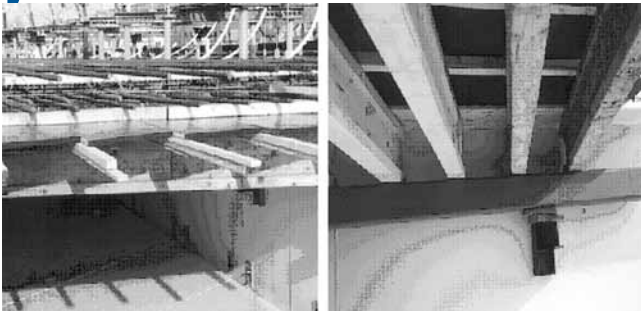


# UITVOERINGSMETHODEN STAAL- BETON BRUGGEN

Dr. ing. A. Romeijn



1. Voorbeeld van aanbrengen van houten bekisting



2a. Voorbeeld van aanbrengen van geprofileerde staalplaat als bekisting.

*Bij de bouw van bruggen werd in het verleden meestal slechts één materiaalsoort gebruikt; het waren óf stalen óf betonnen bruggen. De materiaaleigenschappen van beton en staal zijn echter zeer verschillend. Het ligt daarom voor de hand om bij het ontwerpen het materiaal te kiezen waarvan de eigenschappen het best tot hun recht komen. Tegenwoordig past men daarom in één brugconstructie in toenemende mate zowel staal als beton toe.*

*In dit artikel worden de uitvoerings- en montagethoden van staalbetonnen rijdekken van spoorbruggen en bruggen voor gewoon verkeer beschreven. Daarna worden als voorbeeld de spoorbrug bij Nootdorp, de Eilandbrug bij Kampen en de Prins Clausbrug in Utrecht behandeld.*

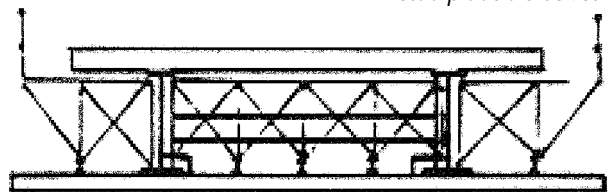
## Uitvoeringsmethoden betonnen rijvloer

De constructiemethode, de wijze waarop de betonnen rijvloer zelf wordt gemaakt, en de montagmethode, de wijze waarop de rijvloer aan de hoofddragconstructie wordt gekoppeld, kan in sterke mate de bouwkosten, bouwsnelheid en functionaliteit beïnvloeden. Daarom is het voor beide methoden belangrijk te weten wat de voor- en nadelen zijn. Hierbij moet gedacht worden aan een scala van aandachtspunten.

Bij de constructiemethode kunnen we de volgende mogelijkheden onderscheiden. Volledig in het werk



2b. Voorbeeld van aanbrengen van geprofileerde staalplaat als bekisting.



3a. Wijze van aanbrengen van bekisting via onderflens stalen ligger.

gestort beton, gedeeltelijk prefab beton en volledig prefab beton. Daarnaast speelt de afweging van wel of niet voorspannen van het beton een rol.

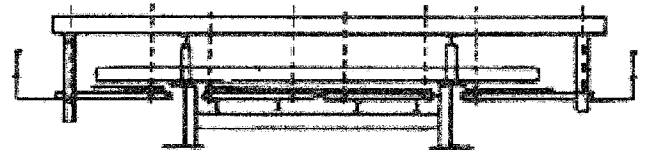
Parameters, die van invloed zijn op de keuze van de wijze van aanbrengen van de rijvloer zijn onder andere de afhankelijkheid van het weer; de mogelijkheden voor transport; de investeringskosten en arbeidsintensiviteit bij het gebruik van bekisting; de gewenste bouwsnelheid; eisen ten aanzien van de duurzaamheid; de wijze van aansluiting tussen ligger en rijvloer; tijdelijke ondersteuningsvoorzieningen; extra wapening voor samenwerkende delen.

Bij de montagmethode moet gelet worden op de spanningsverdeling ten gevolge van de montage; de gewenste stortvolgorde of plaatsingsvolgorde van de (onderdelen van de) rijvloer en de gewenste verbindingsvolgorde van de stalen en betonnen onderdelen.

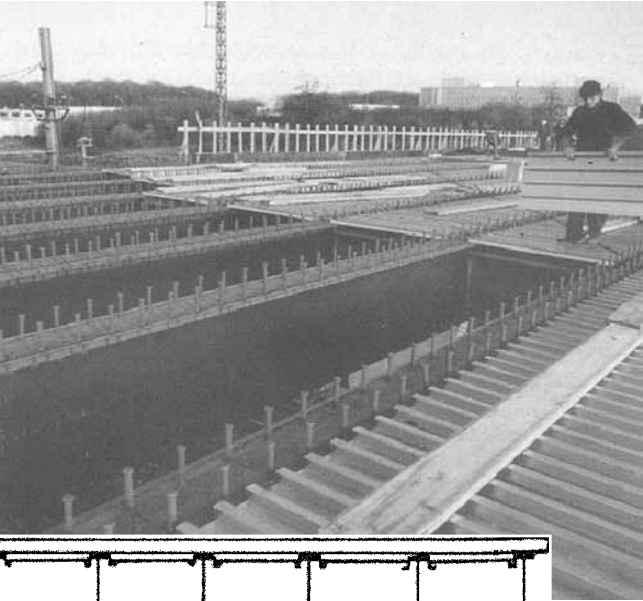
Veelal wordt voorafgaand aan het aanbrengen van de rijvloer de gehele staalconstructie incl. deuels geplaatst. Door de hoge loonkosten ten opzichte van de materiaalkosten is het wenselijk te streven naar een weinig arbeidsintensieve staalconstructie in plaats van een constructie die qua materiaalverbruik optimaal is. Dit heeft tot gevolg dat het aantal bijkomende voorzieningen als stabiliteitsverbanden en verstijvingsplaten tot een minimum wordt beperkt. Bijkomend voordeel is dat



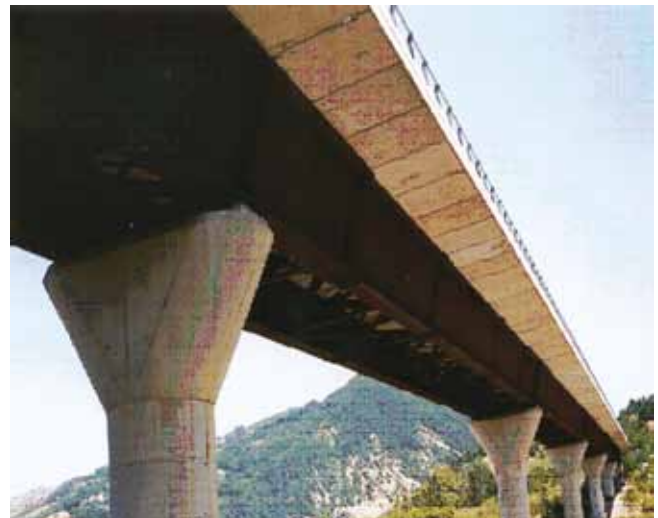
3b. Wijze van aanbrengen van bekisting via onderflens stalen ligger.



4. Wijze van aanbrengen van verrijdbare bekisting.



5. Inzet van geprofileerde staalplaat als verloren bekisting.



6. Voorbeeld van bekisting die uiteindelijk constructief samenwerkt.

het totale conserveringsoppervlak afneemt en inspectie wordt vergemakkelijkt.

Ten aanzien van het aanbrengen van de betonnen rijvloer zijn de volgende belangrijkste uitvoeringsmethoden te onderscheiden:

- a. in het werk gestorte rijvloer
- b. inhijzen van prefab rijvloerelementen
- c. schuiven van betonnen rijvloer over stalen liggers.

#### a. In het werk gestorte rijvloer

De voordelen hiervan zijn het eenvoudige transport, de eenvoudige aanpassing van doorsnede vorm, varianten in stortvolgorde en de verbindingsvolgorde tussen staal en beton, gelijkmatige schuifverbinding over liggerlengte, duurzame verbinding tussen stalen bovenflens en betonnen rijvloer en doordat de betonplaat één geheel vormt, is er geen extra wapening nodig om verschillende delen te laten samenwerken. Nadelen zijn de weersafhankelijkheid. Met andere woorden geen geconditioneerde uitharding, de vereiste bekistingconstructie en de relatief lange bouwtijd: bekisten, wapenen en storten op de bouwplaats.

De bekistingconstructie kan zijn:

1. van tijdelijke aard
2. verloren bekisting

3. bekisting opgenomen in het brugdek (gedeeltelijk prefab betonnen rijvloer).

- 1a Bekistingconstructie van tijdelijke aard: conventionele constructie
- 1b onderhangen ligger
- 1c verrijdbare constructie

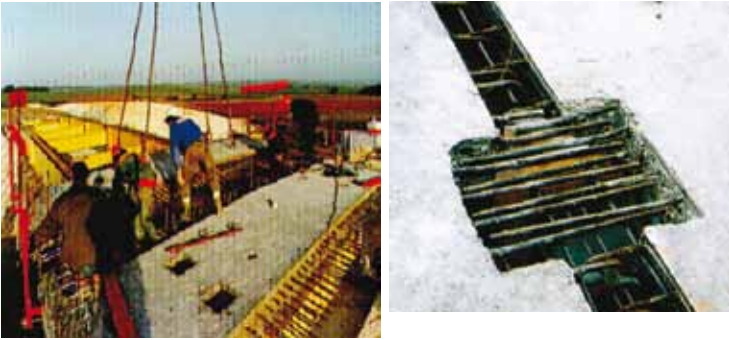
De bekisting wordt afgesteund op de stalen hoofdconstructie. De eenvoudigste wijze van aanbrengen van beton is de methode waarbij de rijvloer achtereenvolgens in moten wordt gestort en de bekisting telkens een moot wordt opgeschoven.

#### 2. Verloren bekisting

De gebruikskosten van een dergelijke bekisting zijn hoog en veelal zijn extra ondersteuningsvoorzieningen nodig voor bijvoorbeeld uitkragingen en in verband met de grootte van de overspanning tussen de hoofdliggers.

#### 3. Bekisting opgenomen in het brugdek

De afstand tussen de stalen liggers wordt overbrugd door bijv. breedplaatvloeren, die naast het feit dat ze bekisting zijn, tevens constructief meewerken. Met andere woorden er is veel extra wapening nodig om de verschillende delen constructief samen te laten werken.



7. Aanbrengen en koppelen van prefab rijvloerelementen.

#### b. Inhijsen van prefab rijvloerelementen

Deze uitvoeringswijze wordt gebruikt waar sprake is van grote hart op hart afstanden van de hoofdliggers en/of sterk uitkragende rijvloeren. De sparingen opgenomen in de rijvloerelementen stroken met de posities van de deuvels op de staalconstructie. Na plaatsing van de elementen komt de verbinding tussen staal en beton tot stand door de sparingen en de voegen tussen de prefabelementen vol te storten met krimpvrrije mortel. De voordelen zijn de relatief korte bouwtijd, fabricage in de fabriek, er zijn varianten mogelijk in de volgorde van plaatsen van de prefab elementen en de verbinding volgorde tussen staal en beton. De nadelen zijn de geconcentreerde locatie van schuifverbindingen, de wapening om prefab elementen te koppelen, maat-toleranties en de spleet tussen staal en beton.

#### c. Schuiven van betonnen rijvloer over stalen liggers

De rijvloer wordt vanaf het land over de liggers geschoven. De rijvloerelementen kunnen prefab worden aangeleverd of nabij het landhoofd "geconditioneerd" worden gestort. De twee meest voorkomende varianten worden hieronder toegelicht.

##### C1 Schuiven van betonnen rijvloer over stalen liggers

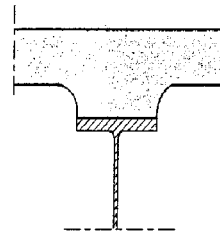
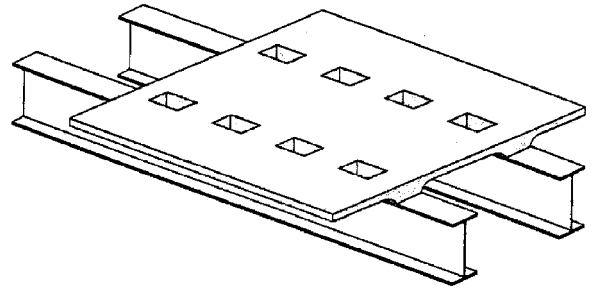
Het aanbrengen van de deuvelfverbinding in de sparingen geschiedt na plaatsing van de rijvloer. Vervolgens worden de sparingen aangestort. Nadelen hierbij zijn het op de bouwplaats moeten aanbrengen van de deuvels en de geconcentreerde krachtsoverdracht tussen staal en beton.

##### C2 Aanbrengen van de deuvelfverbinding voor het schuiven.

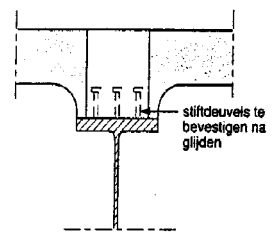
De sterkte in dwarsrichting wordt verzorgd door geconcentreerde wapening, geplaatst in het gedeelte tussen de sparingen. Beide varianten hebben het nadeel dat de volgorde waarin de rijvloer wordt opgebouwd niet kan worden gevarieerd, en de verbinding tussen staal en beton pas kan worden geactiveerd nadat de gehele rijvloer is geplaatst.

## Montagemethoden betonnen rijvloer

In tegenstelling tot betonnen bruggen en stalen bruggen kunnen staalbeton bruggen, in het bijzonder de rijvloer, op een groot aantal verschillende manieren worden gemonteerd. De achtergrond van de verschillende montagemethoden wordt gevormd door het feit dat trek in de betonnen rijvloer ongewenst is en de spanningsverdeling in gereede toestand van de brug sterk



detail tussen de sparingen



detail ter plaatse van de sparingen

8. Schuiven waarbij stifdeuvels na glijden worden aangebracht.

door de wijze van monteren van de rijvloer kan worden gestuurd. De trekspanning in het beton veroorzaakt scheurvorming waarmee de duurzaamheid van de rijvloer en de onderliggende constructie wordt vermindert en afname van de stijfheid van de samengestelde staalbeton doorsnede.

De meest voorkomende oplossing van dit probleem is het toelaten maar beperken van de scheurwijdte door middel van de wapeningskeuze en het enigszins voorspannen van de rijvloer, eventueel door het hanteren van een bepaalde montagemethode.

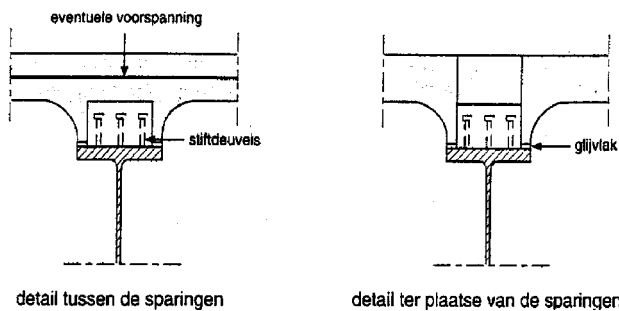
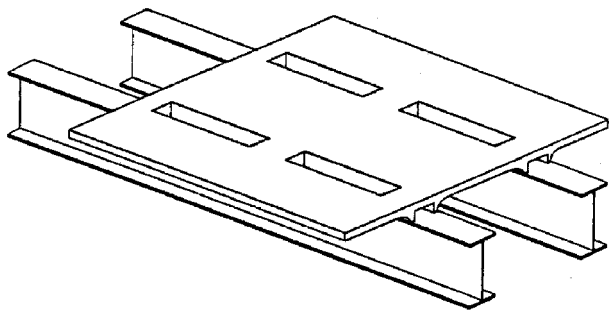
Omdat de uiteindelijke spanningsverdeling in de staalbeton doorsnede, en dus ook de kosten, sterk wordt beïnvloed door de bouwmethode, is het zinvol te weten welke methode het meest geschikt is. Met andere woorden het is voor een verantwoord ontwerp van een staalbetonbrug te beseffen dat de interactie tussen constructie en montage belangrijk is voor de spanningsverdeling. Immers, de spanningen vóór en ná het tot stand brengen van de deuvelfverbinding moeten worden gesuperponeerd. In geval van een plaatliggerbrug met een hoog gelegen betonnen rijvloer (een voorbeeld hiervan is gegeven in fig. 11) zijn de volgende belangrijkste montagemethoden te onderscheiden:

- bepaalde stortvolgorde
- inzet van hulpsteunpunten
- opgelegde steunpuntverplaatsing
- bepaald tijdstip van deuvelfactivering
- voorspannen in langsrichting
- combinatie van de punten a t/m e.

In onderstaande beschouwing wordt ervan uitgegaan dat de stalen hoofdconstructie reeds is geplaatst.

#### a. Bepaalde stortvolgorde

De traditionele methode is het ter plaatse, op een verrijdbare bekisting, storten van achter elkaar liggende moten. Het nadeel hierbij is dat bij tussensteunpunten, veroorzaakt door het storten van betonmoten nadat het

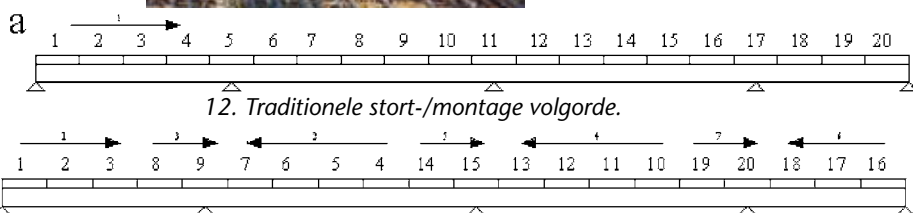


9. Schuiven waarbij stiftdeuvels voor glijden worden aangebracht.



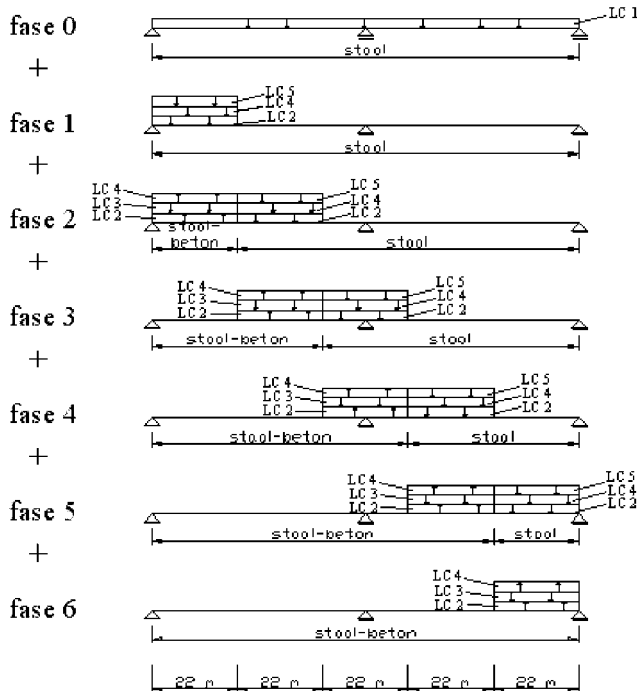
11. Staalbeton plaatliggerbrug met hooggelegen rijvloer.

10. Wapeningstaal incl. voorspanwapening rijvloer staalbeton brug Veghel. (foto midden boven en links)

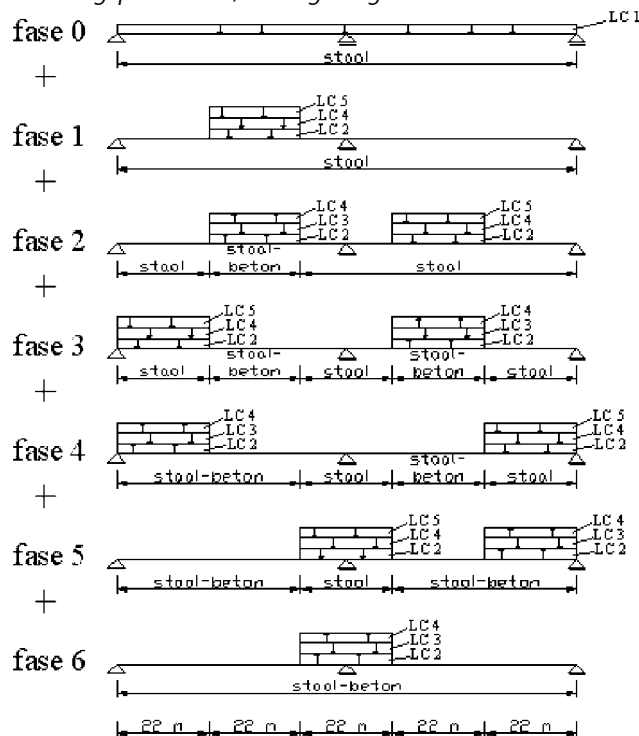


12. Traditionele stort-/montage volgorde.

14. Aangepaste stort-/montage volgorde



13. Belastingwijzen bij storten van achter elkaar liggende moten.



15. Belastingwijzen bij aangepaste stortvolgorde.

beton bij het tussensteunpunt reeds is gestort, grote trekspanningen in het beton kunnen optreden. De verschillende te onderscheiden belastingwijzen (fase 0 – fase 6) voor een ligger doorgaand over drie steunpunten staan afgebeeld in fig. 13.

De bijbehorende vijf belastinggevallen zijn:

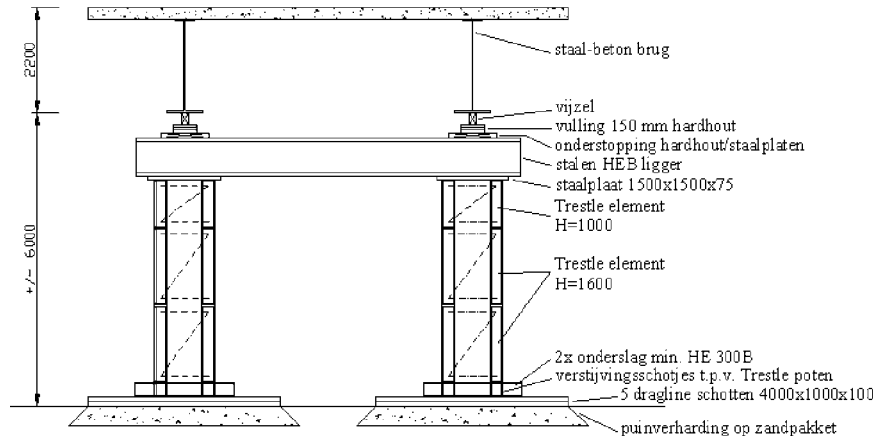
- LC1 eigengewicht stalen ligger
- LC2 eigengewicht onverhard beton
- LC3 eigengewicht verhard beton

- LC4 eigengewicht bekisting
- LC5 overige nuttige belasting (personeel, materiaal, materieel)

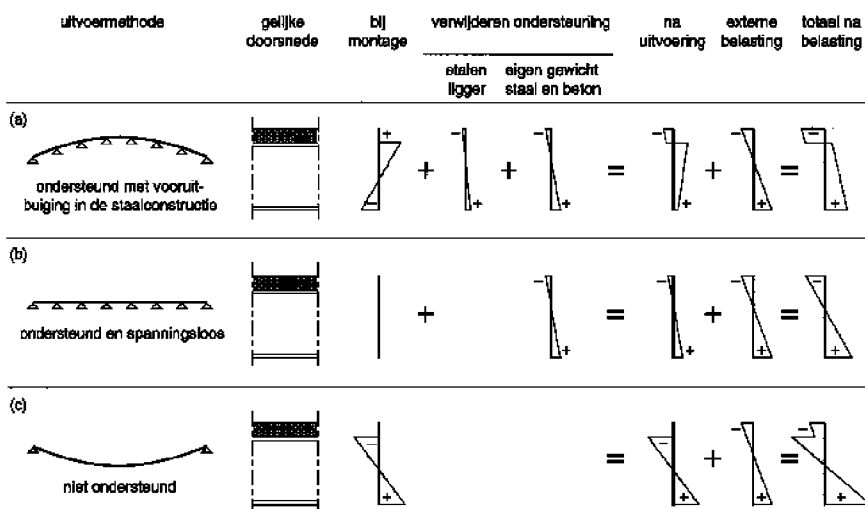
Een aangepaste stortvolgorde, de tussensteunpunten als laatste, kan een aanzienlijke reductie van de trekspanning in het beton opleveren. Echter, er zijn meer handelingen met bijv. de bekisting nodig, waardoor de bouwtijd toeneemt.



16. Praktijkttoepassing gebruik van hulpsteunpunten.



17. Geschematiseerde weergave van een hulpsteunpunt.



18. Rekverdeling bij verschillende montagemethoden.



### b. Inzet van hulpsteunpunten

Hiermee wordt de staalspanning in de bouwphase gereduceerd. Nadat het beton is verhard worden de hulpsteunpunten verwijderd en ontstaat een nieuw evenwicht.

Twee montagethoden zijn te onderscheiden:

- ondersteund met opbuiging van de staalconstructie
- ondersteund maar spanningsloos.

Voor de situatie dat er geen hulpsteunpunten worden gebruikt vormt het gewicht van het onverharde beton, dat geen stijfheid kent en waardoor de deuwelwerking niet actief is, een belasting op enkel de staalconstructie.

#### Ondersteund, met opbuiging in de staalconstructie

Als de stalen ligger door middel van de ondersteuning wordt opgebogen, zal deze vervorming leiden tot trek in de bovenflens van de stalen hoofdconstructie en dus ook in het overgangsgebied van staal naar beton. Na verharding van de betonnen rijvloer en verwijdering van de ondersteuning zal een nieuw evenwicht ontstaan. De spanningen in de stalen hoofdconstructie verminderen en het eigen gewicht van de staalbeton brug zal worden gedragen door de staalbeton constructie. Het beton wordt dan op druk 'voorgespannen'.

#### Ondersteund maar spanningsloos

Bij deze uitvoeringswijze wordt de staalconstructie over de volle lengte ondersteund zonder opgedrongen vervorming. Tijdens de montage ontstaan dan nauwe-

lijks spanningen in de stalen liggers. Na het verwijderen van de ondersteuning (hulpsteunpunten) veroorzaakt het totale gewicht van de staalbeton brug spanningen in de staalbeton doorsneden. De ondersteuning worden pas verwijderd wanneer de staalbeton constructie volledig samenwerkt.

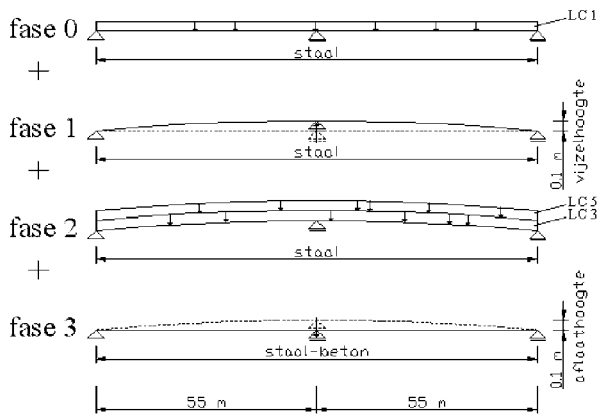
In fig. 18 wordt het effect van de het toepassen van hulpsteunpunten toegelicht door de invloed op de spanningen in een staalbeton doorsnede te laten zien. Het geval waarbij geen hulpsteunpunten zijn toegepast is tevens getoond, zodat er een goede vergelijking mogelijk is. Na verwijderen van een tussensteunpunt moet de oplegreactie als permanente belasting aan de constructie worden toegevoegd.

### c. Opgelegde steunpuntverplaatsing

Voor een statisch onbepaald systeem kan de spanningsverdeling sterk worden beïnvloed door vijzelen en aflaten van (tussen)steunpunten. Drie montage-methoden zijn te onderscheiden:

- vijzelen van alle tussensteunpunten en na activering deuwelwerking aflaten van deze middenopleggingen
- het beurtelings vijzelen en aflaten van de tussensteunpunten
- aflaten van de eindsteunpunten en na activering deuwelwerking vijzelen van deze steunpunten.

De mate waarin de spanningsverdeling wordt beïnvloed is sterk afhankelijk van de toegepaste vijzelhoogte.



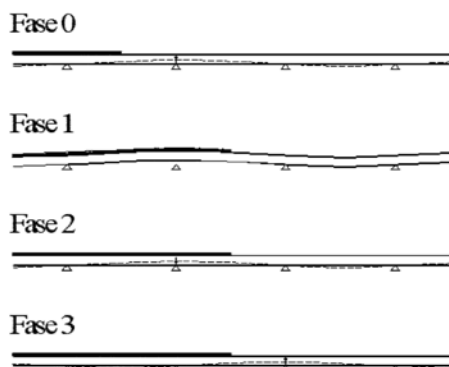
19. Belastingwijzen bij opgelegde steunpuntsverplaatsing.

#### Aflaten van middenopleggingen

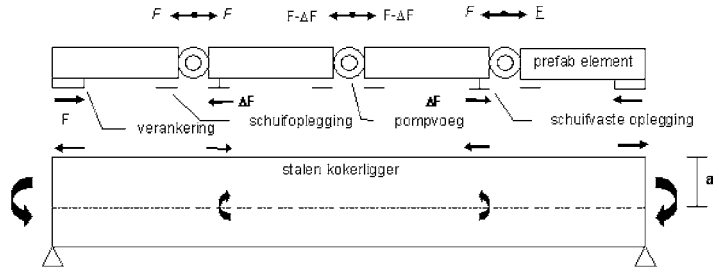
Bij liggers op drie of vier steunpunten is het mogelijk de betonnen rijvloer te storten op de stalen bovenflens van de staalconstructie waarvan de middenopleggingen omhoog zijn gevijzeld. Hierdoor ontstaat een trekvoorspanning in het bovenste gedeelte van de staalconstructie. Na het storten en verharden van het beton worden de middenopleggingen afgelaten, waardoor een voorspanning (druk) in het beton ontstaat. Een na-deel is dat door krimp en kruip een deel van die voorspanning weer verloren kan gaan, maar het uiteindelijke resultaat blijft voordelig voor de spanningen in het beton. Een bijkomend voordeel is dat deze methode een reductie van de onderflenzen ter plaatse van de middenopleggingen mogelijk maakt.

**Beurtelings opvijzelen en aflaten van middenopleggingen:** Voor bruggen met veel steunpunten bestaat de volgende methode: de eerstvolgende oplegging waar nog geen beton is gestort wordt omhoog gevijzeld. Nadat het gedeelte boven de oplegging is gestort en verhard (tot aan de helft van de volgende overspanning), wordt het steunpunt afgelaten en wordt het volgende steunpunt opgevijzeld. Dit wordt bij de gehele brug toegepast. Ook hier verdwijnt een deel van het effect (drukspanning in het beton) door krimp en kruip.

#### Opvijzelen van eindopleggingen:

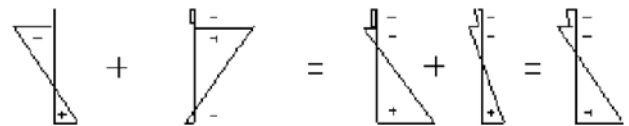


De werking is dezelfde als bij de twee eerder besproken methoden, echter nu worden, in plaats van de middenopleggingen, de eindopleggingen eerst afgelaten en na het storten en verharden van beton opgevijzeld. Voor doorgaande bruggen over meerdere steunpunten (meer dan drie) heeft deze methode weinig effect op de trekspanningen van de betonnen rijvloer ter plaatse van de middenopleggingen van de brug. Voor een brug met drie steunpunten is het resultaat van deze



20. Krachtsverdeling van de pompvoeg en werkvolgorde voegvulling.

bij montage	na aanbrengen pompvoeg spanning	na uitvoering	extreme belasting	totaal na belasting
-------------	---------------------------------	---------------	-------------------	---------------------



21. Spanningsverdeling behorende bij montage met pompvoeg.

methode gelijk aan die van de methode waarbij het middensteunpunt wordt afgelaten.

#### d. Bepaald tijdstip van de uvelactivering

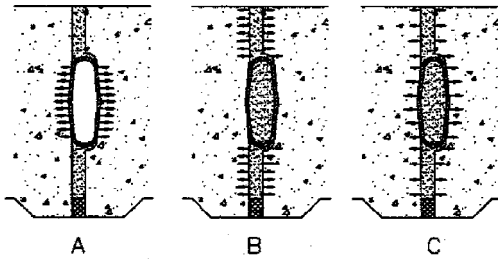
Tijdens storten van het beton worden inkassingen opgenomen waar groepen deuvels aanwezig zijn. Nadat het beton verhard is worden deze inkassingen volgestort, waarmee een constructieve samenwerking tussen staal en beton wordt bereikt. Trek in het beton kan alleen worden veroorzaakt door belastinggevallen als krimp, temperatuursprong en veranderlijke belasting. De groepering van deuvels veroorzaakt lokaal grote afschuifkrachten.

#### e. Voorspannen in langsrichting

Een traditionele methode is het toepassen van een inwendige of uitwendige voorspanwapening. Een in Nederland ontwikkelde, nog niet in de praktijk toegepaste methode is de staalbeton brug met pompvoeg. Uitgangspunt van dit concept is het gebruik van prefabelementen en een twee-assige drukvoorspanning. Bij dit concept (afb. 20), worden prefabelementen, in dwarsrichting reeds van voorspanwapening voorzien, onderling van een voegbuis voorzien. Na plaatsing van alle elementen wordt de buis onder hoge waterdruk gebracht. De elementen hebben hierbij een eenzijdige vaste oplegging en zijn in verticale richting gefixeerd tegen opwippen.

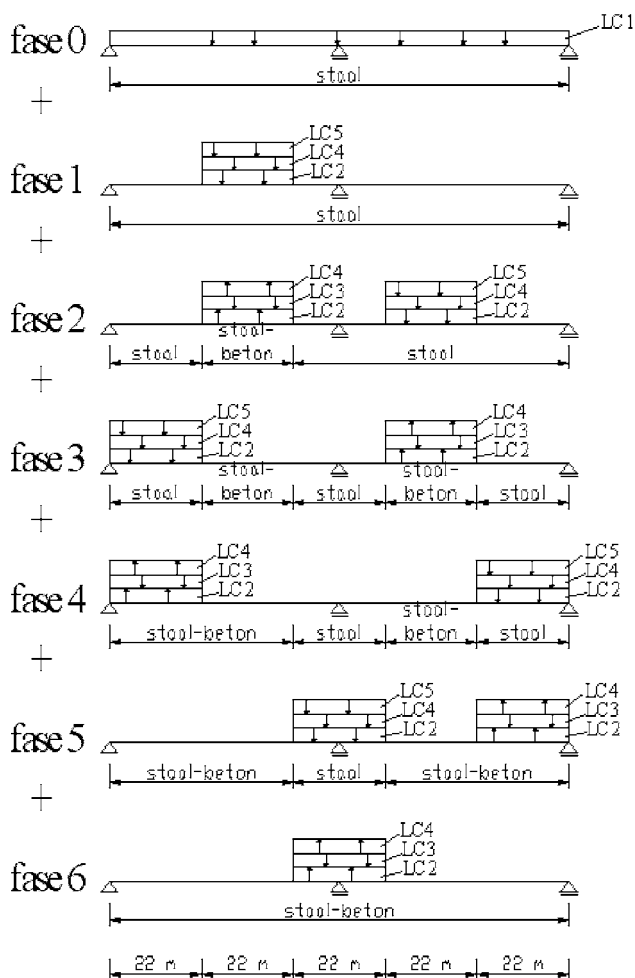
Door de hoge druk, bijv. 400 bar, vervormt de buis en duwt daarmee de prefab elementen opzij. Door de zijdelingse verplaatsing ter plaatse van een liggeruiteinde te verhinderen door de platen aan de stalen ligger te verankeren, wordt een drukkracht in het beton en een trekkracht in de stalen ligger geïntroduceerd. Deze trekkracht grijpt excentrisch aan, waardoor een gunstig opbuigend moment optreedt. Hierdoor is men in staat slanker, en dus lichter, te construeren. Om de druk te behouden wordt de voeg als volgt gevuld:

- de ruimte boven en onder de voegbuis wordt met een speciale hoge-sterkte mortel gevuld
- na verharding wordt de druk in de voegbuis afgelaten, waarna de hoge-sterkte mortel in de voeg de druk overneemt



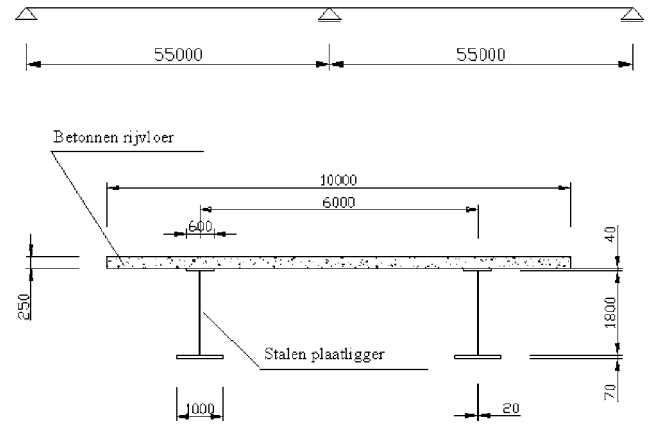
C. tenslotte wordt het water in de buis vervangen door een mortel en deze mortel wordt onder druk ge-plaatst, zodanig dat een min of meer gelijkmatige drukverdeling over de volledige voeghoogte ontstaat.

Door te letten op de voor- en nadelen van de verschillende montage-methoden met betrekking tot het spanningsbeeld kunnen alternatieven worden bedacht - combinatie van hiervoor aangehaalde montage-methoden - waarbij de spanningen in beton en staal gunstige waarden hebben. Een voorbeeld hiervan is door eerst de velden te storten, daarna ter plaatse van de steunpunten te storten en toepassen van een hulp-steunpunt in het midden van de overspanningen.

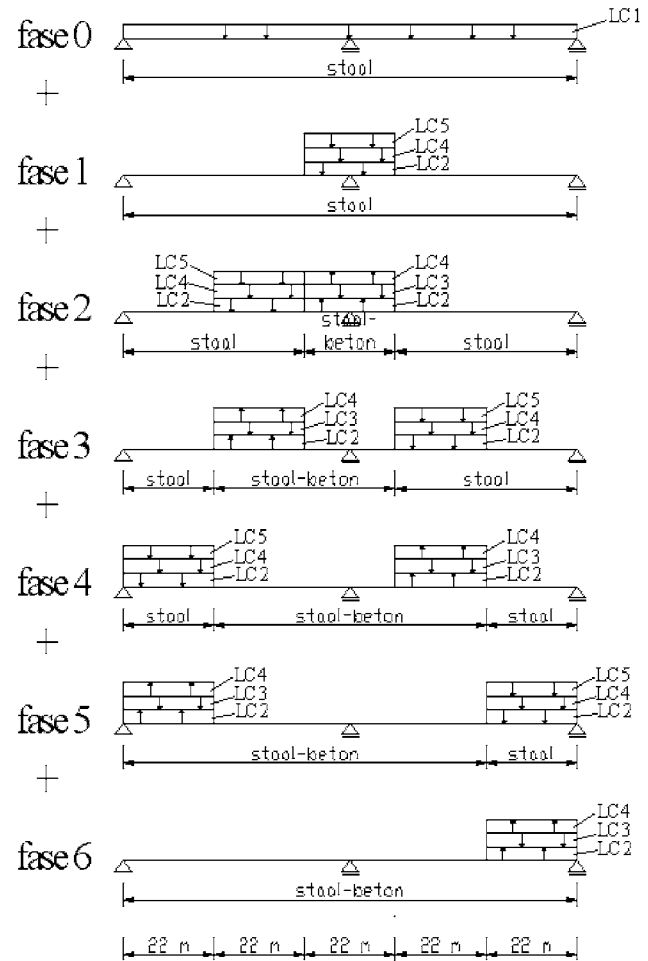


### Rekenvoorbeeld.

Een analyse, gebaseerd op eurocode gegevens, van de invloed van de verschillende montage-methoden is gegeven op de spanningsverdeling ( $t=0$ ) in een staal-beton brug. De afmetingen van de beschouwde brug is gegeven in afb. 22. De gehele brug heeft dezelfde staal- en betondoorsnede en het scheurvormingseffect van het beton(C50/60) wordt voor deze verkennende



22. Afmetingen van staalbetonbrug.



23. Belastingwijzen, links variant 1.2, rechts variant 1.3

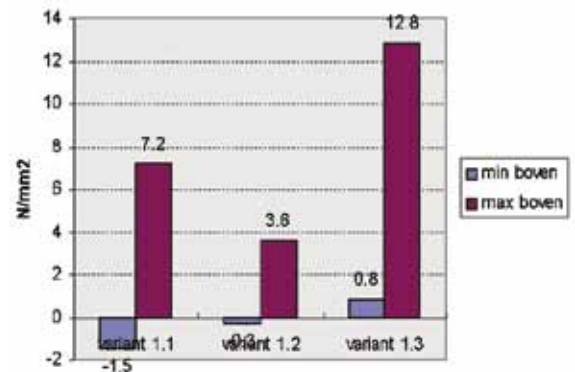
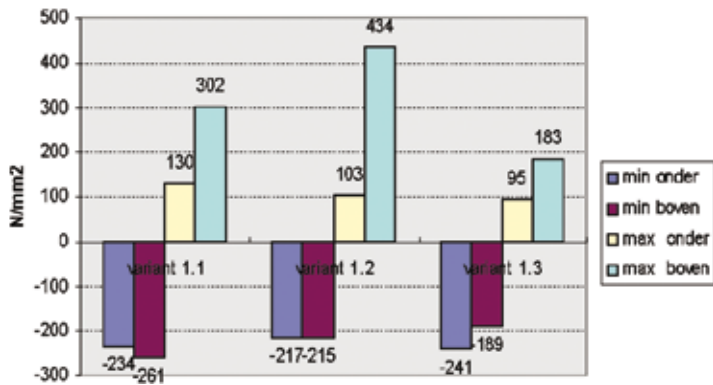
analyse niet meegenomen. De in rekening gebrachte belastingen zijn die ten gevolge van het eigen gewicht van het staal en beton, de bekisting en onvoorzien (materiaal en personen).

#### Aangepaste stortvolgorde

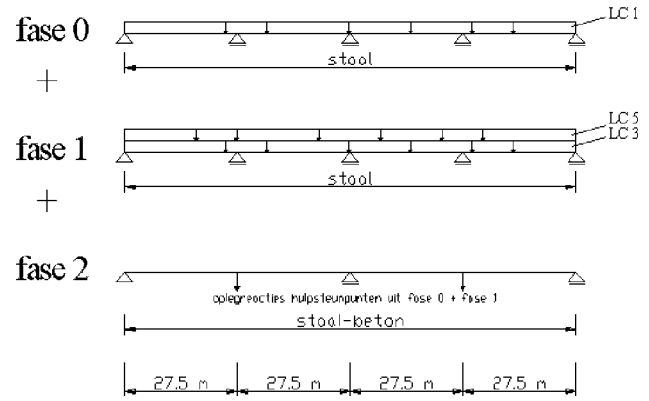
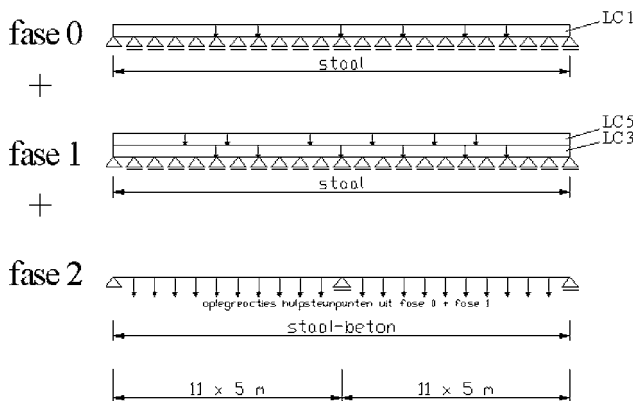
Variante 1.1: storten van achter elkaar liggende moten  
 Variante 1.2: eerst de velden storten en daarna boven het steunpunt (zie afb. 23 links)

Variante 1.3: eerst boven het steunpunt storten en daarna ter plaatse van de velden (zie afb. 23 rechts).

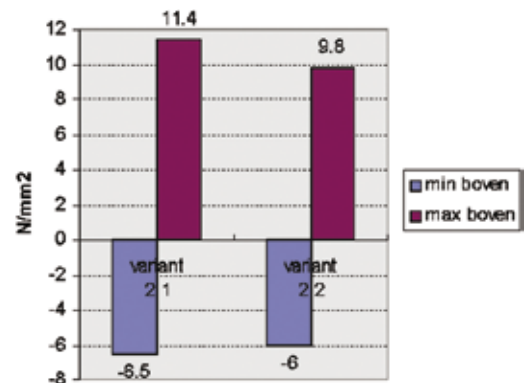
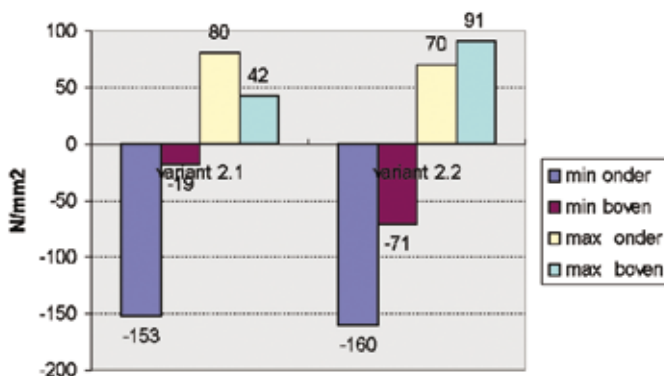
Uit afb. 24 blijkt dat variante 1.2 het gunstigst is. De trekspanning in het beton blijft beperkt tot 3.6 N/mm<sup>2</sup>. Aan de bovenkant van de stalen ligger ter plaatse van het middensteunpunt bedraagt de spanning 434 N/mm<sup>2</sup>.



24. Minimale en maximale spanningen in het staal en in het beton (staal links en beton rechts)



25. Belastingwijzen, links variant 2.1, rechts variant 2.2



26. Minimale en maximale spanningen in het staal en in het beton (staal links en beton rechts)

#### Toepassing van hulpsteunpunten

Variante 2.1: tien hulpsteunpunten per overspanning (zie afb. 25 links)

Variante 2.2: één hulpsteunpunt per overspanning (zie afb. 25 rechts).

Uit afb. 26. blijkt dat variante 2.2 het gunstigst is. De trekspanning in het beton blijft beperkt tot 9.8 N/mm<sup>2</sup>. Aan de onderkant van de stalen ligger ter plaatse van het middensteunpunt bedraagt de spanning 160 N/mm<sup>2</sup>. Gelet op de verschillen in uitkomst heeft het weinig zin veel hulpsteunpunten in te zetten.

#### Toepassing van opgelegde steunpuntsverplaatsing

Variante 3.1: tussensteunpunt omhoog vijzelen met 0.1m (zie afb. 27 links)

Variante 3.2: tussensteunpunt omhoog vijzelen met 0.5m

Variante 3.3: tussensteunpunt omhoog vijzelen met 1.0m

Variante 3.4: Begin- en eindsteunpunt aflaten met 0.1m (zie afb. 27 rechts).

Uit afb. 27 blijkt dat de vijzelhoogte die moet worden toegepast sterk afhankelijk is van de gewenste druk-

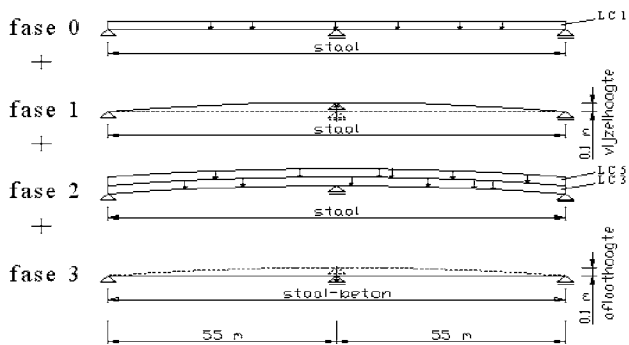
spanning in het beton. Omdat door effecten als kruip en krimp, de rustende belasting en de mobiele belasting, in de definitieve fase, trekkrachten in de betonnen rijvloer ter plaatse van het middensteunpunt ontstaan, moet de vijzelhoogte daarop worden aangepast en zal dan circa 0.5m bedragen, variante 3.2. De staalspanning vormt dan echter nog wel een probleem, daar deze oploopt tot 531 N/mm<sup>2</sup> ter plaatse van het tussensteunpunt. De benodigde maximale vijzelkracht is in dat geval 442 ton, wat in de praktijk geen enkel probleem vormt. Omdat vijzels meestal een maximale vijzelhoogte van 25cm hebben moet de brug wel een keer door andere vijzels worden overgepakt om 50cm op te kunnen vijzelen.

Een totaal overzicht van de resultaten voor de hiervoor beschreven varianten alsmede de resultaten behorende bij de varianten:

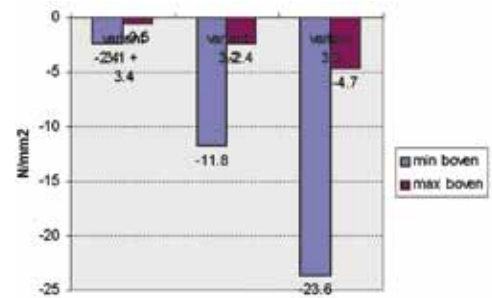
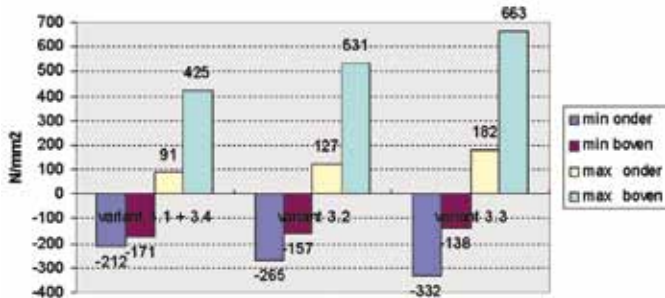
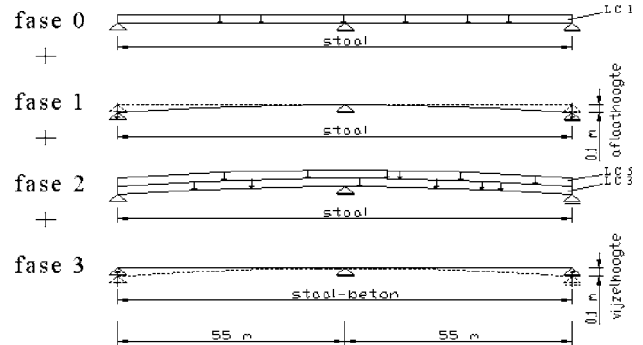
#### Tijdstip deuveldactivering:

- 4.1 deuveld achteraf activeren nadat beton is verhard
- 4.2 deuveld activeren na storten

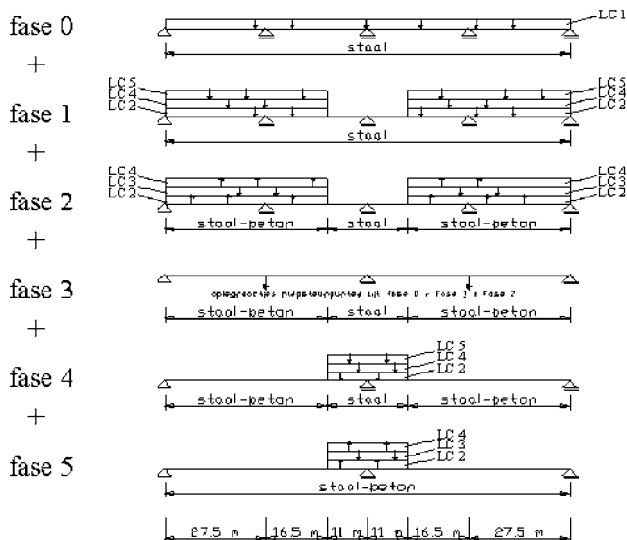




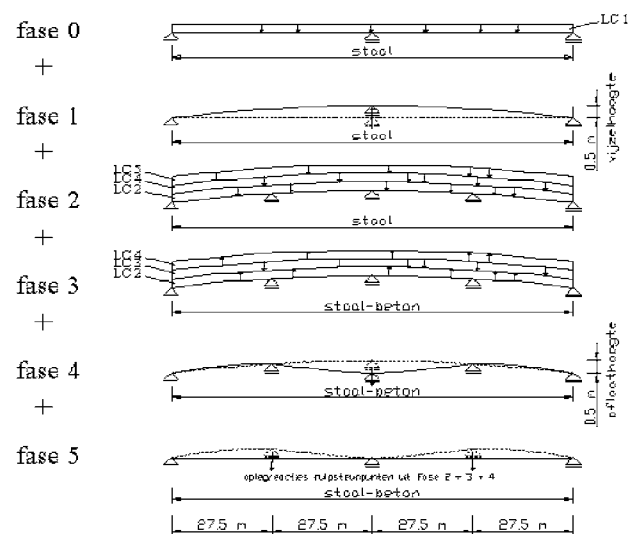
27. Belastingwijzen, links variant 3.1 en rechts variant 3.4



28. Minimale en maximale spanningen in het staal (links) en in het beton (rechts) Resultaten variant 3.4 zijn gelijk aan die van 3.1.



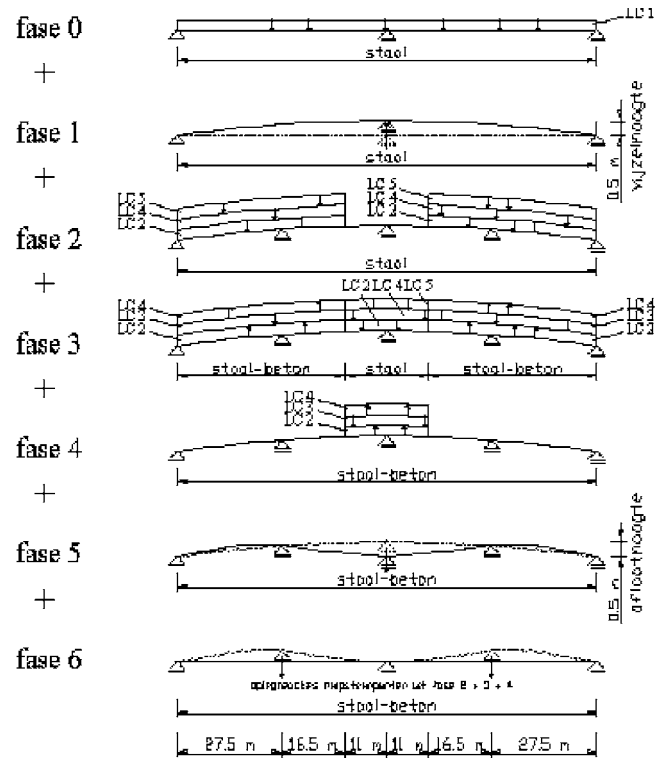
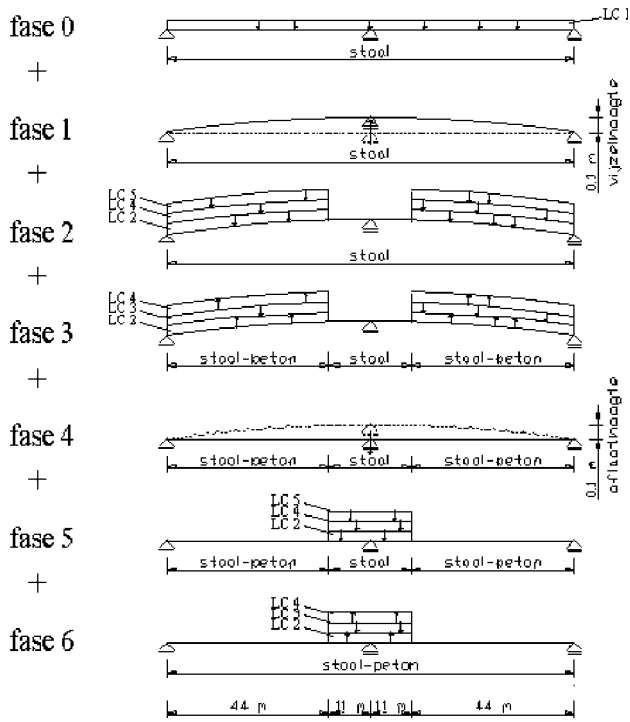
29. Belastingwijzen, links variant 5.1, rechts variant 5.2.



### Combinatie van bouwmethoden:

- 5.1 velden eerst storten, daarna de steunpunten en toepassen van een hulpsteunpunt ter plaatse van de middens van de overspanningen, afb. 29 links
- 5.2 hulpsteunpunten in het midden van de overspanningen en omhoog vijzelen van het tussensteunpunt met 0.5m (hulpsteunpunten aanbrengen nadat het tussensteunpunt omhoog is gevizeld), afb. 29 rechts
- 5.3 omhoog vijzelen van het tussensteunpunt met 0.1m en velden eerst storten, daarna boven de steunpunten, zie afb. 30 links
- 5.4 omhoog vijzelen van het tussensteunpunt met 0.5m, velden eerst storten boven het tussensteunpunt en toepassen van een hulpsteunpunt ter plaatse van het midden van de overspanningen, afb. 30 rechts

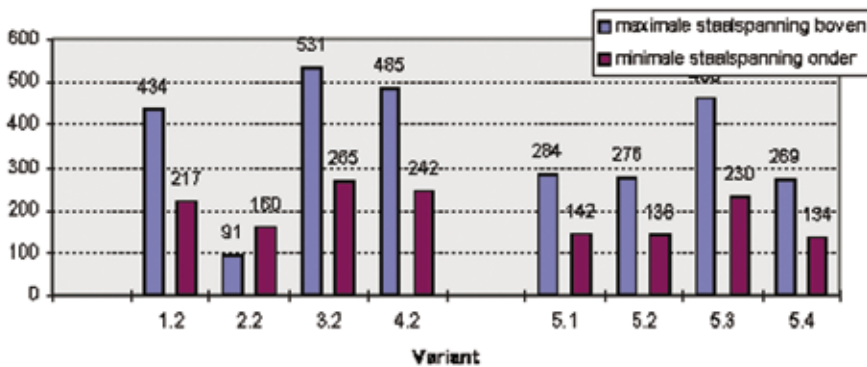
Het spanningsbeeld in de staalbeton constructie is niet het enige criterium om een keuze te maken tussen de verschillende montagemethoden. Ook de bouwsnelheid en, daarmee samenhangend, de kosten spelen een grote rol. Het kan soms beter zijn een montagemethode toe te passen waarbij grote krachten optreden (meer en/of hoogwaardiger materiaal nodig) maar waarbij de montage eenvoudig en snel kan plaatsvinden (geen of weinig hulpconstructies), dan een montagemethode waarbij de optredende krachten klein zijn, maar een ingewikkelde en langdurige montage nodig is (veel hulpconstructies). In tabel 1 staan de vier beste varianten tezamen met de varianten behorende bij combinaties van verschillende bouwmethoden, beoordeeld op de gevolgen van de gebruikte montagemethoden op het spanningsbeeld en de bouwsnelheid.



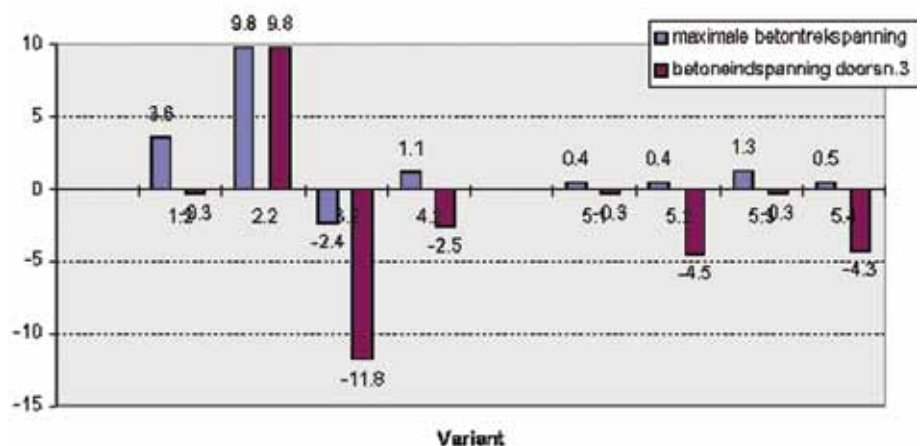
30. Belastingwijzen, links variant 5.3, rechts variant 5.4.

Tabel 1. Conclusies met betrekking tot het spanningsbeeld en de bouwsnelheid (++ = zeer goed, -- = zeer slecht)

montage methode	spanningsbeeld		bouwsnelheid			
	staal	beton	stortvolgorde	hulpsteunpunt	vijselen	deuvel activering
variant 1.2	-	-	-			
variant 2.2	++	--		-		
variant 3.2	--	++			-	
variant 4.2	--	0				-
variant 5.1	+	0	-	-		
variant 5.2	+	+		-	-	
variant 5.3	-	0	-		-	
variant 5.4	+	+	-	-	-	



31. Minimale en maximale spanningen in het staal (boven) en in het beton (onder) Doorsnede 3 is t.p.v. tussensteunpunt.



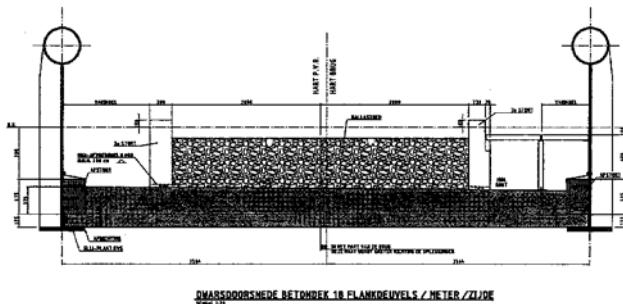
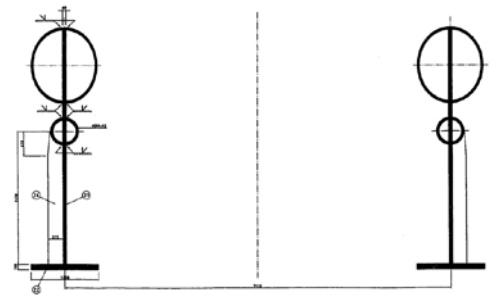
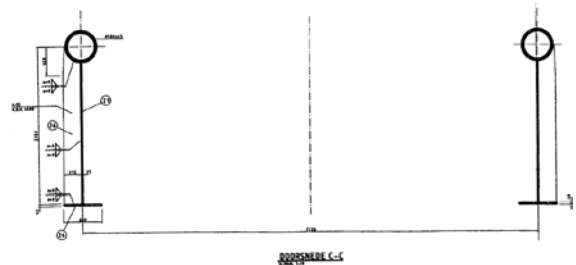
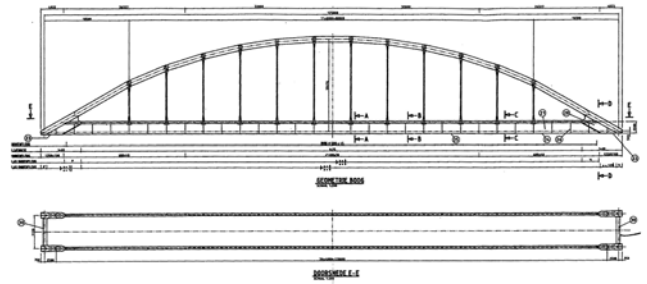
## Eerste voorbeeld: Nootdorp spoorbrug

De Nootdorp spoorbrug nabij Den Haag over de rijksweg Utrecht – Den Haag is uitgevoerd als boogbrug met trekband en heeft een overspanning van 125 m. De brug, opgeleverd in 2004, is bestemd voor enkelsporig treinverkeer, afb. 32. Zowel de boog, de koppelstaven (verband) tussen de bogen en de bovenflens van de hoofdligger is uitgevoerd als buisprofiel. De rijvloer is samengesteld uit een prefab betonvloer dik 175 mm opgelegd op de onderflens van de stalen hoofdligger (glijdend met behulp van roestvaststaalplaat) die als bekisting werkt voor het daarop in het werk gestorte beton dik 375 mm, afb. 33.

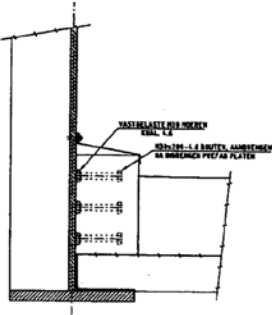
Zoals toegelicht in afb. 34 is ruimte aanwezig tussen de betonnen rijvloer en het lijf van de hoofdligger.

Deze ruimte is pas volgestort nadat de rijvloer over de volle lengte is voorgespannen. Met andere woorden het voorspanverlies eventueel veroorzaakt door verzet vanuit de staalconstructie is minimaal (enkel wrijving).

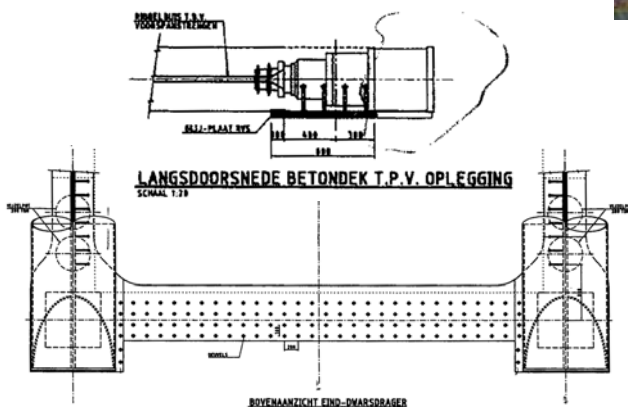
In afb. 35 zijn de voorspankabels alsmede de wapening in de vloer te zien. Een aanzicht van de voorspankabels (kopse einde van de rijvloer) is gegeven in afb. 36. Voor de lastinleiding van de spatkracht uit de boog in de rijvloer is een einddwarsdrager opgenomen, afb. 37. Voor opsluiting van ballastbed zijn randstroken als 3<sup>e</sup> stort aangebracht, afb. 33.



33. Opbouw van de dwarsdoorsnede van de rijvloer.

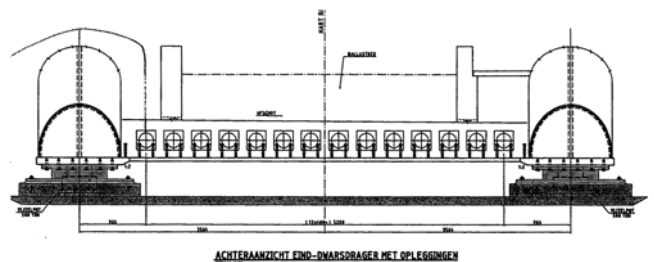


34. Aanwezige ruimte tussen betonnen vloer en stalen lijf van de hoofdligger.



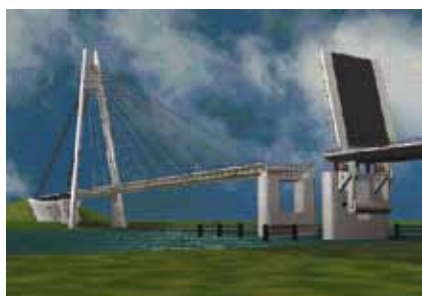
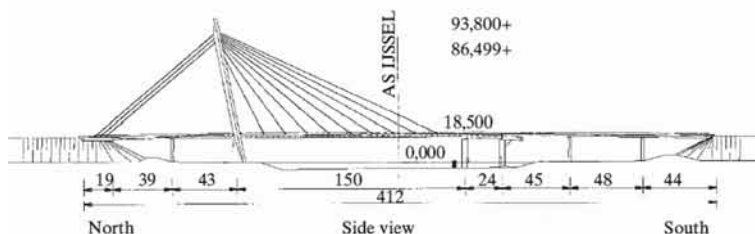
35. Voorspankabels en wapening in de rijvloer. Links is het verplaatsingsverschil te zien a.g.v. voorgespannen zijn (oranje verf)

32. Aanzicht en doorsneden Nootdorp Spoorbrug

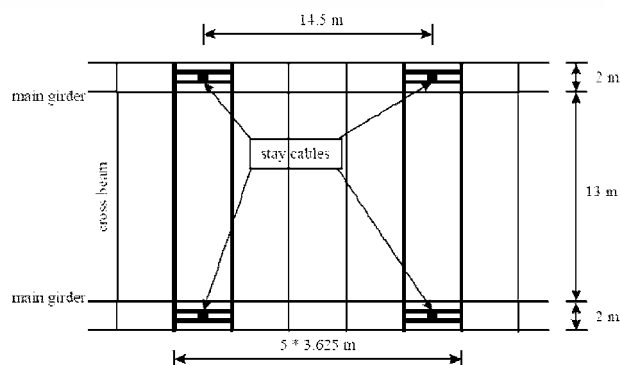
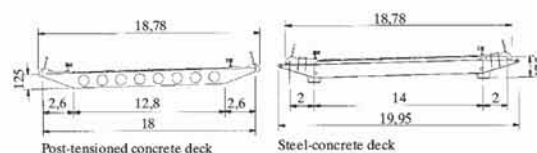


36. Aanzicht van uiteinde betonnen rijvloer met voorspanning.

37. Einddwarsdrager en schematische weergave van vijzelopstelling.



38. Aanzicht en doorsneden van de brug.



39. Schematische weergave van stalen ligger sectie.

Onderdeel	Hoogte	Breedte		Dikte		
		Bovenflens	Onderflens	Lijf	Bovenflens	Onderflens
Hoofdligger	1.5	2.2	1.0	0.02	0.02	0.04
Dwarsdrager (licht)	1.1	0.5	0.5	0.014	0.02	0.03
Dwarsdrager (zwaar)	1.1	0.5	0.75	0.014	0.02	0.04

Tabel 2: Afmetingen van dwarsdragers en hoofdligger in meters.

## Tweede voorbeeld: Staal-beton Tuibrug Kampen

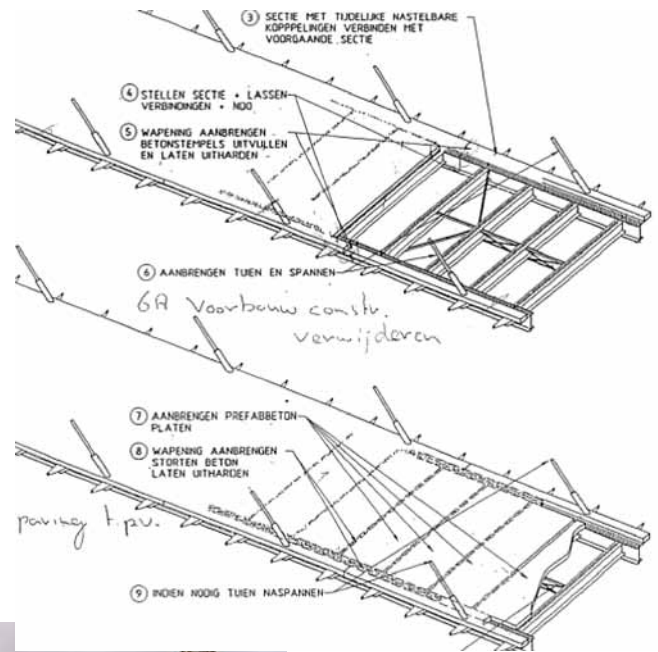
De asymmetrische tuibrug, opgeleverd in 2003, heeft een totale lengte van ruim 400 m en een pyloonhoogte van ca. 100 m (70 m boven de rijvloer). De brug heeft een hoofdoverspanning van 150 m, opgehangen aan tuikabels geplaatst hart op hart 14,5 m, en een zijoverspanning van 90 m, afb. 38, [2,3].

Voor uitbalanceren van de belasting veroorzaakt door eigengewicht en verkeer is aan het uiteinde van de zijoverspanning de fundering als contragewicht ontworpen, de eindverankeringskabels zijn hierin opgenomen. De pylonen zijn opgebouwd met behulp van een klimkist (secties van 3 m met een bouwtijd van 4 dagen) en het hangende deel van de brug volgens het zogenaamde uitbouwprincipe. De pylonen zijn massief uitgevoerd tot een hoogte van 3 m boven het dek. Daarboven is de doorsnede hol en ovaalvormig. De hoofdoverspanning is uitgevoerd met prefab stalen liggersecties lang 14,5 m, zie fig. 39 met daarop geplaatst prefab betonplaten B65m dik 250 mm. De dwarsdragers t.p.v. een kabelaanluiting zijn zwaarder uitgevoerd. De afmetingen van de stalen liggers staan samengevat in tabel 2. Voor de zijoverspanning, voorzien van een tussensteunpunt, is gewerkt met in het werk gestort en voorgespannen beton B65 met een doorsnede zoals getekend in afb. 38. Voor besparing van gewicht zijn 8 sparingsen met een diameter van 0,9 m opgenomen. In het resterende deel van de doorsnede zijn 9 groepen met in totaal 30 voorspankabels aangebracht. Zonder dit tussensteunpunt zou de gewenste dikte van de rijvloer onvoldoende zijn.

Bij een staal-beton doorsnede neemt over de tijd gezien veroorzaakt door krimp en kruip de drukspanning in het beton af, en dus neemt de staalspanning toe. Door de

toepassing van prefab betonplaten minimaal 90 dagen oud is deze herverdeling van spanning veel meer beperkt waardoor de staalspanning max. 35 N/mm<sup>2</sup> toeneemt in de tijd. De betonplaten worden ondersteund door de stalen dwarsdragers h.o.h. 3,625 m gelegen tussen twee stalen hoofdliggers. Op de dwarsdragers zelf zijn stiftdeuvels geplaatst zodat na vullen van de stortnaden sprake is van een staal-beton dwarsdrager. Waar mogelijk is in de fabriek reeds beton gestort op de bovenflens van de stalen liggers. Hiermee is voor bij transport extra stijfheid van de deksectie verkregen en een groot gedeelte van het tijdsafhankelijk gedrag is gepasseerd op moment van uitvoering op locatie. Voor de bouw van de hoofdoverspanning zijn als eerste de twee stalen ligger secties ter plaatse van de pyloon geplaatst (hoofdliggers + dwarsdragers geassembleerd: aangevoerd over water). Vervolgens is de rijvloer uitgebouwd door telkens het erbij plaatsen van een sectie die tot het moment van aan elkaar vast gelast zijn tijdelijk is opgehangen aan een driehoekvormig stalen montageframe. Na vast gelast zijn wordt het montageframe verwijderd, de tuikabels aangebracht waarvan de helft van de strengen onder spanning komt te staan, de prefab betonplaten, aangevoerd over water, aangebracht en vervolgens worden de stortnaden gevuld en de overige strengen gespannen. Als laatste is een bitumineuze slijtlaag aangebracht. De rijvloer is ter plaatse van de pyloon door middel van een betonnen dwarsdrager voorzien van blokdeuvels volledig ingeklemd aan de pyloon. Nadat de gehele rijvloer is aangebracht zijn kabelkrachten gemeten en is het alignment in kaart gebracht. De opgemeten vervormingen lagen binnen de 35 mm afwijking t.o.v. engineering gegevens wat als

heel goed kan worden aangemerkt. Voor nagenoeg de hele lengte van de brug is het beton permanent op druk belast (normaalkracht-horizontale component uit tuikabels). Alleen nabij de eindoplegging hoofdoverspanning is een zone van trek in de rijvloer (weinig normaalkracht met negatief moment: daartoe extra wapening in de prefab betonplaten aangebracht). De prefab betonplaten zijn gewapend zonder extra voorspanning. Bij op trek belast zijn van het beton is het ontwerpcriterium scheurwijdte meegenomen. Onderstaande fotoreeks [4] geeft nadere uitleg over de bouw van de brug.



### Bouw van de pyloon



## Fabricage en assemblage van de stalen rijvloer



## Aanbrengen van de rijvloer



## Derde voorbeeld: Prins Clausbrug in Utrecht

De brug, verkeersverbinding over het A'dam-Rijnkanaal tussen Utrecht en Vinex-locatie Leidsche Rijn, is uitgevoerd als een asymmetrische tuilbrug met een hoofdoverspanning van 150 m en een zijoverspanning (backspan) van ca. 80 m, zie afb. 40, [5].

De rijvloer van de hoofdoverspanning van de brug is over een afstand van ca. 80 m men een tussensteunpunt doorgezet als aanbrug.

De totale brug, gelegen tussen de stramienassen 1 – 6 is schematisch toegelicht in afb. 41.

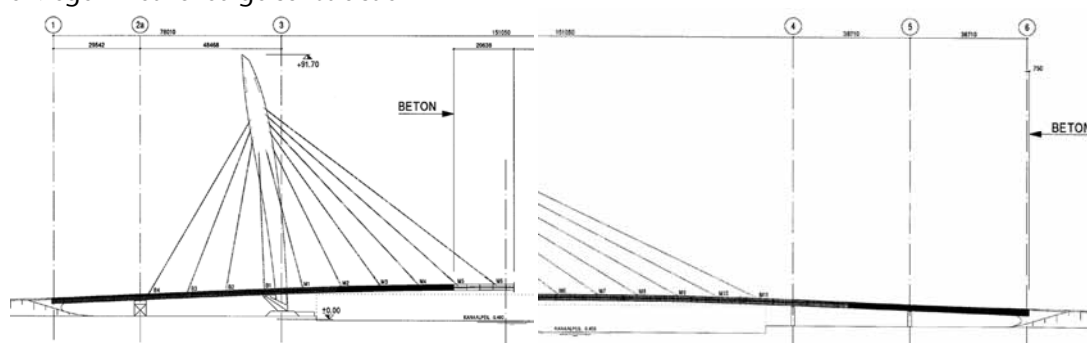
De rijvloer is opgebouwd uit een stalen frame (hoofdliggers met dwarsdragers hart op hart gem. 4485 mm) die vanaf transport over water in secties zijn ingehesen (langsdeling over de breedte van de rijvloer). De afmeting van een sectie is gebaseerd op transportmogelijkheid. Vervolgens zijn prefab betonplaten met een dikte van 130 mm en maximale afmeting van 6050 x 4650 mm aangebracht. Daarop is vervolgens beton gestort met een dikte van 120 mm zodat uiteindelijk een rijvloerdikte van 250 mm is verkregen met volledige constructieve samenwerking met het staal. De

prefab betonplaten en het in het werk gestorte beton zijn in B55 uitgevoerd. De rijvloer is voorzien van een asfaltlaag van 120 mm.

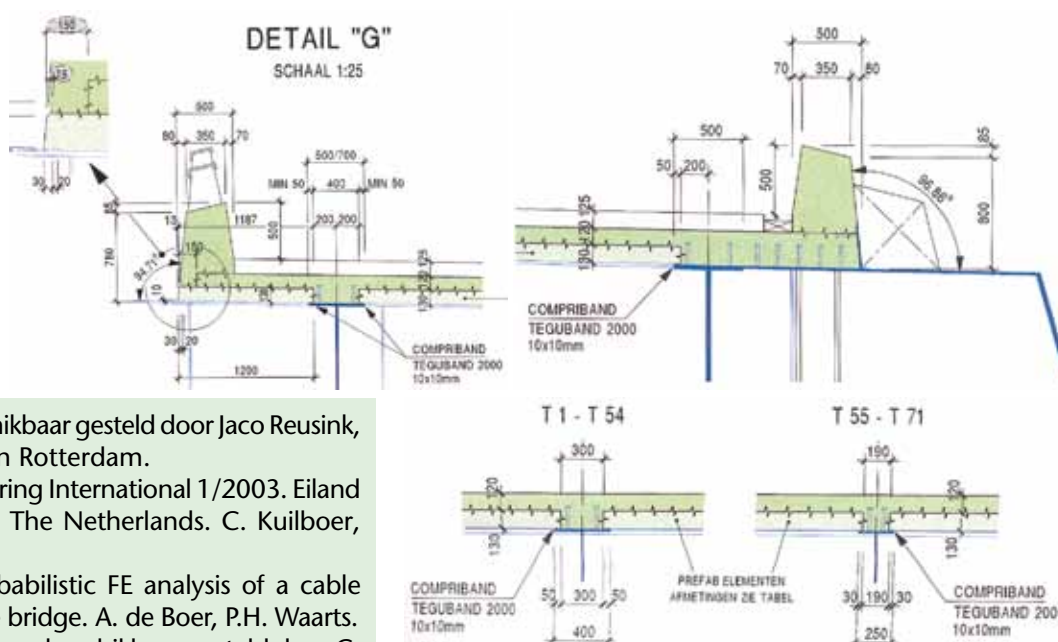
Voor de beeldvorming van de opbouw van de rijvloer worden wat afdrucken van tekeningen gegeven.



40. Prins Clausbrug te Utrecht



41. Overzicht van stramienuitvoering.

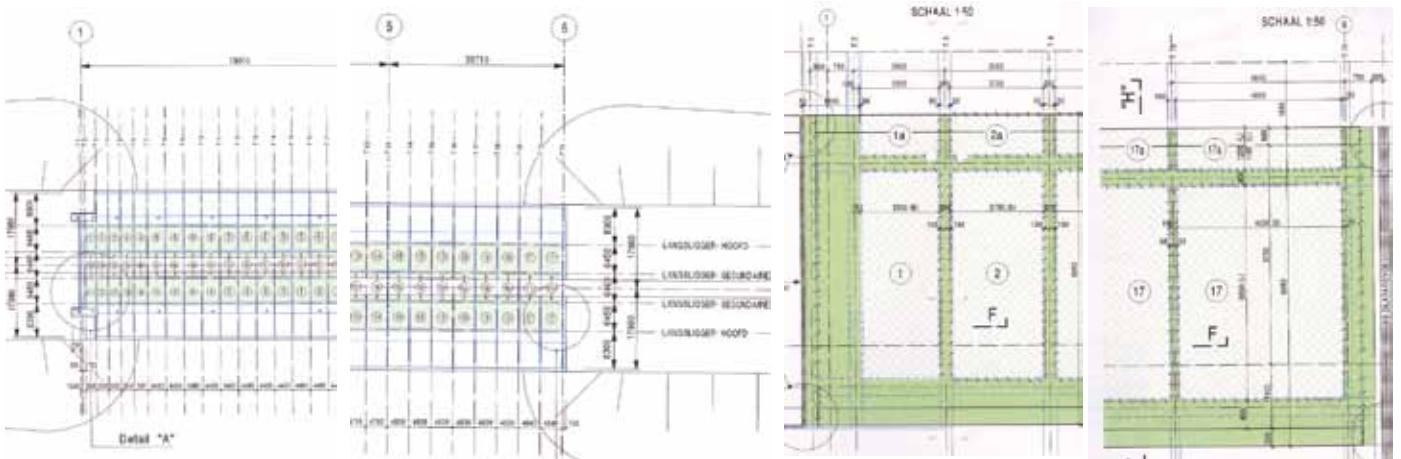


42. Doorsneden over de hoofdliggers en dwarsliggers.

### Doorsnede opbouw van de rijvloer.

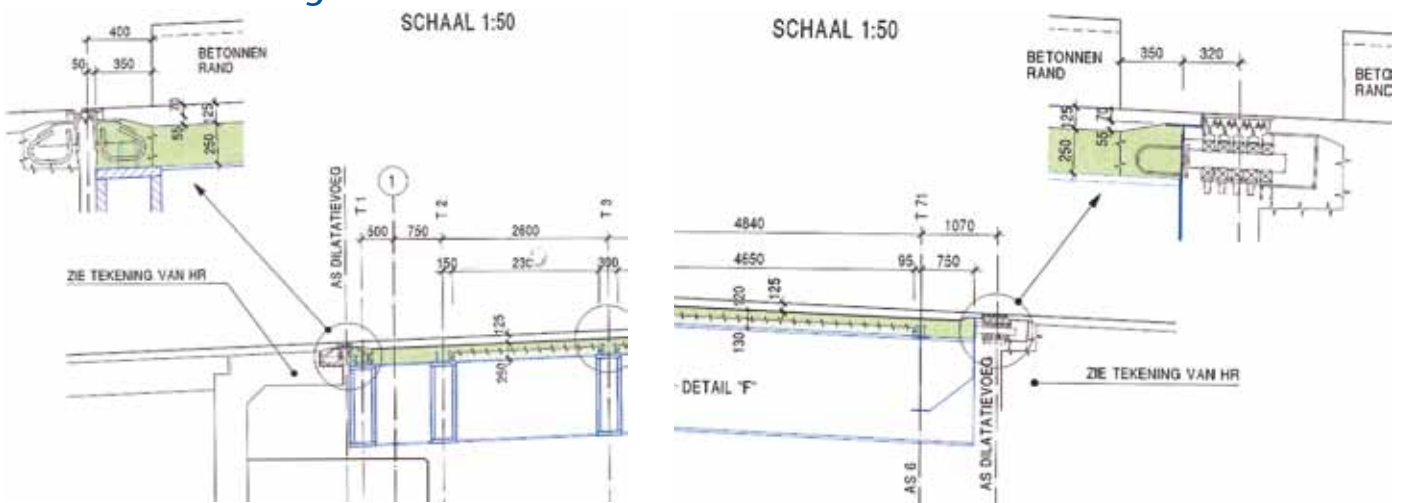
- [1] Tekeningen beschikbaar gesteld door Jaco Reusink, Gemeentewerken Rotterdam.
- [2] Structural Engineering International 1/2003. Eiland Bridge, Kampen, The Netherlands. C. Kuilboer, RWS-Tilburg.
- [3] IABSE 1999. Probabilistic FE analysis of a cable stayed composite bridge. A. de Boer, P.H. Waarts.
- [4] Foto's en tekeningen beschikbaar gesteld door C. Drijkoningen-Konijnenburg, Bouwdienst RWS-Zoetermeer.
- [5] Alle foto's en tekeningen zijn beschikbaar gesteld door Ir. K Kamp van Holland Railconsult.

**Bovenaanzicht van het eerste (stramien 1) en laatste deel (stramien 6) van de rijvloer.**



43. Bovenaanzicht van de rijvloer t.p.v. stramien (links) en stramien 6 (rechts)

**Overzicht van voegdetails.**



44. Voegovergang t.p.v. stramien 1 (links) en stramien 6 (rechts)

**De volgende fotoreeks geeft een indruk van de uitvoeringswijze van de brug.**

