

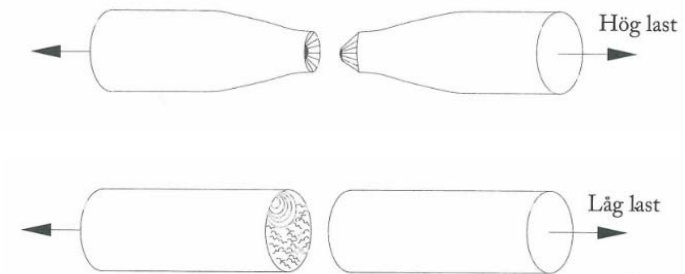
# K3

---

## Stål, utmattning

# Utmattning

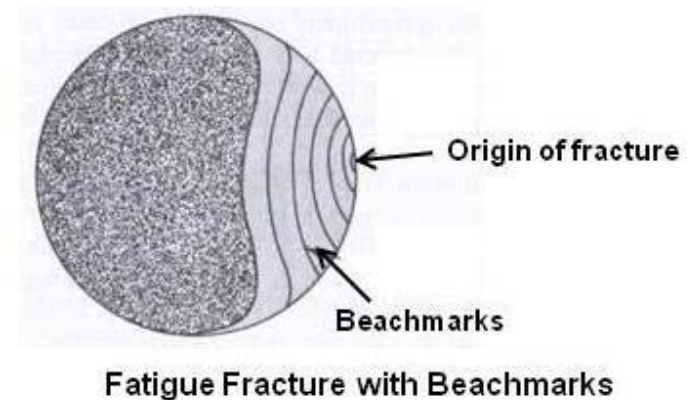
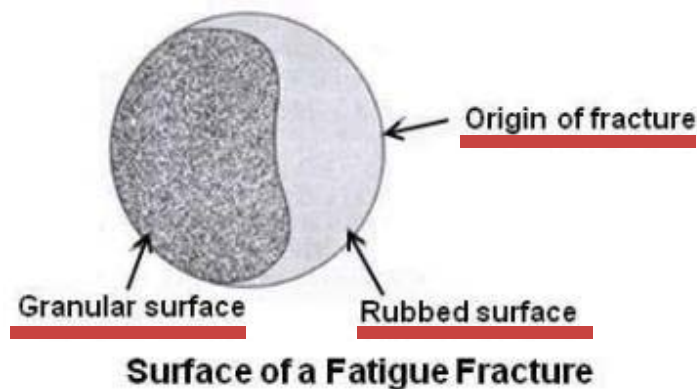
- De flesta haverier som sker i lastbärande konstruktioner orsakas av utmattning.
- Detta beror bl.a. på att:
  - hållfastheten vid upprepade belastningar, speciellt vid hög anvisningsverkan från t.ex. svetsar, är mycket lägre än den statiska hållfastheten
  - detta förhållande inte alltid beaktas vid dimensioneringen.
- **Utmattningsprocessen**
  - Utmattning är en process där materialet gradvis bryts ner vid **upprepade belastning**
  - Sprickor bildas och tillväxer i områden med hög lokal spänning (**anvisningsverkan**).
  - Utmattning är alltså ett **lokalt fenomen**
  - Ett utmattningsbrott karakteriseras av **liten plastisk deformation**
  - Utmattningssprickor kan därför vara svåra att upptäcka.
- **Utmattning är svårt att härleda/beskriva matematiskt.**
- **Beräkningsmodeller baseras till stor del på empirisk kunskap**



# Vägen till utmattningsbrott

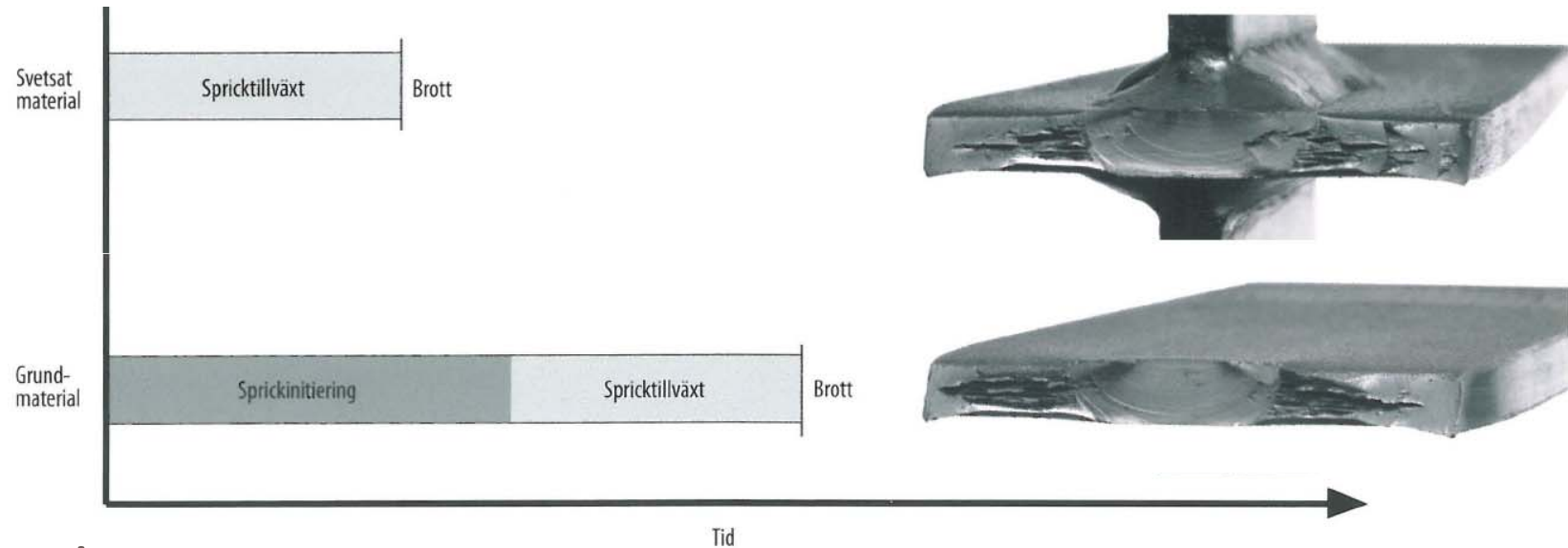
## Utmattningsbrott sker vanligtvis i tre steg.

- **Steg I:** vilket utgörs av en **initial spricka** som ofta börjar vid en repa på ytan eller en inre defekt såsom en inneslutning.
- **Steg II: sprickan växer** lite för varje cykel som den utsätts för. Ytan får små böljeslagsmärken (kallas på engelska för beach marks och skall inte förväxlas med striations som är mikrometerstora), det vill säga en räffla för varje cykel som sprickan vuxit.
- **Steg III:** när sprickan vuxit tillräckligt mycket alternativt om sprickan utsätts för en större last, sker ett plötsligt, katastrofalt **brott**.



Beachmarks brukar uppträda om man har viloperioder mellan belastningarna

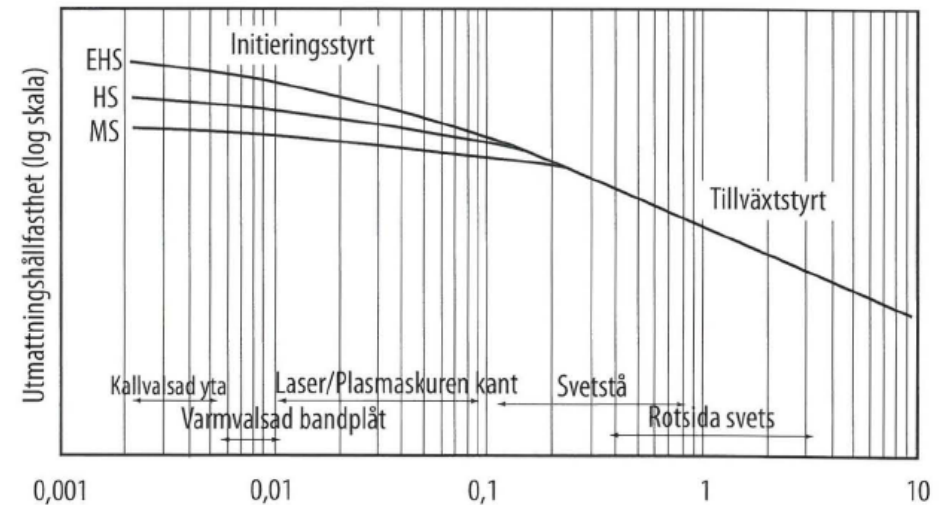
# Sprickinitiering, spricktillväxt och restbrott



- **Utmattningsprocessen:**
  - Initiering av spricka
  - Tillväxt av sprickan
  - Tvärsnittet till slut försvagat (minskat)  $\Rightarrow$  brott
- **Svetsat material**
  - Svets innehåller alltid sprickor/sprickanvisningar

# Kitagawa-diagram

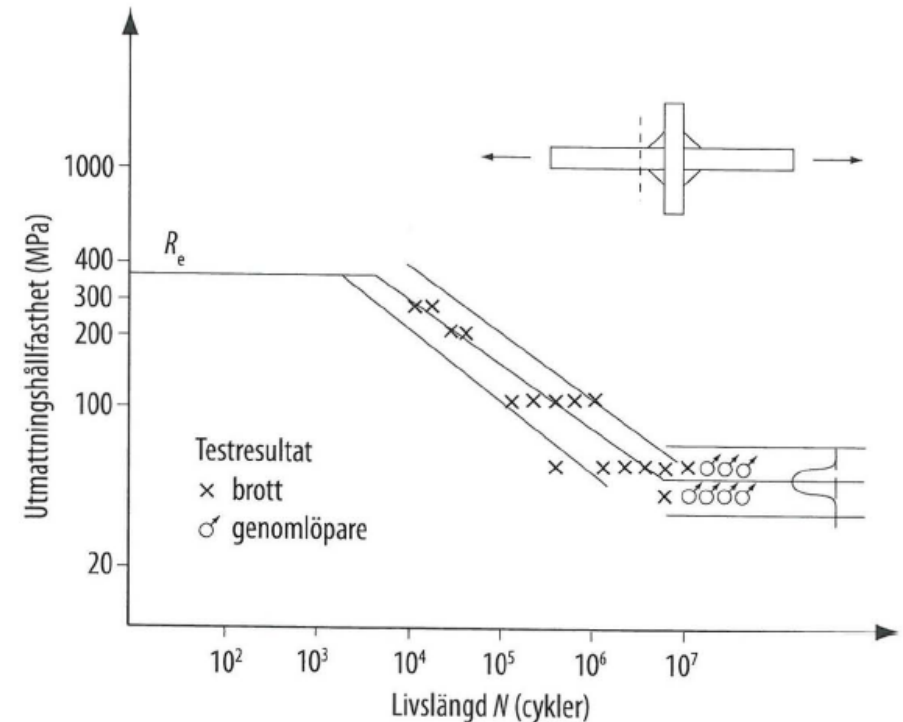
- **Hastigheten för tillväxt av sprickor**
  - i princip oberoende av stålets hållfasthet
- **Utmattningshållfastheten för svetsförband**
  - också i princip oberoende av stålets hållfasthet
- **Spänningen för initiering av utmattningssprickor**
  - relaterad till stålets sträckgräns
  - Därför ökar utmattningshållfastheten med ökande hållfasthet för **osvetsat** material (där initieringsfasen i utmattningsprocessen dominerar)



Defektstorlek

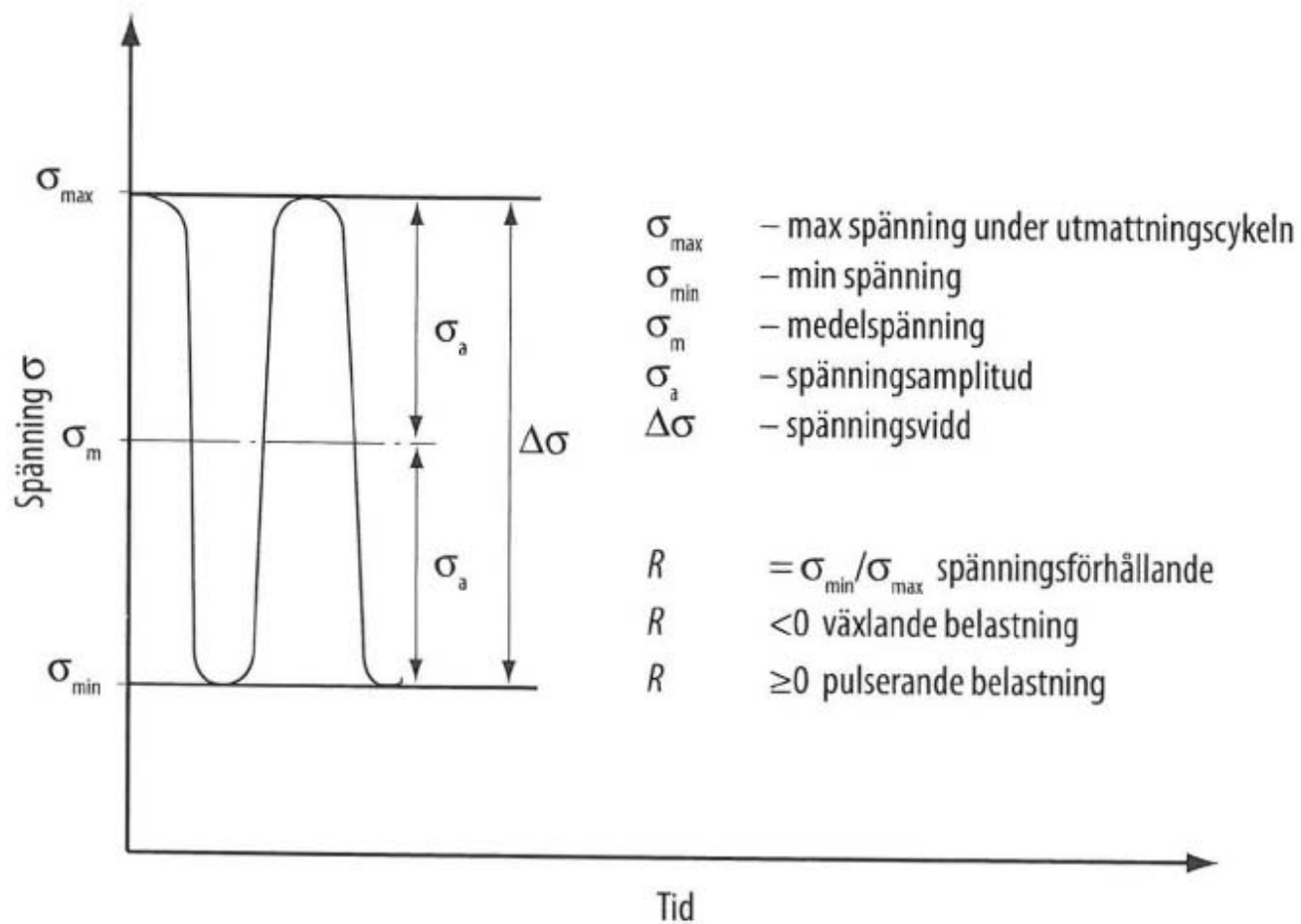
# Inverkan på utmattningshållfasthet

- **Tumregel:**
  - risk för utmattning om antalet lastcykler överstiger  $10^3$
- **Utmattn.hållf beror av:**
  - I första hand:
    - antalet lastcykler
    - lastkollektivets form (spänningsvariationer)
    - graden av anvisningsverkan
  - I andra hand:
    - grundmaterialets statistiska hållfasthet
    - medelspänning
    - korrosion
    - plåttjocklek
    - belastningsfrekvens

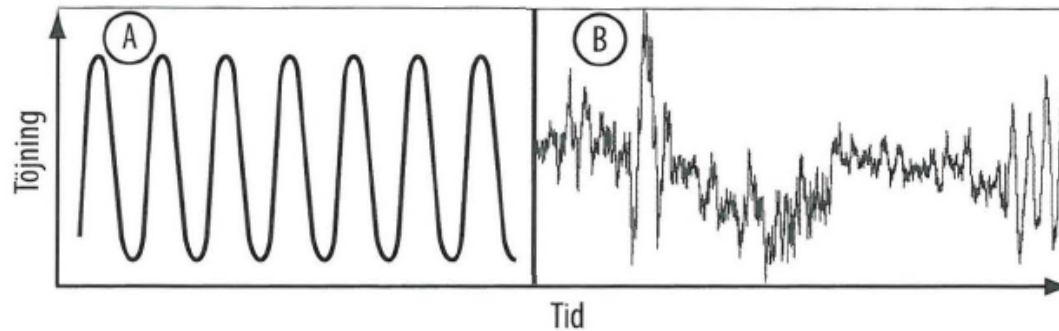


Wöhler-diagram (S-N diagram)

# Definitioner av spänningsmått i en utmattningscykel



# Inverkan av varierande last

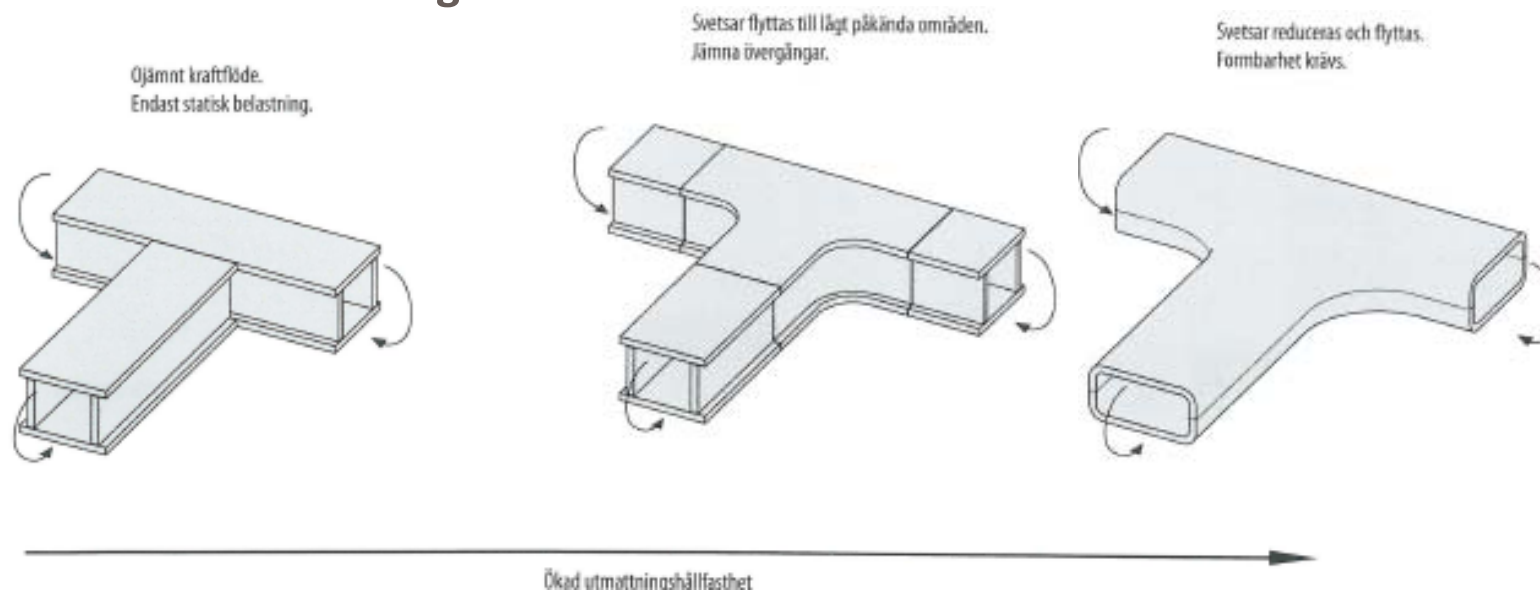


- A: Fullt spänningskollektiv. Dvs last varierar hela tiden mellan max-/min-värde
- B: Verkligt spänningskollektiv (uppmätt mha t.ex. trådtöjningsgivare)
- Vi kan ange en *kollektivfaktor* mellan  $0 < k < 1$  för att ta hänsyn till utseendet på lastkollektivet



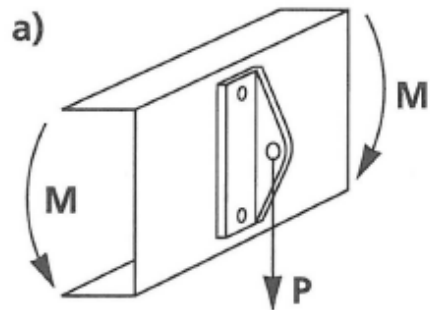
# Att tänka på vid risk för utmattning

- Undvik sprickanvisningar
- Skapa ett jämnt kraftflöde
- Jämna ytor
- Undvik korrosion
- Försök undvika svetsning

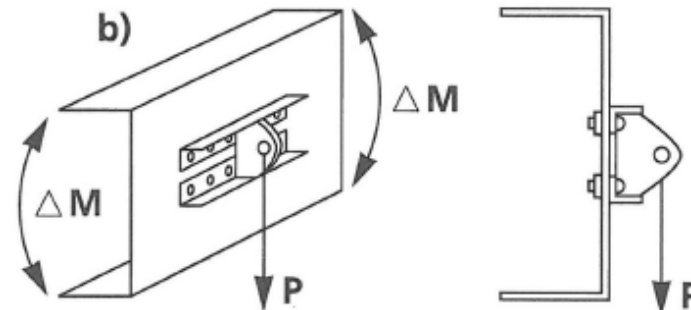


# Utformning av förband

- Lastinföring i balkliv

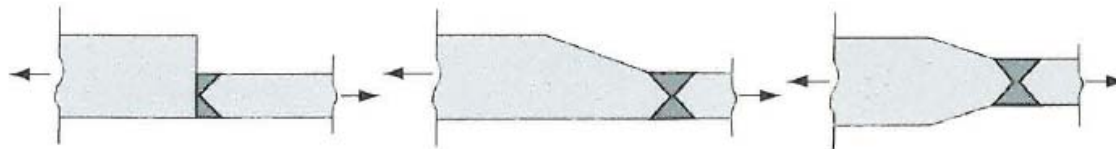


a) Bra vid statiskt belastad balk

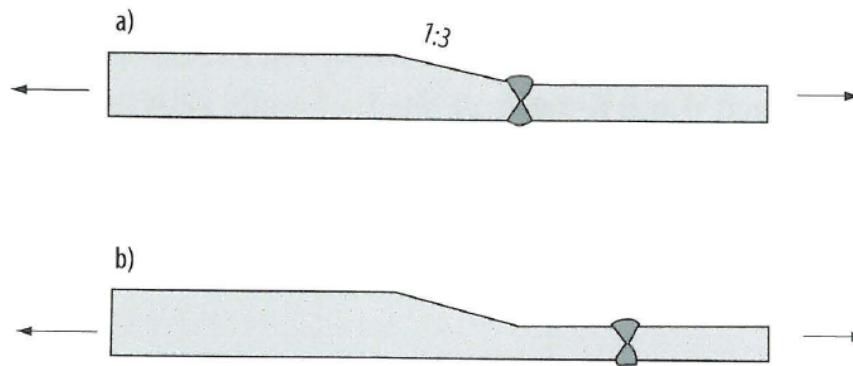


b) Bra vid utmattningsbelastad balk

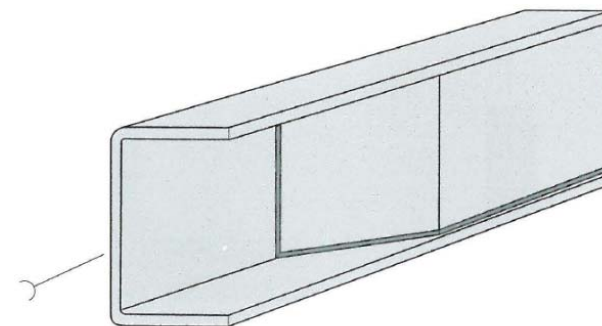
# Utformning av svetsade konstruktioner 1



**Figur 5.13:** Undvik abrupta styvhetsförändringar.

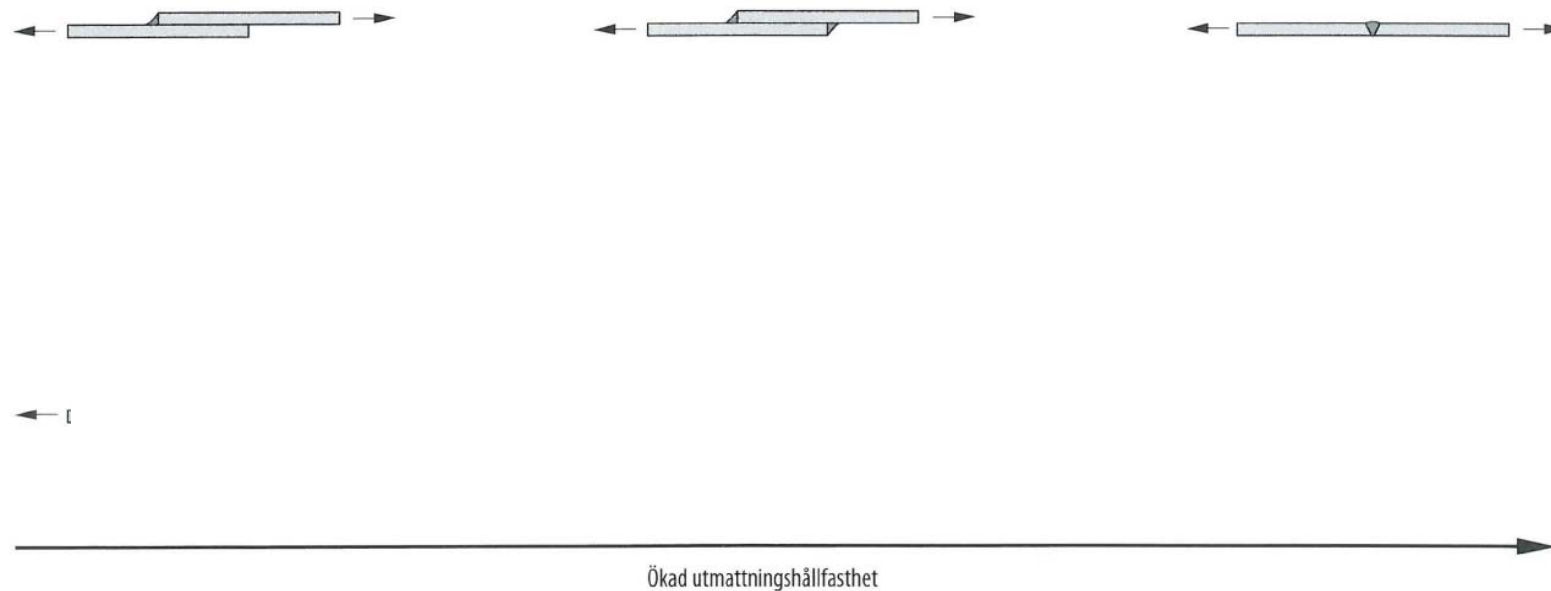


**Figur 5.14:** Undvik att överlagra anvisningsverkan.



**Figur 5.15:** Övergång från slutet till öppet tvärsnitt vid vridbelastning.

# Utformning av svetsade konstruktioner 2



**Figur 3.17:** Stumsvets är bättre än kälsvets vid utmattningsbelastning.  
Om man måste välja kälsvets är det bättre med en dubbelsidig sådan än en enkelsidig.

# Utformning av svetsade konstruktioner 3

---



Fel

Rätt

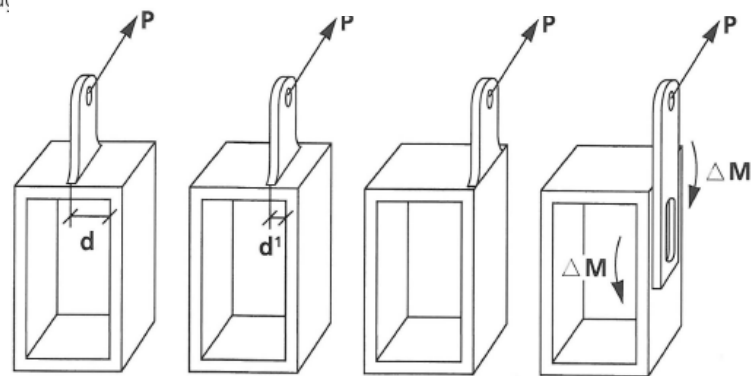
**Figur 3.19:** Ett svetsförband ska absolut inte utformas som ett nitförband. Det som är ett konstruktivt bra nit- eller skruvförband är ett dåligt svetsförband.

# Utformning av svetsade konstruktioner 4

- Placera svetsen där spänningen är låg



Figur 5.22: Svetsa lastinföringar i balkar nära neutralaxeln



Platt-  
verkan

$d' < d$   
 $\geq$   
Mindre  
lokal  
böjning

Skivverkan  
utnyttjas  
bra

lämpligast om  
balken är  
utmattnings-  
belastad

# Exempel

---



# Utformning av svetsade konstruktioner 5

---

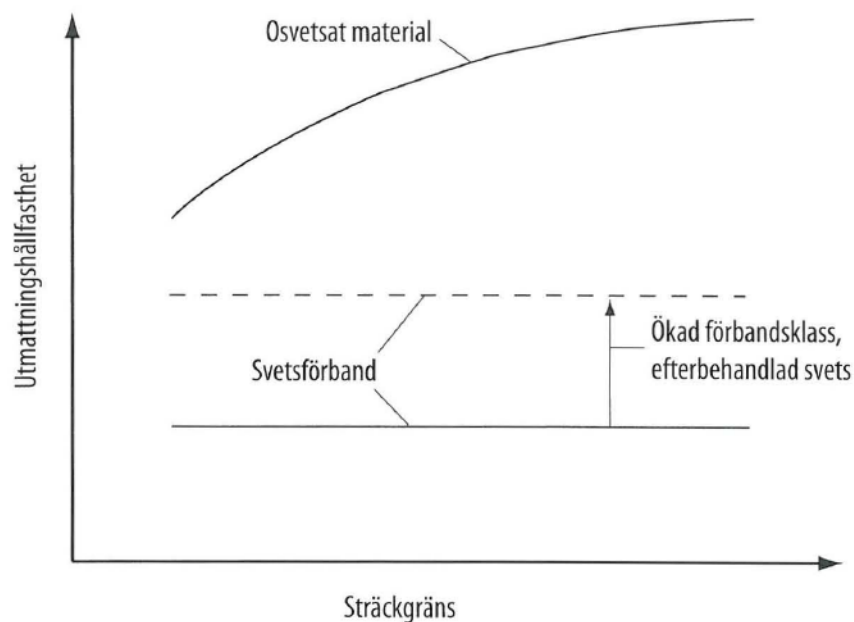
- **Efterbehandling**
  - Metoder för förbättring av svetsprofilen. (avlägsna/reducera sprickliknande defekter)
    - maskinbearbetning eller planslipning av svetsrågen
    - maskinbearbetning eller slipning av svetstån
    - lokal återsmältning med TIG, plasma eller laser
  - Metoder för att införande av tryckegegenspänningar (reducera dragspänningar):
    - kallhamring - Peening (Hamring, Nålhamring, Kulblästring,
    - "Ultrasonic Peening" (UP) och "Ultrasonic Impact Treatment" (UIT)
    - lokal kompression
    - överbelastning
    - avspännings glödning
  
- ***OBS! En spricka kan bara växa om den utsätts för dragspänningar***



# Val av förband/förbandsklasser

## ■ Förbandsklass FAT

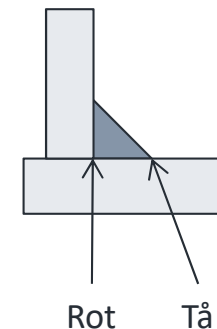
- är den karakteristiska utmattningshållfastheten för förbandet vid  $2 \cdot 10^6$  cykler och vid en brottsannolikhet på 2,3 %.



**Figur 5.11:** Utmattningshållfasthet som funktion av sträckgräns schematiskt, inverkan av ökad förbandsklass och efterbehandling av svets.

# Beräkningsmodeller

- **Metoden med nominella spänningar (spänning ber. med vanl. hållf)**
  - Ännu idag den vanligaste metoden
  - Förutsättningar:
    - Nominell spänning måste vara möjlig att bestämma.
    - Geometrin och belastningsriktning hos aktuellt förband har en motsvarighet i en känd förbandsklass. (anger verkan av spänningskoncentrationer mm)
  - Fördelar:
    - Enkel metod
- **Hot spot-metoden**
  - Förutsättningar:
    - Metoden är tillämpbar endast på svetsförband och endast då svetstån är kritisk.
  - Fördelar:
    - Metoden är tillämpbar för komplicerade strukturer där nominell spänning ej går att definiera.
- **Effective notch- metoden**
  - Förutsättningar:
    - Metoden är tillämpbar endast på svetsförband.
  - Fördelar:
    - Metoden är tillämpbar för komplicerade strukturer där nominell spänning ej går att definiera.
    - Förutom svetstån så kan även svetsroten dimensioneras med denna metod.



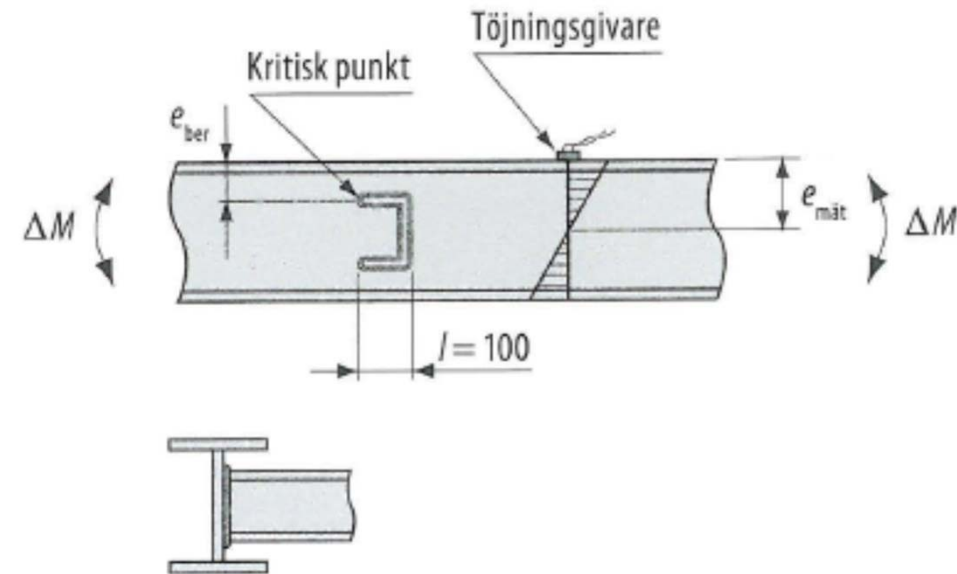
## Ex. 1

---

- Ett svetsat förband skall utmattningsdimensioneras. Man upptäcker vid en mätning att spänningsvidden är 25 % större än man från börjat räknat med. Hur påverkar det livslängden för förbandet?

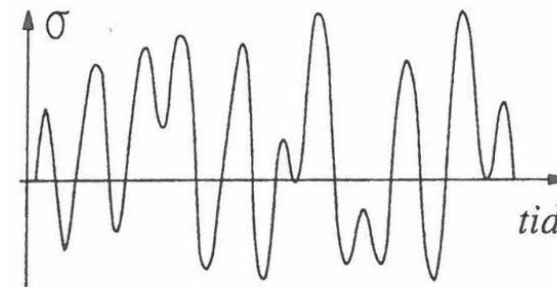
## Ex. 2

- För att få fram dimensioneringsunderlag till en ny balk gjordes en fältmätning på en prototyp under en veckas tid. Mätningen gjordes under sådana förhållanden att man inte behöver befara att släpvagnar ur kommande serieproduktion utsätts för hårdare kollektiv som orsakar större delskada i en given punkt än i fallet med det uppmätta kollektivet, d.v.s.  $\gamma_f$  sätts till 1,0 vid dimensionering. Den beräknade driftstiden är 9 år och släpet är dimensionerat för att gå 2/3-delar av denna tid i trafik d.v.s. 16 h/dygn. En kritisk punkt har identifierats i anslutningen mellan rambalk och tvärbalk enligt Svets är lagd runt om den C-formade tvärbalken. Livet i huvudbalken har godstjockleken  $t=5$  mm. Konsekvensen av haveri bedöms vara allvarlig, d.v.s.  $\gamma_m$  sätts till 1,21. Inverkan av excentricitet och vinkelfel täcks in av aktuell förbandsklass. I figur 5.73 och tabell 5.20 visas fältmättningsdata i form av range-pair värden för spänningsvidder.
- Uppfyller den aktuella beräkningspunkten kravet på driftstid med ovan nämnda förutsättningar?



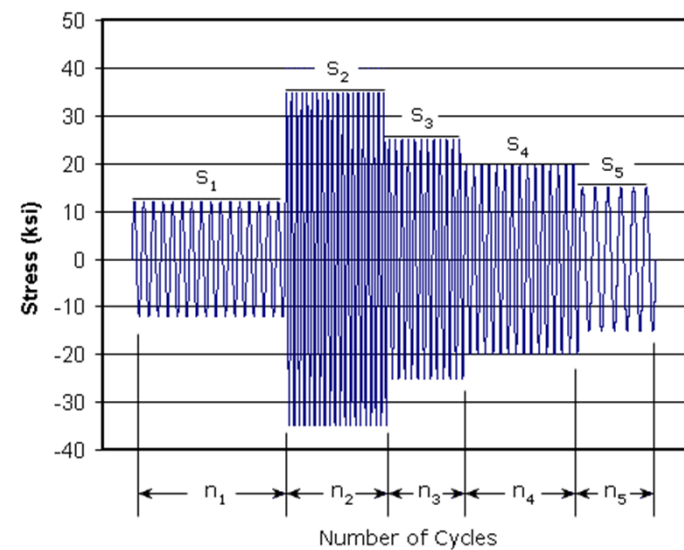
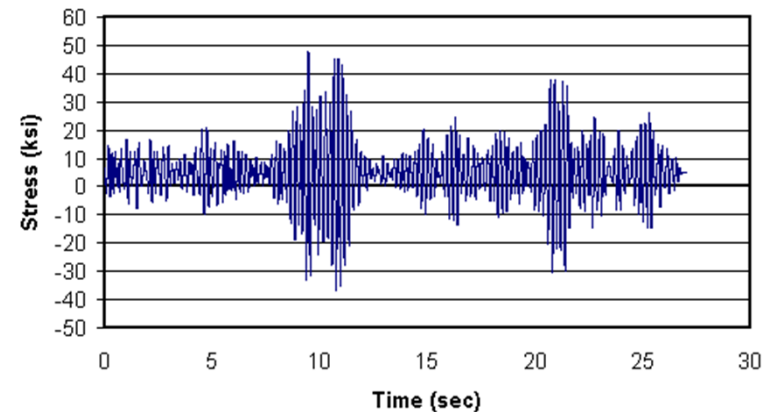
# Analys av lastväxlingarna

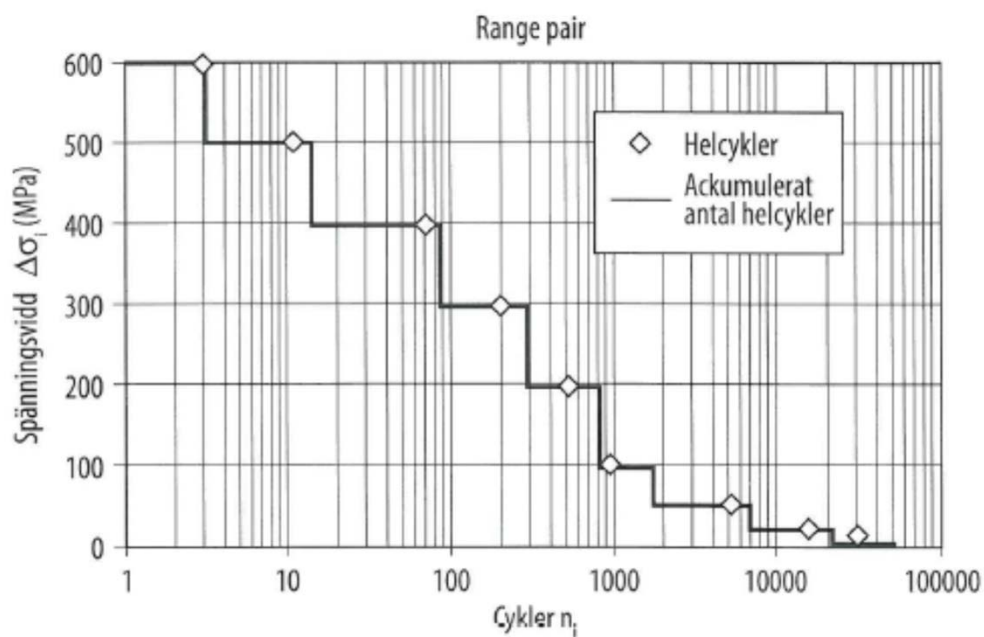
- Hur många belastningscykler?
  - Hur stor amplitud?
- 
- Metoder för att räkna cykler med viss amplitud
    - Peak count-metoder
    - Range pair count-metoder
      - Rain-flow count
    - M.fl.



# Konvertering av oregelbundna cykler till block av regelbundna cykler

- Mätresultat
- Konvertering av mätdata till block med konstant amplitud efter Rain-flow count-analys





**Figur 5.73:** Grafisk representation av kollektiv från fältmätning.

Range-Pair värden från fältmätning		Beräknade värden		
i	(MPa)	$n_i^{1)}$ (helcykler)	$k_{3i}$ ( $\Delta\sigma_{ref} = \Delta\sigma_1 = 600\text{MPa}$ )	Akkumulerat antal helcykler <sup>2)</sup>
1	600	3	$5,80 \cdot 10^{-5}$	3
2	500	11	$1,23 \cdot 10^{-4}$	14
3	400	70	$4,01 \cdot 10^{-4}$	84
4	300	201	$4,85 \cdot 10^{-4}$	285
5	200	511	$3,66 \cdot 10^{-4}$	796
6	100	913	$8,17 \cdot 10^{-5}$	1709
7	50	5015	$5,61 \cdot 10^{-5}$	6724
8	20	15025	$1,08 \cdot 10^{-5}$	21749
9	10	30012	$2,68 \cdot 10^{-6}$	51761
	Summa:	51761 $=n_t$	0,00158 $=k_3$	

<sup>1)</sup> Helcykler då range-pair metoden använts vid mätning.

<sup>2)</sup> Används endast för grafisk representation.

**Tabell 5.20:** Resultat från fältmätning och beräkning av kollektivfaktorn  $k_m$ .

## 5.6.6 Beräkningsgång

1. Bestäm inverkan av spänningskollektivet genom spänningsförloppsparametern  $s_m$

$$s_m = \frac{N_t}{2 \cdot 10^6} \cdot k_m \quad (\text{Ekv 5.10})$$

där

$$k_m = \sum_i \left( \frac{\Delta\sigma_i}{\Delta\sigma_{\text{ref}}} \right)^m \cdot \frac{n_i}{n_t} \quad (\text{Ekv 5.8})$$

Vid varierande spänningsvidd är  $k_m < 1$ .  
Vid konstant spänningsvidd är  $k_m = 1$

2. Bestäm förbandsklassen FAT med hjälp av *tabell 5.17, 5.18* och *5.19*
3. Bestäm tjockleksfaktorn  $\varphi_t$ , se *ekvation 5.11* och *tabell 5.9*
4. Bestäm materialfaktorn  $\varphi_m$ , se *figur 5.64*
5. Bestäm spänningsväxelfaktorn  $\varphi_c$ , se *ekvation 5.12–5.14*
6. Bestäm partialkoefficienterna för last och bärförmåga,  $\gamma_f$  och  $\gamma_m$ , se *tabell 5.11*
7. Bestäm tillåten spänningsvidd  $\Delta\sigma_{\text{Rd}}$

$$\Delta\sigma_{\text{Rd}} = \frac{\text{FAT} \cdot \varphi_t \cdot \varphi_m \cdot \varphi_c}{\gamma_m \cdot \sqrt[n_t]{s_m}} \quad (\text{Ekv 5.15})$$

8. Kontroll av vinkel och kontringsfel,  $\omega$ , se *ekvation 5.16–5.18*

9. Bestäm maximal spänningsvidd,  $\Delta\sigma_{\text{max}}$

$$\Delta\sigma_{\text{max}} = \sigma_{\text{max}} - \sigma_{\text{min}} \quad (\text{Ekv 5.19})$$

10. Dimensioneringsvillkor

$$\Delta\sigma_{\text{max}} \cdot \gamma_f < \Delta\sigma_{\text{Rd}}$$