

Únava stavebních materiálů

- Nastává u materiálů zatížených opakujícím se nebo cyklickým zatížením.
- Dochází k vyčerpání únosnosti (a poruchám) bez toho, že by bylo dosaženo mezních zatížení podle klasických přístupů.
- Postihuje **všechny** stavební materiály.

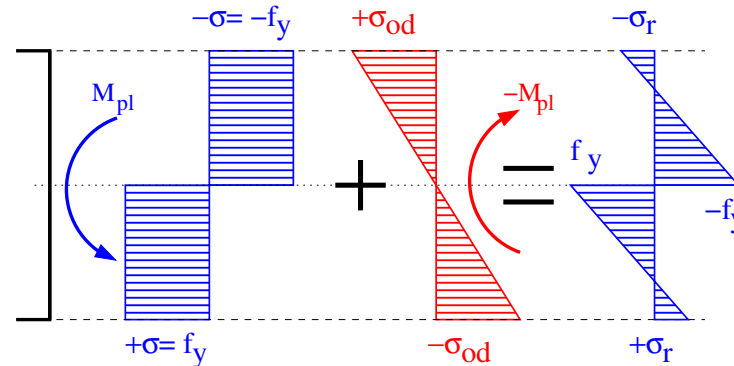
Typy únavového chování

- **Kvazistatický lom** – porušení nastane do 100 cyklů (10^2)
- **Nízkocyklová únava** – porušení nastane do 10^3 cyklů
- **Vysokocyklová únava** – porušení nastane do 10^7 cyklů
- **Supervysokocyklová únava** – porušení nastane nad 10^7 cyklů

Nízkocyklová únava

Nízkocyklová (nízkocyklická) únava:

- Účinky zatížení vyvozují napětí nad mezi kluzu materiálu (tj. např. u oceli plastické deformace).

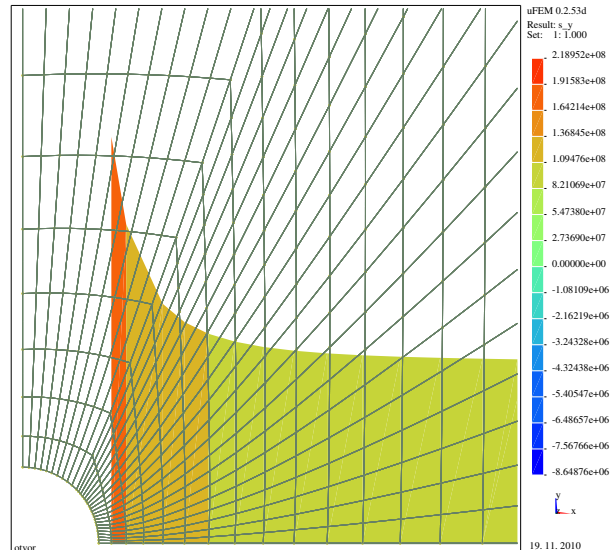


- Rychle tedy dojde k vyčerpání únosnosti (viz zbytková napětí).
- Může být urychlena *koncentrátory napětí* v materiálu (nehomogenity, trhliny) nebo konstrukci (nevhodné detaily).
- Dojde-li k lomu, pak lomová plocha má zpravidla hrubý, nevyhlazený povrch.
- Stavení konstrukce musí být navrženy tak, aby tento stav při běžném provozu **nenastal**.
- Obvykle jde o důsledek **seismických jevů, mimořádných klimatických jevů** (bouře typu tornádo, hurikán...) aj.

Vysokocyklová únava

Vysokocyklová (vysokocyklická) únava:

- Účinky zatížení vyvozují napětí **mnohem menší** než je mez kluzu materiálu.



- Poruchy jsou vždy způsobeny *koncentrátory napětí* v materiálu (nehomogenity, trhliny) nebo konstrukci (nevhodné detaily).
- Dojde-li k lomu, pak lomová plocha má zpravidla převážně hladký, vyhlazený povrch.
- Typicky **mosty, jeřábové dráhy, letištní dráhy**, aj.; zpravidla také dynamicky namáhané konstrukce.

Supervysokocyklová únava

Supervysokocyklová (supervysokocyklická) únava:

- Počet zatěžovacích cyklů je velmi vysoký (podle definice $> 10^7$, ale obvykle v řádu 10^9 nebo více)
- Účinky zatížení vyvozují napětí **mnohem menší** než je mez kluzu materiálu.
- Poruchy jsou vždy způsobeny *koncentrátory napětí* v materiálu (nehomogenity, trhliny) nebo konstrukci (nevhodné detaily).
- Dojde-li k lomu, pak lomová plocha má zpravidla převážně hladký, vyhlazený povrch.
- Typicky **konstrukce vystavené provozu hromadné dopravy – ve městech, pobřežní a mořské konstrukce (těžební plošiny), ale také některé železniční konstrukce (pražce) a konstrukce větrných elektráren, aj.**

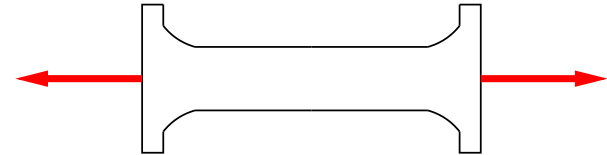
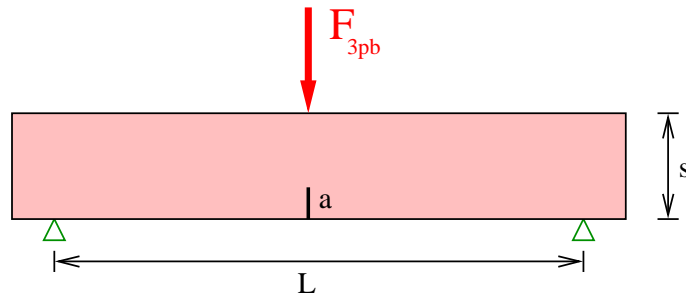
Vysokocyklová únava

Dále se budeme primárně zabývat vysokocyklovou únavou.

- Proces únavy závisí na:
 - **Počtu zatěžovacích cyklů.**
 - **Rozkmitu napětí** ($\Delta\sigma_r = \sigma_{max} - \sigma_{min}$) v jednotlivých cyklech
 - Pořadí rozkmitů napětí (zda nejříve nastanou velké rozkminy, pak menší, jak se střídají...)
- Nelze řešit **obecně** (např. z globálního MKP modelu).
- Je nutno identifikovat a studovat všechny **kritické detaily** konstrukce, např. detaily přípojení, svarů, místa oslabená korozí, místa s již odhalenými trhlinami.
- Řeší se s použitím metod lomové mechaniky.
- Únavové parametry materiálů se získávají **laboratorními testy**, ve kterých zpravidla dochází k zatěžování *konstantní amplitudou* napětí. Časový průběh napětí může mít různý tvar.

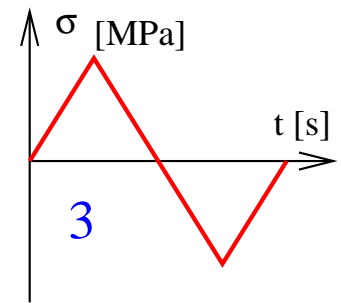
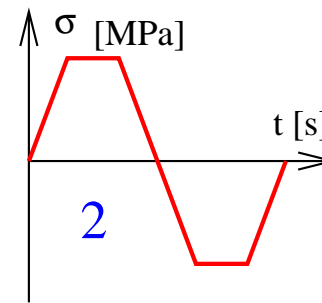
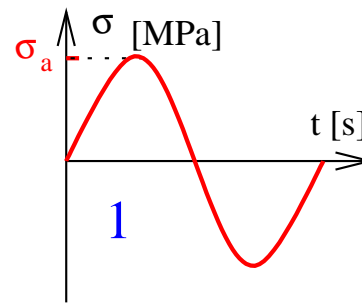
Laboratorní testy

- Vzorky definovaného tvaru (trámeček, „kost“) podle jednotlivých materiálů:



- Předepsaný časový průběh (t) zatěžovacích cyklů a amplitud napětí σ_a (nejčastěji konstantní amplituda).
- Rozkmity napětí mohou být symetrické ($\sigma_{max} = -\sigma_{min}$), ale nemusí.
- Zatěžovací cykly nejčastěji:

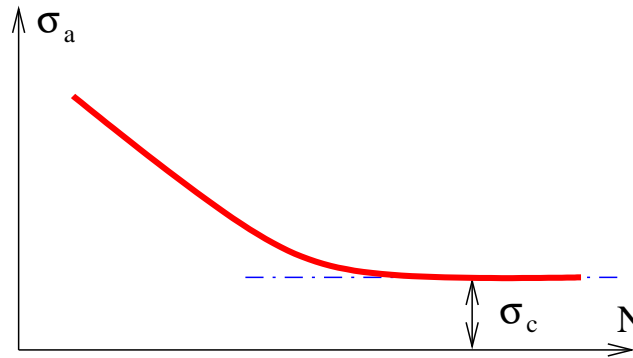
1. sinusové,
2. obdélníkové,
3. trojúhelníkové.



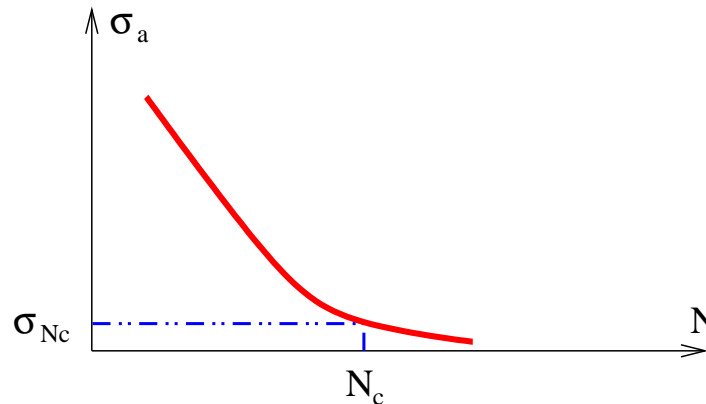
- Provádějí se na více vzorcích pro různé a rozkmity napětí.
- Testování nevystihuje přesně skutečný časový průběh napětí na konstrukci (ten je náhodný nebo pseudonáhodný).

Vyhodnocení laboratorních testů

- Získáme závislosti mezi **amplitudami napětí** σ_a a **počty zatěžovacích cyklů** N – tzv. **Wohlerovy** (Wöhlerovy) **křivky**.
- **Mez únavy** σ_c – amplituda napětí při které ještě *nedojde* i při vysokém počtu cyklů k lomu:

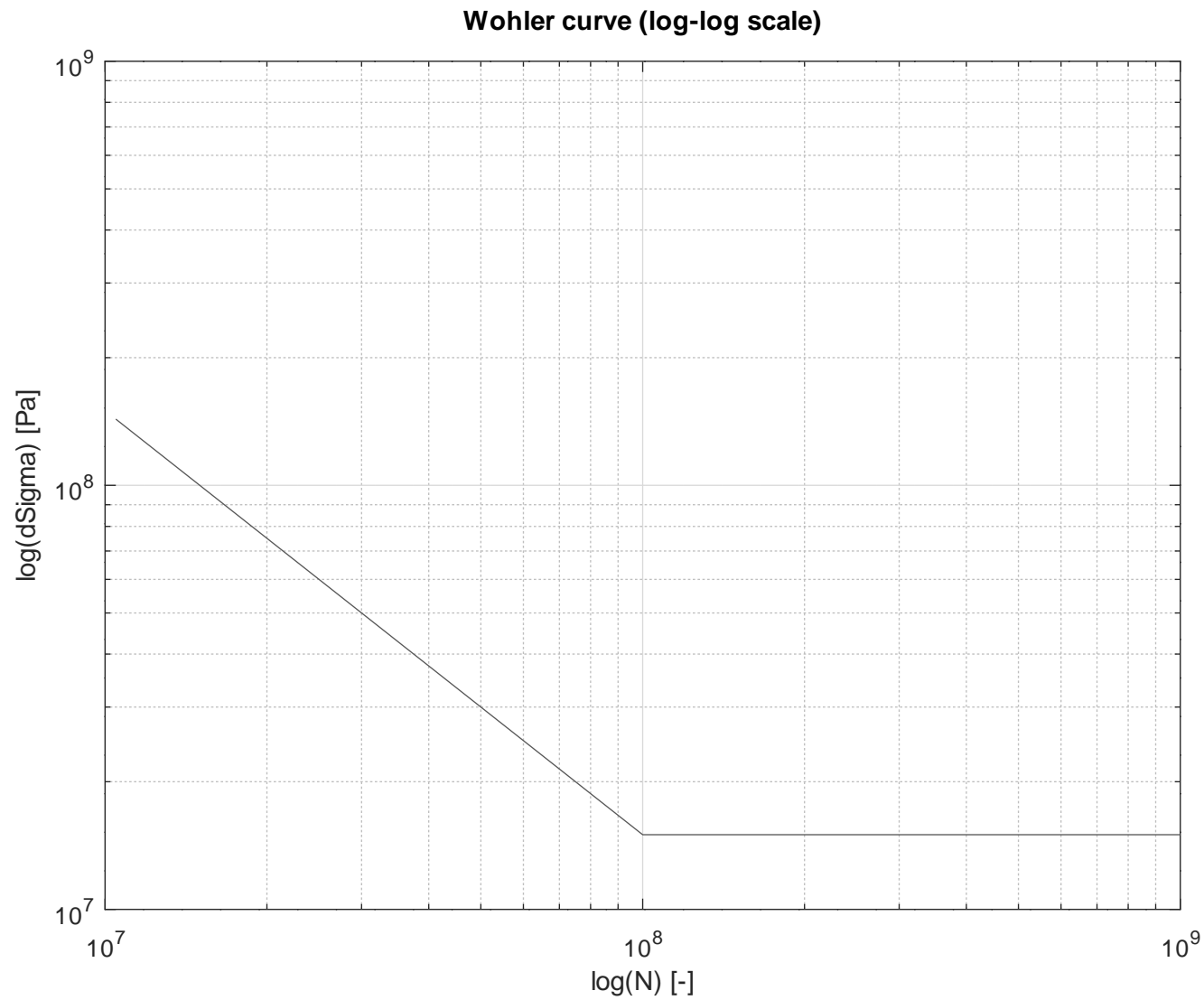


- **Časová mez únavy** σ_{N_c} – amplituda pro počet cyklů N_c , při kterém sm-
lůvně dojde k lomu:



Wohlerova křivka (S-N křivka)

V **logaritmickém** měřítku (s omezením meze únavy – vodorovná čára):



Únavové chování oceli

Typická stádia únavového procesu (tj. při cycklickém zatěžování):

1. Změna mechanických vlastností:

- cyklické zpevnění,
- cyklické změkčení,

2. Iniclace (nukleace) trhlin.

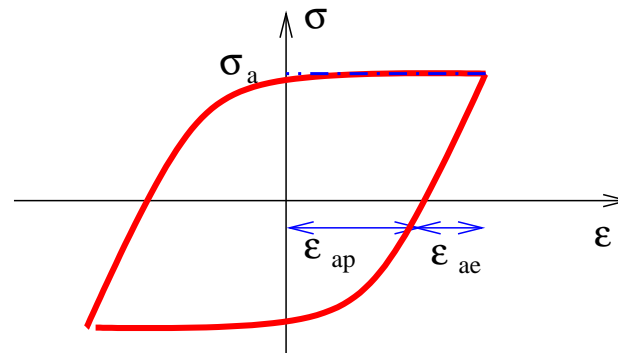
3. Růst trhlin.

4. navový lom.

Přechod mezi uvedenými stádii není „ostrý“.

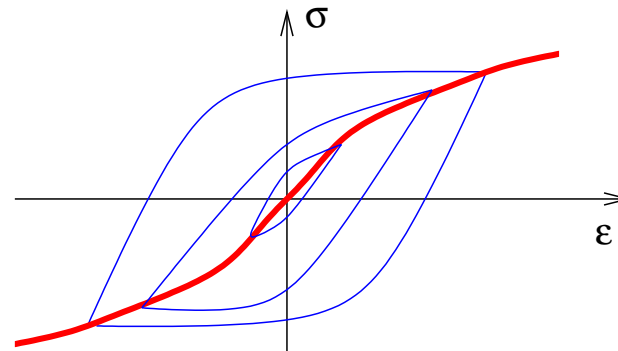
Změna mechanických vlastností

Lze popsat **hysterezní smyčkou** – vztahem amplitudy napětí a elastické a plastické deformace :



Po cyklickém změkčení/zpevnění se vlastnosti zpravidla stabilizují.

Vrcholy hysterezních smyček pro různé amplitudy σ_a lze proložit **cyklickou křivku napětí**:



Iniciace a šíření trhlin

Iniciace (nukleace) trhlin:

- Hladký povrch – důsledek cyklické plastické deformace.
- Nehladký povrch, nehomogenní materiály – u koncentrátorů napětí (dutiny a jiné nehomogenity).

Nukleace zpravidla končí vytvořením *povrchových mikrotrhlin*.

Šíření trhlin:

- Rozšiřování a prodlužování některých trhlin.
- S rostoucí délkou se trhliny stáčí do směru kolmého na hlavní takové napětí.
- Zpravidla přechod do jedné (magistrální) trhliny; růst ostatních se zastaví.

Únavový lom:

- Porušení **zpravidla** v okamžiku, kdy horní napětí v zatěžovacím cyklu překročí kritické napětí v „dosud nesoucím“ zbytku průřezu.
- Obvykle křehký charakter porušení (a rychlý průběh).

Mez únavy oceli

Hodnota meze únavy je ovlivněna řadou faktorů:

- **Druh zatěžování**, za základní se považují:

- tah nebo tlak σ_C ,
- ohyb σ_{oC} ,
- kroucení τ_C

Přibližné vztahy mezi jejich účinky: $\sigma_{oC} = 1.3 \times \sigma_C = 1.73 \times \tau_C$.

- **Velikost** vzorku nebo konstrukce, zejména u namáhání ohybem a kroucením (u σ_C má menší vliv).
- **Vruby**: vrubový součinitel K_f , součinitel vrubové citlivosti Q :
 - materiály **citlivé** na působení vrubů: $Q \rightarrow 1$,
 - materiály **necitlivé** na působení vrubů: $Q = 0, K_f = 1$,
- **Stavu povrchu**:
 - Trhliny vznikají často z *povrchu*.
 - I jemné povrchové nerovnosti mohou působit jako *minkrokoncentrátory napětí*.
 - S rostoucí pevností materiálu se zvyšuje vliv stavu povrchu.
- **Frekvence zatěžování**

Modely pro únavu (1)

Existuje velmi mnoho modelů pro popis únavy.

Basquin :

- Nejjednodušší používaný model.
- Je základem dalších, složitějších modelů (Palmgren–Miner aj.)
- Základní tvar rovnice:

$$\sigma(N) = a \times N^b = a \left(\frac{1}{N} \right)^{-b},$$

kde a ...koeficient únavové pevnosti při jednom cyklu, b ...exponent únavové pevnosti (zjišťují se ze zkoušek).

- V logaritmickém měřítku má Basquinova křivka tvar přímky: $\log(N) = A + B \times \log(\sigma)$ nebo $\log \sigma = \frac{A}{B} + \frac{1}{B} \log(N)$, kde lineární regresní parametry A a b jsou ve vztahu k a a b takto: $a = 10^A$, $b = B$.
- Úprava rovnice, aby lépe pospisovala nízkocyklovou oblast a repektovala limitní hodnotu únavy σ_∞ (**Palmgrenova** rovnice):

$$\sigma(N) = a(N + B)^b + \sigma_\infty.$$

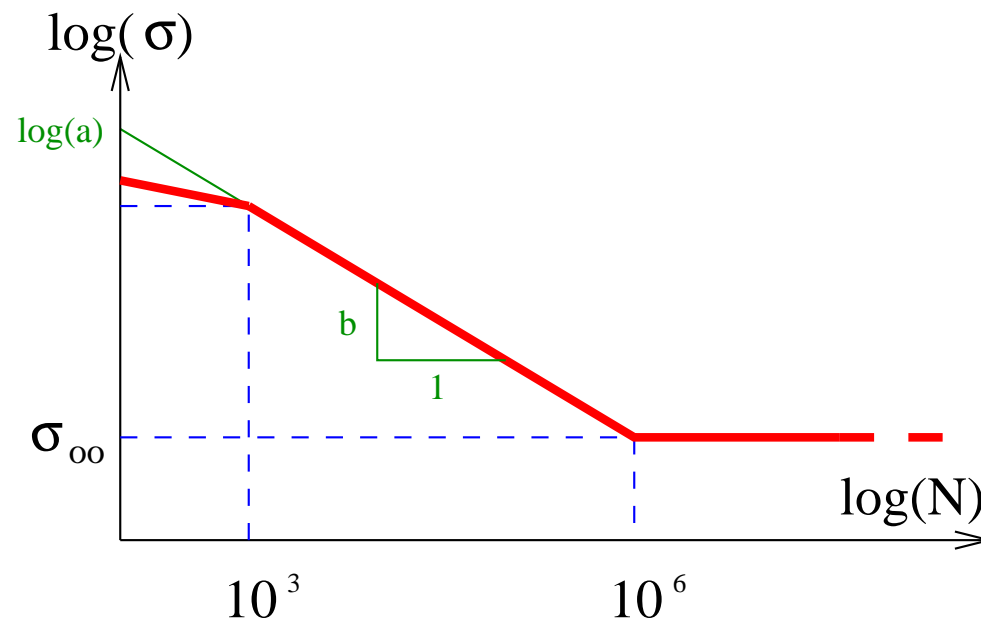
Modely pro únavu (2)

Basquin :

- Schematické znázornění Palmgrenovy rovnice

$$\sigma(N) = a(N + B)^b + \sigma_{\infty}$$

v logaritmickém měřítku.



- oblast **vysokocyklové únavy** je naznačena mezi 10^3 a 10^6 .

Principy posuzování únavy ocelových konstrukcí

- Posuzují se konkrétní detaily (všechny kritické):
 - třídy detailů podle norem (EC, AASHTO aj.)
 - další požadavky na konstrukci (redundance apod.)
- Pracuje se s šířením trhliny \Rightarrow lomová mechanika, využití relativně jednoduchých vztahů, např. Paris-Erdoganova zákona.
- Pracuje se s počtem zatěžovacích cyklů (odhadovaná, předem přesně neznámá veličina) \Rightarrow statistické (např. Palmgren-Mineorovy hypotézy), případně pravděpodobnostní přístupy.

Aplikace lomové mechaniky (1)

Módy trhlin a příslušné *faktory intenzity napětí* K :

- Múd I – **tahový** (opening):

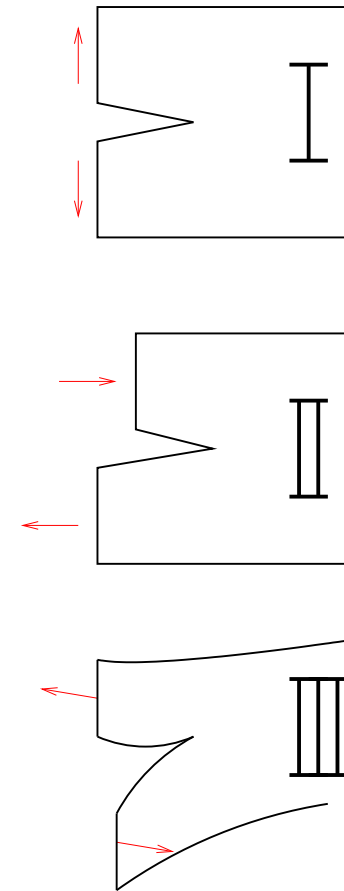
$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a}$$

- Múd II – **rovinný smykový** (sliding):

$$K_{II} = \tau \sqrt{\pi a}$$

- Múd III – **antirovinný smykový** (tearing):

$$K_{III} = \tau \sqrt{\pi a}$$



Aplikace lomové mechaniky (2)

Vztah mezi růstem velikosti a únavové trhliny a počtem cyklů N – **Parisův zákon** (anglicky obvykle „Paris–Erdogan law“):

$$\frac{d a}{d N} = C \times \Delta K^m,$$

kde:

- a ... délka trhliny (obvykle v m),
- C, m ... konstanty zjišťované regresní analýzou dat ze zkoušky (ocel: $m = 2..4$),
- ΔK ... rozkmit faktoru intenzity napětí:

$$\Delta K = (K_{max} - K_{min}).$$

Kumulativní únavové poškození (1)

- Zřejmě existuje vztah mezi počty cyklů N , rozkmity napětí $\Delta\sigma$ a únavovým poškozením.
- Nejjednodušší (a proto často používaný) vztah – *Palmgren-Minerova hypotéza* o **lineární kumulaci poškození**:

$$\sum \frac{n_i}{N_i} = 1,$$

kde

- n_i ... počet cyklů odpovídajících i -té velikosti rozkmitu napětí $\Delta\sigma_i$,
- N_i ... celkový počet kmitů nutným k únavovému porušení při i -tém velikosti rozkmitu napětí $\Delta\sigma_i$.

Kumulativní únavové poškození (2)

Palmgren-Minerova hypotéza:

- **Výhody**

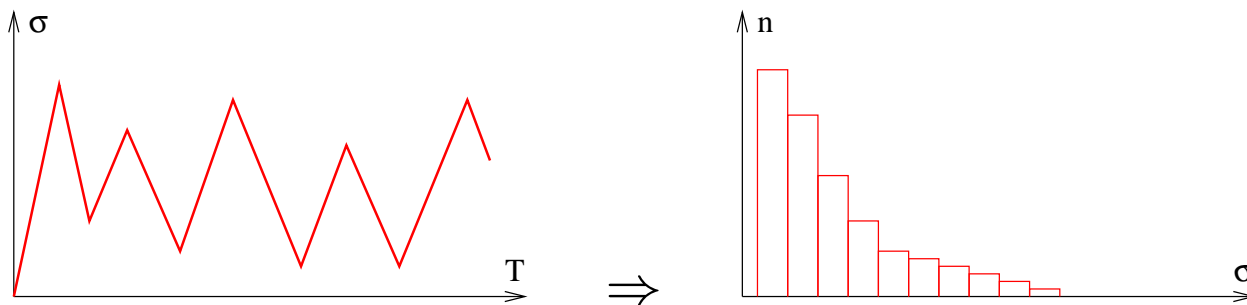
- Jednoduchý výpočet.
- Je souladu s Wohlerovými křivkami a ostatními základními teoretickými nástroji.
- Lze pro ni získat experimentální data – vyzkoušení n sad vzorků pro n různých úrovní rozkmitu napětí.
- Usnadňuje práci s *historií zatížení* (viz dále).

- **Nevýhody**

- Neumožňuje postihnout další vlivy – zejména vliv různé posloupnosti zatěžovacích cyklů o různých rozkmitech napětí (historii zatížení je nutno uvažovat **zjednodušeně**).

Historie zatěžování

- Pro navrhované konstrukce se stanovit – odhadnout – na základě očekávaného využívání.
- U existujících konstrukcí lze – více nebo méně přesně – rekonstruovat z existujících dat o zatěžování (např. dopravní průzkumy u mostů nebo technologická dokumentace, záznamy o provozu aj. u jeřábových drah).
- Typicky jde o soubor neuspořádaných data.
- Pro potřeby výpočtu je třeba stanovit počty n_i opakujících se rozkmitů napětí (stress ranges, $\Delta\sigma_i$), nejlépe do podoby histogramu.
- Obvyklé metody pro **uspořádání dat** (i podle ČSN a EC; dávají stejný výsledek):
 - Rainflow
 - Reservoir



Posuzování únavy

- Normový přístup (s pravděpodobností poruchy se pracuje ve formě parciálních součinitelů).
- Plně pravděpodobnostní přístup (EC ho už taky umožňují):
The probability of failure p_F is defined as difference between load effects R and structural resistance E :

$$p_F = P(G_{fail}(\mathbf{X}) < 0) = P(R_{aac} - E(N) < 0), \quad (1)$$

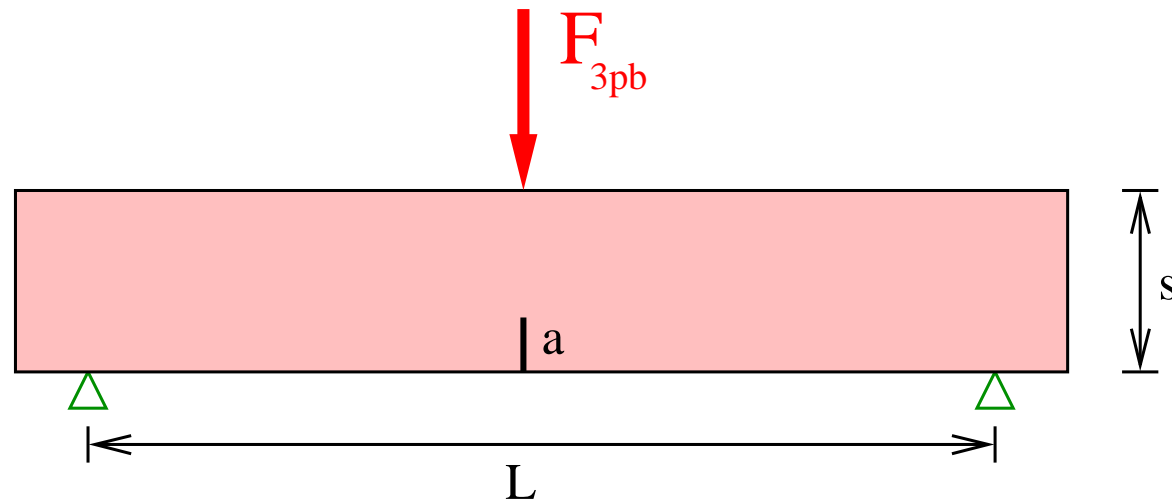
where \mathbf{X} is vector of random properties (material properties, geometric properties of the structure, load effect parameters and – in the studied area of problems – parameters of fatigue crack).

- Do účinku zatížení musí být zahrnuta historie zatěžování, charakter detailu aj.
- Do odolnosti konstrukce vstupují primárně parametry materiálu.

Ukázka

(1)

Pravděpodobnost poruchy trámce se zářezem podle obrázku (odpovídá trámci testovanému v laboratoři AV ČR) po 33 letech.



Parametry:

- $L = 0.4 \text{ m}$... vzdálenost podpor,
- $s = 0.1 \text{ m}$... výška trámce,
- $b = 0.01 \text{ m}$... šířka trámce.

Ostatní parametry byly zadány pomocí histogramů zjištěných statistickým vyhodnocením měření. Historie zatěžování byla dána histogramem.

Účinek zatížení:

$$E = C \Delta\sigma^m (N - N_o),$$

- C, m ... únavové parametry z laboratorních zkoušek,
- $\Delta\sigma$... rozkmit napětí,
- $N_o = 0$... počet zatěžovacích cyklů, které konstrukce absolvovala do začátku analýzy,
- N_a ... studovaný počet cyklů (byl vypočítán z histogramu získaného z měření).

Odolnost (z literatury):

$$R = \int_{a_o}^{a_{ac}} \frac{1}{(\sqrt{\pi a} f(a))^m} da,$$

- a_{ac} ... maximální přípustná šířka trhliny,
- $f(a)$... kalibrační funkce pro nosník při tříbodovém ohybu.

Ukázka

(3)

Veličiny potřebné pro stanovení odolnosti:

- Maximální přípustná velikost trhliny (a_{ac}) do integrálu:

$$a_{ac} = h - \sqrt{\frac{3 F_{3PB} s}{2 b f_y}}$$

- F_{3PB} ... velikost zatížení (svislé síly),
- f_y ... mez kluzu.

- Pro „naši úlohu“ třibodového ohybu je kalibrační funkce:

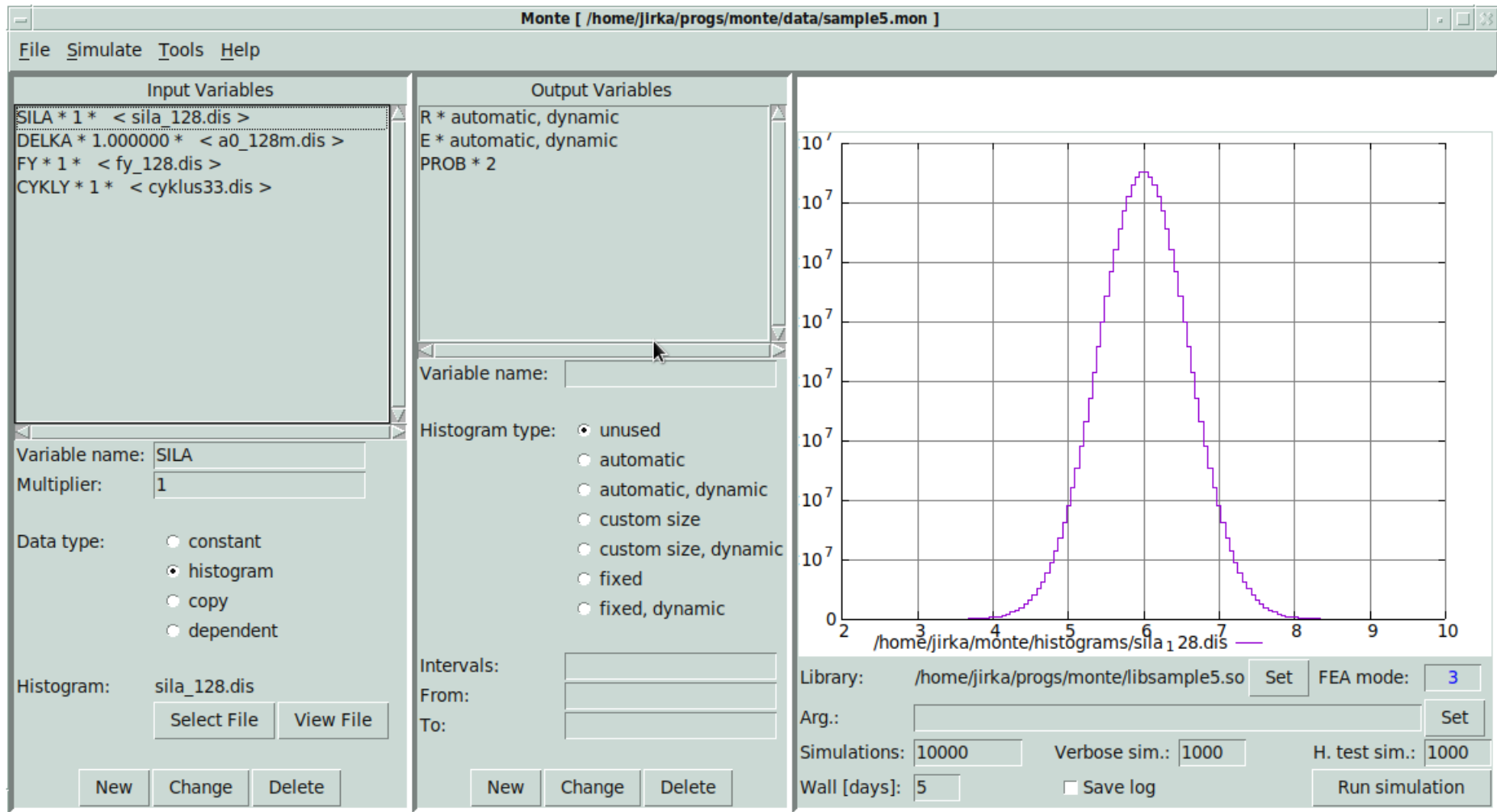
$$f(a) = +1.0618 - 1.0658 \left(\frac{a}{h}\right) + 2.9787 \left(\frac{a}{h}\right)^2 + 1.0435 \left(\frac{a}{h}\right)^3$$

- Tato funkce platí **jen pro poměr** rozpětí ku výšce nosníku $\frac{s}{h} = 4$.

Ukázka

(4)

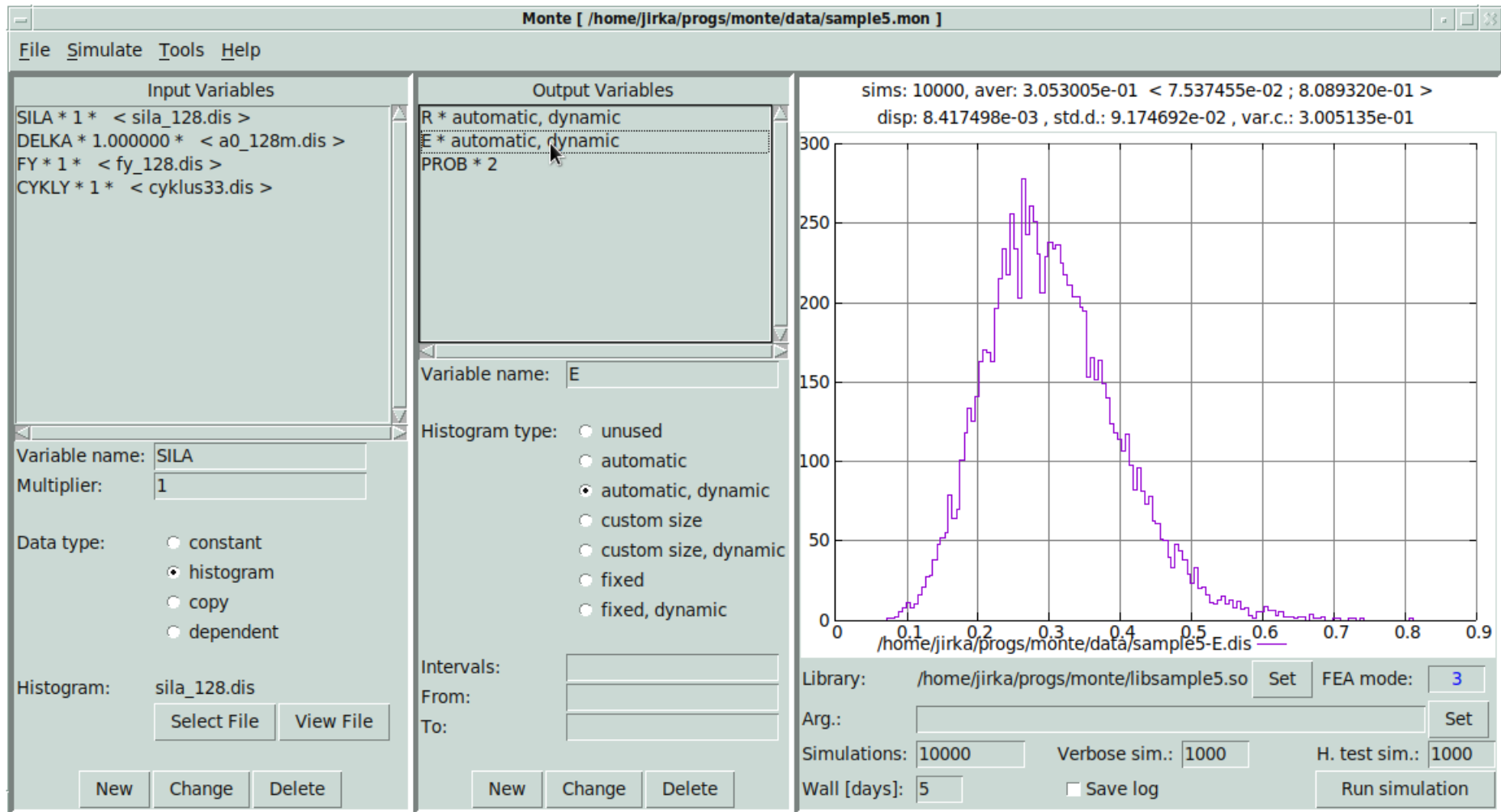
Data byla zadána (a vzorce naprogramovány) do software na bázi metody **Monte Carlo**:



Ukázka

(5)

Po chvílce počítání:



Pravděpodobnost poruchy po 33 letech provozu vyšla $p_f = 0.0038$.