

# BRUGGEN



De langste brug: "Akashi Kaikyo Bridge"

## **Inhoud**

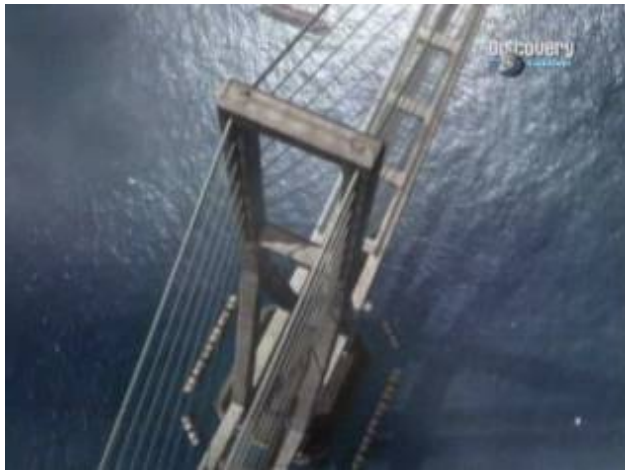
---

	Blz.	
Inleiding	<b>3</b>	
De Geschiedenis	<b>4</b>	
Type Bruggen	<b>5</b>	
Boogbruggen	<b>6</b>	
Balkbruggen	<b>9</b>	
Tuibruggen	<b>11</b>	
Cantileverbruggen	<b>14</b>	
Hangbruggen	<b>17</b>	
Onderzoek balkprofielen	<b>20</b>	
Conclusie	<b>23</b>	
Bronvermelding	<b>24</b>	

## Inleiding

---

Als onderwerp heb ik bruggen gekozen. Ik vond dit wel een leuk onderwerp omdat ik heel lang aan het twijfelen was welk onderwerp ik zou kiezen. In het eerste hoofdstuk staat een globale geschiedenis van de brug. Het volgende hoofdstuk gaat over de verschillende soorten bruggen die voor kunnen komen. De hoofdstukken daarna geven meer informatie per type brug. Er is ook een hoofdstuk over de langste bruggen ter wereld. Ten slotte staat er nog een stuk over mijn practicum waarbij ik een klein beetje hulp van mijn oom heb gehad. En de belangrijkste conclusies daarvan.



Een virtuele brug over de middellandse zee. Hierdoor ontstaat een directe verbinding tussen Spanje en Marokko.

## De geschiedenis van de bruggenbouw

---

Al in de tijd van de oudheid waren er volken die bruggen bouwde. Het belangrijkste doel van deze bruggen was het instant houden van een groot rijk zoals het rijk van de Chinezen of Romeinen. Door deze bruggen kon er makkelijker en meer handel zijn tussen steden, was er minder honger doordat voedsel van verder gelegen plaatsen nog steeds geïmporteerd kon worden voordat het bedorf en konden grote legers sneller verplaatst worden. Het zorgde er dus voor dat het rijk vanuit een hoofdstad te regeren was en niet uiteenviel.



Deze bruggen waren meestal gemaakt van materialen die de natuur in de nabijheid in voorraad had zoals hout, natuursteen, bamboe en lianen. De Romeinen pasten voornamelijk twee brugtypen toe: houten bruggen, gebouwd op stenen pijlers of op ingeheide houten palen, en halfcirkelvormige [boogbruggen](#), vervaardigd uit een betonachtig materiaal met een natuurstenen bekleding. Na het instorten van deze grote rijken is er een tijd in de geschiedenis waarin het snelle transport over langere afstanden minder belangrijk was. Dorpen en steden waren toen erg zelfvoorzienend en waren niet echt afhankelijk van de handel. De handel die er plaatsvond ging meestal met behulp van scheepvaart. Er ontstonden hierdoor ook veel handelsplaatsen bij de kust of op doorwaadbare plekken langs rivieren. Een goed voorbeeld hiervan is Parijs.

Pas in de latere middeleeuwen is er weer meer behoeften naar bruggen zodat de overgang over een rivier, die nog wel eens buiten zijn oevers kon treden, het hele jaar door gegarandeerd is. Ook deze bruggen werden weer gebouwd met materialen die in de beurt gevonden konden worden zoals hout en natuursteen. Deze bruggen werden geheel uit eigen inzicht gemaakt. In het begin bouwde men alleen de perfecte boogbrug met een halfcirkelvormige boog. Later bouwde men meer gedurfde, vlakke brugtypen. Deze bouw hiervan was volledig uit intuïtie zonder enige berekeningen, toch was men toen al in staat overspanningen te maken van meer dan 60 meter.

In de loop van de 18de eeuw werd de kunst van het berekenen van bouwconstructies ontwikkeld. Ook kreeg men meer inzicht het gebruik van bepaalde materialen voor trekkrachten en weer andere voor compressiekrachten. Hierdoor werd het mogelijk bruggen te bouwen met een meer veiligheid en konden weer grotere afstanden "overbrugt" worden. De grote stoot tot de verdere ontwikkeling van zowel vaste als

beweegbare bruggen werd in de eerste helft van de 19de eeuw gegeven. Dit kwam doordat de behoefte aan bruggen enorm toenam door de ontwikkeling van de spoorwegen maar ook de opkomst van sterkere materialen zoals ijzer en staal droegen hun steentje bij. Na 1900 kreeg het staal vooral bij bruggen met kleine en middelgrote overspanningen concurrentie van het gewapend beton wat goedkoper en makkelijker in gebruik was.



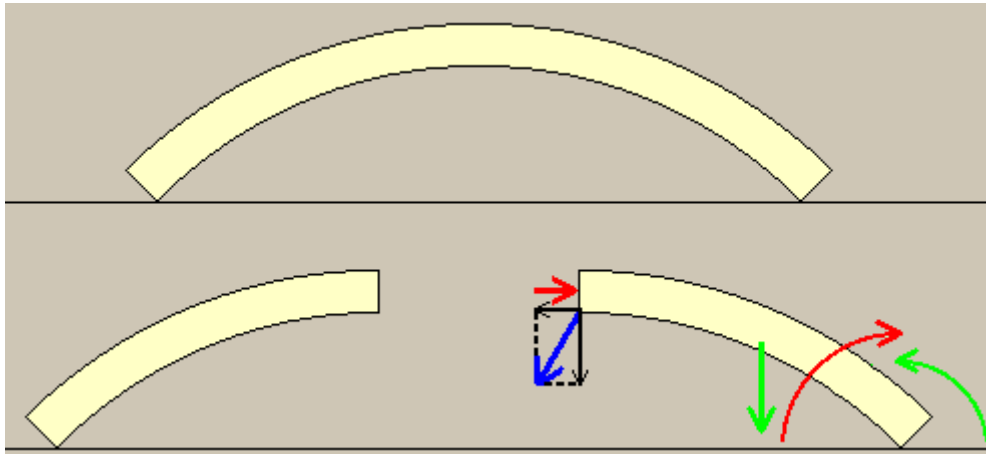
In de laatste jaren heeft de bouw van bruggen een versnelde ontwikkeling doorgemaakt. Door het aaneenlassen van stalen platen en lichte profielen kunnen staalconstructies worden samengesteld die als één geheel werken, in plaats van de eerder toegepaste constructies die uit onderdelen waren opgebouwd. Dit heeft, samen met het gebruik van speciale staalsoorten, geleid tot veel lichtere stalen bruggen. Door voorspanning van de wapening is het mogelijk geworden betonbruggen te bouwen die veel lichter zijn en met een grotere overspanning hebben.

Ook op het gebied van montage heeft is er een snelle ontwikkeling. Door het inzetten van grote mobiele kranen kunnen voorgespannen betonnen brugliggers met een maximale lengte van 60 meter vooraf in de fabriek worden gemaakt en daarna in hun geheel als een soort meccano doos in elkaar worden gezet. Grote betonnen bruggen kunnen in 'moten' worden gefabriceerd, welke met een speciale lijm en voorspankabels tot een hecht geheel worden samengevoegd. Met behulp van deze techniek kan men bruggen snel bouwen op plaatsen die praktisch onbegaanbaar zijn of maar kort kunnen worden afgesloten in verband met de economische belangen.

## Boogbruggen

---

Je zou je wel eens kunnen afvragen waarom een boogbrug niet instort? Er is namelijk niks waar het aan kan hangen of op kan steunen buiten de zijkanen waar de boog aan vast zit. Dit is het duidelijkst uit te leggen met de volgende plaatjes.



Stel we nemen een boog en delen die in tweeën zoals in het bovenstaande plaatje. Als je nu het rechter boogdeel zou loslaten zou de zwaartekracht (de groene pijl) de boog naar beneden trekken. Doordat de boog echter al op de grond steunt zal hij linksom gaan draaien, om het punt waar hij de grond raakt (zie kromme groene pijl). Door deze draaiing zal punt A in het plaatje de kant van de blauwe pijl op gaan bewegen. Doordat er een beweging is in die richting verplaatst zich dus massa in die richting wat eigenlijk inhoudt dat er dus een kracht is in die richting. Deze zou je je dus eigenlijk kunnen voorstellen als de blauwe peil.

De blauwe schuine pijl die een kracht voorstelt kan je ook tekenen door hem op te splitsen in een horizontale en een verticale kracht. Stel je voor dat er aan de andere kant dezelfde boog staat maar dan in spiegelbeeld. De krachten zijn dan ook allemaal gedraaid. De horizontale krachten staan dan tegen over elkaar en zullen elkaar dus opheffen. Wat we dan overhouden is de verticale kracht. Deze kracht zal echter ook veranderen in een horizontale kracht.

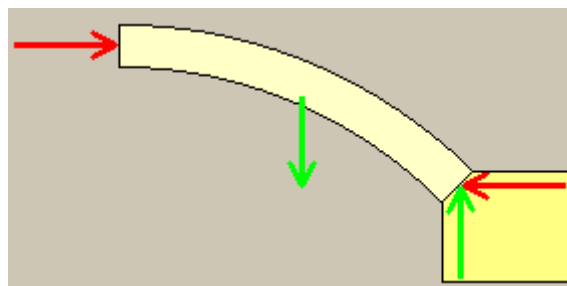
Stel je voor dat de we de boog zouden bouwen op een mal en deze in een keer kunnen weghalen. We filmen dit en spelen dit filmpje vervolgens heel langzaam af zodat we goed kunnen zien wat er met de krachten gebeurt. De boogdelen willen draaien (kromme groene pijl) door de zwaartekracht (groene pijl). De bogen staan echter tegen elkaar waardoor de ze tegenovergestelde krachten op elkaar uitoefenen (rode pijl). Deze krachten zijn even groot. Daardoor houden ze elkaar in evenwicht blijft de boog precies het zelfde dan als er geen krachten zouden zijn. De kracht naar beneden blijft wel over. De boog gaat daardoor ietsje naar beneden. De blauwe pijl draait hierdoor en wordt iets horizontaler omdat de boog uiteindelijk bij de punt van de pijl moet uitkomen. Anders zou de boog een andere vorm krijgen. De boog valt dan weer een stukje naar beneden en wil daardoor weer meer opzij. Dit blijft net zolang doorgaan totdat je alleen nog maar een horizontale kracht overhoudt. Doordat de twee boogdelen het zelfde zijn zullen deze krachten ook weer de zelfde waarde hebben en elkaar opheffen. De boog is nu 1 geheel zou dus moeten blijven staan.





De boog is ietsjes ingezakt omdat de krachten naar beneden opgeheven moeten worden.

Er is echter nog iets waar we rekening mee moeten houden. Als de bogen naar links en naar recht duwen zullen ze zich naar rechts en links moeten afzetten. Dat is waar de grond voor zorgt zoals je kunt zien in de volgende figuur.



De rode pijl in het gele blok (de grond) zorgt ervoor dat de brug niet opzij schuift het zelfde geldt voor de groene peil die hierdoor de zwaartekracht naar beneden kan opheffen. Dit zorgt er voor dat het totaal moment (het totaal van alle krachten die op de brug werken) nul is. De boog zou nu blijven staan. Zonder enige ondersteuning met uit zondering van de grond.

De boogbrug is na de balkbrug het oudste type brug wat bestaat. Dit komt omdat er voor dit type brug materialen nodig zijn die een hoge compressiekracht kunnen weerstaan. Dat is dus een kracht die als het ware probeert het materiaal fijn te drukken. Bijna alle materialen kunnen beter tegen compressiekrachten dan tegen trekkrachten.

Dit materiaal is vrijwel overal voor handen: steen. Dit is ook het voordeel van de brug, hij is relatief goedkoop te maken doordat er weinig hoogwaardig staal nodig is, in het geval je hem helemaal van steen maakt natuurlijk. Met dit type brug zijn ook grotere overspanningen te maken. Ook is de boog een soort bewijs van wijsdom. Het is ingewikkeld type brug om te bouwen, wie vroeger grote boogbruggen kon ontwerpen en bouwen zonder dat ze instorten werd ook als geniaal beschouwd.





## Balkbruggen

---

Het type balkbrug is technisch gezien het simpelste om te bouwen. Het bestaat slechts uit één onderdeel; de balk. Deze rust op de twee zijkanten van hetgeen wat je wil overbruggen en zo ontstaat een brug. De krachten die worden overgebracht door de balk zelf gaan ook via deze zijkanten de grond in. Als het bouwen van een brug zo simpel is als het hier is uitgelegd, waarom bouwen we dan allemaal van die ingewikkelde bruggen met pilaren of bogen? Dit leg ik uit met het volgende plaatje:



In de situatie van de foto is er een evenwicht. Het blad met de boeken erop blijft liggen. In deze situatie geldt dus dat de gehele kracht linksom (Dus het blad dat links van de paal zit plus de boeken) net zo groot is als de gehele kracht rechtsom. Toch is dat raar want je zou zeggen dat de stapel boeken links veel meer weegt dan rechts. Dit komt door de arm zoals dat heet. Til maar eens een hele dikke encyclopedie en houd deze eerst 30 seconden tegen je aan. Houd de encyclopedie nu is 30 seconden met gestrekte armen vast. Je snapt nou ineens waarom leraren zo gespierd zijn, die lopen altijd met dikke boeken. Hoe verder je het boek van je af houdt hoe zwaarder het lijkt te wegen. Dit geldt in onze situatie met de boeken ook. Je kan de kracht van een arm uitrekenen met de volgende formule:

$$M = Fd$$

M staat voor Moment

F staat voor gewicht in newton van het totaal gewicht van de arm

d is de afstand van de rand tot het aangrijpingspunt van de zwaartekracht van de totale massa F

In het geval van de plaat. De boeken links wegen 0.8 kg en het boek rechts 0.3 kg. Het gewicht van de plastic plaat verwaarlozen we omdat weinig invloed heeft en het anders de som onnodig ingewikkeld maakt.

M linksom is  $(0.8 \text{ kg} \times 9.81) \times 0.2 \text{ meter} = 1.6$

M rechtsom is  $(0.3 \text{ kg} \times 9.81) \times 0.6 \text{ meter} = 1.7$

De plaat is dus min of meer in evenwicht. Je zal nu ook wel snappen dat als iemand op een brug loopt en hij verder van een pilaar af loopt het voor de pilaar net lijkt alsof hij steeds zwaarder wordt. Elk materiaal heeft een breekpunt. Dat is een bepaalde kracht over een bepaalde lente, dus bijvoorbeeld 100 kg per meter als de balk vijf 5 centimeter dik is waarbij het materiaal breekt. Dus zo is er ook een maximum voor de lengte van een balkbrug die je kunt maken. Je kan dit maximum echter veel verlengen door het toepassen van [balkprofielen](#).

Het voordeel van een balkbrug is dat hij heel simpel is en het goedkoopst om te bouwen. 1 balk is al genoeg. Hij komt het verreweg het meeste voor. Toch heeft de balkbrug ook een beperking: de lengte. Ten opzicht van alle andere typen bruggen kan een balkbrug maar relatief korte afstanden overbruggen. Dit maakt hem ideaal voor een brug over auto of spoorwegen. Maar rivieren en diepe ravijnen kan je er echter niet mee overbruggen zonder gebruik te maken van tussen ondersteuning of ophang.



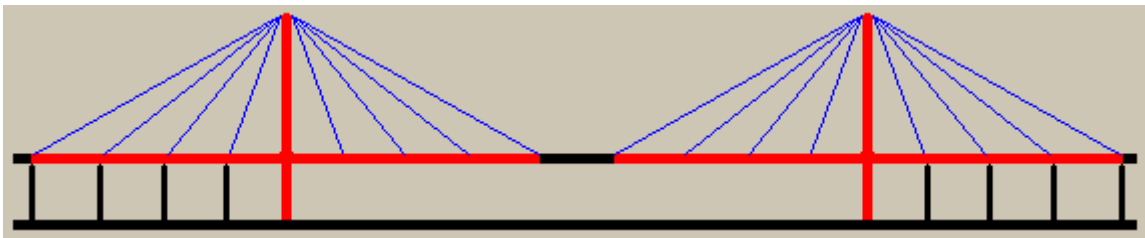
In de staat Florida in Amerika ligt er een dunne strook land voor de kust. Dit gebied is zeer toeristisch net zoals de Nederlandse stranden vol Duitsers zitten in de zomer. Er zijn daarom ook veel verbindingswegen tussen het vaste land en deze strook land aangelegt. Doordat het water er ondiep is kon men hier gewoon een goedkope balkbrug bouwen met heleboel ondersteuningspilaren in plaats van de veel duurdere hangbrug die anders nodig was geweest. Ook zijn deze balkbruggen veel beter bestand tegen de vele oorkanen die over dit gebied trekken.



## Tuibruggen

---

Een tuibrug lijkt in veel opzichten op de cantilever brug die in het volgende hoofdstuk beschreven staat. De overspanningen links en rechts van een steuntoren kunnen op dezelfde wijze gemaakt worden als een cantilever brug. Namelijk naar beide kanten even snel zodat er geen ondersteuning van de grond nodig is tijdens de bouw. Een verschil tussen een cantilever brug en tuibrug is dat de eerstgenoemde een stuk overspanning tussen de twee cantilevers heeft. Het grootste verschil is natuurlijk dat een cantilever brug meestal van metalen frames gebouwd is en een tuibrug van 'slappe' kabels. In onderstaande afbeelding staat de schematische weergave van een tuibrug. De rode balken staan onder drukkrachten en zijn de cantilevers, de blauwe kabels staan onder trekkrachten. In het volgende hoofdstuk staat nader toegelicht hoe de cantilevers werken.



Het grootste nadeel van de tuibrug is dat hij de stijfheid van het metalen frame zoals bij bijvoorbeeld een cantilever brug mist. Dit wordt wel enigszins tenietgedaan door de lange doorlopende balk die door het wegdek gevormd wordt, maar zeker tijdens de bouw van een lange tuibrug kunnen er ernstige schommelingen ontstaan. Zeker zolang de twee helften nog niet met elkaar verbonden zijn. Tijdens de bouw van de 'Pont de Normandie' waren er zelfs grote actieve dempers aangebracht voor als de situatie uit de hand mocht lopen. Deze dempers maten de slingering van de brug en als deze te erg werden zorgden ze voor een tegenovergestelde kracht zodat de slingering weer gedempt werd. De bouw verliep echter zonder enige problemen. Op onderstaande foto's is de 'Pont de Normandie' te zien tijdens de constructie en als de brug af is.



Het grootste voordeel van een tuibrug is dat ze goedkoper zijn dan een hangbrug van dezelfde lengte, al kan een hangbrug dan wel weer langer zijn. Nog een voordeel is dat er geen horizontale krachten optreden zoals bij bijvoorbeeld een boogbrug. Dit scheelt veel geld omdat er geen dure verankering gemaakt hoeven te worden. Je kunt ze ook goed aanpassen aan ieder locatie omdat ook vele asymmetrische ontwerpen mogelijk zijn. Een in Nederland zeer bekende asymmetrische tuibrug is de Erasmusbrug. Bij deze brug is asymmetrie toegepast omdat er dan maar één toren gebouwd hoefde te worden. De totale lengte van de Erasmusbrug is 802 meter. Op onderstaande foto's is de asymmetrie zeer goed te zien.





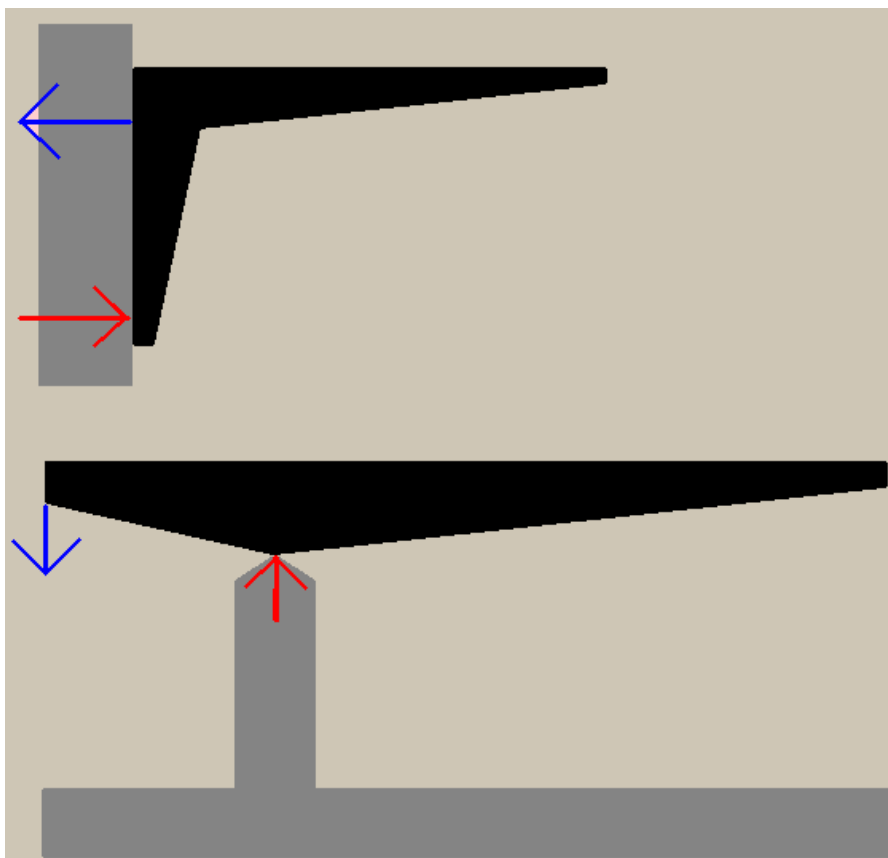
Het meest gebruikte materiaal voor de kabels is staal, omdat dit zeer goed tegen trekkrachten bestand is. Bij kleinere bruggen wordt soms ook wel gewapend beton gebruikt, vooral om de kosten te drukken. Dit kan echter alleen bij kleine bruggen omdat een hoeveelheid beton beduidend minder trekkracht aankan dan een zelfde hoeveelheid staal. De torens worden vaak van wel van beton gemaakt, omdat dit materiaal wel weer zeer goed tegen drukkrachten kan.

De meeste logische plaats voor een tuibrug is bij een overspanning van groter van 500 of 600 meter, daar kunnen de andere brugtypes niet meer aan komen. De hangbrug nog wel, maar die is weer veel duurder voor deze afstanden. Een overspanning groter dan 1100 meter kan niet meer overbrugd worden door een tuibrug, dus vanaf deze lengte zal de hangbrug weer gekozen worden.

## Cantileverbruggen

---

Een cantilever brug lijkt vaak veel op bijvoorbeeld een boogbrug of een balkbrug. Het zit het in de manier van het dragen van het wegdek. Bij een boogbrug en een balkbrug wordt de zwaartekracht via de ondersteuning rechtstreeks naar de aarde weggevoerd. Een cantilever heeft een vrij overhangend gedeelte wat vaak iets weg heeft van een hefboom. Twee krachten of twee verschillende plaatsen houden elkaar hierbij in evenwicht. Je kunt zelf een simpele cantilever overspanning maken door met een 30 centimeter lange liniaal. Houd je rechter wijsvinger onder de liniaal bij ongeveer 10 centimeter en houd je linker wijsvinger boven de liniaal bij ongeveer 1 centimeter. De twintig centimeter die nu overhangt hangt dus op de cantilever manier. Ook een vorm van cantilever ondersteuning vindt je bij een boekenplank. De L-vormige steuntje werken ook op dit principe, alleen dan een kwartslag gedraaid. Onderstaande afbeelding verduidelijkt dit, de bovenste figuur is de boekenplank, de onderste de 'liniaalbrug'.



Op deze foto zie je een praktijkvoorbeeld van het cantilever principe, de seinen van de trein die boven de rails gehouden worden.



Op deze manier kun je natuurlijk ook bruggen maken, de meeste cantilever bruggen zien er dan zo uit als op het plaatje hieronder. Aan het begin en het eind van de brug zijn twee cantilever overspanningen (de zwarte delen), en ertussen in word nog een normale balk gelegd. Dit heeft als grootste voordeel dat met een relatief simpele constructies hele lange overspanningen behaald kunnen worden, veel langer dan met bijvoorbeeld een balkbrug. Dit komt doordat de het de middenoverspanning dus net zo lang kan zijn als een balkbrug, maar door de cantilever methode toe te passen op de ondersteuning kunnen deze veel verder naar buiten geplaatst worden.



De meeste kleine cantilever bruggen zijn op deze manier gemaakt, zijn bruggen over rijkswegen of bruggen van rijkswegen. De verschillende betonnen platen worden voorgefabriceerd en hoeven terplekke alleen nog maar 'opgestapeld' te worden. En is dus een relatief goedkope manier van bruggen bouwen. Er zitten nog meer voordelen aan; het uitzetten en krimpen van het materiaal door temperatuursinvloeden maken weinig uit omdat de verschillende delen over elkaar heen kunnen schuiven. Hetzelfde geldt als de grond waar de brug op staat een klein beetje begint te schuiven. De ondersteunden palen hoeven bij dit type cantilever brug alleen maar simpele palen te zijn, er zijn namelijk geen horizontale krachten in het veld.

Als de bruggen groter worden, kunnen ze niet meer van beton gemaakt worden, het eigen gewicht wordt dan te groot voor de brug. Er moet nu met staal gewerkt worden, omdat er dan in plaats van massieve balken met lichtere, vakwerk constructies gewerkt kan worden. Nu zit er om de zoveel meter een stalen balk, het netwerk van stalen balken heeft nu veel minder gewicht, maar kan bijna dezelfde belasting aan. Nu kunnen er dus bruggen gebouwd worden met enorme overspanningen. Het grote voordeel van deze manier van bruggen bouwen is dat je geen extra ondersteuning nodig hebt tijdens de bouw. Bij bijvoorbeeld een boogbrug moet eerste de boog ondersteund worden voordat hij helemaal af is. Bij cantilever bruggen heb je dit probleem niet, omdat je de linker en de rechterkant van de in evenwicht kunt houden. Je bouwt de brug van beide kanten naar elkaar toe, zonder dat je steun van de grond nodig hebt, dit is het grootste voordeel van de cantilever brug. Onderstaande foto verduidelijkt dit.



Doordat je geen ondergrond nodig hebt voor ondersteuning tijdens de bouw kun je de cantilever brug zeer goed bouwen over bijvoorbeeld snelstromend water. Maar ook andere moeilijk begaanbare terreinen zoals gebied waar al veel laagbouw staat is geschikt voor een cantilever brug.

De grootste cantilever brug staat in Quebec, Canada. Hier zijn de twee grote, ruitvormige cantilever ondersteuning en het kleine, boogvormige verbindingsstuk in het midden zeer goed te zien. Deze brug is gebouwd in het jaar 1917 en heeft een overspanning van 550 meter.





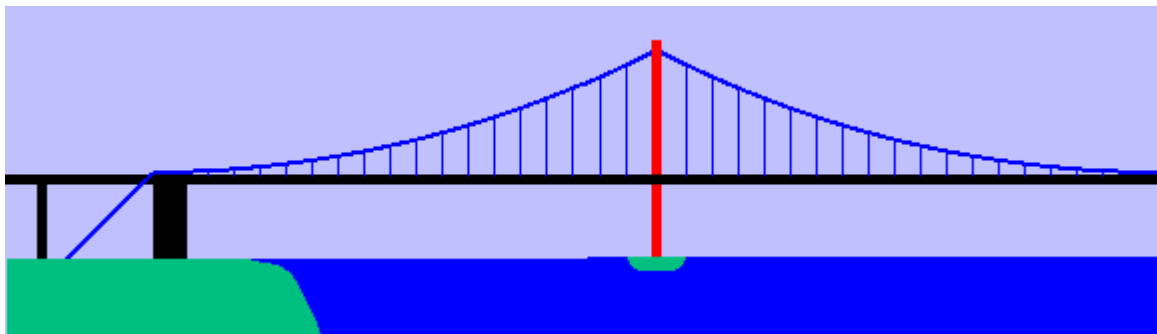
## Hangbruggen

---

Stel je wilt een rivier oversteken zonder natte voeten te krijgen; als je een touw tussen twee bomen knoopt heb je al een simpele hangbrug gemaakt. Alleen is deze manier van bruggen bouwen zeer onhandig. De boog krijgt een knik op de plek waar de belasting is:



Voor een touwbrug waar je overheen loopt is dit niet zo erg, maar als je een vrachtwagen over je brug wilt laten rijden heb je toch een groot probleem. Dit probleem is op te lossen door een recht wegdek aan te brengen en voor de ondersteuning verticale kabels tussen het wegdek de boog aan te brengen. Het wegdek hangt nu aan de boog, daar komt dus ook de naam 'hangbrug' vandaan. Hieronder zie je wat je dan krijgt als standaard hangbrug. Alleen de linkerhelft van de brug is afgebeeld, van de oever tot het midden van de brug.



Alle kabels zijn blauw getekend, dit betekent dat hier spankrachten in heersen. De grote toren is rood getekend, dit betekent dat hier drukkrachten in voorkomen. Een groot voordeel van de hangbrug tegenover de boogbrug is dat de boog omgedraaid is. Daardoor kunnen met een hangbrug veel grotere overspanningen gehaald worden. Dit komt door het verschil in druk- en spankrachten. Een paal waar je op drukt kan buigen of zelfs dubbelvouwen, een paal waar je aan trekt heeft dit gevaar niet. Om een kracht als drukkracht te weerstaan heb je een dikkere paal nodig dan als het een spankracht geweest zou zijn. Doordat in de boog van een boogbrug drukkrachten voorkomen, moet het materiaal veel dikker zijn, ook komt het eigengewicht van het materiaal nog bij de drukkrachten. De hangbrug heeft in de kabels alleen spankrachten, wat als voordeel heeft dat de kabels relatief dun kunnen zijn of dat de brug een grotere overspanning kan hebben. Alle krachten worden verzameld in de grote middentoren, daar worden ze als drukkrachten naar de grond geleid. Daarom zijn deze torens ook altijd zo groot, en omdat ze alleen onder drukkrachten staan is het gemakkelijk om deze torens te ontwerpen.



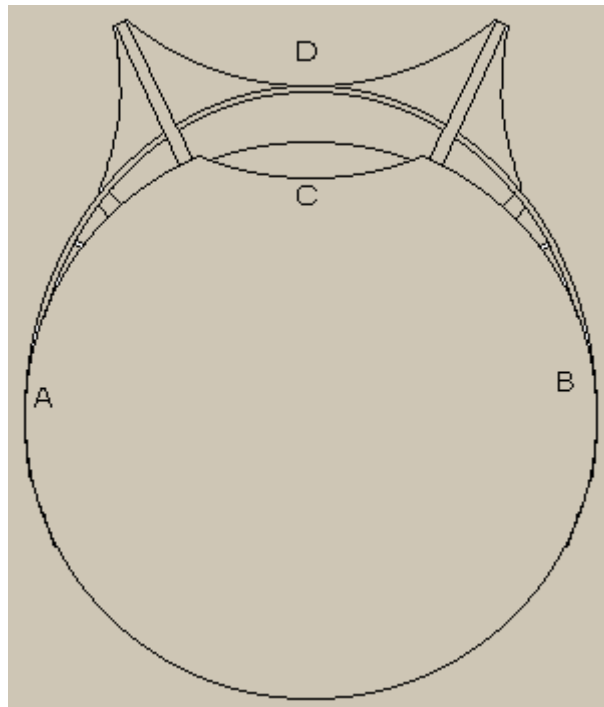
Een van de nadelen van de hangbrug is dat ze niet erg stijf zijn, alle stijfheid wordt geleverd door het wegdek. Ook bij plaatselijke belastingen, tussen twee kabelverankeringen in, moet het wegdek voor alle stevigheid zorgen. Dit kan leiden tot het enigszins doorbuigen van de brug. Als er de juiste hoeveelheid belasting met de juiste snelheid over de brug rijdt, kan dit leiden tot resonantie. Dit maakt dit type brug dan ook zeer ongeschikt om te dienen als spoorbrug. Een groter risico op resonantie komt echter van de karmanwervels die ontstaan doordat de wind langs de kabels blaast. Bij de goede belasting en windsnelheid kunnen zeer grote resonanties plaatsvinden.

De bouw van een hangbrug is niet al te gemakkelijk, het grootste probleem is het begin van de bouw. Als eerste zal er namelijk een kabel van de ene naar de ander kant moeten komen, die kabel wordt dan later uitgebouwd tot een hele brug. Bij een rivier lukt dit goed, je laat een boot met een kabelrol achterop naar de overkant varen en je bent klaar. Maar bij een diepe vallei is dit een lastiger probleem. Eerst zorg je ervoor dat een hele dunne kabel aan de overkant komt, vroeger deed men dit vaak met een vlieger. Daarna kun je via die dunne kabel steeds dikkere kabels overbrengen totdat de hoofdkabels hangen. Aan de hoofdkabels worden nu om de zoveel meter met een speciaal karretje verticale kabels bevestigd. Aan de einden van deze kabels kan vervolgens vanaf de kanten het wegdek vastgemaakt worden.



Zoals al eerder gezegd kun je met een hangbrug veel verder komen dan met een boogbrug. De langste bruggen op de wereld zijn zelfs altijd hangbruggen. De ideale situatie om voor een hangbrug te kiezen is dan ook als er een grote afstand overbrugd moet worden en er geen mogelijkheid is voor ondersteuning halverwege de brug. In de praktijk komt dat er op neer dat bijna ieder brug met een langere overspanning van 800 meter een hangbrug is. Deze bruggen worden soms zo lang dat er zelfs rekening

gehouden moet worden met de kromming van de aarde. Bij de langste brug ter wereld, de Akashi Kaikyo brug van 2000 meter lang, moest het wegdek zo meegekromd worden dat het midden van de brug bijna een meter (!) hoger lag dan de rechte lijn tussen de twee hoofdtorens. In het hoofdstuk over de langste bruggen staat meer informatie over brug. Het principe van de invloed van de kromming van de aarde kun je in onderstaande afbeelding goed zien. De cirkel stelt de aarde voor met een brug D van punt A naar B over de rivier C. Als de brug een rechte lijn zou zijn tussen de twee torens zou de brug bijna in het water van de rivier hangen. Dit is natuurlijk heel erg overdreven, maar het principe wordt zo wel goed duidelijk.



## Onderzoek balkprofielen

---

Voor het practicum onderdeel van mijn profielwerkstuk heb ik onderzoek gedaan naar de sterktes van verschillende soorten balkprofielen. Ik deed juist dit onderzoek omdat een balk het meest essentiële onderdeel van een brug is. In ieder brug die je tegenkomt zitten balken, al zijn ze alleen maar bedoelt om het wegdek op te leggen. Zonder balken is het in principe ook onmogelijk om een brug te bouwen, tenzij je bijvoorbeeld een touwbrug maakt. Het onderzoek richtte zich op de verschillende profielen die voor kunnen komen, zoals bijvoorbeeld de I, de H of een O profiel. Ik verwacht bij deze proef dat het I profiel het sterkste zou zijn, mede doordat je het I profiel het meeste in de praktijk tegenkomt. Een I profiel met een hoger middenstuk zou nog sterker moeten zijn, omdat zo'n balk minder last heeft van doorbuiging. Hieronder staat een praktijkvoorbeeld van een I profiel.

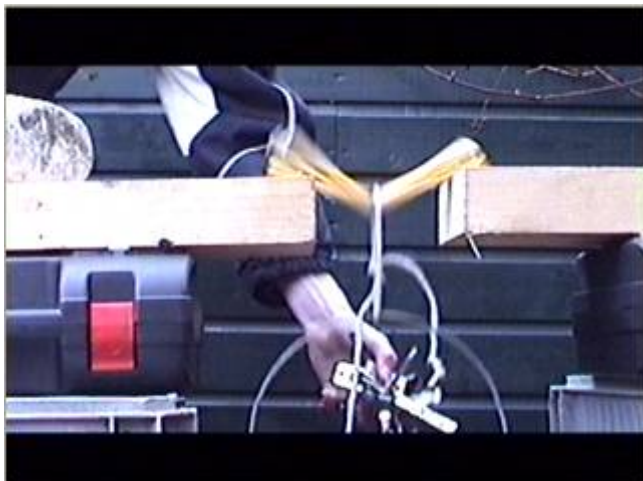


De proefopzet was als volgt: ik heb de balkprofielen van spaghetti in elkaar gelijmd, eerst maakte we kleine 'plankjes', door tien spaghetti stengels naast elkaar aan elkaar vast te lijmen. Als deze droog waren, lijmden we de standaardplankjes op de hoeken aan elkaar vast zodat er balkprofielen gevormd werden. Ik heb in totaal acht verschillende balkprofielen getest. Welke dit waren is hieronder te zien. De grootte van ieder profiel is ook aangegeven, de getallen komen overeen met het aantal spaghetti stengels waaruit die lengte opgebouwd was.



ik heb de profielen als volgt getest: ik legde ze tussen twee even hoge houten balken in, zo dat ze precies in het midden lagen en er vijftien centimeter niet op het hout steunde. In het midden belastten we de balken door een er met een touwtje een emmer aan te hangen. De emmer vulde ik langzaam met stukjes ijzer. Zodra de balk door midden brak woog ik de emmer met het ijzer en het touw. Op onderstaande foto's is goed te zien hoe dit in zijn werk ging.





De resultaten zie je in de onderstaande tabel, met per profiel het aantal spaghetti stengels waaruit het opgebouwd is, de totale belasting en de belasting per spaghetti stengel. Alle belastingen staan vermeld in gram.

Profiel:	Aantal spaghetti stengels:	Totale belasting in gram:	Aantal gram belasting per stengel:
Nr. 1	30	2093	69,77
Nr. 2	20	2149	107,45
Nr. 3	40	5846	146,15
Nr. 4	20	2038	101,90

Nr. 5	30	2950	98,33
Nr. 6	30	3743	124,77
Nr. 7	35	2517	71,91
Nr. 8	28	2253	80,46

Zoals uit de tabel blijkt is volgens mijn onderzoek het profiel met de vierkante doorsnede het sterkste. Deze droeg niet alleen het meeste totaalgewicht (bijna zes kilo), maar droeg ook het meeste gewicht per stengel. Een verklaring waarom niet de I profielen het sterkste zijn kan zijn dat bij een stalen balk een veel kleiner deel van de kracht die een balk kan hebben voorkomt uit de hoekverbindingen dan bij een balk van spaghetti. Het vierkante profiel heeft vier hoekverbindingen, het I profiel maar twee. Een andere verklaring kan zijn dat een vierkant profiel twee rechtopstaande zijdes heeft en een I profiel maar één. Een balk krijgt namelijk een groot deel van zijn sterkte door de rechtopstaande delen.

Nog een voorspelling die niet uitgekomen is is dat het I profiel van vijftien stengels hoog niet sterker is dan het I profiel van tien stengels hoog. De verklaring hiervoor is dat een plankje van spaghetti snel doorbuigt over de breedte richting. Hier begon het hogere I profiel op driekwart van zijn belasting als het ware "dubbel te klappen" en was er weinig profielvorm meer over. Door het verlies van de vorm brak hij dus veel eerder dan het lagere profiel dat wel goed in vorm bleef.

Volgens onze tests is een vierkante balk steviger dan een balk met een ander profiel. In de praktijk kan er toch voor een ander profiel worden gekozen, met het oog op het onderhoud. Een balkprofiel met een vierkante doorsnee kun je aan de binnenkant niet bewerken, dus als er een maal roest optreedt, kun je dit niet ontdekken of verhelpen. Een balk met bijvoorbeeld een I profiel kun je veel makkelijker inspecteren op schade en ook veel makkelijker herstellen.

Voor een vervolproef zou je ook bij een bouwmarkt verschillende profielen kunnen kopen, zodat je een realistischere benadering hebt van een stalen balk. Ook zou je onderzoek kunnen doen naar de invloed van de lengte van een balk op de hoeveelheid gewicht waarbij een balk breekt.

## Conclusie

---

De conclusie van mijn practicum was als volgt: niet het I profiel is het sterkste, maar het vierkante profiel. Dat deze verwachting niet goed uitkwam is waarschijnlijk het geval van de verschillende materiaaleigenschappen van spaghetti en staal of ijzer. Er zal waarschijnlijk verschil in toegevoegde sterkte door de hoekverbindingen zijn. Ook was het hoge I profiel niet sterker dan het lagere, de verklaring hiervoor is dat de spaghettibalken sterk de neiging hebben om dubbel te klappen.

De hoofdvraag was: in welke situaties kies je voor welke brug. Ik heb ondervonden dat de enige factor die echt veel uitmaakt de lengte van de benodigde overspanning is. De prijs speelt ook een grote rol, maar vaak is er alweer weinig keuze omdat de lengte al veel bepaald heeft. De locatie terplekke heeft ook enige invloed, maar niet zeer groot. Er zijn geen gevallen waarin een bepaald type brug echt uitgesloten, tenzij het door de lengte van de brug komt. Het belangrijkste aspect om rekening mee te houden tijdens de ontwerpfase is de veiligheid. Een ding is zeker, zonder een brug had onze maatschappij er toch wel anders uitgezien.



## Bronvermelding/links

---

Internet:

- [www.brantacan.co.uk/bridgedefs.htm](http://www.brantacan.co.uk/bridgedefs.htm): informatie over type bruggen en hun principe
- [www.pbs.org/wgbh/nova/bridge/](http://www.pbs.org/wgbh/nova/bridge/): algemeen
- [www.howstuffworks.com/bridge.htm](http://www.howstuffworks.com/bridge.htm): idem
- [www.spaghetti.tudelft.nl/](http://www.spaghetti.tudelft.nl/): idee onderzoek
- [www.google.nl/](http://www.google.nl/): voor verschillende afbeeldingen van bruggen

Encyclopedieën:

- Encarta 2003 winkler prince editie: zoeken onder "brug: weg- en waterbouw"