

BRON ÖVER FIRTH OF FORTH

Sture Samuelsson • www.sbi.se
Skapad 2009-12-09

Firth of Forth är mynningssundet för floden Forth i Skottland. Den järnvägsbro som byggdes under åren 1883–90 över detta sund, 14 km väster om Edinburgh, var då det största byggprojektet i världen. Än i dag är det ett av de mest imponerande projekt som genomförts. Det blev världens längsta järnvägsbro med en sammanlagd längd av över 2,5 km, med två fria spann på 521 m och med järnvägsspåren 46 m över högvattenytan. Det var den första stora bron helt byggd med det då nya materialet stål.

Skottland var till långt in på 1800-talet ett nästan väglöst land och stora delar av det kunde inte nås på annat sätt än till fots eller ridande på häst. Thomas Telford (1757–1834) hade, efter år av rekognosering, lett planeringen av ett vägnät och byggandet av Caledonian Canal. Efter honom kom järnvägsepoken. Under 1860-talet påbörjades byggandet av den järnväg som skulle förbinda Edinburgh med Dundee och Aberdeen. Den hindrades av två stora vatten, av det breda sundet Firth of Forth och längre norrut av floden Tay.



Bron över Firth of Forth på avstånd

Farlig överfart

Firth of Forth var ett stort hinder för trafiken. Det är ett brett och djupt sund med stora tidvattnvariationer och ofta stark vind. Romarna anses redan på 200-talet ha byggt en flottbro över sundet men därefter var överfarten länge helt beroende av färjor. Efter att järnvägsbron var färdig 1890 dröjde det ända till 1964 innan det fanns en vägförbindelse över sundet. Då invigdes den stora hängbron belägen ca 1 km väster om järnvägsbron. Med en total längd av 2 515 m och ett fritt spann på 1 006 m är den bland de tjugo största broarna i världen. Färjetrafiken över sundet var vanskelig och det skedde många olyckor. Ett antal berömda

ingenjörer var vid olika tider engagerade för att förbättra förutsättningarna för den. John Smeaton (1724–92) och John Rennie (1761–1821) kom båda med förslag till hur färjelägena skulle utformas för att fungera bättre. Robert Stephenson (1757–1850) föreslog en förändring av fyrens läge och Thomas Telford föreslog alternativa landningsplatser för färjorna att välja mellan med hänsyn till väderförutsättningar. En fast förbindelse över sundet hade diskuterats länge. Tunnlrar, för brytning av kol, hade redan byggts och under första hälften av 1800-talet satsades mycket pengar på att undersöka möjligheterna att bygga en tunnel hela vägen under sundet. Det visade sig vara en för svår uppgift. I mitten av sundet finns en djup fåra där botten består av sand och silt. En tunnel måste gå mycket djupt till en mycket hög kostnad. En bro var det enda realistiska alternativet.

Tidigare förslag

Uppgiften att bygga järnväg och broar från Edinburgh mot de två städerna på Skottlands östkust gavs till den framstående ingenjören Thomas Bouch (1822–80). Hans idé var att bygga en hängbro över sundet. Redan 1818 hade ingenjören James Anderson, för ett läge ca 100 m från där den nuvarande bron ligger, föreslagit en hängbro av gjutjärn med spännvidden ca 610 m. Han gjorde modellförsök med linor belastade med vikter och föreslog dimensioner. Som tur var byggdes bron aldrig. En sentida kontrollräkning visade att den skulle ha blivit för klen. Vid 1800-talets slut var hängbron en väl etablerad brotyp. Telford hade redan på av 1820-talet byggt hängbroar i gjutjärn vid Menai och Conway i Wales.

Vid Menai byggde också Robert Stephenson vid 1800-talets mitt en järnvägsbro, Britannia Bridge, som från början var avsedd att hängas upp i kedjor. Tågen skulle gå inuti en lådformad balk som visade sig så styv och stark att linorna inte behövdes. Stora hängbroar hade byggts i USA av den tyskättade ingenjören John A. Roebling (1806–1889). Han byggde Brooklyn Bridge i New York, Niagara Bridge samt The Roebling Suspension Bridge i Cincinnati. Den senare påbörjades 1856 men, på grund av inbördeskriget, slutfördes den inte

förrän 1867. Det var en järnvägsbro med den fria spännvidden ca 380 m.

Katastrofen

Under 1870-talet ritade Thomas Bouch ett flertal broar som baserades på hängbroprincipen. 1873 lade han fram ett förslag till en ny Forthbro uppdelad i två huvudspänn med den då enorma spännvidden av 1 600 ft, dvs ca 490 m. Ett problem var att nedböjningarna under last uppskattades bli stora och bron var heller inte särskilt vacker. 1878 fick han dock i uppdrag att bygga den och satte igång förberedande arbeten. Ett fundament var färdigställt då katastrofen inträffade. Den bro han byggt över floden Tay, som var färdig 1878, kollapsade i december 1880. En lång sträcka av bron bröts sönder och ett tåg med 75 passagerare drogs med i fallet. Bron över Tay var världens längsta järnvägsbro, 2 miles, dvs 32 km lång. Den var byggdes med ett stort antal balkar lagda på pelare av sten. Balkarna var fackverksbalkar av gjutjärn och smidesjärn, s k gitterbalkar med korslagda livstänger. Närmast land var järnvägsspåren placerade ovanpå de dubbla, relativt låga balkarna. För att få tillräcklig seglingshöjd under mittersta spannen låg balkarna där högre och tågen körde mellan dem. En kommission kunde konstatera att det fanns flera möjliga orsaker till katastrofen. I förundersökningarna hade man missat att grundförhållandena i sundets mitt var mycket dåliga. Vattendjupet var där mycket stort och då vissa pelarna måste flyttas, blev avståndet mellan dem större än avsett. Balkar förlängdes men dimensionerna på dem och på pelare ökades inte i tillräcklig omfattning. Kvaliteten på det gjutjärn som användes var också undermålig och det fanns många brister i arbetsutförandet. Vindbelastningen var större än den antagna. En teori var att tåget, som utgjorde ett stort vindfång, kunde ha spårat ur, kraschat i brobalkarna och därmed knäckt bron. Bron kunde dock blåst ner även utan tåg. Kommissionen fann att huvudorsaken var slarv och Thomas Bouch, som för övrigt hade adlats för sina tidigare insatser, gavs huvudparten av skulden för katastrofen. Han blev fråntagen ansvaret att bygga Forth-bron och dog som en bruten man kort därefter. Allmänhetens

förtroende hade rubbats. Någon upprepning av Taykatastrofen ville man inte ha. Det gällde att för Forth-bron ta fram en konstruktion som gick att lita på.

Höjning av kraven

Katastrofen ledde till en höjning av nivån på såväl projektering som på material och byggt teknik. Ännu under senare hälften av 1800-talet baserades inte alltid dimensionering av bärande konstruktioner på de teorier som vetenskapen hade resulterat i. Man byggde främst efter beprövad erfarenhet och fattade beslut om nya material och konstruktioner på basis av provningar. Naturlaster, som t ex vindbelastning, var inte heller säkert bestämda. Efter ett helt år av utredningar gav järnvägsföretaget sina konsulter Sir John Fowler (1817–98), W H Barlow (1812–1902) och T H Harrison (1808–88) i uppdrag att utarbeta ett nytt förslag till en järnvägsbro över sundet. De föreslog en bro med konsoler som bar inhängda balkar. Brotypen var okänd i Storbritannien men det fanns exempel på liknande konstruktioner i USA, t ex Niagara Cantilever bridge, färdig 1883. I Europa fanns det också sådana broar men inte så stora. Så tidigt som 1867 hade Benjamin Baker (1840–1907) i en artikel i tidningen The Engineer argumenterat för en sådan konstruktion för broar och han och Fowler hade 1871 utarbetat ett förslag till en sådan bro med 209 m fri spännvidd att byggas över floden Severn. Intressant i detta sammanhang är att Heinrich Gerber (1832–1912), år 1866, fick patent på sin sedermera så kallade "Gerberkonstruktion". Den innebar att kontinuerliga balkar försågs med leder på sådant sätt att skadlig inverkan av sättningar i stöden eliminerades. Den första bron med den konstruktionen byggdes över floden Main vid Hassfurt, 1867. Den konsolande Forthbron fungerar på ungefär samma sätt. I parlamentet var man överens om att i fortsättningen skulle byggandet av Forthbron följa vissa kriterier. Enligt de strikta föreskrifter som utarbetades skulle bron ha stor styvhet under rullande last och både under byggnadstiden och som färdigställd skulle bron vara säker mot orkanvindar. Inget oprövat material fick användas, stål måste uppfylla kraven enligt de kontrollorgan som myndigheterna

anvisade. Under hela projektet skulle god kontroll över ekonomin upprätthållas. Parlamentet utsåg en särskild kontrollfunktionär som på plats, var tredje månad, skulle kontrollera att allt gick rätt till. Avsevärt högre dimensionerande vindlast än den som gällt tidigare föreskrevs, 56 lbs/ft² (ca 2,8 kPa) istället för 30 lbs/ft² (ca 1,5 kPa). Det fanns inga detaljerade regler för hur den skulle appliceras på komplicerade strukturer och inte heller togs hänsyn till att vindlast kan variera kraftigt. Kunniga och erfarna ingenjörer kunde påverka tillämpningen mer än i dag.

Det nya förslaget

1881 presenterade Fowler och hans yngre partner Benjamin Baker ett reviderat broförslag. I det ursprungliga var "konsoltornen" ledat upplagda och var därför inte stabila. De skulle inte kunna bära de inhängda balkarna förrän de motriktade konsolerna hade förankrats. Nu föreslogs att "konsoltornen" skulle vara styvt förankrade i grunden. Baker hade också funnit det lämpligt och mer ekonomiskt med ett annat förhållande mellan konsolernas och balkarnas längd. Balkarna gjordes kortare, från ca 152 m till ca 107 m och konsolerna ökades från ca 187 m till ca 207 m. Detta krävdes för att balkarna skulle kunna byggas utkragande från konsolerna, en metod som krävde stor precision under hela byggprocessen. Det modifierade förslaget uppfyllde fullständigt de givna kriterierna. Bron var lätt att beräkna och var styv och stabil under såväl byggskede som bruksskede. Landfästena på båda sidor om sundet hade lämplig höjd för att ge bron tillräcklig seglingshöjd. Den stora fria spännvidden förutsatte bra grundläggningsförhållandena på lämpliga ställen, vilket fanns. På den lilla ön Inchgarvie kunde bron ena "konsoltorn" placeras. Fowler och Baker hade övertygande visat att deras konstruktion uppfyllde kraven och att de och deras medarbetare hade mod, visioner och tillräckliga kunskaper att utveckla den och att genomföra projektet. Järnvägsföretaget hade tillräckliga finansiella resurser och brobygget accepterades av dess styrelse den 30 september 1881. Beslutet att bygga bron fattades i parlamentet den 12 juli 1882. Baker hade hjälp med beräkningsarbetet av en matemati-

ker från Cambridge, Allan D. Steward (1831–94). Det finns inga beräkningar bevarade som gör det möjligt att exakt se vilken metod som användes. Steward själv anger att han använde sig av, vad han kallade "diagrams of forces", en metod som utvecklats av universalgeniet Clerk Maxwell (1831–79). Sannolikt var det den virtuella kraftmetoden som Maxwell tidigare publicerat.

Byggandet av bron

Uppdraget att bygga bron gick till Sir William Arrol & Co. Det beslöts också att den skulle byggas i stål som då var ett relativt okänt material. Det fanns en del skeptiker som ansåg stålet olämpligt eftersom det inte är lika mjukt som smidesjärn och att det är mer rostbenäget. För att bestämma lämplig nivå på dimensionerande spänningar genomförde Fowler och Baker en mängd provningar och lade ner stor tankemöda. På basis av dessa utredningar gav Board of Trade dem tillåtelse att tillämpa tillåtna spänningen 7,5 tons/in² dvs 115,8 MPa, vilket var ca en fjärdedel av brottspänningen. Ingen skillnad gjordes på drag- och tryckspänningar. De var medvetna om att utmattning kunde vara ett problem men hade inte möjlighet att testa det. Efter att bron nu har fungerat i 120 år kan den valda spänningsnivån anses ha varit väl avvägd.



Bron under byggande vid ön Inchgarvie.

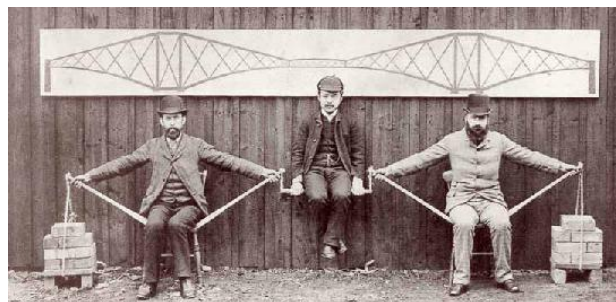
William Arrol (1839–1913) påbörjade arbetena 1882. Han var en mycket erfaren och begåvad ingenjör som utvecklade effektiva metoder för alla projektets moment och han ledde själv det gigantiska planerings- och byggarbetet. Han var redan väl orienterad om förhållandena på platsen eftersom han tidigare även varit utsedd att leda byggandet av Thomas Bouch:s bro. Efter att ha mätt in brons läge mycket noggrant med hjälp av triangulering påbörjades murning av pirar och arbetet med de stora plintar som bron skulle förankras på. Dessa byggdes i kassuner av stål som tillverkades på land, bogserades på plats och sänktes ner. Under botten på dem fanns ett utrymme i vilket arbetare under tryckluft kunde gräva dem i läge.

Detta utrymme fylldes senare med betong och inuti kassunen murades väggar med huggen sten varefter de fylldes med sten och betong. Utplaceringen av kassunerna var inte helt lätt. En av dem hamnade snett och fylldes med vatten. Det tog nio månaders arbete att få den i rätt läge. Det uppstod ett fullkomligt industriområde på södra sidan om sundet, Queensferry. Där fanns ett ritkontor och arbetsplatser för olika arbetsmoment utrustade med maskiner drivna av ångmaskiner. Bron konstruerades avsiktligt med så få stänger som möjligt för att få ner antalet knutpunkter för att underlätta framtida underhåll. Stora delar av konstruktionerna skulle komma att tryckbelastas och Baker hade därför valt cirkulära tvärsnitt för stängerna. Plåtarna kröktes med en hydraulisk press och komponenterna förtillverkades i speciella gigger. De snedställda undre lutande stängerna och de horisontella rören ("skewback") som skulle bli tryckbelastade, fick ansenliga dimensioner och byggdes upp av flera lager av stålplåt.

Självbärande konstruktion

Konstruktionen skulle under hela byggprocessen vara självbärande och arbetet planerades efter det. De förtillverkade komponenterna lyftes på plats och nitades samman med stor noggrannhet och precision. Det föreskrevs att hålen skulle vara borrarade, inte stansade, och att nitningen i möjligaste mån skulle ske genom pressning. För detta byggdes speciella press-

verktyg. De kraftiga uppåtriktade rören på "konsoltornen" byggdes först. De lutades inåt för att ge bättre stabilitet. De utragande delarna på "konsoltornen" byggdes symmetriskt åt båda hållen. För att förhindra extraspänningar från temperatur var tre av de fyra förankringsupplagen på varje "torns" plintar monterade så att de tillåter viss horisontell rörlighet. Ställningar, från vilka monteringen utfördes och på vilka kranar och nitningsutrustning placerades, hängdes på konstruktionerna och flyttades med allteftersom arbetet fortskred. Arbete bedrevs dygnet runt, nattetid i elektriskt ljus från båg-ljuslampor. Brons dimensioner var mycket väl studerade. Den kan se överdimensionerad ut men har kontrollberäknats under senare år och även med våra normer har de ingående komponenterna rimliga dimensioner. Normalt ses bron från sådan vinkel att det är omöjligt att se helheten men från håll, t ex från den nya vägbron, ser den nästan graciös ut. Konstruktören av en senare liknande bro, Quebecbron, ansåg att den var överdimensionerad. Detta uttalande fick han senare äta upp. Den bro som under hans ledning byggdes, 1907, kollapsade och även den som därefter byggdes, 1917, drabbades av ett ras i sent skede. Som mest arbetade 4 600 man på Forthbron. Det var mest skottar, engelsmän och irländare men det kom också många arbetare från andra länder, även från Sverige. Arbetet var mycket riskabelt och trots stor försiktighet omkom 57 personer (senare forskning anger 98) och flera hundra skadades allvarligt, de flesta på grund av fallolyckor. Ett speciellt riskabelt arbete var att flytta och ta ner ställningar eftersom det ofta fanns arbetare på lägre nivåer.



Brons funktionssätt

Slutförande och provbelastning

Efter att brons bärande konstruktion var komplett monterades brodäcket och på 6 m långa sleepers av ek, med 12" kvadratisk tvärsnitt, fixerades de dubbla spåren. Bron provbelastades i januari 1890 med två tåg, var och ett med 50 kolvagnar och tre lok, med en sammanlagd vikt av 1800 ton. Tågen kördes bredvid varandra och mätningar gjordes av deformationerna. De låg inom beräknade gränser och som mest var nedböjningen 7 tum, dvs ca 18 cm, längst ut på de utkragande armarna. Bron var ett av de första och då även det största projekt som byggts med stål. Totalt gick det åt 54 000 ton stål och 7 miljoner nitar. Eftersom det var känt att stål är mer rostbenäget än gjutjärn och smidesjärn planerades redan från början för framtida underhåll. Delarna rengjordes noggrant och behandlades med kokt linolja. Vid tillverkningen målades insidan av tuberna och efter montage utsidan med flera omgångar av olika typer av blyfärger. I dag underhålls bron kontinuerligt med nyare färgtyper efter ett särskilt program. Detta arbete är utlagt på ett företag som har 20 man heltidsanställda för att utföra arbetet. Bron över Firth of Forth har nu funnits i 120 år. Den blev en viktig transportled norr ut i Skottland. Varje dag körs mellan 190 och 200 tåg över den. De är lättare än dåtidens tunga tåg med ånglok men det är ändå imponerande. Den har konstruerats och byggts för att vara tillförlitlig och den fungerar ännu helt som det var tänkt. Det har inte senare byggts många broar efter samma principer. Det har utvecklats andra i byggskedet mer ekonomiska metoder men de leder sannolikt inte till lika robust resultat. Bron är ett av de största mästerverk som ingenjörer åstadkommit och är utnämnt som en UNESCO World Heritage Site.

Fakta

Beständig – än idag, 120 år efter invigningen, trafikeras bron av 190-200 tåg per dygn.

Läs mer

[UNESCO:s Tentative List](#)

