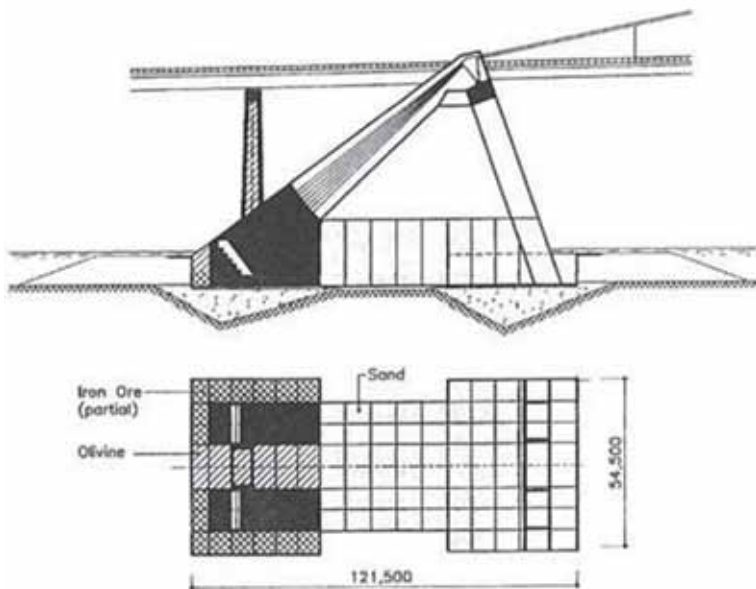
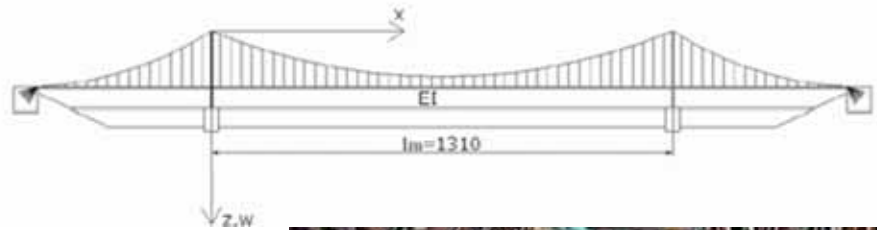


# ZELFVERANKERENDE HANGBRUG

dr. A. Romeijn, TU Delft



1. Voorbeeld van de aansluiting kabel – fundering (rotswand).

2. Great Belt hangbrug met links schematisch weergegeven de fundering.



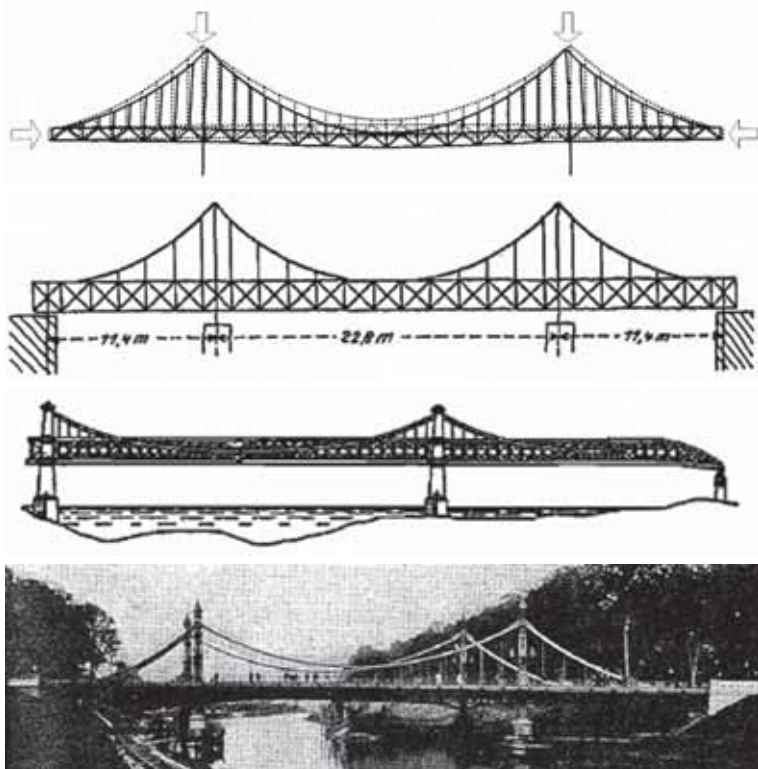
## Klassieke hangbrug versus zelfverankerende hangbrug

Bij een klassieke hangbrug wordt de trekkracht in de hoofdkabel volledig naar de fundering overgebracht (afb. 1). Dit heeft als nadeel een kostbare fundering en een lange bouwtijd.

Een sprekend voorbeeld waarbij een zwaar verankeringsblok in de vorm van een caisson gevuld met respectievelijk steenslag, zand en schrootijzer is toegepast is de Great Belt Bridge (afb. 2).

Een zelfverankerende hangbrug is een brug waarbij de horizontale kracht uit de hoofdkabel niet naar de ondergrond (rotswand of verankeringsblok) wordt afgevoerd maar de kracht, die aan beide uiteinden van de brug werkzaam is, wordt kortgesloten via de rijvloer (afb. 3).

Een dergelijke brug zou dus goed toepasbaar kunnen zijn in gebieden met een slechte grondslag en/of een hooggelegen rijvloer. Daarmee komen we gelijk bij het grootste nadeel van een zelfverankerende hangbrug namelijk het gehele brugdek moet gereed zijn voordat de kabels kunnen worden aangebracht. En moeten dus tijdelijke voorzieningen worden getroffen om het eigen gewicht van de rijvloer te ondersteunen. Het concept van zelfverankerend zijn is qua ontwerp een logisch uitgangspunt. Immers krachten direct kortsluiten in plaats van afzonderlijk afdragen is "boerenlogica". We zien het systeem van zelfverankerend dan ook bij veel bruggen toegepast. Bijvoorbeeld bij een boogbrug met trekband waarbij de spatkracht uit de boog via trek in de rijvloer wordt kortgesloten. Een ander voorbeeld is de tuibrug waarbij de horizontale krachten als gevolg van de schuin lopende tuikeblen en de eindverankeringkabels grotendeels onderling via druk in de rijvloer worden kortgesloten.



Van boven naar beneden:

3. Principe krachswerking zelfverankerende hangbrug.
4. Ontwerp Warsowicer brug uitgevoerd door Josef Langer.
5. Patent zelfverankerende hangbrug op naam van Bender.
6. Mühlenthor brug.



7. Cologne-Deutz brug 1915
8. Krefeld-Uerdingen brug 1935
9. Duisburg brug 1955

### Voorbeelden van zelfverankerende hangbruggen De eerste aanzet van voor 1955

De eerste ideeën van Oostenrijkse en Amerikaanse ingenieurs op het gebied van zelfverankerende hangbruggen zijn ontstaan in het midden van de 19e eeuw. In 1859 heeft de Oostenrijkse ingenieur Josef Langer als eerste een ontwerp gepresenteerd. Een illustratie van zijn voorstel is gegeven in afb. 4. De brug met een hoofdoverspanning van 22,8 m was bestemd voor zwaar treinverkeer.

In 1867 heeft de Amerikaanse ingenieur Charles Bender patent gekregen voor de zelfverankerende hangbrug (afb. 5).

Opvallend aan beide ontwerpen, afb. 4 en 5, is de zware rijvloer en de extra bevestiging van de kabel aan de rijvloer in het midden van de hoofdoverspanning. De eerste zelfverankerende hangbrug waarbij de kabel alleen aan de uiteinden van de brug is gekoppeld is de Mühlenthor brug, afb. 6. De brug gebouwd in 1899 ligt over de Elbe-Trave Canal bij Lübeck en heeft een hoofdoverspanning van 42 m en twee zijoverspanningen van 19,7 m.

Tussen 1915 en 1955 zijn verschillende zelfverankerende hangbruggen over de Rijn gebouwd met een beduidend grotere overspanning dan voorheen. Enkele voorbeelden hiervan staan hierna beschreven.

#### Cologne-Deutz brug 1915 (afb. 7)

De hoofdoverspanning is 185 m en de zijoverspanning zijn elk 92 m. De hoofdkabel bestaat uit schakels (ketting). Tijdens de uitvoering is de brug ondersteund door vier tijdelijke steunpunten. Als eerste zijn de zijoverspanningen gebouwd en vervolgens de hoofdoverspanning. De bouw heeft twee jaar geduurd en in 1945 is de brug vernietigd. Na de Tweede Wereldoorlog is er een stalen kokerliggerbrug geplaatst.

#### Cologne-Mülheim brug 1929

De hoofdoverspanning is 315 m en de twee zijoverspanningen zijn elk 91 m. De brug is nog steeds de zelfverankerende hangbrug met de grootste overspanning. Vergeleken met de Cologne-Deutz brug is het eigen gewicht sterk gereduceerd tot 28 ton per meter. Dit kwam voornamelijk door het toepassen van een parallel wire strand kabel. Voor de bouw van de hoofdoverspanning is gewerkt met twee tijdelijke extra steunpunten. De bouw duurde 27 maanden en in 1950 is de brug vervangen door een niet zelfverankerende hangbrug. In circa 2013 zal de brug qua grootste overspanning worden overtroffen door de thans in aanbouw zijnde San Francisco-Oakland Bay bridge, hierover later meer.

#### Krefeld-Uerdingen brug 1935 (afb. 8)

De brug is gebouwd conform het concept van uitbouwmethode (cantilever) en daarom waren er geen tijdelijke steunpunten nodig. De hoofdoverspanning is 250 m en de twee zijoverspanningen zijn 125 m. In 1945 is de brug vernietigd en daarna in zijn oorspronkelijke vorm weer herbouwd.



10. The three sisters  
11. De Konohana bridge  
12. De Yeongjong Grand Bridge

#### Duisburg brug 1955 (afb.9)

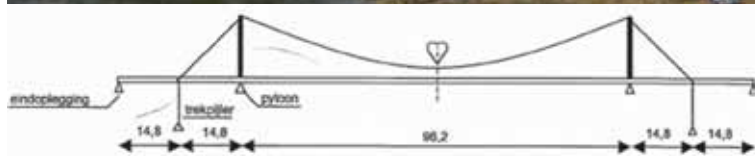
Deze brug is de laatste van de serie over de Rijn in Duitsland en voor het eerst is nu een stalen orthotrope rijvloer toegepast. Hiermee is een aanzienlijke reductie van het eigen gewicht gerealiseerd. De hoofdoverspanning is 285 m en de twee zijoverspanningen zijn 128 m.

Na deze brug zijn geen serieuze zelfverankerende hangbruggen meer in Duitsland gebouwd. Dit kwam door de opmars van de tuibrug ingegeven door met name de bouw van de succesvolle Stromsund brug in Zweden. Deze brug was de aanleiding tot bouw van vele tuibruggen over de Rijn, Voor 1967 zijn in korte tijd 5 tuibruggen over de Rijn gerealiseerd. Hiermee raakte de zelfverankerende hangbrug min of meer uit de gratie.

In dezelfde periode als in Duitsland zijn ook in Amerika verschillende zelfverankerende hangbruggen gebouwd. Enkele voorbeelden zijn:

- Six Street Bridge (Robert Clemente Bridge) 1928
- Seventh Street Bridge (Andy Warhol Bridge) 1926
- Ninth Street Bridge (Rachel Carson Bridge) 1928
- Little Niangua River Bridge 1933
- Hutsonville Bridge 1939.

Een bijzonderheid van de Ninth Street Bridge (afb.10) is dat het hierbij gaat om drie naast elkaar gelegen zelfverankerende hangbruggen (in volkstaal genoemd "the three sisters"). De bouw van drie nagenoeg identieke bruggen maakte het economisch mogelijk te kiezen voor dit concept.



13. Kanne brug  
14. San Francisco-Oakland Bay bridge



#### Recent gebouwde zelfverankerende hangbruggen

De meeste met een noemenswaardige overspanning zijn gebouwd in Azië.

Een tweetal voorbeelden wordt nader toegelicht.

#### De Konohana bridge (afb. 11)

De brug is gerealiseerd in 1990 en kent een hoofdoverspanning van 300 m. Het is de eerste brug met een overspanning die komt in de buurt van de Cologne-Mülheim brug uit 1929. De rijvloer is zo ontworpen dat die tijdens de bouw een overspanning van 120 m aankan.

#### De Yeongjong Grand Bridge (Afb. 12.)

Dit is de eerste brug waarbij de hangers in dwarsrichting van de brug hellend zijn uitgevoerd, het zogenoemde spatial systeem. Dit is in Azië de brug met de grootste overspanning, de hoofdoverspanning is 300 m. Het is de eerste zelfverankerende dubbeldeksbrug met een combinatie van wegverkeer en treinverkeer.

Dichter bij huis is in 2005 in België gebouwd de Kanne brug. (afb. 13.) De hoofdoverspanning is 96,2 m en de zijoverspanningen zijn elk 21,3 m. De hoofdkabels, geprefabriceerde parallel wire strand, zijn niet doorlopend over de pyloontop.

In San Francisco wordt thans de grootste zelfverankerende hangbrug gebouwd, zie afb. 14. De hoofdoverspanning is 385 m en de twee zijoverspanningen zijn elk 180 m.

Een bijzonder aspect bij deze brug is dat aan één kant van de brug de kabel met behulp van een zadelcon-



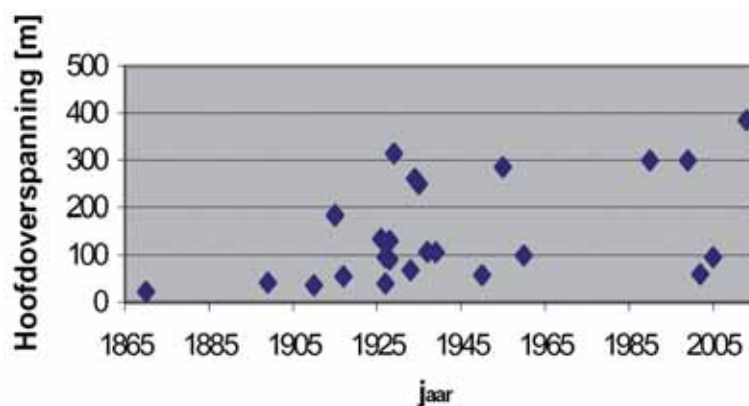
15. Nesciobrug. Ref. Wikipedia

structie rondom is doorgezet. Dit brugtype is gekozen omdat de grondslag de klassieke oplossing vrijwel onmogelijk maakt. De rijvloer bestaat uit twee afzonderlijke orthotrope stalen kokerliggers die om de 10 m gekoppeld zijn door een dwarsdrager met een hoogte van 5 m. Bij het ontwerp is veel aandacht besteed aan aardbevingbelasting. In 1989 is door de Loma Prieta aardbeving met een kracht van 7.1 op de schaal van Richter het oostelijke gedeelte van de San Francisco-Oakland Bay Bridge vernietigd. Hierbij viel het bovendek op het onderdek.

### Recent Nederlands voorbeeld

Een bekend Nederlands voorbeeld van een zelfverankerende hangbrug is de Nesciobrug, afb. 15. Het is de langste fiets- en voetgangersbrug van Nederland en de brug zorgt voor een snelle verbinding tussen Amsterdam IJburg en Diemen. De naam komt van de Nederlandse prozaschrijver Nescio omdat hij vaak lange wandelingen maakt op de Diemerzeedijk en zijn belevenissen daarvan in zijn literair werk (1918) opnam. De brug is ontworpen door Jim Eyre van het Londense bureau WilkinsonEyre in samenwerking met ingenieursbureau Arup.

De lengte van de toeleidende wegen bedragen resp. 255 en 270 m, zodat een goed begaanbare helling voor de gebruikers bestaat. Samen met de betonnen oprit is de brug 790 m lang, terwijl de staalconstructie 220 m lang is en de hoofdoerspanning van 170 m een doorvaarthoogte van 9.3 m over het kanaal biedt. De hoofdoerspanning is opgehangen aan één hoofdkabel. Zoals te zien in afb. 15 is het dek in plattegrond gebogen en splitst het zich aan elk van de uiteinden om de stijfheid in dwarsrichting van de brug te verbeteren. Hiermee zijn de fiets- en voetpaden in eerste instantie gescheiden en komen ze samen binnen de hoofdoerspanning. De hoofdoerspanning bestaat uit een stalen kokerligger waarvan het element vloeiend verandert

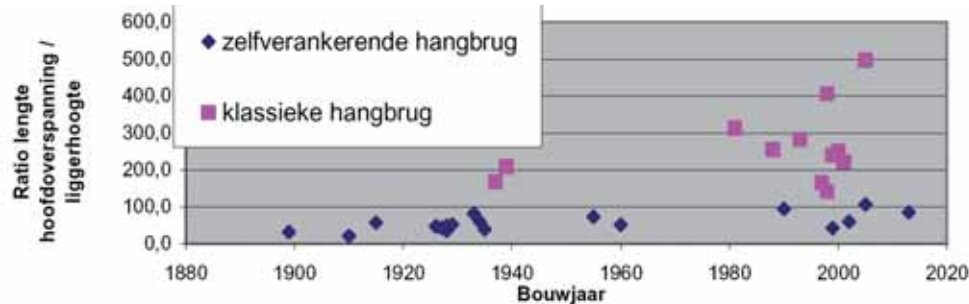
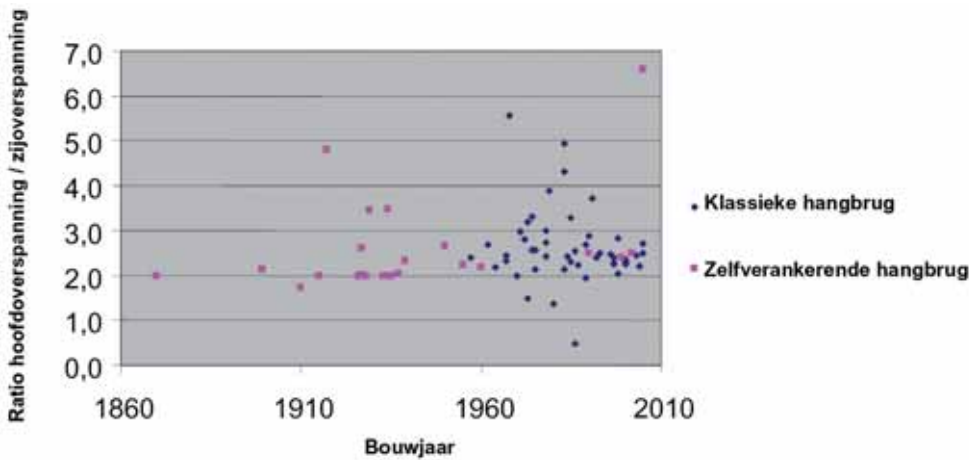
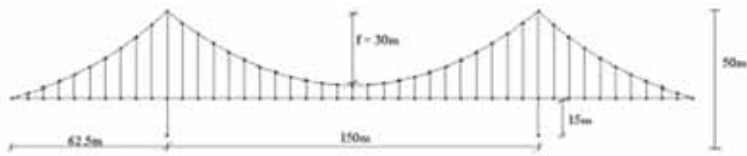


16. Ontwikkeling van de hoofdoerspanning van zelfverankerende hangbruggen.

van een driehoekige doorsnede in het midden naar een minder hoge doorsnede die overgaat in de betonnen oprit. Gelet op het gewenste passagierscomfort heeft het bureau Arup veel aandacht besteed aan de dynamische effecten waaronder het toepassen van massablokken met visceuze dempers om bewegingen in dwarsrichting te temperen.

### Redenen van toepassing van zelfverankerende hangbrug

Voor de meeste toepassingen geldt dat de hangbrug, in plaats van bijvoorbeeld een boogbrug of een tuibrug, wordt gekozen niet om technische of economische redenen maar om esthetische redenen. Zowel voor de bruggen over de Rijn als de Pittsburgh bruggen gold de slechte grondslag als argument om een zelfverankerende hangbrug toe te passen. Voor zowel de Konohana brug als de Yeongjong Grand brug met beide een open karakter van havengebied gold dat geen zware verankeringsblokken konden worden toegepast. De dimensies daarvan zouden een te grote aanslag zijn op de vrije ruimte. Vrijwel alle zelfverankerende hangbruggen zijn uitgevoerd in staal. Van de meeste zelfverankerende hangbruggen liggen de overspanningen tussen 40 en 140 m, afb. 16. Deze afbeelding laat tevens zien dat na 1955, veroorzaakt door de succesvolle opkomst van de



17. Voorbeeld van schema hangbrug met hoofdmaten.  
 18. Verhouding hoofdoerspanning / zijoverspanning.  
 19. Verhouding hoofdoerspanning / liggerhoogte.

tuibrug, de zelfverankerende hangbrug uit de gratie was. De begrenzing van de overspanning voor de zelfverankerende hangbrug wordt veroorzaakt door:

- Mogelijke knik van de rijvloer gezien de grote drukkracht
- tweede orde effecten veroorzaakt door de combinatie van grote vervorming en grote drukkracht
- aerodynamisch gedrag
- uitvoering

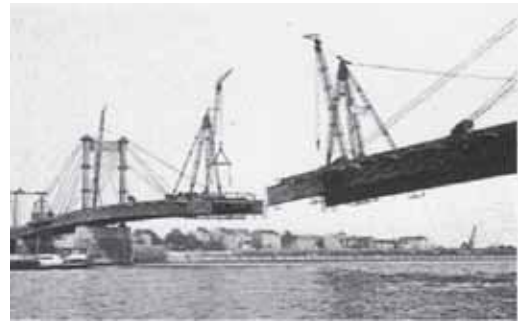
Het laatste, de uitvoering, is wel als de belangrijkste aan te duiden.

Afb. 16 laat zien dat de toepassingsrange van de zelfverankerende hangbrug sterk afwijkt van de klassieke hangbrug, waarmee een hoofdoerspanning tot circa 2 km mogelijk is.

### Kenmerken verschillen tussen een klassieke hangbrug en een zelfverankerende hangbrug

In het voorbeeld (afb. 17) gegeven bedraagt de pijl 30 m, de lengte van de hoofdoerspanning 150 m en de lengte van de zijoverspanningen is 62.5 m.

Naast het grote verschil in "gangbare" overspanning zijn andere mogelijke verschillen te traceren. Het gaat hierbij om de verhouding tussen de pijlhoogte en de lengte van de hoofdoerspanning; de verhouding tussen de lengte van de hoofdoerspanning en die van de zijoverspanningen; de liggerslankheid en de verhouding tussen lengte en breedte van de rijvloer.



20. Bouw van een zelfverankerende hangbrug volgens de uitbouwmethode.



21. Uitbouwmethode onder toepassing van drukstaven.

### Verhouding doorhang hoofdkabel (pijl) / lengte hoofdoerspanning

Voor de klassieke hangbrug bedraagt deze ratio circa 1/10. Voor de zelfverankerende hangbrug is deze ratio circa 1/8. Dit heeft alles te maken met de drukkracht in de rijvloer, immers een toename van de pijlhoogte geeft een afname van deze drukkracht.

### Verhouding hoofdoerspanning / zijoverspanning

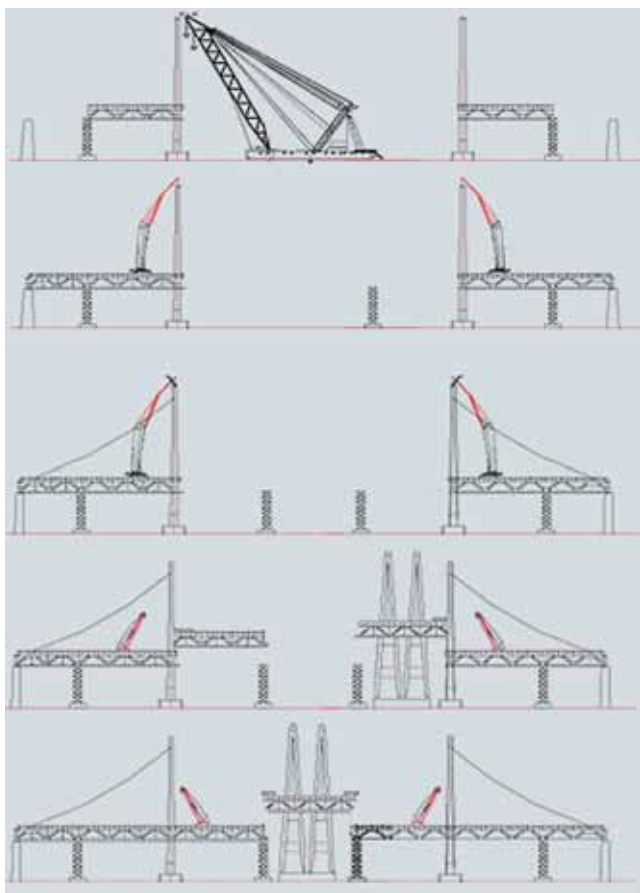
Hierbij bestaat geen wezenlijk verschil tussen de twee soorten van hangbrug. Gemiddeld gezien is deze verhouding circa 2. Afb. 18 geeft hiervan een overzicht.

### Liggerslankheid en verhouding liggerhoogte / lengte hoofdoerspanning

Het gegeven dat bij een zelfverankerende hangbrug een grote drukkracht in de rijvloer aanwezig is en bij een klassiek hangbrug geen normaalkracht laat zich duidelijk vertalen in een verschil in liggerslankheid, afb. 19.

### Lengte / breedte verhouding van het rijdek

Ook deze verhouding verschilt aanzienlijk tussen de twee soorten hangbruggen. Voor de klassieke hangbrug ligt deze verhouding rondom de 40 terwijl voor de zelfverankerende hangbrug deze waarde schommelt om de circa 10. De bovengrens van circa 40 heeft alles te maken met een verantwoorde aerodynamische constructie van de rijvloer en de bovengrens van circa 10 heeft veel te maken met het knikgedrag van de rijvloer.



22. Meest gebruikte methode voor de bouw van een zelfverankerende hangbrug.

### Bouwwijze zelfverankerende hangbrug

Bij de bouw van een klassieke hangbrug wordt voor de bovenbouw gewerkt met een vast patroon van eerst de pylons, dan de hoofdkabels, vervolgens de hangers en als laatste de rijvloer (in segmenten aangebracht). Voor de zelfverankerende hangbrug bestaan globaal gesproken twee gangbare bouwmethoden, te weten;

- uitbouwmethode
- gebruik van tijdelijke steunpunten voor de opvang van het eigengewicht van de hoofdoverspanning

Bij de bouw van de Duisburg brug in 1955 is de uitbouwmethode toegepast, afb. 20. De bouw vertoont veel overeenkomst met de bouw van een tuibrug. De rijvloer wordt tijdelijk opgehangen aan tuikabels die nadat de rijvloer en hangkabels zijn aangebracht weer worden verwijderd. Met deze bouwwijze wordt het scheepvaartverkeer niet gehinderd.

Bij de bouw van de Seventh Street bridge is tevens gewerkt volgens de uitbouwmethode, echter nu is de hoofdkabel met de rijvloer meegebouwd en zijn de twee onderling verbonden met drukstaven, afb. 21.

Vrijwel alle zelfverankerende hangbruggen zijn gebouwd met toepassing van tijdelijke steunpunten, afb. 22. Het aantal tijdelijke steunpunten, voor de hoofdoverspanning en ook zijoverspanningen, is sterk afhankelijk van de schaal van prefabricage. Het ontwerp van de rijvloer wordt dan ook gedictieerd door het buigend moment dat optreedt tijdens de bouw van de brug.

### Referenties

[1] Self-anchored suspension bridges part I, Afstudeerwerk D. van Goolen, april 2007.



Geschoorde hangbrug Wissekerke in 2007, zie verder artikel volgende pagina