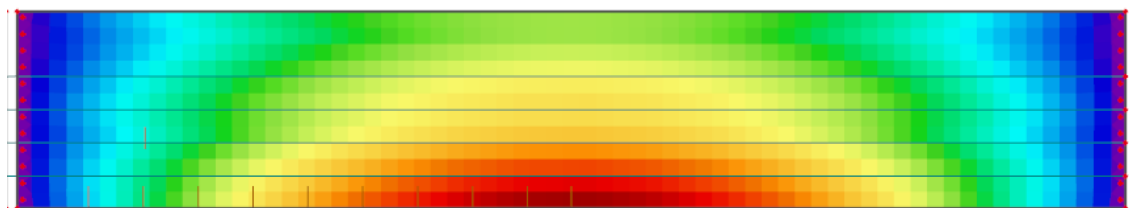
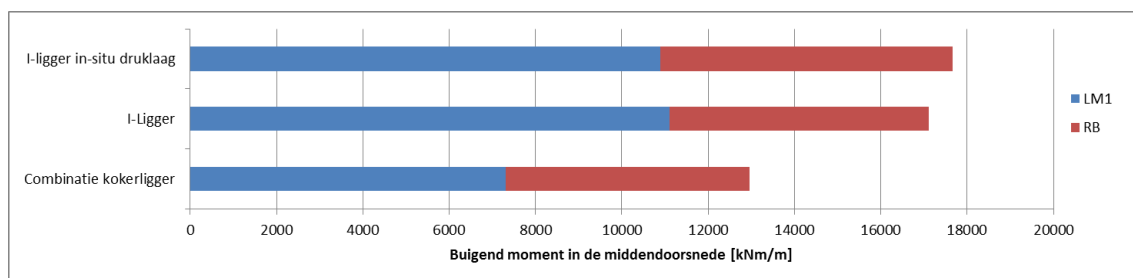
## Bijlage B8 - Dwarsspreiding van de Combinatie kokerligger

Om een inzicht te krijgen hoe goed de combinatie kokerligger de belasting kan spreiden over het brugdek en daardoor het maximale buigende moment per ligger te verminderen is een berekening gemaakt waarin de buigende momenten in de ligger doorsnede 3 type doorsnede vergeleken wordt, namelijk: de combinatie kokerligger, een combinatiekokerligger zonder doorverbonden onderflens en een gelijk liggertype met een 230 mm dikke bovenflens uit standaard gewapend beton, met een betonsterkteklasse van C30/37.

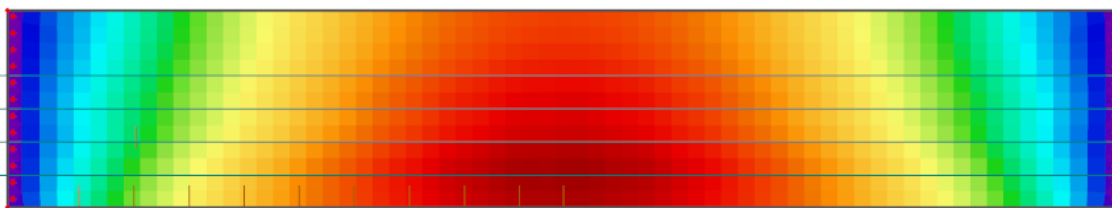
Combinatie kokerligger		Zonder doorverbonden onderflens		Met 230 mm druklaag in C30/37*	
D <sub>11</sub>	66191 [MNm]	D <sub>11</sub>	66191 [MNm]	D <sub>11</sub>	66191 [MNm]
D <sub>22</sub>	60141 [MNm]	D <sub>22</sub>	81 [MNm]	D <sub>22</sub>	17 [MNm]
D <sub>12</sub>	12028 [MNm]	D <sub>12</sub>	16 [MNm]	D <sub>12</sub>	3 [MNm]
D <sub>33</sub>	14541 [MNm]	D <sub>33</sub>	44 [MNm]	D <sub>33</sub>	44 [MNm]
D <sub>44</sub>	4848 [MN/m]	D <sub>44</sub>	4848 [MN/m]	D <sub>44</sub>	4848 [MN/m]
D <sub>55</sub>	29 [MN/m]	D <sub>55</sub>	2651 [MN/m]	D <sub>55</sub>	1311 [MN/m]

\*bij dit type profiel zijn alleen de D<sub>22</sub>, D<sub>21</sub> en de D<sub>55</sub> aangepast om zo een stijfheidsmatrix te krijgen die meer ligt in de buurt van de huidige railbalkliggers, die niet bestaan in de gebruikte constructiehoogte van 3,2 meter.

In het onderstaande diagram zijn de resultaten van de berekening getoond. Hierbij is zichtbaar dat de Combinatie kokerligger resulteert in een 25 % lager buigende moment in de midden doorsnede vergelijkbaar met even hoge I-profielen, dus zonder doorverbonden onderflens. Opgemerkt moet worden dat dit verschil nog hoger zou liggen indien de hoogte van de I-profielen aangepast wordt aan het groter buigende moment dat deze moet weerstaan. Omdat de buigstijfheid in de lengterichting dan verder zal toenemen, zal de belasting spreiding verder dalen.



Omhullend maximaal buigend moment in de lengterichting voor I-liggers

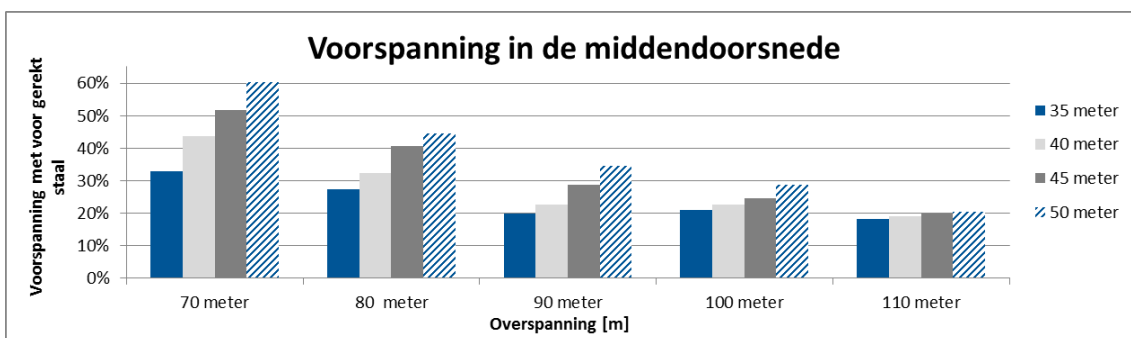


Omhullend maximaal buigend moment in de lengterichting voor de combinatie kokerliggers

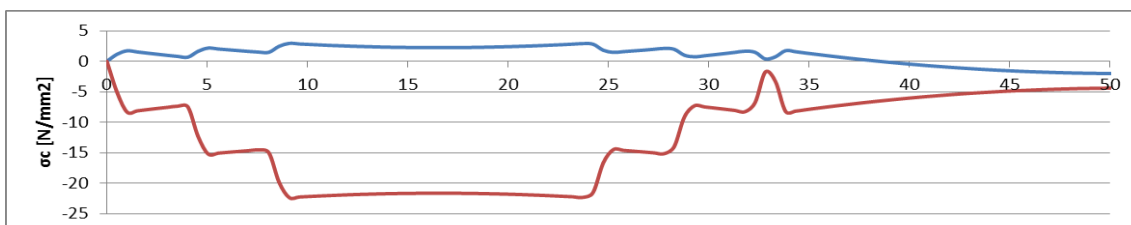
## Bijlage B9 - Voorspanning in de 3-delige ligger

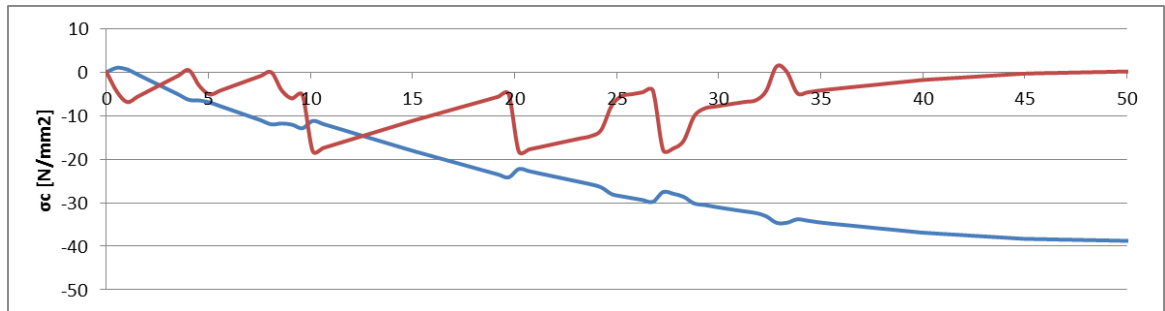
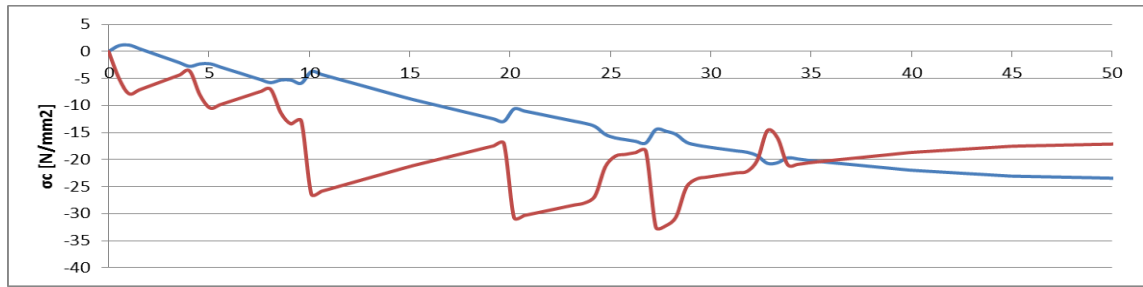
In variant 1 wordt gebruik gemaakt van een combinatie van voorspanning met voor en nagerekt staal in de lengterichting. Om een idee te krijgen hoe deze voorspanning gecombineerd kan worden is een globale berekening gemaakt van de voorspanning in de lengterichting. Hierbij is gekeken naar een situatie met een drukspanning in de onderflens voor de karakteristiek belasting. de voorspanning met nagerekt staal (de 2<sup>e</sup> fase) is bepaald door de drukspanning te controleren ter plaatse van de liggerkoppeling. De benodigde hoeveelheid voorspanning in de onderflens is vervolgens bepaald door dezelfde controle uit te voeren voor de midden doorsnede, om zo ook daar geen trekspanning te hebben. De bepaalde hoeveelheid voorspanning is omgerekend naar een percentage om zo een globaal idee te krijgen hoe deze voorspanning gecombineerd kan worden.

Bij deze berekening is om onnodig rekenwerk te voorkomen besloten de doorsnede niet aan te passen aan de overspanning, ook zijn de buigende momenten volgend uit de krachtsverdeling niet berekend voor elk brugdek, maar slechts geschaald met de lengte, het eigengewicht, ongeveer 70% van de belasting is wel exact berekend. Door deze vereenvoudiging zijn afwijkingen in de percentages bij een meer gedetailleerde berekening mogelijk, maar het beschreven effect, meer voorspanning met voorgerekt staal bij een relatief langer midden liggerdeel zal behouden blijven.



Hieronder is een grafiek geplaatst van de betonspanningen in de onder en bovenzijde van de halve totale ligger voor een aangebracht voorspanning volgens de onderstaande tabel. De rode lijn is hierbij de betonspanning in de onderste vezel van de doorsnede en blauw de betonspanning in de bovenste vezel. De eerste grafiek is direct na het spannen van de voorspanning met voorgerekt staal. De tweede grafiek is na het spannen van de voorspanning met nagerekt staal. De derde grafiek is onder de karakteristieke belasting.





Voorspanning met voorgerekt staal:

z [mm]	aantal	Ap [mm]	xstart	Xeind
62	30	4500	0	33
62	30	4500	33	68
62	30	4500	4	29
62	30	4500	8	25

Voorspanning met nagerekt staal

Voorspanning			locatie [m]	
z [mm]	aantal	Ap [mm]	xstart	Xeind
141	50	7500	10	91
141	50	7500	20	81
141	50	7500	27	74

In deze grafieken is goed zichtbaar dat de voorspanning zowel op het buigende moment bij de koppeling als in de midden doorsnede ontworpen moet worden. Ook moet vermeld worden dat de 180 strengen Y1860S7 Ø15,7 die nu vermeld staan als voorspanning niet voldoende is voor de uiterste grenstoestand. Hiervoor zijn ongeveer 210 voorspanstrengen noodzakelijk.

## Bijlage B10 - Gevolgen in-situ druklaag

Om een inzicht te krijgen in de gevolgen van een druklaag voor de constructie, is een aantal mala hetzelfde profiel, met een bovenflens waarvan een steeds groter deel uitgevoerd wordt als druklaag in de sterkte klasse C50/60. De hoeveelheid voorspanstaal is constant gehouden. Effecten door twee fase voorspanning, met voor- en nagerekt staal zijn niet meegenomen, alle voorspanning is gerekend als voorspanning met voorgerekt staal. Er is gerekend met CC3. De doorsnede is met behulp van SpanDrnsn gecontroleerd.

Trapezia:	h1	h2	b1	b2
1	0	320	1980	1980
2	320	409	1980	200
3	409	2850	200	200
4	2850	2850	200	200
5	2850	3200	1980	1980

Druklaag dikte:	UGT $M_{Rd}$ [kNm]	Voorspan strengen	Opmerkingen:
0 mm druklaag/ Totale hoogte: 3200 mm	125611	25 keer op 62 mm 170 keer op 195 mm	Profiel onder druk in SLS
100 mm druklaag/ Totale hoogte: 3200 mm	121259	25 keer op 62 mm 170 keer op 195 mm	Profiel onder druk in SLS Controle Xu/d faalt
150 mm druklaag/ Totale hoogte: 3200 mm	118414	25 keer op 62 mm 170 keer op 195 mm	Bezwijkt en xu/d voldoet niet
200 mm druklaag/ Totale hoogte: 3200 mm	113675	25 keer op 62 mm 170 keer op 195 mm	Bezwijkt en xu/d voldoet niet
250 mm druklaag/ Totale hoogte: 3200 mm	108678	25 keer op 62 mm 170 keer op 195 mm	Bezwijkt en xu/d voldoet niet

Druklaag dikte:	UGT: $M_{Rd}$ / $M_{Ed}$ [kNm]	Voorspan strengen	Opmerkingen:
0 mm druklaag/ Totale hoogte: 3200 mm	125611/ 121259	25 keer op 62 mm 170 keer op 195 mm	
100 mm druklaag/ Totale hoogte: 3300 mm	131604/ 130009	25 keer op 62 mm 170 keer op 195 mm	Toets Xu/d voldoet ruim
150 mm druklaag/ Totale hoogte: 3350 mm	134594/ 134384	25 keer op 62 mm 170 keer op 195 mm	Toets Xu/d voldoet ruim
200 mm druklaag/ Totale hoogte: 3400 mm	137693/ 138759	25 keer op 62 mm 170 keer op 195 mm	Doorsnede bezwijkt, meer staal noodzakelijk.
Ook extra eigengewicht door druklaag verwerkt in $M_{Ed}$			

Het probleem bij de in-situ druklaag is de lagere beton sterkte niet zo zeer de mindere effectieve voorspanning, deze minder effectieve voorspanning is namelijk niet maatgevend voor de SLS. Dit komt om dat ULS de maatgevende situatie is voor deze doorsnede, dit waarschijnlijk ook doordat gekozen is voor CC3. Dit kan ook samenhangen met de gekozen slankheid in relatie tot de hoge belasting. bij de profiel hoogte van 3200 mm voldoet Xu/d dan net. It is wel een voordeel voor de koppeling, als deze toch volledig voorgespannen moet zijn om aan de ULS te voldoen is het misschien handiger om voor een onderdruk staande ongewapende koppeling te kiezen die minder werk kost om te maken. Maar aan de druk eis voldoet de koppeling toch al, omdat de minimale druk al gehaald wordt door het staal dat benodigd is voor de UGT.

Een andere mogelijkheid is dat de in-situ druklaag zorgt voor een dergelijk reductie in het eigengewicht van het middelste liggerdeel dat deze dusdanig verlengt kan worden en dat er daardoor een besparing op het eigengewicht van de onderflens behaald kan worden.

