

Utmattningsdimensionering av stålkonstruktioner enligt eurokod

Hans Pétursson, Trafikverket

Elisabeth Helsing, Trafikverket

Inledning

Utmattningsdimensionering enligt eurokoderna är ett av de områden där många frågor har kommit fram sedan införandet av eurokoderna för brodimensionering i Sverige. Det har visat sig att utmattning blir dimensionerande i många fall där det med tidigare regelverk inte var det. I nr 1 2009 av Eurokodnytt skrev Kjell Eriksson en artikel om Utmattning av stålkonstruktioner som främst handlar om SS-EN 1993-1-9. Här beskrivs de delar som gäller för broar.

Dimensioneringen kan göras på två olika sätt enligt eurokoderna. Det ena sättet, som brukar kallas delskademetoden, innebär att alla de spänningsväxlingar som uppkommer när fordon passerar bron analyseras och vilka delskador dessa spänningsväxlingar ger upphov till beräknas och läggs ihop. Detta kräver att fordonstrafiken över bron kan beskrivas med fordonstyper och trafikintensitet. Det andra sättet är att bestämma ett representativt värde för den utmattningspåverkan som trafiklasten ger och jämföra denna med utmattningshållfastheten. Detta utgör en förenklad dimensioneringsmetod som brukar kallas λ -metoden. Det är den mest använda och ger oftast resultat på säker sida jämfört med den mer komplicerade delskademetoden.

Vid dimensionering för utmattning tas hänsyn till bärverkets avsedda livslängd och de trafiklasten som beskrivs i SS-EN 1992-2 utgör lasten som ger upphov till spänningsväxlingarna. Vid vissa speciella konstruktioner kan även dynamiska faktorer spela in och vibrationer kan ge upphov till utmattningsskada men dessa kommer inte att diskuteras här.

Flera delar av eurokod används vid utmattningsdimensioneringen och de är:

SS-EN 1990 Grundläggande dimensioneringsregler för bärverk

SS-EN 1991-2 Laster på bärverk- del 2: Trafiklast på broar

SS-EN 1993-2 Dimensionering av stålkonstruktioner –Del 2: Broar

SS-EN 1993-1-9 Dimensionering av stålkonstruktioner –Del 1-9: Utmattning

SS-EN 1994-2 Dimensionering av samverkanskonstruktioner i stål och betong –Del 2: Broar

Vid utförande av stålkonstruktioner dimensionerade enligt eurokod används SS-EN 1090 Utförande av stål- och aluminiumkonstruktioner – Del 2: Stålkonstruktioner.

Laster

Trafik på broar ger upphov till ett spänningsspektrum, vilket kan orsaka utmattning. Detta spänningsspektrum är beroende av fordonens geometri, axellasterna, avståndet mellan fordonen, trafikens sammansättning och dess dynamiska effekter. Trafiklasterna som används för utmattningsdimensionering finns beskrivna i SS-EN 1991-2 4.6 för vägbroar och SS-EN 1991-2 6.9 för järnvägsbroar.

På vägbroar

För vägbroar finns 5 olika utmattningslastmodeller (här betecknade ULM1 till ULM5) beskrivna. Den första (ULM1) består av ett boggsystem och utbredda laster. ULM2 sammansätts av fem idealiserade lastfordon beskrivna med axelavstånd, axellast och hjultyp. Den tredje lastmodellen, ULM3 utgörs av ett enstaka väl definierat lastfordon och en kombination med två sådana fordon. Den fjärde lastmodellen (ULM4) består av olika sammansättningar av fem standardiserade lastfordon, vilka tillsammans ska motsvara effekten av typisk trafik på europeiska vägar. Sammansättningarna, dvs de olika fordonstypernas andel av trafiken, är olika för vägar med långväga, regional och lokal trafik. Den sista lastmodellen (ULM5) utgörs av data från uppmätt verklig trafik.

De båda första lastmodellerna, ULM1 och ULM2, används bara för att verifiera att livslängden för utmattning är obegränsad, dvs när spänningarna är så små att inga delskador uppstår, och lämpar sig därför för bärverk av stål och är mindre lämplig för andra material. Utmattningslastmodell 3, ULM3, används vid beräkning med förenklade metoder, t.ex. λ -metoden. ULM4 och ULM5 är anpassade för delskademetoden, men för den metoden kan även ULM3 användas. ULM5 går inte att använda i de fall där data saknas. Vanligtvis används ULM3 eller ULM4, och av dessa är ULM3 den enklare. Den ska på säker sida täcka in effekten av fordonen i ULM4.

På järnvägsbroar

Grundmodellen för utmattningslast av tågtrafik, som anses motsvara trafik på det europeiska järnvägsnätet, består av definierade sammansättningar av 12 olika standardiserade tågtyper med angivna axellaster, axelavstånd och hastigheter. Tre olika sammansättningar anges; normal trafik, tung trafik (axellast 250 kN) och lätt blandad trafik. Trafikverket har dock valt att i TK Bro B.3.4.1.5 ange egna trafiksamansättningar för broar som dimensioneras för $\alpha=1.33$ och $\alpha=1.46$, d.v.s. alla järnvägsbroar som dimensioneras för Trafikverket. α är den faktor som trafiklasterna multipliceras med om de är större eller mindre än LM71 eller SW/0 (Se SS-EN 1991-2, 6.3.2). Utmattningslasterna ska dock inte multipliceras med denna faktor. Inte heller ska trafiklastens excentricitet medräknas vid utmattningsdimensionering. Vid användning av dessa tågtyper används en dynamikfaktor enligt SS-EN 1991-2 Bilaga D, vilket ger ett lägre värde än dynamikfaktorn Φ_2 som används vid statisk brottgränsdimensionering,

Vid förenklad utmattningsdimensionering används dock en annan lastmodell som utgörs av trafiklasten LM 71 eller SW/0 multiplicerad med dynamikfaktorn, Φ_2 . Denna dynamikfaktor är egentligen avsedd för det maximala värdet som uppstår i brottgränstillstånd men används även vid utmattningsdimensionering med λ -metoden. LM 71 eller SW/0 ska däremot inte multipliceras med faktorn α .

Som ett tredje alternativ kan en verklig tåg sammansättning anges.

Beräkningsmetoder

Dimensionerande spänningar och dimensionerande utmattningshållfasthet

Bärförmågan vid utmattning uttrycks i SS-EN 1993-1-9 med hjälp av hållfasthetskurvor vid utmattning för

- vanliga detaljer, för vilka nominella spänningar används
- referenstyper för svetsar, vid vilka geometriska spänningar används.

Analysmetoden "livslängdsmetoden" ska tillämpas enligt de nationella val för vägbroar som anges i VVFS 2004:43. Utmattning i primärbärande bärverksdelar ska dessutom anses vara stora konsekvenser. Detta ger en partialkoefficient för utmattning $\gamma_{mF} = 1.35$. För järnvägsbroar

tillämpas samma analysmetod trots att den kallas "skadesäkerhetsmetoden" i Boverkets BFS 2011:10 EBS 8.

Spänningar beräknas för elastiska förhållanden. Vanligen beräknas nominella spänningar vid initieringspunkten för en tänkt utmattningsspricka. Det finns också möjlighet att använda en modifierad nominell spänning eller hot spot spänning för fall som inte täcks av de tabeller som finns i SS-EN 1993-9. Det dimensionerande värdet för den nominella spänningen bestäms genom att multiplicera spänningsvidden av de utmattningsslaster som anges i SS-EN 1991-2 med faktorer för ekvivalent skada beroende på de spänningsskolektiv som anges i SS-EN 1993-2. Vid dimensionering med modifierad nominell spänning ska utmattningsslasterna även multipliceras med en spänningskoncentrationsfaktor, k_f . Spänningskoncentrationsfaktorer kan hittas handböcker eller beräknas med finita elementmetoden.

Delskademetoden

Vid beräkning av delskada beräknar man först alla spänningar som de olika fordonen i trafiksammansättningen ger upphov till när de färdas över bron. Man kan sedan använda reservoirmetoden eller regndroppsmetoden för att räkna antalet spänningscykler för ett antal intervaller av spänningsvidder. För varje spänningsvidd bestäms antalet cykler till brott. Kvoten mellan antalet beräknade cykler under bron livslängd och antalet cykler till brott är delskadan för resp. spänningsvidd. Om summan av alla delskador är lägre än 1,0 så klarar detaljen kraven enligt eurokod.

För vägbroar är i första hand ULM 4 är avsedd att användas med delskademetoden för att bestämma spänningsvidderna. Totala antalet tunga fordon per år i det långsamma körfältet ges av $N_{obs, \tau}$, som i standarden väljs med hjälp av fyra kategorier för olika typer av vägar. För Trafikverkets broar ska kategorin väljas enligt TK Bro och årsdygnstrafik. Hur fordonen fördelar sig på de olika fordonstyperna ges av ULM4. Varje fordonstyp antas färdas en i taget över bron. Denna lastmodell kan därför inte utan vidare användas då flera lastfordon kan befinna sig på bron samtidigt.

Vid användning av delskademetoden går det även att använda ULM 3 med antagandet att alla tunga fordon på en vägbro utgörs av detta enstaka fordon. Denna modell är betydligt mer lätthanterlig men också mindre precis än ULM4.

Vid användning av delskademetoden för en järnvägsbro används verkliga eller standardiserade tågsammansättningar för att bestämma spänningsvidderna. Då det normalt saknas uppgifter om verkliga sammansättningar är det de standardiserade sammansättningarna som i praktiken används.

Beräkning med delskadeanalys är inte vanlig idag då den betraktas som krånglig. Men eftersom metoden torde ge en mer optimerad konstruktion är det troligt att den blir mer använd i framtiden.

λ - metoden

Vid användning av den förenklade metoden, här kallad λ -metoden, ska den beräknade maximala spänningsvidden som uppstår vid den mest ogynnsamma placeringen av lasten (lastmodell 3 för vägbroar och LM71 eller SW/0 för järnvägsbroar) multipliceras med en skadeekvivalentfaktor, λ . Påkänningarna vid den skadeekvivalenta spänningsvidden ska sedan påvisas vara lägre än den dimensionerande utmattningshållfastheten vid 2×10^6 cykler. I denna metod ska

utmattningshållfastheten vid detta cykelantal användas oberoende av hur många spänningscykler bron utsätts för i verkligheten.

Skadeekvivalenfaktorn består av fyra delar, λ_1 , λ_2 , λ_3 och λ_4 .

λ_1 beror på "kritiska längden på influenslinjen", L och typ av trafik.

λ_2 bestäms av trafikvolymen;

λ_3 bestäms av för brons avsedda livslängd;

λ_4 bestäms av eventuell trafik på andra körfält resp. spår;

Den "kritiska längden på influenslinjen"

Den "kritiska längden på influenslinjen", L bestämning av λ_1 finns angivna för olika typer av balkar. I många fall är den lika med spännvidden. Det finns dock inte några angivna värden för t.ex. rörbroar. Där kan man använda dubbla spännvidden som L .

För vägbroar finns värden på av λ_1 angivna i SS-EN 1993-2 ned till en spännvidd av 10 m. Vi kortare spännvidder används värdet för 10 m. Vid beräkning av λ_2 för vägbroar används trafikvolymen $Q_{m1}=300$ kN (medelvärde för tung trafik i den långsammaste filen) enligt ett ändringsbrev till TK Bro.

Beräkning med λ -metoden för järnvägsbroar har visat ge värden på osäker sida jämfört med beräkning av delskadeanalys vid korta spännvidder. Därför har värdet för λ_1 korrigerats i TK Bro vid spännvidder på 10 m och lägre. Värden som gäller för trafik med 25 tons axellast ska alltid användas på Trafikverkets järnvägsbroar och trafikvolymen per år sätts till $25 \cdot 10^6$ ton per år och spår, förutom för broar på Malmbanan för vilka särskilda värden finns angivna i TK Bro.

Utformning av detaljer

För att få en stålkonstruktion som har stor motståndskraft mot utmattningsbelastning är det av största vikt att såväl utformning som utförande gör med omsorg. I SS-EN 1993-1-9 finns det tabeller där olika typdetaljer finns uppräpnade med angiven utmattningshållfasthet för konstant spänningsvidd i $2 \cdot 10^6$ cykler. I tabellerna finns även utförandekrav angivna för att utmattningshållfastheten ska gälla. Konstruktören måste alltså ange dessa utförandekrav på ritning eller beskrivning så att förutsättningarna för dimensioneringen också byggs in i den färdiga konstruktionen.

För vissa detaljer som inte täcks in av tabellerna i SS-EN 1993-1-9 kan det vara aktuellt att göra utmattningsprovningar för att få fram en utmattningshållfasthet. Detta är t.e.x. fallet för skruvförband i rörbroar.