


# BRUGGEN VAN DE TOEKOMST

## WELKE UITDAGINGEN KUNNEN WE VERWACHTEN?

Jean-Yves Del Forno |  
afdeling infrastructuur Bureau Greisch



1 René Greisch



In de negentiger jaren werkte ik bij het ingenieursbureau van René Greisch, een beroemd ingenieur die een bureau had opgericht dat nog steeds zijn naam draagt. En eind 1997, omdat op mijn CV stond dat ik Nederlands had geleerd, nam hij mij mee naar Jo Coenen in Maastricht. Die had hem gevraagd een voetgangersbrug over de Maas te ontwerpen. Ik begreep er tijdens die bespreking helemaal niets van!

Maar het zij zo. In de weken die volgden, hebben wij, of liever heeft René, de brug ontworpen en berekend en het project aan de gemeente Maastricht gepresenteerd. Om budgettaire redenen werd het project vertraagd en René Greisch overleed twee jaren later, in juli 2000. Zo bleef ik alleen achter met de stad Maastricht als opdrachtgever en de aannemers. Allemaal in het Nederlands. Een echte uitdaging, maar 'De Hoge brug' werd op 16 december 2003 geopend.

Vandaag is mij gevraagd u iets te vertellen over mijn visie op de bruggen van de toekomst. Het wordt mijn visie, zoals wij die in bureau Greisch hebben ontwikkeld. Maar zeker geen absolute visie, wij hebben niet de pretentie deze te hebben.

Deze visie kan alleen worden verankerd in de analyse van het verleden. Onze voorouders waren verre van dwaas en hen negeren zou ons zelf dwaas maken. Sinds mensenheugenis moeten mensen hindernissen oversteken, vooral rivieren, om de hulpbronnen te verkrijgen die zij nodig hebben om te overleven.

Ver van onze ingenieursoverwegingen wist de mens al, dat om een kleine kloof te overbruggen, het voldoende was om één of meer boomstammen neer te leggen met daarop een paar platte stenen.

En toen de hindernis groter werd, kon door het gebruik van gevlochten lianen, het bereik worden vergroot.

Tenslotte, ook al zijn er sporen van gewelven te vinden die dateren uit de 13e eeuw v. Chr., het was in de Romeinse periode dat de bouw van boogbruggen tot ontwikkeling kwam.

Zonder zich daarvan bewust te zijn, heeft de mens sinds de oudheid gebruik gemaakt van de drie basisvormen van de toegepaste mechanica: de balk, de ketting en de boog. Bijna 2000 jaar lang is het ontwerp van bruggen niet wezenlijk veranderd.

In de loop van de 18e eeuw hebben een aantal ingenieurs en wetenschappers geleidelijk de sterkte van materialen omschreven. Bijvoorbeeld de wet van Hooke, die het lineair-elastische gedrag van een stalen staaf beschrijft, of de kritische belasting van Euler, die de belasting bepaalt waarboven een kolom uitknikt (zie fig. 3, blz 14). De verzameling van deze theorieën vormt de basis van de eigenschappen van materialen. Parallel met deze theoretische ontwikkelingen verschenen in Engeland de eerste ijzeren en stalen constructies.



← ↑ 2 Hoge Brug, Maastricht

Sinds  
mensenheugenis  
moeten mensen  
hindernissen  
oversteken,  
vooral rivieren

# Bruggen over water hebben altijd een meer nobel karakter gehad

Pure buiging

Balk



3 basisbegrippen construeren

Pure tension

Ketting



Pure compression

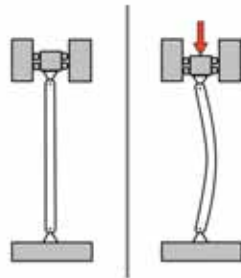
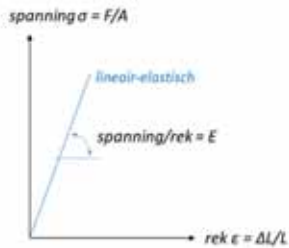
Boog



De eerste was de IJzeren Brug over de Severn in Engeland, die vijf gietijzeren bogen met een overspanning van 30 meter bevatte. Puddelijzer - een type gietijzer waaruit het koolstof uit het ijzer is verwijderd - wordt gebruikt vanwege zijn grotere ductiliteit, bijvoorbeeld in de door Eiffel gebouwde Garabit-brug over de rivier de Truyère in Frankrijk. Staal werd in het midden van de 19e eeuw uitgevonden en de industriële processen om het te produceren ontwikkelden zich snel. In die tijd werden veel stalen bruggen gebouwd, zoals de Alexander III-brug in Parijs. Deze structuur is zeer elegant door zijn slanke vorm. Of nog de brug over de Forth in Schotland, die voor zijn tijd een opmerkelijke overspanning heeft van 521 m!

Wet van Hooke

Eulerknik



Gewapend beton verscheen ongeveer in dezelfde periode, naar aanleiding van een octrooi dat werd aangevraagd door Hennebique, die één van de eerste bruggen van gewapend beton bouwde, die vandaag trouwens nog steeds in gebruik is.

In de eerste helft van de 20e eeuw werden talrijke bogen van gewapend beton gebouwd, met name door de Franse ingenieur Eugène Freyssinet.



4 Pont Alexandre III, Parijs



5 Primeur gewapend betonnen brug, 1905 bij een expositie in Luik

Voorgespannen beton deed zijn intrede net na de Tweede Wereldoorlog. Het proces bleek revolutionair te zijn. Als de trekspanningen in het beton door de voorspanning verdwenen waren, kon ook veel van de wapening verdwijnen. De begrippen buigzaamheid en robuustheid die in de huidige codes worden gehanteerd, bestonden in die tijd nog niet. In diezelfde tijd begonnen de Verenigde Staten hangbruggen te bouwen. De meest symbolische is de Golden Gate Bridge in San Francisco, die al een hoofdoverspanning van 1280 m heeft. In al deze constructies is het dek geheel van staal, in de vorm van een vakwerk, en de rijplaat is een orthotrope plaatvloer, bestaande uit een plaat en trogvormige verstijvingen. De Europeanen sloten zich iets later bij deze ontwikkeling aan, maar met een andere dwarsdoorsnede: een doosvormige doorsnede, ontworpen om het een aerodynamisch profiel te geven met een optimale stabiliteit. Het laatste bouwwerk van dit type is onlangs in Turkije ingehuldigd, de '1915 Çannakale-brug', waarvan de overspanning van 2023 m 's-werelds langste is.

Een ander type brug is de tuibrug. Drie van de eerste bruggen van dit type werden in Düsseldorf gebouwd. De eerste generatie tuibruggen werd gekenmerkt door dikke (en dus stijve) dekken en een klein aantal tuien. De komst van computers in de jaren zestig maakte het mogelijk steeds complexere bruggen te berekenen, met inbegrip van de tuibruggen, of deze nu van staal of beton zijn.



7 minder geslaagd voorbeeld van een balkliggerbrug

In onze landen, althans in België, is in de jaren zestig en zeventig een groot aantal autosnelwegen aangelegd. De bruggen die nodig waren om de onderbroken verbindingen te herstellen, werden in een razend tempo gebouwd. Ze waren in de eerste plaats functioneel en ontworpen voor efficiëntie. We hebben veel gelijksoortige bruggen gezien, waarvan de eerste ter plaatse werden gestort, met variabele of met constante hoogte. Vervolgens gemaakt van gestandaardiseerde geprefabriceerde balken, zonder dat dit altijd tot zeer succesvolle resultaten heeft geleid (fig. 7).

Bruggen over water hebben altijd een meer nobel karakter gehad. De voorbije veertig jaar hebben wij het geluk gehad een groot aantal bruggen in en rond de Maas te mogen ontwerpen. Bij dit ontwerp hebben wij steeds getracht bepaalde eenvoudige principes in acht te nemen, die vandaag nog steeds gelden en dat ook in de toekomst zullen blijven doen.

- **EEN BRUG VOORZIET MEESTAL IN EEN BASISBEHOEFTE.** Of het nu gaat om een weg, een spoorweg, voetgangers of fietsers, of zelfs een waterweg, een brug maakt het mogelijk een communicatiekanaal over een obstakel, natuurlijk of kunstmatig, te leiden. Het is in deze basisbehoefte, waaraan allereerst en met voorrang moet worden voorzien.
- **EEN BRUG HEEFT MASSA.** De fundamentele beginselen van de statica kunnen bij het construeren niet worden verwaarloosd.
- **EEN BRUG IS DUUR.** Zoals bij elke constructie zijn er twee componenten in de prijs: materiaal en arbeid. De kunst van de ontwerper is het juiste evenwicht te vinden tussen de hoeveelheid materiaal en de hoeveelheid arbeid die nodig zal zijn om het te bouwen.
- **EEN BRUG GAAT LANG MEE.** Het eerste gevolg hiervan is dat het ontwerp niet modieus mag zijn. Het ontwerp moet tijdloos zijn. Het tweede, en even belangrijke gevolg is dat de materialen waarvan het wordt gemaakt, van hoge kwaliteit moeten zijn en zorgvuldig moeten worden toegepast. De constructiedetails moeten duidelijk en robuust zijn.
- **EEN BRUG MOET STABIEL ZIJN** in al zijn configuraties. Tijdens het gebruik natuurlijk, maar ook tijdens alle bouwfasen. Voor de bouw ervan moet gebruik worden gemaakt van realistische middelen, waarvan het belang op de schaal van het bouwwerk moet worden afgestemd.
- **EEN BRUG VEROUDERT.** Naast het principe van duurzaam bouwen moet die dus ook bezocht, onderhouden en gerepareerd kunnen worden.



6 '1915 Çannakale-brug' over de Bosporus



8 Spiraalfietsbrug in Leuven

Het is moeilijk om deze beginselen afzonderlijk te illustreren. Dit is de reden voor de term 'Integraal ontwerp', die hier in Nederland welbekend is. Toch zal ik trachten ze te illustreren aan de hand van voorbeelden, of die zich nu in België of elders bevinden.

- 1 Laten we beginnen met de basisbehoefte: een hindernis oversteken om van punt A naar punt B te komen. In de buurt van het station van Leuven moest een project worden gebouwd om fietsers in staat te stellen deze trap over te steken, uiteraard zonder te moeten afstappen. En de trap moest tegelijk bruikbaar blijven voor voetgangers. De studie moest beginnen met het onderzoeken van de behoeften op het gebied van verkeer, in dit geval fietsers. Het resultaat is beschreven in het decembernummer 2020 van *BRUGGEN*.

Een andere voetgangersbrug illustreert dit zelfde beginsel: een project dat helaas niet zal worden uitgevoerd omdat het aan een ander bureau is gegund.

Het 'Ile du Ramier' in Toulouse moet toegankelijk worden gemaakt voor fietsers en voetgangers. Bij het oversteken van de Garonne moet het doorstroomprofiel in acht worden genomen, wegens het risico op overstroming.

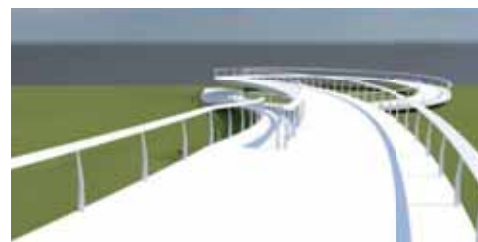
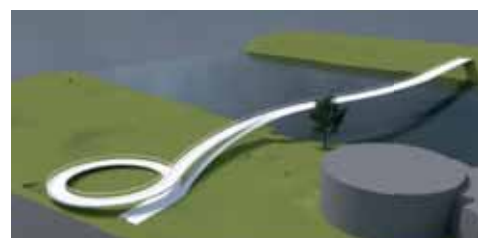
Maar de hellingen die voor dit soort verkeer worden opgelegd, laten een rechtlijnige oversteek niet toe. Alvorens zich de structuur voor te stellen, moet het 'lint' worden getekend, het oppervlak waarop de gebruikers zich zullen bewegen. Hier zorgen de bochten voor een vlotte, aangename en speelse doorstroming van het verkeer. Pas dan kunnen we het structurele antwoord op de functie geven., een structureel antwoord dat ook intrinsiek architecturaal is.

- 2 Laten we ons nu wenden tot de beginselen van statica. Het zal u duidelijk wezen: een brug moet in evenwicht zijn. Het verbaast mij dan ook soms te zien hoe

sommige architecten of zelfs ingenieurs volharden in het bouwen van piramiden op hun kop.

Als men deze twee bruggen vergelijkt, hoeft men geen genie te zijn om te beseffen dat het materiaal dat wordt verbruikt om het eenvoudig structureel evenwicht te garanderen, voor beide projecten niet te vergelijken is. Een zuivere boog- of paraboolvorm (fig. 10) boven, en een meer complexe vorm onder. Hierbij moet worden opgemerkt dat er gestreefd is naar een grotere geschiktheid bij de verdeling van de krachten, aangezien het vasthouden van de hangers plaatsvindt in de zone van de boog die effectief gebogen is. Aan de hand van dit voorbeeld wil ik aantonen dat de computers ons tegenwoordig in staat stellen alles te berekenen en ons de illusie geven van een grotere vrijheid bij het ontwerpen van structuren en met name van bruggen. Maar de technische en economische realiteiten, die achter een schijnbare sensualiteit schuilgaat, kan vrij complex blijken om te beheersen.

- 3 De manier waarop de brug is ontworpen heeft een directe invloed op de kosten ervan, en in dit verband hebben we gezien dat er drie categorieën bruggen zijn. Ten eerste zijn er, die een natuurlijke schoonheid hebben. Goed geïntegreerd in



9 ontwerp voetbrug 'Ile du Ramier' in Toulouse



← ↑ 10 vergelijk  
materiaalgebruik

hun omgeving, hebben zij over het algemeen een vorm die overeenstemt met hun structureel gedrag. Hun intrinsieke kwaliteit vereist geen toevoeging van enig overbodig element. Dan zijn er, die niet onopgemerkt willen blijven. Zij nemen een bijzondere plaats in, vaak in een stad, en de ontwerpers willen er een kleine decoratieve toets aan geven, in de kleur, of door het toevoegen van symbolische elementen die verband kunnen houden met hun geschiedenis. En tenslotte zijn er, die worden gebruikt als pronkstuk, als standaard, als uiterlijk teken van rijkdom. Deze krijgen een architectuur die de wetten van het rationalisme tart ten gunste van onbeperkte extravagantie.

Wat moeten we ervan denken? Dat iedereen het recht heeft op zijn eigen mening over de zaak. Zoals ik al zei, we hebben een visie, die geenszins universeel is. Het enige wat ik hier wil aantonen is de invloed van onze keuzes op de kosten, en daarachter ook op de gevolgen voor het milieu. Als we wat ik 'het rationele gebruik van materialen ten dienste van een zorgvuldige architectuur' noem, nader willen overdenken, laten we dan het geval nemen van het Viaduct van Millau (fig. 11) in Frankrijk. Dit viaduct is voornamelijk ontworpen door de Engelse architect Sir Norman Foster en de Franse ingenieur Michel Virlogeux.

Ondanks de immense reputatie van de architect, is zijn ingreep in een van 's-werelds meest prestigieuze viaducten bijna onmerkbaar. Het is vooral te zien in de finesse van zijn onderdelen, niet in de extravagantie van een overdadig architectonisch gebaar. Het algemene ontwerp van deze structuur is duidelijk het resultaat van een serieus werk van de ingenieur.

Bij voorbeeld, de A-vorm van de pylonen die de tuien en het dek ondersteunen, beantwoordt aan de noodzaak om de multi tuienstructuur in te bedden, in pijlers die voldoende stijf zijn om die doeltreffend te maken bij niet uniforme belastingen. En de V-vorm van de pijlers zorgt ervoor dat ze flexibel genoeg zijn om de uitzettingsvervormingen te weerstaan die het dek ondergaat onder invloed van extreme temperatuurschommelingen.

- 4 Als er één gebied is waar duurzaamheid belangrijk is, dan is het wel bij bruggen. Een brug wordt gebouwd om minstens 100 jaar mee te gaan. Hoe kan deze levensduur worden gegarandeerd als niet wordt gewerkt met duurzame materialen? Overall duiken nieuwe betonformules op, op basis van gerecycleerde toeslagmaterialen, hout, synthetische materialen zonder cement op basis van vlas, die getuigen van- en een goed voorteken zijn voor de groeiende bekommernis om de circulaire economie op de bouw. Het lijdt geen twijfel, dat er in de komende jaren en decennia, nieuwe materialen zullen ontstaan als gevolg van het toenemende onderzoek. Maar vandaag blijft, voor grote structuren, het gebruik van beton en staal een noodzaak. Om ze duurzaam te maken, moet voor hun intrinsieke kwaliteiten worden gezorgd.

Dit aquaduct (fig. 12, blz 19) is volledig gemaakt van voorgespannen beton, is 500 m lang en ondersteunt een 34 m breed en 4,50 m diep kanaal. De intrinsieke waterdichtheid wordt gegeven door het gebruik van wat we tegenwoordig 'normaal beton' zouden noemen, een C40/50.





Dit wordt bijkomend gegarandeerd door voorspanning in alle drie richtingen: in lengterichting, maar ook dwars en verticaal. Dit garandeert een minimale drukspanning van  $0,5 \text{ N/mm}^2$  in alle richtingen en in alle doorsneden onder water. Deze voorspanning is van het type 'voorspannen met nagerekt staal zonder aanhechting' en kan zo nodig worden vervangen.

Daarenboven wordt dit mogelijk gemaakt door de gebruikte bouwmethode, ik bedoel de lanceermethode (schuiven in de overspanningsrichting). Deze techniek maakte het mogelijk gebruik te maken van een vast bekistings- en wapeningssysteem en een rigoureuze bouwprocedure met een gering aantal voegen.

Ten slotte zal het gebruik van hoogwaardige materialen, zoals roestvaststaal, en een zorgvuldige afwerking een lange levensduur van het werk garanderen. Ik zou hier willen benadrukken dat het welslagen van dergelijke werken weliswaar afhangt van de bijzondere zorg die aan de uitvoering ervan wordt besteed, maar dat het ook de taak van de opdrachtgevers is om zichzelf de middelen en budgetten te verschaffen voor adequate studies. Wij zijn regelmatig, en nog onlangs, geconfronteerd met aanbestedingen waarbij de prijs van de studies een doorslaggevend criterium was voor de gunning van de opdracht. Dit gaat ten koste van de creativiteit en de kwaliteit in

de ruimste zin. Het is belangrijk dat alle klanten zich ervan bewust zijn dat een studie een dienst is die wordt verleend en niet een product dat wordt verkocht. Laten we hier waakzaam over zijn. Het bouwen van een uitzonderlijke brug is vaak een technische uitdaging. Als het ontwerp van essentieel belang is, kan het bepalen van de manier waarop het zal worden gebouwd even belangrijk zijn, en zelfs het ontwerp ter discussie stellen. Het viaduct van Millau (fig. 11), dat een paar wereldrecords brak, kon pas worden gebouwd na een indrukwekkend aantal uren studie.

Van de 80.000 bestede uren was meer dan 80% gewijd aan de analyse van alle fasen van de lancering en de tussenstops tussen de lanceringen!

- 5** Het laatste beginsel is inspectie en onderhoud. Ondanks alle zorg die aan het ontwerp en de constructie kan worden besteed, vergt een brug toch enig onderhoud. Een eenvoudig en zorgvuldig ontwerp vergt minder onderhoud dan ingewikkelde details. Hebben we liever een plaat die om de 4 m door stalen dwarsdraggers wordt ondersteund, of een plaat die over de hoofdstructuur heen uitkraagt? De eerste is veel minder duur om te bouwen, maar hoe zit het met onderhoud en opnieuw schilderen?

- 6** En tenslotte mogen we de toegangen, de noodvoorzieningen en de verlichting niet vergeten, die latere inspecties en eventuele versterkingen of reparaties mogelijk maken. Zo zal het viaduct van Vilvoorde op de Brusselse ring volledig worden vernieuwd om vier rijstroken in elke rijrichting mogelijk te maken en ten volle rekening te houden met de vermoeiingsproblemen die zich voordoen bij een aantal stalen constructies met orthotrope plaatvloeren.

Wat moeten we hieruit concluderen? De constructies van de toekomst zitten vandaag in de digitale modellen en morgen op de bouwplaatsen. De technologieën die bij de bouw van constructies worden gebruikt, evolueren langzaam. Zij moeten zichzelf bewijzen omdat zij niet de minste mislukking kunnen verdragen.

Op het gebied van voetgangersbruggen is grote vooruitgang geboekt in de fijnheid van constructies, met name met de komst van afgestemde, dynamische dempers waarmee de meeste dynamische effecten kunnen worden opgelost.

Verkeersbruggen, en zeker spoorbruggen, mogen niet aan modeverschijnselen onderhevig zijn, zij moeten de zes principes blijven respecteren, die de essentie vormen van hun levensduur.

