

Utmattningsdimensionering av betongbroar enligt eurokod

Elisabeth Helsing, Trafikverket

Inledning

Ett område där beräkningsmetodikerna skiljer sig avsevärt mellan eurokoderna och våra gamla regler är utmattning. Dessutom har inget samlat grepp på fenomenet tagits i eurokoderna. Det behandlas t.ex. knappast alls i SS-EN 1990 utan de delar som behandlar utmattning är utspridda på ett antal ställen, och är dessutom inte tydligt skrivna. Utmattningsdimensionering av broar är därför ett område som vi på Trafikverket får många frågor om. I en tidigare artikel behandlades utmattningsdimensionering av stålbroar. Vissa grundläggande delar för utmattningsdimensionering av betong- och stålbroar är desamma men upprepas ändå i denna artikel så att denna kan läsas självständigt.

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. Dessutom finns det möjlighet att i vissa fall bara göra en enkel kontroll av spänningsnivån och konstatera att en regelrätt utmattningsdimensionering inte behöver utföras.

De delar av eurokoderna som används vid utmattningsdimensionering av en betongbro är:

SS-EN 1990 Grundläggande dimensioneringsregler för bärverk

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

SS-EN 1992-1 Dimensionering av betongkonstruktioner –Del 1: Allmänna regler och regler för byggnader

SS-EN 1992-2 Dimensionering av betongkonstruktioner –Del 2: Broar

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. De båda första lastmodellerna, ULM1 och ULM2 används inte för betongkonstruktioner och behandlas därför inte här. 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, d.v.s. 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.

Utmattningslastmodell 3, ULM3, används främst vid beräkning med förenklade metoder, t.ex. λ -metoden. ULM4 och ULM5 är anpassade för delskademethoden, 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 $\alpha=1.60$, 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 tågsammansättning anges.

Lastkombinationer

Den grundläggande lastkombinationen som ska användas för verifiering av utmattning hos betongkonstruktionen är den frekventa kombinationen som används för bruksgränsdimensionering, där alla icke-cykliska laster ska ingå, kombinerad med den cykliska utmattningslasten. För broar är det vanligtvis trafiklasten.

Delskademethoden

Vid beräkning av delskada beräknar man först alla spänningar som de olika fordonen i trafiksamansättningen ger upphov till när de färdas över bron. Man kan sedan använda reservoarmetoden 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 bronns livslängd och antalet cykler till brott är delskadan för respektive spänningsvidd. Om summan av alla delskador är lägre än 1,0 så klarar armeringen eller betongen kraven enligt eurokod.

Eurokoden ger regler både för utmattning av armering och för betong med delskademethoden. För armering är det den rena spänningsvidden av trafiklasten som används. För betong divideras max- och minspänningarna med betongens utmattningshållfasthet för bestämning av delskadan. Betongens utmattningshållfasthet blir högre ju äldre konstruktionen är när den utsätts för trafiklasten. Observera att vid bestämning av utmattningshållfastheten ingår också en faktor k_1 som valts till 1 för broar men som är 0,85 för andra konstruktioner. För vägbroar är i första hand ULM 4 är avsedd att användas med delskademethoden för att bestämma spänningsvidderna. Totala antalet tunga fordon per år i det långsamma körfältet ges av N_{obs} , som i standarden väljs med hjälp av fyra kategorier för olika typer av vägar. För Trafikverkets broar ska kategorin väljas enligt TK Bro och beror av årsdygnstrafiken. 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 delskademethoden 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 delskademethoden 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 och beräkningsarbete blir omfattande. 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 som beskrivs i bilaga NN till SS-EN 1992-2, här kallad λ -metoden, ska den beräknade maximala spänningsvidden som uppstår vid den mest ogynnsamma placeringen av lasten (ULM 3 för vägbroar och LM71 eller SW/0 för järnvägsbroar) multipliceras med en skadeekvivalentfaktor, λ .

Armeringen och betongen verifieras för utmattning var för sig och på lite olika sätt och heller inte på riktigt samma sätt för vägbroar som för betongbroar. Eurokoderna ger inte några regler för λ -metoden för utmattningen av betongen i vägbroar medan det finns regler för att verifiera betongutmattning i järnvägsbroar.

Inom denna metod används "kritiska längden på influenslinjen" L , som är ett begrepp som inte är särskilt väl beskrivet i Eurokod 2. I såväl ENV-versioner av 1992-2 som i bakgrundsdokumentet till båda dessa definieras L helt enkelt som spännvidden. För såväl fritt upplagda som kontinuerliga balkar eller plattor sätts alltså L lika med spännvidden för utmattningsverifiering i spannet. För delen över mellanstöd används medelvärdet av de angränsande spannens spännvidder.

Verifiering av armering med λ -metoden

För verifiering av armering består skadeekvivalenfaktorn av fyra delar, λ_1 , λ_2 , λ_3 och λ_4 , som multipliceras med varandra:

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

λ_2 bestäms av trafikvolymen;

λ_3 bestäms av för bron avsedda livslängd;

λ_4 bestäms av eventuell trafik på andra körfält respektive spår.

Värdena på dessa faktorer är inte desamma för väg- som för järnvägsbroar.

Påkänningarna vid den skadeekvivalenta spänningsvidden ska påvisas vara lägre än den dimensionerande utmattningshållfastheten vid N^* antal cykler. Värdet på N^* är olika för olika typ av armering och anges i SS-EN 1992-1-1, Tabell 6.3N. I λ -metoden ska utmattningshållfastheten vid detta cykelantal användas oberoende av hur många spänningscykler bron utsätts för i verkligheten.

Basvärde för bestämning av den skadeekvivalenta spänningsvidden fås för vägbroar genom att spänningsvidden av axellasten i ULM3 multipliceras med 1,75 för dimensionering av armering vid mellanstöd och med 1,4 för verifiering i andra delar. Detta leder till att det högre värdet vanligtvis används för stödarmoring och det lägre för underkantsarmeringen. För att bestämma var gränsen går mellan dessa zoner kan figur 9.7 i SS-EN 1993-2 användas.

För vägbroar finns värden på λ_1 för armering angivna i bilaga NN till SS-EN 1992-2 för balkar ned till en spännvidd av 10 m och för brobanepeltor ner till 3 m. Vid beräkning av λ_2 och eventuellt λ_4 används N_{obs} enligt Tabell 4.5(n) i SS-EN 1991-2, med de anvisningar som ges i TK Bro¹.

För järnvägsbroar anges värden på $\lambda_{s,1}$ för varierande spännvidder. 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.

Verifiering av betong med λ -metoden

Det är endast för järnvägsbroar som eurokoden ger regler för verifiering av utmattning i betongen med hjälp av λ -metoden.

Till skillnad från i stål och armering tas inte bara hänsyn till spänningsvidden av den cykliska lasten utan även till spänningsnivån. Dock har man här krånglat till det hela genom att ange att det är den karakteristiska lastkombinationen som ska användas, inte den frekventa, för de icke-

¹ TK Bro kommer inom kort att ges ut som TRVK Bro

cykliska lasterna. I praktiken blir det egentligen ingen skillnad eftersom man samtidigt anger att man inte ska inkludera andra variabla laster.

En lägsta och en högsta betongspänning beräknas där en korrigering med λ_c ingår.

Skadeekvivalentfaktorn λ_c för betong sammansätts av:

$\lambda_{c,0}$ beror på den permanenta spänningsnivån.

$\lambda_{c,1}$ beror på "kritiska längden på influenslinjen", L , och typ av trafik;

$\lambda_{c,2,3}$ bestäms av trafikvolymen och bronns avsedda livslängd;

$\lambda_{c,4}$ bestäms av eventuell trafik på andra körfält respektive spår.

Vid bestämning av $\lambda_{c,1}$ ska en tung trafiksammansättning förutsättas. Som vid delskadeberäkning sätts allt i relation till betongens utmattningshållfasthet. Här är det dock den som gäller vid 10^6 cykler som gäller.

Verifiering med enkel spänningskontroll

Om utmattungsverifiering krävs, måste man då alltid använda dessa metoder? Nej, det finns enkla spänningskontroller för både armering och betong som om de uppfylls gör att man inte behöver kontrollera något mer (6.8.6 (1)&(2) och 6.8.7(2),(3)&(4) i SS-EN 1992-1-1) Om t.ex. spänningen i armeringen är under 70 MPa i utmattninglastfallet så behöver man inte verifiera armeringen för utmattning mer. Att det inte finns några regler för betong inom $\tilde{\sigma}$ -metoden för betong i vägbroar beror antagligen på att det normalt räcker med denna enkla spänningskontroll för dessa.

Beräkningsstrategi

Att verifiera med delskademetoden ger mycket omfattande beräkningar. En beräkningsstrategi för att verifiera en betongbro med hänsyn till utmattning kan lämpligen se ut som i det följande:

1. En enkel spänningskontrollerna för armering respektive betong utförs
2. Om den enkla spänningskontrollen av armering eller betong inte uppfylls, görs en verifiering med λ -metoden
3. Om bron inte klarar verifieringen λ -metoden, ändras förutsättningarna (betongtvärsnitt, betongkvalitet, armeringsmängd, tid för pålastning) så att kriterierna uppfylls
4. Om det ändå inte går att räkna hem bron eller åtgärderna i punkt 3 inte är realistiska att genomföra eller ekonomiskt försvarbara kan man försöka räkna hem bron g med delskademetoden.