

Når vinden sætter broer i bevægelse – og hvordan vi sikrer lange hængebroer fremover

Ph.D. projekt ”*Aerodynamic stability optimisation of twin-box bridge girders*” (DK: *Optimering af aerodynamisk stabilitet for tvillingebrodek*)

Af Maja Rønne

Hængebroer har længe været ingeniørkunst på højeste niveau: smukke og imponerende lange broer, der spænder over brede vandområder. Men hængebroer er også særligt følsomme overfor vindpåvirkning, grundet konstruktionens fleksibilitet. Det er præcis den udfordring, jeg har arbejdet med i mit Ph.d.-projekt, hvor jeg har undersøgt, hvordan vi kan sikre bedre aerodynamisk stabilitet af broer med såkaldte tvillingebrodek – et moderne brodesign, der anvendes for meget lange hængebroer.

Når en kraftig vind rammer en fleksibel brokonstruktion, kan den forårsage svingninger – små bevægelser, der kan udvikle sig til farlige, selvforstærkende vibrationer kaldet ”flutter”. Disse svingninger kan i værste fald få broen til at bevæge sig så meget, at den kollapser. Dette fænomen kan ses i den famøse film af Tacoma Narrows broen fra 1940. Denne hængebro faldt sammen få måneder efter åbningen på grund af netop sådanne flutter vibrationer genereret af vinden (frisk kuling). Derfor er en grundig forståelse af, hvordan broens form og vindpåvirkninger spiller sammen, helt afgørende for at kunne bygge sikre og holdbare broer der kan spænde længere og længere.

Mit Ph.d.-projekt: En ny forståelse af ”næse-op” rotationen

Mit Ph.d.-projekt har fokuseret på at etablere en fundamental forståelse for den aerodynamiske stabilitet af broer med tvillingebrodek – et særligt design for brodækket, der anvendes i nogle af verdens længste hængebroer. Formålet med en større forståelse for aerodynamisk stabilitet for tvillingebrodek er at kunne bygge længere broer, der kan klare de stadigt større spænd som moderne infrastrukturprojekter kræver. Tvillingebrodek består af to parallelle, strømlinede brokassedragere med en luftspalte mellem, der er holdt sammen af tværbjælker med jævne mellemrum. Tvillingebrodek kombinerer stærke strukturelle egenskaber med øget vindstabilitet. Gennem omfattende forskning, herunder vindtunnelforsøg og computerbaserede simuleringer af luftstrømmen omkring brodækket, har projektet belyst en overraskende effekt:

- Tvillingebrodek udviser øget flutterstabilitet, når brodek under vindpåvirkning vrides således at det løftes i vindsiden mens læsiden trykkes ned. En vridning der betegnes som en "næse-op" rotation.
- Øget flutterstabilitet er relateret til et formindsket tab af broens aerodynamiske stivhed. Tvillingebrodek mister simpelthen mindre stivhed når de stikker næsen opad i blæst.

Når tvillingebrodek stikker næsen op, bliver suget på undersiden af den opstrøms brodrager (brodrageren tættest på vinden) mindre, og den kritiske vindhastighed for flutter ustabiliteten øges. Der skal med andre ord en endnu større vindpåvirkning med større hastighed til, før end at brodek begynder at svinge. Et fænomen der ikke tidligere har været erkendt indenfor broteknikken. Erfaringer fra hængebroer bygget med enkeltstående strømlinede brodek (mono-dæk), viser typisk at den største stabilitet opnås ved at dekket ikke roterer under vindbelastning men forbliver vandret.

Udover den nye forståelse for "næse-op" effekten har projektet været med til at understrege vigtigheden af geometriske detaljer i designet af tvillingebrodek, og hvordan disse bidrager til "næse-op" rotationen og dermed stabiliteten:

- Forskellige geometriske detaljer, så som formen på brodek, vindskærme, skinner til inspektionsvogne og størrelsen af luftspalten mellem de to brodek, påvirker stabiliteten forskelligt hver for sig og når de betragtes sammen.
- Vindskærme, der monteres på tvillingebrodek, fremmer næse-op rotationen og er dermed med til at øge flutterstabiliteten, udover at skærme trafikken fra vinden. Dette er interessant, fordi vindskærme på strømlinede mono-dæk normalt giver anledning til forringet stabilitet og derfor ofte undgås.
- Små installationer som skinner til inspektionsvogne på undersiden af brodek - specielt de inderste nær luftspalten - har stor betydning for luftstrømmen omkring brodragerne og igennem luftspalten mellem de to brodek, hvilket påvirker lufttrykket på brodek. De indre skinner hjælper med til at fremme den stabiliserende "næse-op" rotation, og har faktisk større effekt end vindskærmene.

Overnævnte er selvfølgelig interessant fra et videnskabeligt synspunkt, men hvorfor er det vigtig viden, og hvordan kan vi bruge den? For at svare på dette bliver vi nødt til at have lidt baggrundsviden omkring hængebroer.

Hængebroer gennem historien – kort fortalt

Hængebroer er fleksible brokonstruktioner der statisk holdes oppe af to hovedkabler der løber mellem pylonerne (brotårnene) og forankres i undergrunden. Fra hovedkablerne holdes brodækket på plads af lodrette hænger kabler. Hængebroer kan opnå nogle af de længste frie spænd indenfor broteknikken, og anvendes derfor oftest ved faste forbindelser over brede vandområder. Designet af brodækket er essentielt for en hængebro, da den fleksible konstruktion gør at broen nemt bliver påvirket af vinden og dermed blive aerodynamisk ustabil. Et klassisk eksempel på manglende aerodynamisk stabilitet er Tacoma Narrows broen med et 853 meter langt hovedfag. Brodækket var opbygget som et simpelt H-profil og kollapsede kun få måneder efter at broen åbnede, grundet selvinduceret svingninger, forårsaget af vinden.

I dag anvendes almindeligvis strømlinede lukkede mono-brokassedragere i hængebrodesign, da disse har god aerodynamisk stabilitet og er billigere end f.eks. en tung gitterkonstruktion. Et klassisk eksempel på en hængebro med et strømlinet mono-dæk, er Storebæltsbroen med et hovedspænd på 1624 meter.

Ved hovedspænd på op til omkring 1800 meter, har de strømlinede mono-dæk vist sig at være tilstrækkelige for at opnå aerodynamisk stabilitet. For spænd der er større end ca. 1800 meter, bliver de strømlinede mono-dæk dog ofte ustabile og begynder at svinge. At en hængebro begynder at svinge, skyldes at den mister stivhed grundet vindlasten. For at opnå tilstrækkelig aerodynamisk stabilitet i sådanne tilfælde har anvendelsen af tvillingebrodragere for dækkonstruktionen vist sig at være en god løsning. Tvillingebrodæk har vist sig at have overlegne strukturelle og aerodynamiske egenskaber sammenlignet med et brodæk der kun består af en enkelt kassedrager med tilsvarende bredde af kørebanerne. Strukturelt forøges stivheden på tværs af broens spænd samtidig med at vægten stort set forbliver uændret i forholdt til et brodæk med en enkelt kassedrager. Aerodynamisk forøges stabiliteten, idet luftstrømmen og hvirvlerne kan komme bedre rundt om brodækket og slippe broen i den nedstrøms side uden at sætte den i svingninger. Samlet set gør det, at tvillingebrodæk kan anvendes til større spænd. Blandt lange hængebroer med tvillingebrodæk kan bl.a. nævnes 1915 Çanakkale broen i Tyrkiet, verdens nuværende længste hængebro med et hovedspænd på 2023 meter og Xihoumen broen i Kina med hovedspænd på 1650 meter.

Det samfundsmæssige perspektiv

Vi står midt i en global teknologisk udvikling, hvor infrastrukturprojekter mellem lande og landsdele skal være hurtigere og mere effektiv samtidig med at sikkerheden og bæredygtigheden øges. I Norge skal projektet "Færgfri E39", erstatte færgeruter over dybe og brede fjorde med broer, hvor traditionelle pyloner i det dybe vand ikke er mulige. Dette betyder store krav til brospændet og dermed behov for avancerede, aerodynamisk stabile designs.

Her kan tvillingebrodek med optimeret aerodynamisk design være en løsning til at bygge de lange broer, som både er sikre og økonomisk bæredygtige.

Verdens længste hængebro, 1915 Çanakkale broen i Tyrkiet, benytter allerede "næse-op"-stabilitet som en del af sit design. Min forskning bidrager til at forstå de komplekse mekanismer bag denne effekt og peger på nye veje til at gøre fremtidens broer endnu mere modstandsdygtige overfor vindens kræfter.

Mit projekt har derfor direkte relevans for planlægning og design af fremtidens meget lange broer – eksempelvis kan et projekt for Sulafjord broen i Norge med et planlagt hovedspænd på 2710 meter nævnes, hvor tilstrækkelig aerodynamisk stabilitet af tvillingebrodek kun kan opnås, hvis "næse-op" rotationen tages aktivt i betragtning i designet.

Sådan viden betyder ikke kun mere sikre broer, men også økonomiske besparelser, da overdimensionering kan undgås og materialer udnyttes bedre. Det bidrager til udviklingen af en bæredygtig infrastruktur, der samtidig rækker ud over traditionelle faggrænser inden for ingeniørvidenskab og hjælper med at forme en mere sammenhængende infrastruktur, der kan forbinde mennesker og regioner på tværs af verden. Det næste skridt er at omsætte denne viden til konkrete designprincipper, som ingeniører i hele verden kan bruge, når nye broprojekter planlægges.

Perspektiver og næste skridt

Forskningen åbner flere spændende muligheder:

- Videre udvikling af designprincipper for tvillingebrodek, der systematisk kan udnytte den stabiliserende "næse-op" rotation.
- Optimering af geometriske detaljer og små tekniske installationer for at maksimere aerodynamisk stabilitet med minimal ekstra vægt eller omkostning.
- Anvendelse af mine resultater i internationale broprojekter, som bidrager til mere robuste, langtidsholdbare og økonomisk bæredygtige broer, der modstår fremtidens klimamæssigt udfordrende vindforhold.

Og hvem ved, måske kan viden fra mit Ph.d.-projekt være med til at realisere den store italienske bro over Messina-strædet, som grundet de geologiske forhold i Messina-strædet, skal have pyloner på hver sin kyst og dermed et hovedspænd på 3300 meter.

Kort sagt: Ved at forstå, hvordan tvillingebrodek naturligt kan "løfte næsen" mod vinden, kan vi bygge længere, mere stabile og økonomisk fordelagtige broer – til gavn for samfundet, miljøet og den globale infrastruktur.