



Figur 1. Åbuen ved indvielsen i juni 2008. Broen holdt til "prøvebelastningen". Foto NIRAS.

Åbuen – en stibro over Ågade

Ingeniører og entreprenører udfordres stadig oftere af arkitekters visioner om at skabe markante elegante og æstetiske konstruktioner. Således også for Åbuen – en stibro over Ågade som er på grænsen af det teknisk mulige.



Af Civilingeniør Christian von Scholten, Broer, NIRAS
cvs@niras.dk

Indledning

Den nye stibro over Ågade i København er en forførende bro på flere måder. Med sit dristige design kan de daglige trafikanter, som passerer over og under broen, ikke undgå at lægge mærke til den og få lyst til at se nærmere på den. For entreprenøren, som har bygget broen og ingeniøren, som har designet den, har den umiddelbart enkle og spændende bro været et "blandet" bekendtskab med betydeligt flere udfordringer end forventet.

Del af nye cykelrute på tværs af København

Den nye bro skal sikre de mange fodgængere og cyklister, som dagligt krydser den stærkt befærdede Ågade, og indgå i et nyt net af grønne cykelruter på i alt 110 km på kryds og tværs i hovedstaden. Den elegante og iøjnefaldende bro danner samtidig et både konkret og æstetisk bindeled mellem Københavns og Frederiksberg kommuner, idet den med sin høje bue hæver sig over Ågade som en moderne byport anno 2008. Dette er formentlig også grunden til at borgerne har givet den navnet: "Åbuen".

Broen er en del af Nørrebro Cykelrute, som, når den er færdig, bliver en del af en større cykelrute fra Emdrup i nord til Hvidovre i syd via Frederiksberg og Valby.

I 2005 afholdt Københavns Kommune en brodesignkonkurrence, som blev vundet af Dissing+Weitling, arkitekter. Brokonceptet

inkl. stianlæg på begge sider af broen blev udbudt i en totalentreprise i 2006, som Barslund A/S vandt med Bladt Industries som stålentreprenør og NIRAS som rådgiver. Udover detailprojektering af selve broen og stianlæg, se figur 2, bestod rådgivningen også af design af interimskonstruktioner for montagen, samt udarbejdelse af værkstedstegninger for stålbroen.

Brokonstruktionens udformning

Brodrageren er 6,5 meter bred og udformet som et opsvejt krumt stålkasseprofil, der spænder 65 meter. Tværsnittet minder om en flyvinge og er maksimalt på det højeste sted blot 0,65 m højt. Hovedspændet af brodrageren understøttes af en slank cirkelkrum rørbue via trækstag. Rørbuen med en diameter på kun 0,60 m hælder 45 grader og understøtter derved kun drageren langs den ene side. Brodrageren understøt-

tes desuden lodret på selve buen i dennes skæringspunkter med drageren. Broens ydre geometri måtte ifølge udbudet ikke ændres af totalentreprenøren.

Broens virkemåde

På grund af hængestagens ensidige placering påvirkes brodrageren af kraftig vridning. Vridningen føres til broens ender hvor vridningsmomentet optages som træk – tryk kræfter, se figur 5. Herudover udsættes buen for en uheldig påvirkning, idet trækstagene ikke ligger i buens plan. Dette giver en meget ugunstig skæv påvirkning af buen.

Konstruktionens virkemåde er ikke umiddelbar indlysende. Det viser sig, at konstruktionen ikke opfører sig som en traditionel buekonstruktion, hvor lasten bæres ved buevirkning, men i langt højere grad ved bjælkevirkning i brodrageren og buen. Således fordeler den lodrette last på broen i brodrageren og buen sig stort set efter disse bøjningsstivheder. Man kan opfatte det på den måde, at brodrageren er delvist indspændt ved broenderne over en linje gen-

nem brodragerens to trykunderstøtninger i hver ende. Set i dette perspektiv er forholdet mellem konstruktionshøjde og spændvidde omkring $h/l \sim 1/90$ hvilket indikerer, at der er tale om en ekstrem slank konstruktion.

Yderligere er brodragerens ender skråt understøttet i linjer parallelle med vejtracéet i Ågade, hvilket er logisk set ud fra et æstetisk synspunkt, men det giver til gengæld en meget asymmetrisk fordeling af brodragerens bøjningspåvirkning.

Fabrikation

Det har været en stor teknisk udfordring, at få konstruktionerne til at "opnå tilstrækkelig styrke" med den låste geometri som var grundlaget for totalentreprisen. Arkitektens og bygherrens ønske om, at broens ydre geometri ikke måtte ændres, blev overholdt, men det har krævet særdeles kraftige stålgodstykker, høje stålstyrker (S355 og S420) og utraditionelle detaljer på grund af bl.a. pladshensyn.

En anden stor udfordring har været at "beskrive" den geometri, som smeden skulle

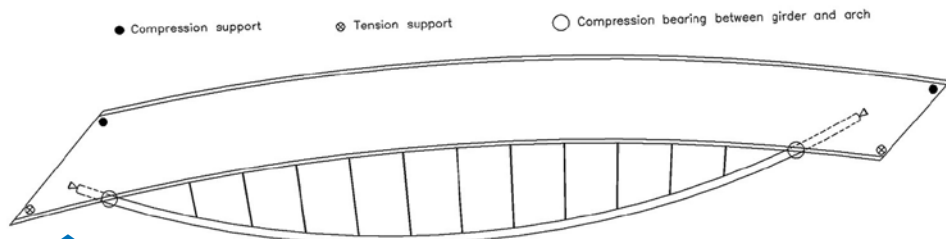
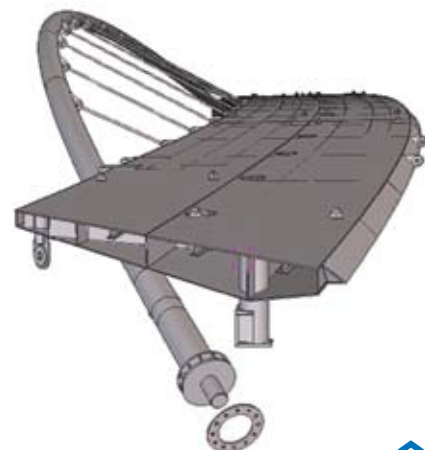
skære og svejse ståldelene sammen efter. Da broen er meget slank, deformeres den sig betydeligt under de lodrette laste den udsættes for. Dette skulle der kompenseres for ved udarbejdelsen af arbejdstegningerne, således at brodragerens tværfald, længdefald og broens frihøjde over Ågade blev rigtige i den færdige monterede bro.

Dette kompliceres yderligere af, at broen krummer på flere leder, samt at broen ikke har symmetrier, som kan udnyttes i projekteringen. Alt i alt resulterer det i rigtig mange tegninger. For at håndtere dette er broen designet med TEKLA, som er et 3D CAD program. Der er udarbejdet over 600 arbejdstegninger til entreprenøren. Uden et sådant program havde det ikke været muligt at løse opgaven inden for de tidsrammer, der var. F.eks. ville det have været særdeles vanskeligt og risikofyldt at bestemme trækstagens længde uden dette værktøj. Den 65 m lange brodrager er produceret og opsvejt i seks dele på specialbyggede montagestativer i Polen, se figur 6. Brodelene blev derefter fragtet til Danmark og sam-

Figur 2. Plan af stianlæg omkring broen. Nørrebro til venstre og Frederiksberg til højre.



Figur 3. Broen set fra Nørrebro. Foto Jon Norddahl.



Figur 5. Statisk system, planbillede.

Figur 4. Figuren viser en samlet 3D model (Tekla) af hele stålbroen uden rækværk. Alle ståldele og detaljer er modelleret, selv montagebeslag til kranløft. Ud fra dette kunne produktionstegningerne af alle ståldele genereres til smeden.



Figur 6. Hele brodrageren under opbygning hos smeden i Polen. Brodrageren er opbygget af kegleflader med plader på op til 30 mm's tykkelse. Brodrageren bliver her opsvejt på hovedet, delt i to dele på tværs og i 3 dele på langs. Efterfølgende fragtes de til Ågade og sammensvejses retvendt. Foto Bladt.

mensvejt på de medbragte stativer.

Det var ganske vanskeligt for entreprenøren at finde og få leveret Ø600 mm rørsektioner til buen på grund af de markante godstykkelser på mellem 45 og 90 mm og stålstyrker på op til S420. Produktionen foregik i Polen, hvor rørsektionerne blev svejst sammen til større dele. Herefter blev de sendt til England for at blive bukket til den rigtige cirkelform. Tilbage i Polen blev de svejst sammen til to sektioner, se figur 7, og sendt til byggepladsen på Nørrebro, hvor den endelige sammensvejsning skete.



Figur 7. De to færdige buesektioner er klar til afrejse til Danmark. Øjerne til trækstag har alle lidt forskellig vinkel til buen. Foto Bladt.

Montagen

Selve montagen krævede en omfattende planlægning herunder hensyntagen til gamle kloaker og dimensionering af mange interims- og montagekonstruktioner. Montagen krævede, at alle 6 kørebaner på Ågade spærres for trafik for en periode. Københavns Kommune gav tilladelse til, at montagen kunne gennemføres Skærtorsdag og Langfredag 2008.

Montagen indledtes Skærtorsdag morgen, hvor den færdige 65 m lange og 220 tons tunge brodrager blev transporteret på blokvogne ind på Ågade. Herfra blev den hejst op i fire af Danmarks største mobilkraner, se figur 8, og lagt til rette på broens betonvederlag og fire hydrauliske donkrafte fordelt jævnt hen langs og under broen. Herefter blev buen hejst på plads ved hjælp af tre mobilkraner og placeret i sin endelige position, hældende 45 grader med vandret således, at de 11 trækstag mellem bue og brodrager kunne monteres.

Brodrager, bue, stag og betonvederlag passede sammen inden for få millimeter, så entreprenøren kunne samle delene uden problemer, se figur 9. Mens mobilkranen stadig havde let fat i buen, blev de 4 hydrau-



Figur 8. Brodrager på 220 tons løftes på plads med fire store mobilkraner. Foto Jon Norddahl.

liske donkrafte under brodrageren langsomt sænket, hvorved brodrageren og bue langsomt kom i funktion ved at broen deformerede sig for sin egen vægt. Da brodrageren var fri af den sidste donkraft, spændte broen 65 m frit.

Alle på pladsen holdt vejret, da broen blev monteret og kom i funktion, men alt

gik som planlagt. Broen blev færdigmonteret 12 timer hurtigere end planlagt. At det lykkedes så godt, skyldes primært, at en række forudsætninger forinden var på plads: Bladt havde foretaget et meget grundigt planlægningsarbejde, Niras' tegninger og beregninger var meget præcise, og smeden havde været virkelig omhyggelig. For selve

kranløftene modtog BMS i øvrigt den Europæiske Kranpris 2008.

Svingningsdæmpere i brodrageren

Grundet det ekstremt slanke design, der forholdsvis lange spænd samt den ensidige understøtning af drageren, vil broen være meget følsom over for vibrationer induceret af fodgængerne. Dette understreges af, at broen har hele 7 egenfrekvenser under 5 Hz. De dynamiske undersøgelser under projekteringen viste, at det var nødvendigt at designe og installere tunede massedæmpere (TMD) for at tilgodese en rimelig svingningskomfort for fodgængerne. En TMD er en relativ enkel enhed bestående af en kasse, hvori en masse kan bevæge sig på fjedre og dæmpes af en hydraulisk dæmper.

Normalt undersøges fodgængerbroer alene for svingninger opstået ved gang, men det viste sig også nødvendigt at dæmpe for den situation, hvor en lille gruppe personer bevidst ved hop sætter broen i ubehagelige svingninger. Broen er dæmpet med TMD'er ved broens to laveste egenfrekvenser, som er ca. 1 Hz og lidt under 2 Hz, jf. [1].

Konklusioner

Alt i alt blev arkitektens og bygherrens visioner og ønsker opfyldt med en flot, spændende og markant bro. Entreprenøren og ingeniøren blev udfordret med et forførende flot design, der var på grænsen af det teknisk mulige.

Det bør overvejes en anden gang at undgå at udbyde et så særpræget og udviklingsorienteret design, som der her er tale om, i en totalentreprise, hvor det har været et krav, at den ydre geometri ikke måtte ændres. Dette har medført uøkonomiske konstruktioner.

Det har været muligt at designe broen, fordi der i dag eksisterer 3D tegneværktøjer der kan håndtere meget komplicerede geometrier. Dette giver store muligheder i fremtiden for helt nye konstruktionsudformninger, men også tilsvarende for udfordringer, teknisk såvel som anlægsøkonomisk.

Det har været en ubehagelig oplevelse for rådgiveren alene at skulle tro og stole på de elektroniske værktøjers formåen i projekteringen. Fejl er næsten umulige at fange i en almindelig kvalitetssikring. Og sund fornuft og grove check er vanskelige at anvende ved et sådant design.

Referencer

RASMUSSEN, M., Saberi, M, Døssing, J and Scholten, C., "Arched footbridge - Architectural elegance and Engineering challenges", Conference, Footbridge 2008, Porto, July, 2008, pp. 293-300.



Figur 9. Brodrager, bue og trækstag er monteret og endnu "spændingsløse". Herefter sænkes de hydrauliske donkrafte og broen spænder frit. Foto NIRAS.