

UTMATTNING AV STÅL- KONSTRUKTIONER ENLIGT EUROKOD 3

Kjell Eriksson • kjell.eriksson@ltu.se
www.sbi.se • Skapad 2010-06-28

Svensk Standard för dimensionering av stålkonstruktioner med utmattningslast är SS-EN 1993-1-9:2005. Europastandarden har utarbetats av den tekniska kommittén CEN/TC 250 "Structural Eurocodes" med sekretariat vid BSI (British Standards Institution).

Allmänt

SS-EN 1993-1-9 ger metoder för att bestämma eller kontrollera bärförmåga hos konstruktionsdelar, infästningar och förband som är utsatta för utmattningslast. *En utmattningslast varierar regelbundet eller stokastiskt i tiden under ett mycket stort antal lastcykler. Utmattning är ofta dimensionerande eftersom haveri kan uppträda vid laster som är mindre än eller betydligt mindre än tillåten last för enbart statisk belastning. I svetsade konstruktioner är i regel svetsförbandens utmattningshållfasthet dimensionerande.* Standardens metoder är baserade på provning i full skala av olika typer av konstruktionsdetaljer. Metoderna tar således hänsyn till inverkan av olika typer av defekter och anvisningar från både materialframställning och utförande, t ex materialdefekter, tillverkningstoleranser och svetsegensspänningar. Sådana defekter och anvisningar ger upphov till lokala spänningskoncentrationer. För en konstruktions utförande gäller de allmänna tekniska kraven enligt SS-EN 1090. Metoderna i SS-EN 1993-1-9 gäller för **a)** allmänna konstruktionsstål (oberoende av stålsort), **b)** rostfria stål och **c)** oskyddade rosttröga stål. Stålen ska också uppfylla seghetskrav enligt SS-EN 1993-1-10. Standarden behandlar endast spänningsutmattning, d.v.s. dimensionering baserad på samband mellan spänningsvidd och lastcykelantal, men inte andra metoder som t.ex. töjningsbaserade eller brottmekaniska metoder eller deformationsstyrd utmattning. Den enda metod för att öka utmattningshållfasthet hos svetsförband efter tillverkning som behandlas är avspänningsglödning. Andra metoder, t.ex. slipning, blåstring eller TIG-behandling, behandlas inte. *Avspänningsglödning förbättrar emellertid inte utmattningshållfastheten obetingat utan endast då dragegenspänningar relaxeras. Reducerade tryckegenspänningar kan medföra att utmattningshållfastheten försämras.* Standar

den gäller vidare endast för konstruktioner under normala atmosfäriska förhållanden, med tillräckligt rostskydd och regelbundet underhåll. Varken inverkan av korrosion i havsvatten eller inverkan av temperaturer över 150° omfattas av standarden.

Definitioner

Termer och begrepp som är specifika för utmattning beskrivs kortfattat i SS-EN 1993-1-9. Gångse språkbruk i vetenskaplig litteratur och andra kvalificerade källor används. En läsare med svensk utbildning inom området möter således inga överraskningar. *En enskild egenhet i den engelskspråkiga originalversionen är dock att normalspänning betecknas 'direct stress' i stället för den gängse beteckningen 'normal stress'. Skjuvspänning, däremot, behåller den gängse beteckningen 'shear stress'.* Det finns ett tjugotal begrepps-beteckningar med kortfattade beskrivningar. Lastcykelantal betecknas *n* eller *N* men i övrigt används andra beteckningar än de som förekommer i BSK, för spänningsvidd mm.

Allmänna föreskrifter

Det grundläggande kravet på en utmattningsbelastad konstruktion/bärverk är att dess delar ska utformas så att konstruktionen med godtagbar sannolikhet får en tillfredsställande funktion under hela den avsedda brukstiden. Konstruktioner dimensionerade för utmattningslast enligt SS-EN 1991 och utmattningshållfasthet enligt SS-EN 1993-1-9 anses uppfylla det grundläggande kravet. Lastmodeller för vissa specifika fall finns angivna i SS-EN 1991. Om verklig utmattningslast avviker från de specifika lastfallen eller om en noggrannare lastbeskrivning är önskvärd finns särskilda anvisningar för att bestämma en dimensionerande utmattningslast. Utmattningsprov får genomföras för två ändamål, dels för att bestämma utmattningshållfasthet för objekt som inte ingår i standarden och dels för att bestämma brukstid hos prototypkonstruktioner vid verklig belastning eller en likvärdig effektiv belastning. Vid dimensionering mot utmattning enligt standarden får man endast använda standardens termer och begrepp. Egna och andras inte vedertagna procedurer får således

inte användas vid dimensionering mot utmattning. Standarden anger hur specifika utmattningsslaster ska bestämmas. Dimensionering i bruksgränstillstånd eller i brottgränstillstånd ersätter inte dimensionering mot utmattning. Utmattningssprickor kan uppträda i en konstruktion utan att den avsedda brukstiden är uttömd. Standarden tillåter reparation av sådana utmattningsskador. Dock skall förtida sprickor repareras på ett sådant sätt att inte allvarligare anvisningar än de ursprungliga införs.

Analys

Det finns två olika dimensioneringsmetoder: a) *skadetålighetsmetoden* b) *livslängdsmetoden* (Härtill kommer dimensionering genom provning i vissa fall, enligt ovan) Skadetålighetsmetoden säkerställer en konstruktions funktion under den avsedda livslängden. Detta sker med stöd av fortlöpande inspektion och underhåll. Inspektionernas intervall och omfattning är i förväg föreskrivna. Syftet är att skador upptäcks i god tid och åtgärdas med hänsyn till omfattning och konsekvenser. Livslängdsmetoden, å andra sidan, är avsedd att ge godtagbar säkerhet mot utmattningsbrott under en konstruktions hela avsedda livslängd utan behov av inspektion. Metoden kan användas för sådana detaljer som t.ex. inte är åtkomliga för inspektion. Den bör främst användas då lokal sprickbildning i en enskild konstruktionsdetalj kan medföra risk för haveri i hela konstruktionen. Normalt bör man inte använda denna metod. De viktigaste stegen vid metodernas tillämpning beskrivs kortfattat. Partialkoefficienter för utmattningshållfasthet finns angivna i den nationella bilagan.

Spänningar

Nominell spänning i en konstruktion beräknas som brukligt med linjär elastisk teori och med hänsyn till lastpåverkan (inklusive eventuell tvärsnittsdeformation). Utmattningsslaster är normalt kvasi-statisk och dynamiska laster kräver särskild behandling. Speciellt för fackverksbjälkar av rörprofiler får spänningar beräknas med en förenklad modell där fackverkets knutpunkter antas vara ledade. För att ta hänsyn till sekundära böjmoment i knutpunkterna beräknas

motsvarande spänningar genom att spänningar beräknade med den förenklade modellen multipliceras med tabellerade förstärkningsfaktorer för olika fall. För andra, vanliga belastningsfall, med endast lokal spänningskoncentration, beräknas nominell spänning för sådana snitt där utmattningssprickor kan förväntas uppträda. Spänningar beräknas normalt i bruksgränstillstånd. För belastningsfall med annan än lokal spänningskoncentration, t.ex. p.g.a. komplex geometri, finns särskilda anvisningar. I material opåverkat av svetsning beräknas spänningskomponenterna nominell normalspänning och nominell skjuvspänning i ett betraktat snitt. I en svets beräknas dels en effektiv normalspänning vinkelrätt mot svetsens längdaxel och dels en skjuvspänning parallellt med svetsens längdaxel i ett föreskrivet beräkningssnitt. Förfarandet är inte identiskt med proceduren vid kontroll av kälsvetsar i brottgränstillstånd enligt SS-EN 1993-1-8. Spänningsberäkningarna i SS-EN 1993-1-9 skiljer sig som synes också i vissa detaljer från förfarandet i BSK, även om det grundläggande förfarandet är snarlikt.

Spänningsvidder

Den väsentliga belastningsparametern vid utmattning är spänningsvidden, d.v.s. skillnaden mellan maxspänning och minspänning i en spänningscykel. Spänningsvidden beräknas på olika sätt, beroende på detaljutformning, antingen som: a) *nominell spänningsvidd*, för tabellerade detaljer med angiven förbandsfaktor b) *modifierad nominell spänningsvidd*, för fall med känd spänningskoncentration som inte medräknats i förbandsfaktorn c) *geometrisk spänningsvidd*, för vissa fall då stora spänningsgradienter uppträder Alternativ c) täcker f.n. endast ett fåtal vanliga förbandstyper (t.ex. genomsvetsad stumsvets, korsförband etc.). Alternativen b) och c) kräver specialistkunskap. Ett *dimensioneringsvärde* för spänningsvidd beräknas i varje särskilt fall som *spänningsvidd* av utmattningsslaster multiplicerad med en eller flera *skadeekvivalenta faktorer* och i förekommande fall en *spänningskoncentrationsfaktor*. Skadeekvivalenta faktorer, som karakteriserar typiska lastkollektiv, finns angivna i SS-EN 1993. Spänningskoncentrationsfaktorer finns angivna i SS-EN 1993-1-9 för

vissa fall och får även hämtas från andra vedertagna källor, t ex handböcker och tillförlitliga analytiska eller numeriska beräkningar.

Utmattningshållfasthet

Utmattningshållfastheten för nominella spänningsvidder ges av två serier log-logkurvor, med spänningsvidd som funktion av antal lastcykler (S-N-kurvor), i vilka en enskild kurva motsvarar en typisk förbandsklass. Den första serien gäller för normalspänning och innehåller 14 st. enskilda kurvor. Antalet kurvor är således större än i BSK. De tio centrala kurvorna i SS-EN 1993-1-9 är identiska med de i BSK. Härtill kommer ytterligare fyra kurvor, två med lägre utmattningshållfasthet än i BSK och två med högre.

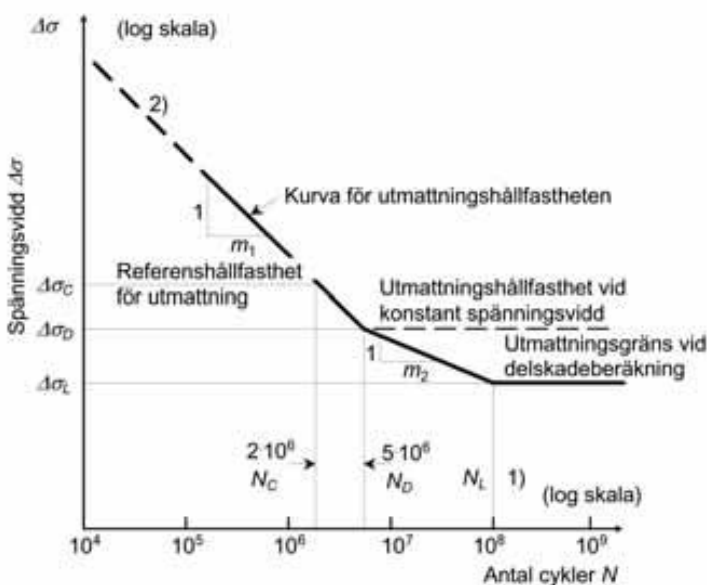


Fig. 1. Utmattningshållfastheten (spänningsvidden) som funktion av antalet spänningscykler.

En enskild kurva, **Fig. 1**, består av tre linjesegment med olika lutning. För lastcykeltal upp till 5×10^6 ges lutningen av $m_1 = 3$ och därefter av $m_2 = 5$ upp till 10^8 varefter lutningen är noll. Brytpunkten vid 2×10^6 spänningscykler anger också utmattningens gränser vid konstant spänningsvidd. Vid delskadeberäkning (inklusive lastkollektiv) uppträder utmattningens gränser vid 10^8 lastcykler. Figuren 1 är tagen från T. Höglund, Utmattning av aluminiumkonstrukt-

ioner enligt Eurokod 9, EurokodNytt nr 6, 2008. Beteckningarna är identiska för stål- och aluminiumkonstruktioner. Vid normalspänning och konstant spänningsvidd har således en utmattningsskurva två delar: en inledande del med lutningen 3, upp till 5×10^6 cykler, och därefter är kurvan horisontell. Vid variabel spänningsvidd har kurvan tre delar: en inledande del med lutningen 3 upp till 5×10^6 cykler, därefter en del med lutningen 5 upp till 10^8 cykler och därefter horisontell. Utmattningshållfastheten i den högsta förbandsklassen är mer än 4 ggr större än i den lägsta, vilket återspeglar utmattningshållfasthetens stora spännvidd för olika typer av svetsförband. De två högsta klasserna gäller dock endast för av svetsning opåverkat grundmaterial. För fallet skjuvspänning finns en serie om två kurvor (förbandsklasser) med lutning $m = 5$ för lastcykeltal upp till 10^8 cykler varefter lutningen är noll. En typisk förbandsklass (enskild kurva) betecknas med ett referensvärde som är lika med utmattningshållfastheten vid 2×10^6 spänningscykler. Utmattningshållfastheten som funktion av antal spänningscykler och även utmattningens gränser definieras explicit, d.v.s. de beräknas med givna formler. Tillämplig förbandsklass för enskilda detaljer har bestämts genom provning. Vid utvärdering av provdata antar man att logaritmen av antalet lastcykler till utmattningens brott (vid en given spänningsvidd) är normalfördelad. Spänningsvidden vid 2×10^6 spänningscykler (referensvärdet) motsvarar 75% konfidensnivå och 95% sannolikhet för att utmattningens brott inte inträffar. Antalet försök bakom ett enskilt förbandsklassvärde är minst tio st. Förbandsklass som bestäms nationellt genom experiment skall beräknas på samma sätt. För många detaljer som ingått i tidigare standarder finns i dag i vissa fall hundratals försöksresultat framtagna. Något förenklat kan man säga att utmattningshållfastheten är lika med medianbrottkurvan minus ca två standardavvikelser hos fördelningen av logaritmen av antal lastcykler till brott, vid en given spänningsvidd. Om logaritmen av antalet cykler till brott är normalfördelade så är den teoretiska risken för brott vid minus två standardavvikelser ca 2.3%. I Sverige är den teoretiska risken för utmattningens brott betydligt mindre än så ef-

tersom utmattnings-hållfastheten vid minus två standardavvikelse reduceras ytterligare med nationellt föreskrivna partialkoefficienter. Avsnittet innehåller också speciella regler för dimensionering av vissa förbandstyper vars försöksresultat ger kurvor vars lutning delvis avviker från antagna kurvor för utmattningshållfasthet i standarden.

Förbandsklasser

I SS-EN 1993-1-9 anges förbandsklasser för nominell spänningssvidd för mer än hundralet enskilda fall, som indelats i tio grupper, se **tabell 1**. Liksom i BSK illustreras enskilda fall med figur för att ange lastriktning mm. Det finns också en tillhörande kort teknisk beskrivning och kravspecifikation samt i vissa fall geometriska villkor, främst för en detaljs storlek och form. Å andra sidan saknas BSK:s svetsklasser men analoga krav anges som specifikationer i varje särskilt fall och förbandsklass. Förbandsklasser för fall då geometrisk (hot spot-) spänningssvidd kan användas ges i ett Appendix för sju typer av vanliga svetsförband som stumsvets, kälsvets, korsförband och liknande.

Indelning av förbandsklasser i SS-EN 1993-1-9.

1. Bärverksdelar och förband
2. Svetsade profiler
3. Tvärgående stumsvetsar
4. Påsvetsade detaljer avstyvningar
5. Lastöverförande svetsförband
6. Rörprofiler
7. Knutpunkter i fackverksbalkar
8. Ortotropa däck med slutna längsavstyvningar
9. Ortotropa däck med öppna längsavstyvningar
10. Övergång mellan övre fläns och liv i kranbanebalkar

Tabell 1. I SS-EN 1993-1-9 anges förbandsklasser för nominell spänningssvidd för mer än hundralet enskilda fall, som indelats i tio grupper.

Modifiering av utmattningshållfasthet

Ett flertal faktorer påverkar utmattningshållfastheten sekundärt. SS-EN 1993-1-9 medger modifiering av utmattningshållfastheten för medel-

spänningens inverkan och föreskriver sådan modifiering för storlekseffekter i vissa fall. Dimensionering av svetsförband mot utmattning är baserad enbart på spänningssvidden, utan hänsyn till medelspanning, eftersom denna i hög grad styrs av svetsegensspänningen och därför varierar förhållandevis ringa. För detaljer som inte är påverkade av svetsning eller för svetsförband som är avspänningsglödgade får hänsyn tas till inverkan av medelspanning i sådana fall då lasten är helt eller delvis kompressiv. Man får då använda en effektiv spänningssvidd där bidraget från trycklast reducerats med 40%, d.v.s. den effektiva spänningssvidden fås som hela den dragda delen plus 0.6 ggr den tryckta. Utmattningshållfastheten är i vissa fall storleksberoende och den avtar då med storleken hos geometriskt likformiga objekt. Standarden ger reduktionsfaktorer för utmattningshållfastheten som funktion av storleken för detaljer och förband där storleksinverkan inte får försummas.

Utmattningsberäkning

Dimensioneringsvillkoren för utmattning är formulerade som olikheter som begränsar ett dimensioneringsvärde med hänsyn till ett reducerat hållfasthetsvärde. Det finns sådana villkor för normalspänningssvidder och för skjuvspänningssvidder var för sig. Om normalspänningss- och skjuvspänningssvidder uppträder samtidigt tillkommer ett kombinerat villkor som är analogt, men inte identiskt med villkoret i BSK för utmattning vid fleraxligt spänningstillstånd. Spänningssvidd p.g.a. ofta förekommande laster enligt SS-EN 1990 begränsas dessutom gentemot materialets sträckgräns. Bilaga A i SS-EN 1993-1-9 beskriver kortfattat en metod för att bestämma parametrar för utmattningslast och åtföljande verifieringsmetoder för lastkollektiv och varierande spänningssvidd. Man börjar med att bestämma typiska lastsekvenser utifrån rimliga men inte konservativa uppskattningar, gärna med stöd av tidigare erfarenhet, för all förväntad nyttig last under hela den avsedda livslängden. Från en eller flera enskilda typiska lastsekvenser inkl. eventuell inverkan av dynamiska förlopp sammantagna beräknas ett spänningförlopp för den betraktade detaljen. Speciellt kan dynamiska tillskott, som får

beräknas teoretiskt, kräva avancerade beräkningar. Spänningsförlopp kan också bestämmas genom mätning på en befintlig konstruktion som liknar den prospekterade. Spänningsförlopp utvärderas med endera av regndroppsmetoden eller reservoirmetoden för att bestämma spänningskollektiv, d.v.s. histogram med spänningsvidder och tillhörande antal cykler i ordning efter avtagande spänningsvidd. *De två utvärderingsmetoderna är ekvivalenta. För överskådliga spänningsförlopp, d.v.s. förlopp som medger en exakt utvärdering, ger regndroppsmetoden och reservoirmetoden exakt samma resultat. Båda metoderna räknar, något förenklat, halvcykler i ett spänningsförlopp, men i olika följd, medan slutresultaten, uttryckta i antal helcykler i givna intervall, är lika. Vid exakt utvärdering kan man också exakt invertera det ursprungliga spänningsförloppets histogram. Datoriserade utvärderingsprogram är inte exakta för mycket långa spänningsförlopp. Resultatet är då approximativt och invertering är inte alltid entydig.* Ett spänningskollektiv får modifieras genom att man bortser från de största spänningsvidderna som representerar mindre än 1% av den totala skadan. Förfarandet är således mer komplicerat än i BSK, eftersom det kräver en preliminär delskadeberäkning.

Små spänningsvidder, under utmattningsgränsen vid delskadeberäkning får också försummas. Spänningsvidder och utmattningshållfastheter justeras med tillhörande partialkoefficienter. Delskador beräknas och summeras enligt Palmgren-Miners delskaderegeln. Den summerade delskadan skall uppfylla ett dimensioneringskriterium, som också finns uttryckt direkt i spänningsvidd för motsvarande beräkning.

Läs mer:

[Luleå tekniska universitet](#)

[CEN/TC250](#)

