

Komfort hos gång- och cykelbroar

Fredrik Radlert & Julius Åkerblom

När en gång- och cykelbro dimensioneras i brottgränstillståndet blir det lätt en relativt slank konstruktion. Detta kan ge oönskade effekter i form av vibrationer då folk passerar över bron vilka kan upplevas som obehagliga, men även i förlängningen, vid tillräckligt stora vibrationer, orsaka skada på bron. Om vibrationsfenomenet inte analyseras korrekt vid dimensionering kan åtgärder behöva vidtas i efterhand för att reducera dessa oönskade effekter, åtgärder som ofta kan bli väldigt dyra och tekniskt komplicerade. Det är därför av stor vikt att komfort kan säkerställas i projekteringsstadiet.

Denna studie har syftat till att på ett pedagogiskt sätt beskriva problematiken kring vibrationer hos gång- och cykelbroar samt undersöka vilka faktorer som påverkar detta problem. För att återkoppla till verkligheten undersöktes även en befintlig gång- och cykelbro, Knislingebron.



Knislingebro över E6 vid Trafikplats Arlöv

För att uppnå detta ställdes följande frågeställningar:

- Vid vilka spannlängder uppstår problematiken?
- Vad är en rimlig lastmodell?
- Är enkla handberäkningar ett alternativ till tidsödande datormodeller?
- Är materialdämpningsparametrar som återfinns i litteraturen realistiska för Knislingebron?

Bakgrund

Krav som rör komfort har blivit allt mer vanligt vid konstruktion av gång- och cykelbroar. Dessa krav är sprungna ur en inte helt obefogad oro, då en handfull exempel på broar med betydande vibrationer har konstruerats och byggts under de senaste åren. Exempel på två

sådana broar är Bagers bro i Malmö och Millenniumbron i London, som båda varit föremål för vibrationsbegränsande åtgärder i efterhand. Många av de broar som får problem med stora vibrationer har dock ofta det gemensamt att de är arkitektoniskt intressanta, med andra ord slanka samt med en säregen utformning, vilket kan leda till svikt vid passage av desamma.

Krav i normer ställs dock numera på samtliga gång- och cykelbroar. Komfortnivåer kvantifieras då i form av maximala tillåtna accelerationer av brobanan. För att man i projekteringsstadiet ska kunna ta fram dessa för en given bro krävs dynamiska analyser. Dessa analyser kräver då att en lastmodell motsvarande ett antal passerande gångtrafikanter tillförs systemet. Erforderliga lastmodeller är dock väldigt dåligt specificerade i normer och det är svårt att veta vad som blir en rimlig belastning för en given bro.

Brons dämpning, med andra ord den rörelseenergi som försvinner till värme då bron svänger, är en annan helt väsentlig parameter som måste in i den dynamiska analysen. En felaktigt angiven dämpning kan ge stora utslag på accelerationerna hos bron. Dämpning är dock inte helt okomplicerad att uppskatta för en given konstruktion. Värden för dämpning för konstruktioner av givna material & uppbyggnad finns att tillgå i litteraturen, men kan skilja sig mycket från verkligheten. Den klart bästa möjligheten man har är att mäta dämpningen på ett likartat referensobjekt och använda detta i sina analyser istället.

För att ta reda på huruvida komfortproblem kan uppstå i en vanlig gång- och cykelbro har en stålfackverksbro av typen Knislingebron analyserats på basis av normer och övrig tillgänglig litteratur.

Genomförande

Gång och cykelbroar lika Knislingebron med spannlängder mellan 20-45 m har analyserats med datormodeller i finita element programmet Sofistik. Lastmodeller implementerades dels i enlighet med Eurokod (tillsammans med därtill nödvändiga antaganden), dels med rekommenderade lastfall från Sétra (ett departement inom väg- och brobyggnad i Frankrike).

För att erhålla faktiska värden på egenfrekvenser samt verkliga dämpningsparametrar utfördes en mätning på en befintlig Knislingebron, belägen vid trafikplats Arlov över E6, utanför Malmö. Dessutom, för att stämma av datormodellerna, gjordes handberäkningar av de olika broarna.

Slutsats

Såväl Eurokod som övriga publikationer i ämnet fokuserar i synnerhet på analyser av resonansfrekvenser vid beaktande av komfort. Ifall bronns egenfrekvenser ligger tillräckligt långt från en gångtrafikants stegfrekvens anser såväl Eurokod som Sétra att en dynamisk analys inte behöver genomföras. Studien har visat att detta är ett rimligt antagande, då stegfrekvenser som skiljer sig med en relativt liten marginal från bronns egenfrekvenser resulterar i små & acceptabla accelerationer. Det är dock av yttersta vikt att egenfrekvenserna beräknas korrekt, samt att rimliga stegfrekvenser kan bestämmas.

Enligt Sétra kan en normal gångfrekvens antas till ca 2 Hz, till skillnad från Eurokod som föreskriver gånghastigheter upp till 3 Hz. Gångfrekvenser på så mycket som 3 Hz får dock anses som mycket ovanliga. Om man provar att gå i denna frekvens märker man att ens gångbeteende är allt annat än naturligt.

Antalet trafikanter som används i lastmodellerna kan ge stora genomslag på accelerationerna. Valt antal trafikanter påverkar nämligen inte enbart belastningsamplituden, utan även bronns egenfrekvenser. Eftersom bron i sig har en massa som är relativt liten ger tillskottsmassan från trafikanterna en ofta märkbar effekt på bronns egenfrekvenser. Högre massa ger lägre egenfrekvens, och i en bro som Knislingebron, vars egenfrekvenser i regel ligger över normal gångfrekvens är denna tillskottsmassa negativ ur komfortsynpunkt, eftersom resonansfrekvensen närmar sig belastningsfrekvensen.

Vid analys av resonansfrekvenser är dämpningen den enskilt viktigaste parametern som styr accelerationen av bron. Vid resonans är accelerationen omvänt proportionell mot dämpningskvoten, med andra ord ger dubblad dämpning en halverad acceleration i analysen. Det faktum att dämpningen är så central, i kombination med svårigheten att uppskatta densamma står för den avgörande delen av komplexiteten i komfortanalyser.

Det har kunnat konstateras att de egenfrekvenser som tagits fram i datormodellerna stämmer väl överens med verkligheten, då de utförda mätningarna givit snarlika resultat. Detta var väntat, eftersom egenfrekvenser vid relativt låga dämpningskvoter enbart beror på systemets massa och styvhet, vilka båda har varit (och i allmänhet är) väl definierade. Detta är en viktig kvalitetssäkring av modellen eftersom en större avvikelse av dessa egenskaper leder till enorma felaktigheter i därpå följande analyser av accelerationer.

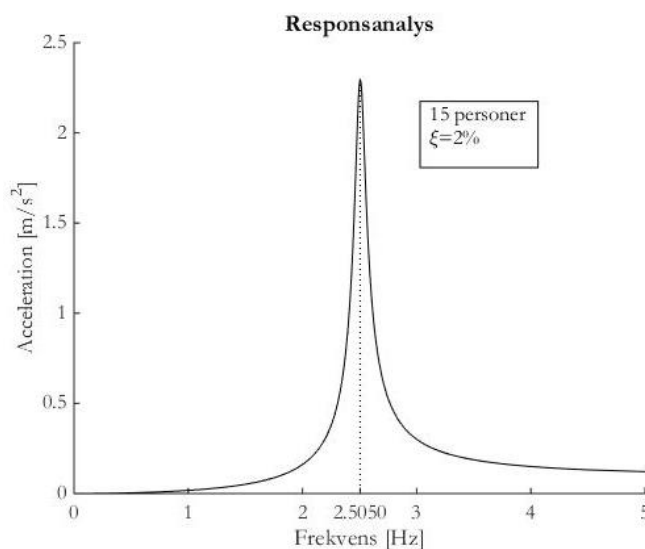
Mätningarna indikerar vidare, att den givna brotypen har en dämpningskvot på ca 3-4%. Detta är cirka en faktor 10 gånger högre än dämpningskvoter som påträffas i viss litteratur för stålbroar. Den höga dämpningen hos bron förklaras troligtvis hos beläggningens massa, en 30mm tjock asfaltsbeläggning, vilken verkar som en långsträckt, seg gummimassa där stora

mängder energi försvinner till värme då brobanan svänger. Vid analys av resonansfrekvenser hade därför framtagna accelerationer blivit 10 gånger högre ifall dämpningsvärden ur litteraturen hade använts, snarare än uppmätta värden. Det konstateras därför, att om möjligheten finns till dämpningsmätningar i anslutning till projektering av en ny bro bör denna möjlighet vara av intresse att utvärdera.

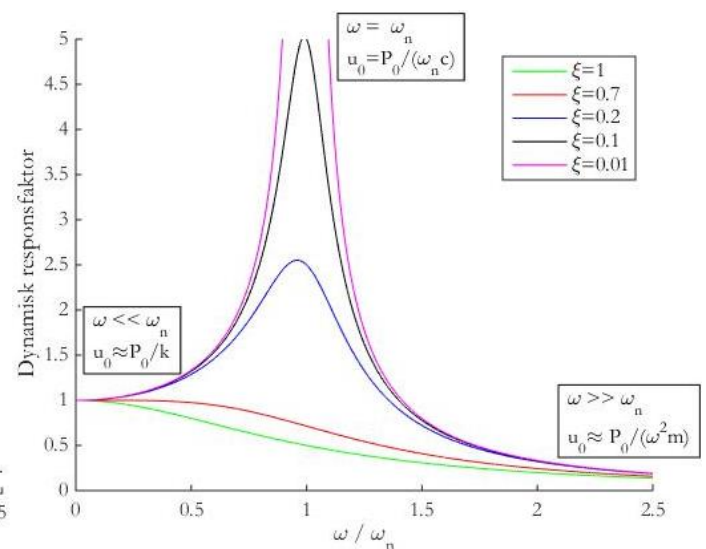
Ifall ett enkelfrihetsgradigt system kan etableras vid analys av en given böjmod är det enkelt att utföra handberäkningar av systemet, snarare än FE-analyser. De handberäkningar som utförts i studien ger snarlika resultat i jämförelse med datormodellerna. Det är dock fördelaktigt att få en bra uppskattning av egenfrekvenserna. I en fackverksbro likt Knislingebron erhålls vid handberäkningar högre värden för egenfrekvenser jämfört med verkligheten, eftersom inte skjuvdeformationer av det sammansatta

tvärsnittet beaktas. Det kan därför vara sunt att beräkna egenfrekvenser med hjälp av ett FE-program, varpå accelerationerna kan bestämmas för hand. Som tidigare nämnt kan annars accelerationerna i systemet underskattas.

Slutligen har det kunnat konstateras, med bakgrund av Eurokod & Sétras lastmodeller, att Knislingebron med all sannolikhet är komfortabel för spannlängder upp till och med 40 meter. Därutöver bör man överväga att förändra bronns dimensioner och därmed lägga sig en bit över brotgränstillståndet för att säkerställa komfort. Att fackverksbroar konstrueras för spannlängder över 40 meter är dock relativt ovanligt, eftersom broar med ställådstvärsnitt blir mer ekonomiska vid så stora spannlängder.



Resonansanalys för Knislingebro med spannlängd 45m, med dämpningskvoten 2% och 15 personer som går med frekvenser mellan 0 & 5 Hz. Vid bronns egenfrekvens (2.5 Hz) blir bronns acceleration som störst, ca 2.2 m/s². Går trafikanterna i normal gångtakt (runt 2 Hz) blir maximal acceleration ca 0.2 m/s².



Dynamisk responsfaktor för kvoten lastfrekvens/egenfrekvens och olika dämpningskvoter. Då kvoten är 1 (resonans) styrs responsen främst av dämpningen.