

STEEL CASES

Åbuen - elegant stibro over Ågade i København - på grænsen af det teknisk mulige.



Figur 1. Åbuen. Gang- og cykelbro over Ågade mellem København og Frederiksberg. Broen blev åbnet for offentligheden den 21. juni 2008. Foto NIRAS.

Arkitektonisk elegance

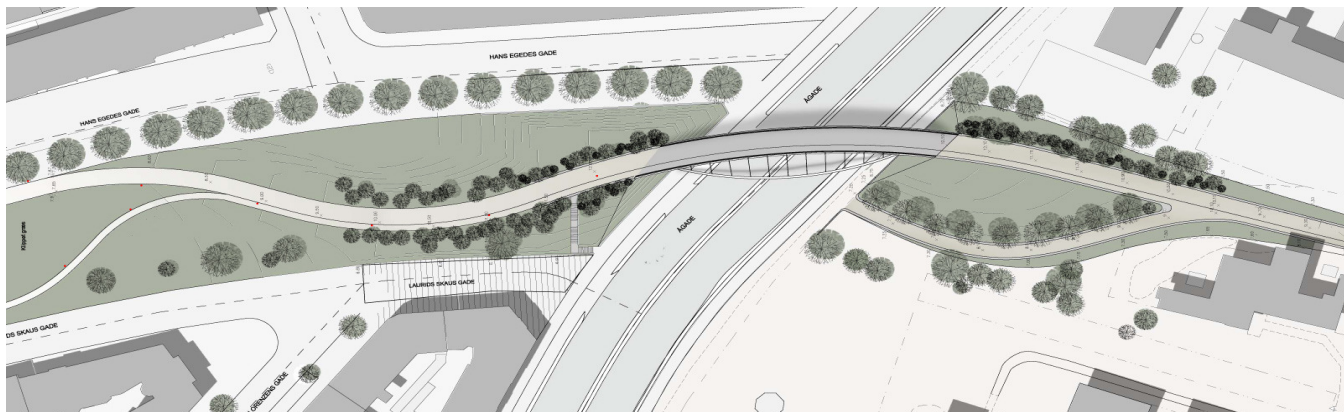
En arkitektonisk smuk og elegant bueformet gangbro blev den 21. juni 2008 åbnet for offentligheden i København, se figur 1.

Formålet med bygningen af denne gangbro var at lede fodgængere og cyklister sikkert over den stærkt trafikerede Ågade, men det var samtidigt en vision at skabe et stykke signifikant dansk arkitektur i et slankt og elegant design.

Der har været en god del avanceret og sofistikeret ingeniørarbejde at gøre denne vision til virkelighed.

For at opnå et rent, spinkelt udtryk anvendte projektet en anden side af stålets potentiale. Hele den designmæssige tilgang til bearbejdning og samling af stålet var anderledes, idet projektet udfordrede stålmaterialalets håndværksmæssige potentiale, i stedet for at dyrke de tekniske, industrielle kvaliteter, som så ofte bliver eksponeret som det overordnede. Konceptdesignet blev udviklet af arkitekt-

firmaet Dissing+Weitling og ingeniørfirmaet Cowi i forbindelse med en arkitektkonkurrence som Københavns Kommune afholdt i 2005. En dommerkomité kaldte det vindende forslag elegant og graciøst og vurderede, at broen med sin buede og lette form på fornem vis supplerer de markante og massive karrébyggerier i området. Arkitekten valgte blandt andet den buede form for at broen kan fungere som en naturlig fortsættelse af den i forvejen slyngede Nørrebro Cykelrute, se figur 2.



Figur 2. Broens indpasning i et slynget stianlæg omkring Ågade. Illustration Dissing+Weitling

Åbuen

Københavns Kommune var bygherre og udbød efterfølgende i 2005 bro- og parkprojektet i en totalentreprise, som Barslund A/S vandt. Bladt Industries var underentreprenør på bygningen af stålbroen. NIRAS var rådgiver for Barslund for bro og stiprojektet og udførte detailprojekteringen inkl. arbejdstegningerne for fabrikationen af broen samt tegningerne til interimskonstruktionerne i forbindelse med fabrikation og montage.

Broens beliggenhed og formål

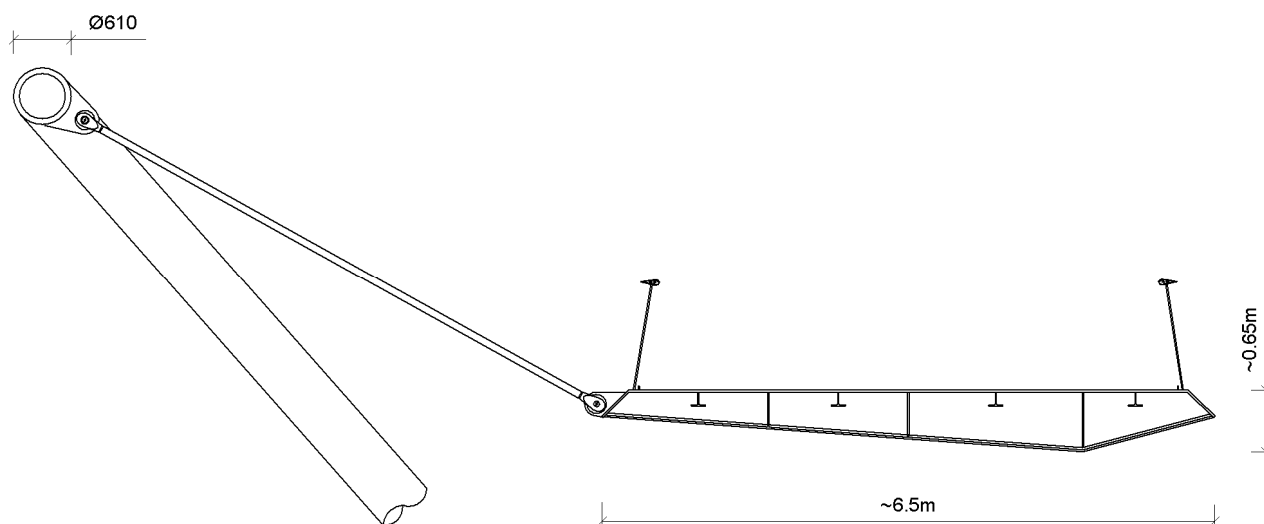
Ågade på grænsen mellem Nørrebro og Frederiksberg er en vigtig ind- og udfaldsvej for mange af byens bilister, men for cyklister og fodgængere kan den brede gade være lidt af en udfordring at krydse.

Broen er et led i København og Frederiksberg Kommuner arbejde med at etablere et net af grønne cykelruter på kryds og tværs af byen. 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.

Udover at gøre livet mere behageligt for cyklisterne, er det vigtigt for kommunerne, at broen kommer til at udgøre et originalt og æstetisk byelement, der passer ind i sine omgivelser og kan tjene som en moderne byport på tværs af den befærdede gade.

Brokonstruktionens udformning

Brodrageren er 6,5 meter bred og udformet som et opsvejt krumt stålkasseprofil, der spænder ca. 65 meter. Tværsnittet minder om en flyvinge og er på det højeste sted blot 0,65 m højt, se figur 3.



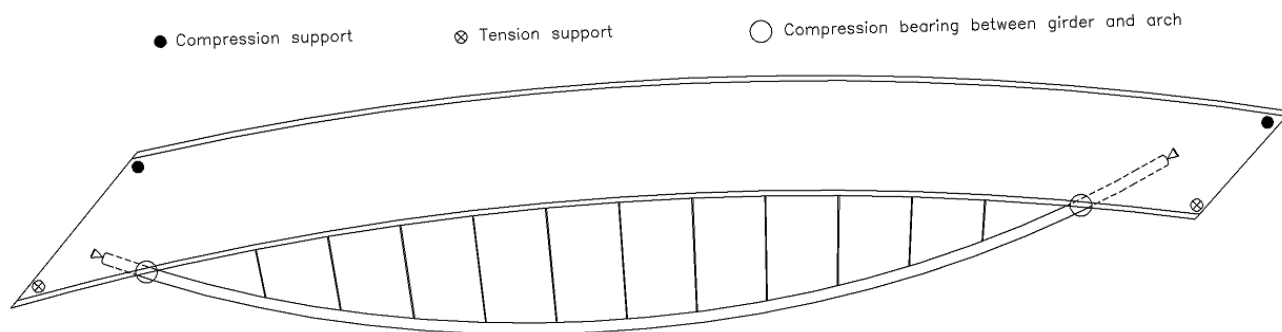
Figur 3. Tværsnit af brodrager og bue. Illustration NIRAS.

Hovedspændet af brodrageren understøttes af en slank cirkelkrum rørbue via trækstag. Rørbuen med en diameter på kun 0,61 m hælder 45 grader og understøtter derved kun drageren langs den ene side. Brodrageren understøttes desuden lodret på selve buen i dennes skæringspunkter med drageren.

Broens virkemåde

På grund af hængestagenes ensidige placering påvirkes brodrageren af kraftig vridning. Vridningen føres til broens ender, hvor vridningsmomentet optages som træk – tryk kræfter.

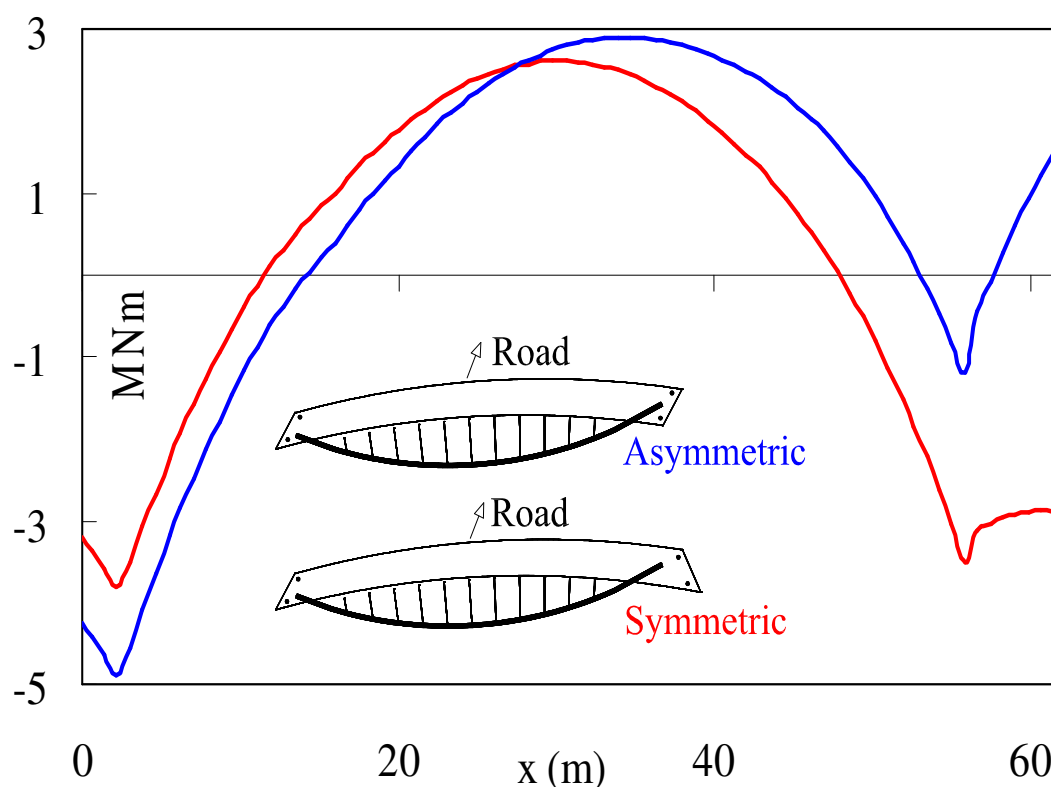
Herudover udsættes buen for en u hensigtsmæssig påvirkning, idet trækstagene ikke ligger i buens plan. Dette giver en ugunstig skæv påvirkning af buen, se figur 4.



Figur 4. Statisk system, planbillede. Illustration NIRAS.

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 brobelastning sig, i brodrageren og i buen, stort set efter disses bøjningsstivheder. Man kan opfatte det på den måde, at brodrageren er delvist indspændt ved broenderne over en linie gennem brodragerens to trykunderstøtninger i hver ende af broen. Set i dette perspektiv er forholdet mellem konstruktionshøjde og spændvidde (h/l) usædvanligt lavt, $\sim 1/90$, hvilket indikerer, at der er tale om en ekstrem slank konstruktion.

Yderligere er brodragerens ender skråt understøttet i linier parallelle med vejtracéet i Ågade, hvilket er logisk set ud fra et æstetisk synspunkt, men er til gengæld medvirkende til en meget asymmetrisk fordeling af brodragerens bøjningspåvirkning, se figur 5.



Figur 5. Svagaksemomentet i brodrageren for jævn fordelt lodret last. Illustration af betydningen af understøtningernes placering/udformning. Den asymmetriske er den aktuelle. Illustration NIRAS.

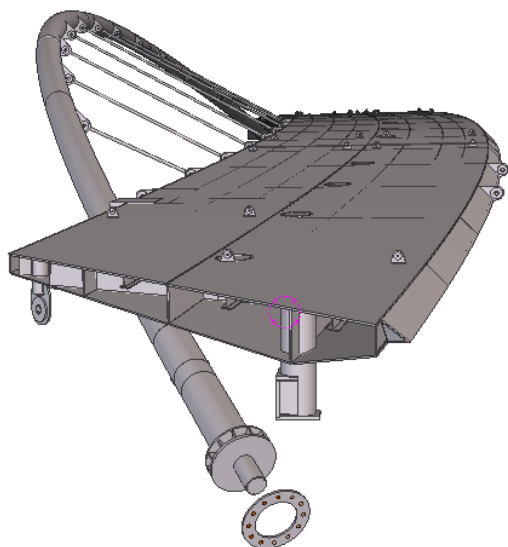
Overordnet set afspejler broens spektakulære æstetiske design ikke et statisk princip, hvor stålets bærende funktion kan udnyttes optimalt.

Ingeniørens udfordringer

Det var en stor teknisk udfordring for entreprenørens rådgiver, 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 krævede usædvanlig kraftige stålgodstykkelser, op til 90 mm, 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 entreprenøren skulle skære og svejse ståldelene sammen efter. Da broen er meget slank, deformeres den sig betydeligt, når den belastes af sin egenvægt. 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 detailprojekteringen. Alt i alt resulterede det i mange tegninger. For at håndtere dette blev broen designet med TEKLA (3D CAD), se figur 6. Der er udarbejdet over 600 arbejdstegninger til entreprenøren. Uden et sådant CAD værktøj havde det været vanskeligt at løse opgaven indenfor de tidsrammer der var. F.eks. ville det have været meget vanskeligt og risikofyldt at bestemme trækstagenes længde uden dette værktøj.



Figur 6. Figuren viser en samlet 3D model (TEKLA) af hele stålbroen (her dog uden rækværk). Alle ståldele og detaljer, herunder midlertidige åbninger aht. svejsearbejdet, er modelleret, selv montagebeslag til kranløft. Udfra dette kunne produktionstegningerne af alle ståldele dele genereres til smeden. Illustration NIRAS.

Fabrikation

Den 65 m lange brodrager er produceret og opsvejt i seks dele på specialbyggede montagestativer i Polen. Brodelene blev derefter fragtet til Danmark og sammensvejt på de medbragte stativer, se figur 7.



Figur 7. Hele brodrageren under opbygning hos smeden i Polen. Brodrageren er opbygget af kegleflader med plader på op til 30mm's tykkelse. Brodrageren blev opsvejt på hovedet på bukke, delt i to dele på tværs og i 3 dele på langs. Efterfølgende blev de 6 dele fragtet til Ågade og sammensvejt retvendt.

Foto Bladt.

Det var vanskeligt for entreprenøren at finde og få leveret Ø610 mm rørsektioner til buen på grund af kravene til markante godstykkelser og høje stålstyrker, samt et ophedet stålmarke. Fabrikationen 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 8, og sendt til byggepladsen på Nørrebro hvor den endelige sammensvejsning skete.



Figur 8. De to færdige buesektioner klar til afrejse til Danmark. Øjerne til trækstag er alle påsvejst med forskellig vinkel til buen. Foto Bladt.

Montagen

Selve montagen krævede en omfattende planlægning herunder hensyntagen til gamle kloaker i Ågade og dimensionering af mange interimis- og montagekonstruktioner. Montagen krævede at alle 6 kørebaner på Ågade blev spærret for trafik.



Figur 9. Brodrager på 220 tons løftes på plads med fire store mobilkraner. Foto Jon Norddahl

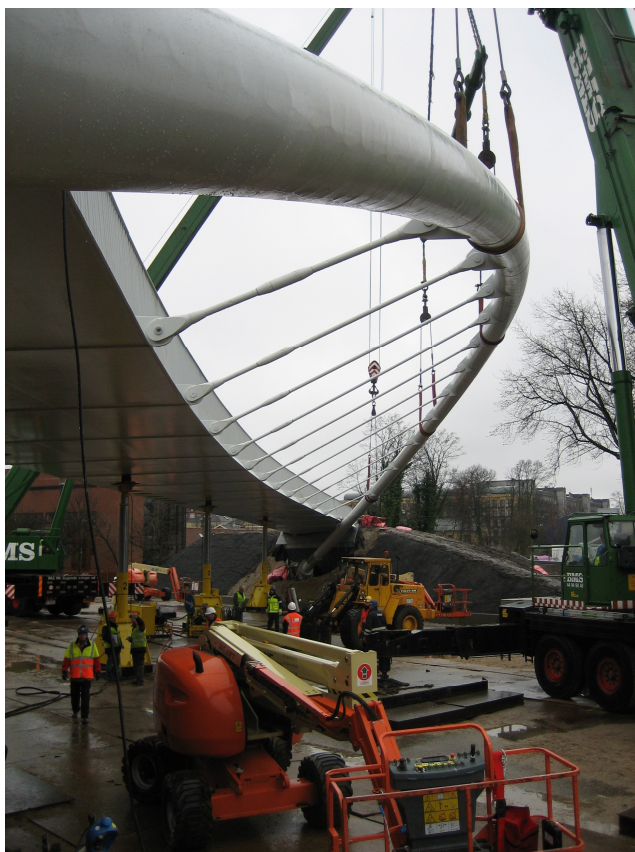
Montagen indledtes Skærtorsdag morgen, hvor den færdige 65 m lange og 220 tons tunge brodrager blev transporteret ind på Ågade på blokvogne. Herfra blev den hejst op i fire af Danmarks største mobilkraner, se figur 9, og lagt til rette på broens to betonvederlag og fire hydrauliske donkrafte fordelt jævnt hen langs og under broen. Buen blev hejst på plads ved hjælp af to 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, træk- og tryklejer og betonvederlag passede sammen indenfor få millimeter, så entreprenøren kunne samle delene uden problemer, se figur 10.



Figur 10. Montage af buen. Foto NIRAS. I forgrunden ses lejehylden på buen hvorpå et trykglideleje mellem brodrager og bue placeres. Foto Jon Norddahl/NIRAS

Mens mobilkranen stadig havde let fat i buen, se figur 11, blev de 4 hydrauliske donkrafte under brodrageren langsomt sænket hvorved brodrageren og bue langsomt kom i funktion, ved at broen deformede sig for sin egen vægt. Da brodrageren var fri af den sidste donkraft, spændte broen frit 65 m.



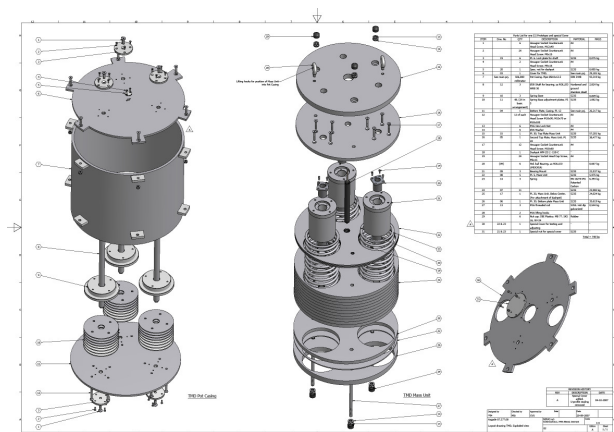
Figur 11. Brodrager, bue og trækstag er monteret men endnu "spændingsløse". Herefter sænkes de hydrauliske donkrafte og broen spænder frit. Foto NIRAS

Alle på pladsen holdt vejret, da broen blev monteret og kom i funktion, men alt forløb uden problemer. Montagen tog 36 timer; ca. 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 i Polen havde været virkelig omhyggelig. For selve kranløftene modtog BMS den Europæiske Kranpris 2008.

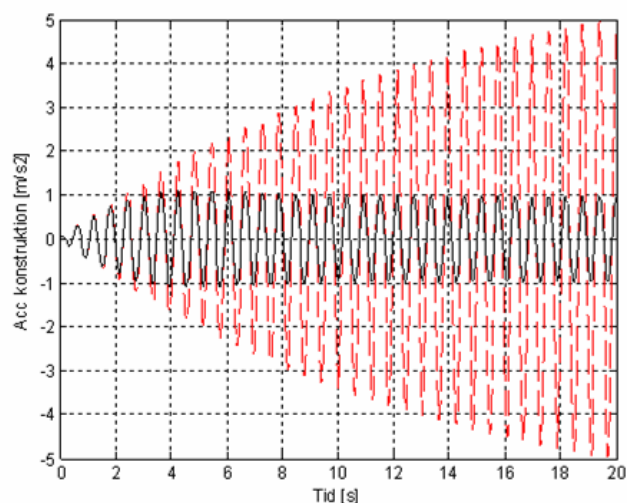
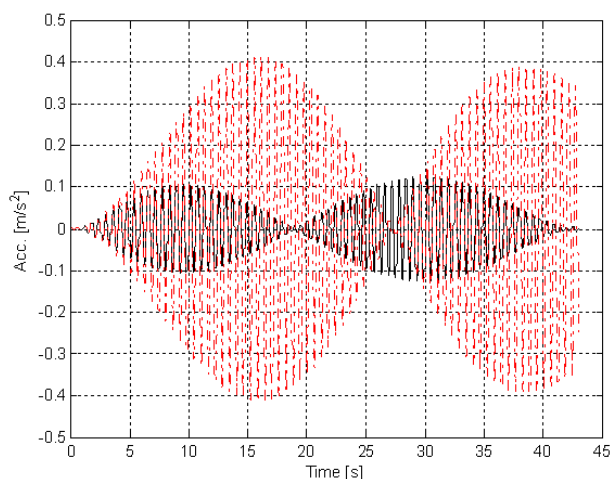
Vibrationer

Det temmelig spinkle design, det relativt lange spænd og det faktum, at buen kun understøtter broens kassedrager ensidigt, gør broen yderst følsom over for vibrationer, forårsaget af fodgængerne. Dette understreges af, at broen har hele 7 egenfrekvenser under 5 Hz. De dynamiske undersøgelser under projekteringen viste at de svingningsfremkaldte accelerationer overskred grænseværdierne herfor og det derfor var det nødvendigt at designe og installere tuned massedæmpere (TMD), se figur 12, for at dæmpe vibrationerne og derved tilgode en rimelig svingningskomfort for fodgængerne.

Normalt undersøges fodgængerbroer alene for svingninger opstået ved gang og løb. Men analyser viste at det var nødvendigt at dæmpe for den situation, hvor en lille gruppe personer ved vandaliserende hop får sat broen i ubehagelige svingninger, se figur 13. Broen er dæmpet med TMD'er ved broens to laveste egenfrekvenser, som er henholdsvis ca. 1 Hz og lidt under 2 Hz. TMD'erne er placeret i brodrageren så tæt på områderne hvor udsvingene er størst.



Figur 12. Arbejdstegning (Inventor) til massedæmper som installeres i brodrageren (fra undersiden). Design NIRAS.



Figur 13. Respons (accelerationer) i brodrager med (sort) og uden (rød) indbygget TMD'er ved gang (første diagram) og hop (andet diagram) ved egenfrekvensen på 2 Hz. Diagrammer NIRAS.

Konklusioner

Alt i alt blev arkitektens og bygherrens visioner og ønsker opfyldt med en flot, spændende og markant bro, se figur 14 og 15.



Figur 14. Den færdige bro. Foto Jon Norddahl

Projektet har stort set kun været praktisk gennemførligt ved anvendelse af avancerede 3D software hvad angår FEM beregningerne og CAD tegninger. Uden disse værktøjer – og tillid til dem – ville projekteringen have været meget vanskelig at gennemføre. Generelt har det været et komplekst projekt med mange tekniske udfordringer for ingeniøren og stålentreprenøren – udfordringer på grænsen af det teknisk mulige, men også udfordringer som viser de store muligheder der er for helt nye konstruktionsudformninger med stål.

Initiativpris

"Åbuen" er tildelt Foreningen til Hovedstadens Forskønnelses Initiativpris med følgende begrundelse: "Foreningen til Hovedstadens Forskønnelse finder at denne nye passage er et meget vigtigt bidrag til den nødvendige forbedring af forholdene for de bløde trafikanter – et bidrag til at hovedstaden kan gå i en lidt mere bæredygtig retning.

Udformningen af cykelruten og ikke mindst selve Åbuen og områderne i tilknytning hertil er skabt på en meget smuk måde, der med respekt for området – i et moderne formsprog – giver området et løft."

Fakta om Åbuen

Bygherre:	København Kommune
Arkitekt (koncept):	Dissing+Weitling Arkitektfirma A/S
Landskabsarkitekt (koncept):	Schønherr Landskab
Ingeniør (koncept):	Cowi A/S
Totalentreprenør:	Barslund A/S
Rådgivende ingeniør:	NIRAS
Underentreprenør (stål):	Bladt Industries
Anlægsomkostning:	20 mio. kr. (anslået)
Tid:	Indviet 21. juni 2008
Adresse:	På tværs af Ågade mellem Frederiksberg og København N

Yderligere information

Dissing+Weitling, Vej & Park, Københavns Kommune, NIRAS (teknik)



Figur 15. I en del lande er der tradition for at en bro "prøvebelastes" inden den tages i brug. En vellykket prøvebelastning skete umiddelbart under indvielsen. Foto NIRAS.

Dansk stålinstitut
Gydevang 39-41
D-3450 Allerød

Tlf. 66 13 08 88
Fax 65 91 87 89
ds@steelinfo.dk