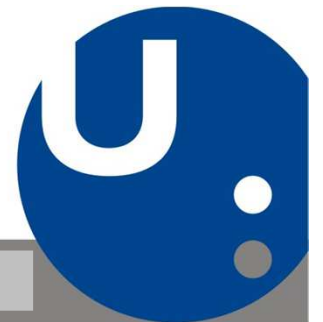


# *Ocelové mostní konstrukce*

## *životnost*

*(Vysokocyklová únava, stávající mostní konstrukce)*

*doc. Ing. Bohumil Culek, Ph.D.*



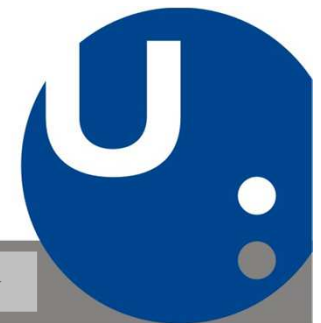
## ***Spolehlivost ocelových konstrukcí :***

***Schopnost konstrukce plnit všechny požadavky uživatele jak při běžném provozu, tak při extrémním souběhu nepříznivě působících zatížení.***

### ***Ukázky selhání spolehlivosti ocelových konstrukcí :***



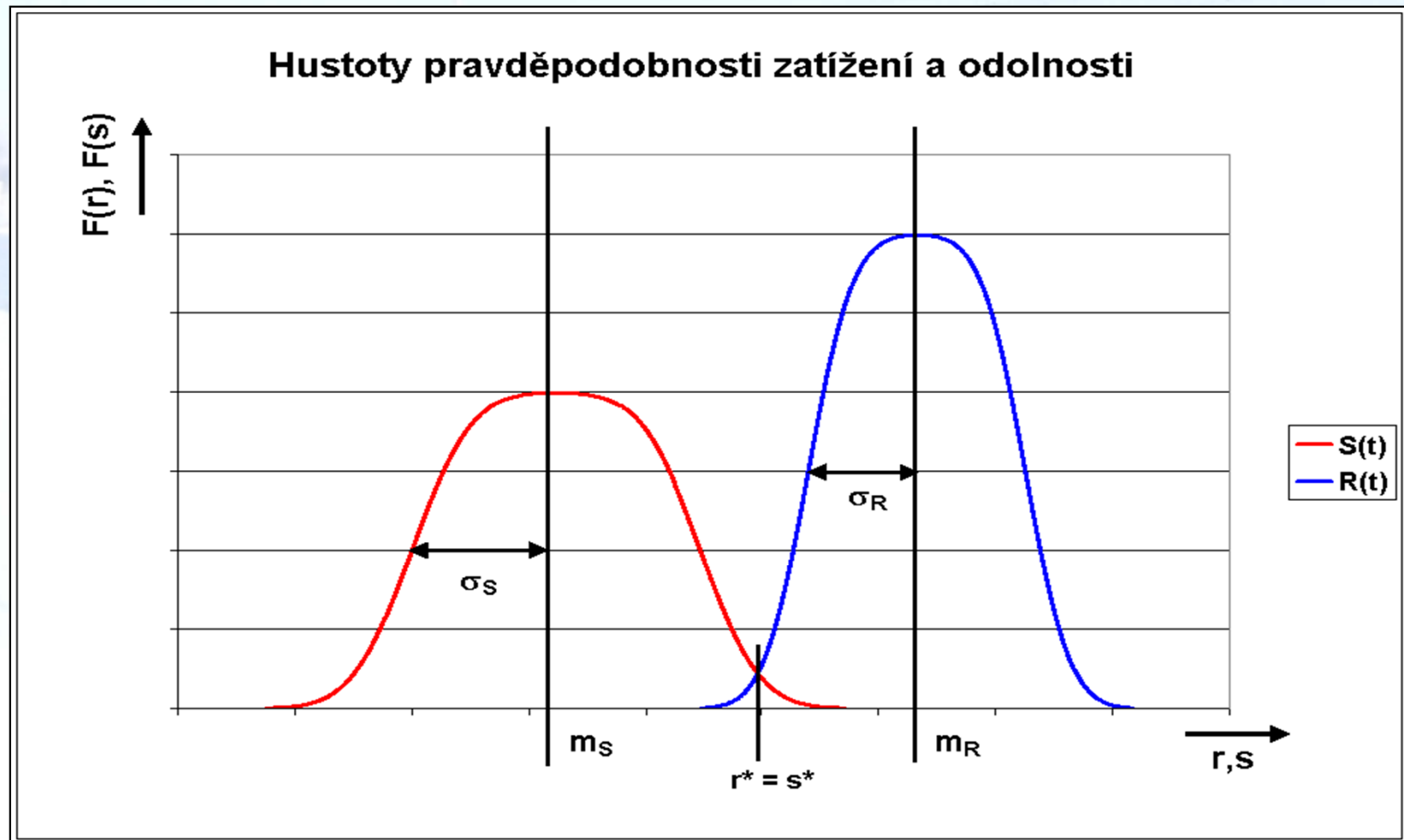
***Pont de Quebec – Kanada  
katastrofa 7 září 1907***



# Hodnocení spolehlivosti ocelových konstrukcí :

Kriteriem spolehlivosti je tzv. rezerva spolehlivosti  $G(t)$  :

$$G(t) = R(t) - S(t) \geq 0$$



# Hodnocení spolehlivosti ocelových konstrukcí :

Rezerva spolehlivosti  $G(t)$

pravděpodobnost poruchy

$$P_f = P(G < 0)$$

$$P_f < P_{fd}$$

index spolehlivosti

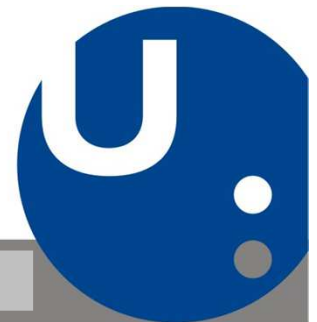
$$\beta = (m_R - m_S) / \sqrt{s_R^2 + s_S^2}$$

$$\beta \geq \beta_d$$

← *kriterium spolehlivosti* →

V souladu s pravděpodobnostním přístupem postačí, je-li uvedená nerovnost splněna s určitou (velmi vysokou) pravděpodobností (95 %). Aby tohoto byla dosaženo, používá se pro přepočítání tzv. **dílčích součinitelů spolehlivosti**. (normy ČSN, EN, DIN, ...)

Evropské normy využívají metodu dílčích součinitelů v návaznosti na koncepci mezních stavů.



# ***Hodnocení spolehlivosti ocelových konstrukcí :***

## **Ověřování mezních stavů únosnosti dle ČSN EN 1990:**

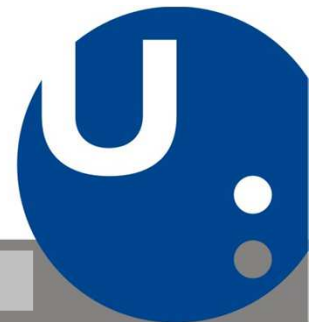
***EQU : ztráta statické rovnováhy konstrukce nebo její části uvažované jako tuhé těleso tam kde :***

- je významné i menší kolísání hodnoty nebo prostorového uspořádání zatížení stejného původu,***
- pevnosti konstrukčních materiálů nebo základové půdy nejsou obvykle rozhodující.***

***STR : vnitřní porucha nebo nadměrná deformace konstrukce nebo nosných prvků v případech, kde rozhoduje pevnost konstrukčních materiálů.***

***GEO : porucha nebo nadměrná deformace základové půdy, kde pevnosti zeminy nebo skalního podloží jsou pro únosnost důležité.***

***FAT : Únavová porucha konstrukce nebo nosných prvků.***



*Železniční mosty :*

Zdroj dat: ČD, a.s.		Celostátní koridorové	Celostátní ostatní	Regionální	Ostatní	Celkem
Železniční mosty	ocelové	137	943	602	14	1696
	masivní	1244	2873	829	38	4984
	celkem	1381	3816	1431	52	6680
z toho : nevyhovující stav		58	310	131	17	516
- v %		4,2	8,1	9,2	32,7	7,7

## Technický stav železničních ocelových mostů

- stáří konstrukce,
- kvalita údržby,
- typ konstrukce,
- technologie výroby konstrukce,
- agresivita prostředí,
- historie provozního zatížení

42%

25%

## Ocelové železniční mosty :

Objekty podle doby stavby	[ks]
do r. 1850	153
1851-1900	1865
1901-1960	2710
1961-1980	1567
po r. 1980	475

Průměrné stáří mostních ocelových konstrukcí je 72 let.



### Závady na nosných konstrukcích :

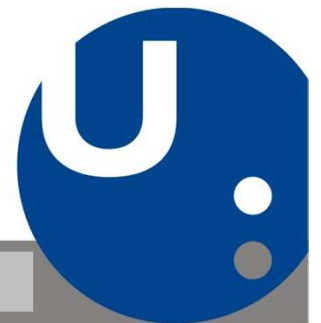
- stav mostnic vč. upevnění koleje,
- uložení - ložiska,
- korozní úbytky či přerezávání konstrukce,
- trhliny (únavové),**
- závady od nrazu silničních vozidel.

technická  
životnost  
ocelových  
mostů

## ***Dynamické zatěžování a únava materiálu :***

### **Okno do historie posuzování únavy:**

- 1837:** *Wilhelm Albert publikuje první článek o únavových poruchách důlních řetězů v důsledku cyklického zatěžování.*
- 1839:** *Jean-Victor Poncelet popisuje únavu kovů ve svých přednáškách na vojenské škole v Metz.*
- 1842:** *William John Macquorn Rankine rozpoznává důležitost koncentrace napětí ve svém výzkumu poruch železničních náprav.*
- 1843:** *Joseph Glynn podává zprávu o únavě osy kola tendru lokomotivy, únavu identifikuje jako klíčovou při vzniku trhliny.*
- 1860:** *William Fairbairn a August Wöhler zahajují systematické testování únavy konstrukcí.*
- 1870:** *Wöhler dokončuje svoji práci na testování únavy u železničních náprav formuluje **empirické závěry mající platnost dodnes.***





## ***Dynamické zatěžování a únava materiálu :***

### **Okno do historie posuzování únavy:**

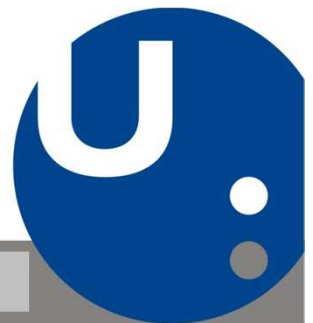
#### ***Wöhlerovi poznatky :***

- 1) Pro lom součásti, který vzniká v důsledku opakovaného zatížení, je rozhodující počet změn zatížení a nikoli doba provozu.***
- 2) Poškození materiálu závisí na rozdílu max. a min. napětí v kritickém místě. Absolutní velikost napětí má až druhořadý význam.***
- 3) Výsledky zkoušek lze graficky znázornit v závislosti mech. napětí – počet cyklů.***
- 4) Na základě experimentů lze stanovit mezní napětí, pod nímž k únavovým lomům již nedochází.***
- 5) Geometrické vruby snižují únavovou pevnost o hodnotu závislou na tvaru vrubu a druhu materiálu.***

#### ***Poznámka :***

---

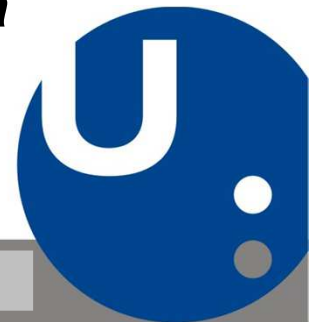
**Únavová pevnost – význam je vysvětlen v další části prezentace.**



## ***Dynamické zatěžování a únava materiálu :***

### **Okno do historie posuzování únavy:**

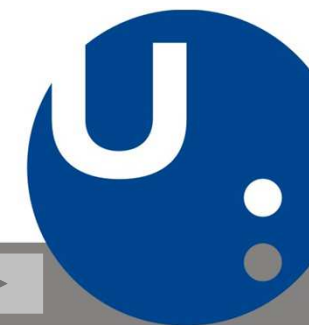
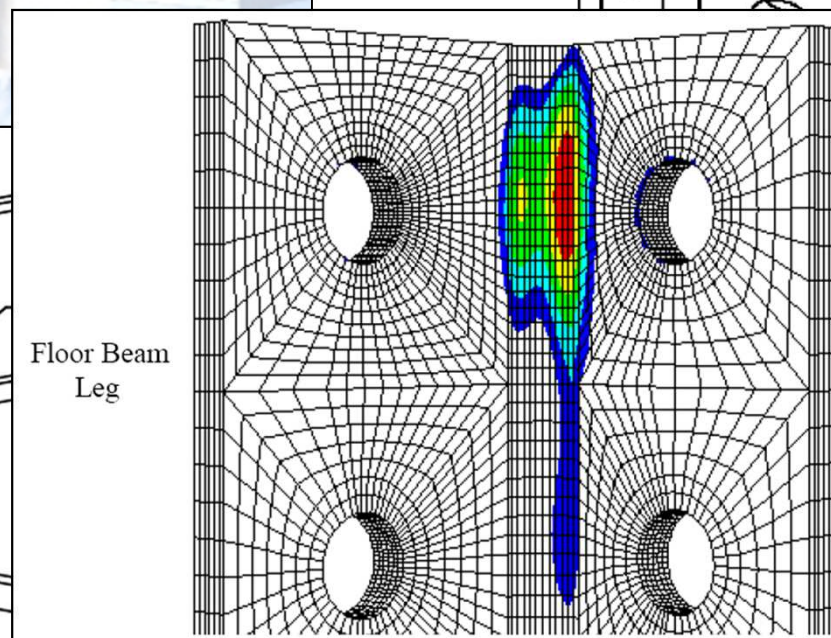
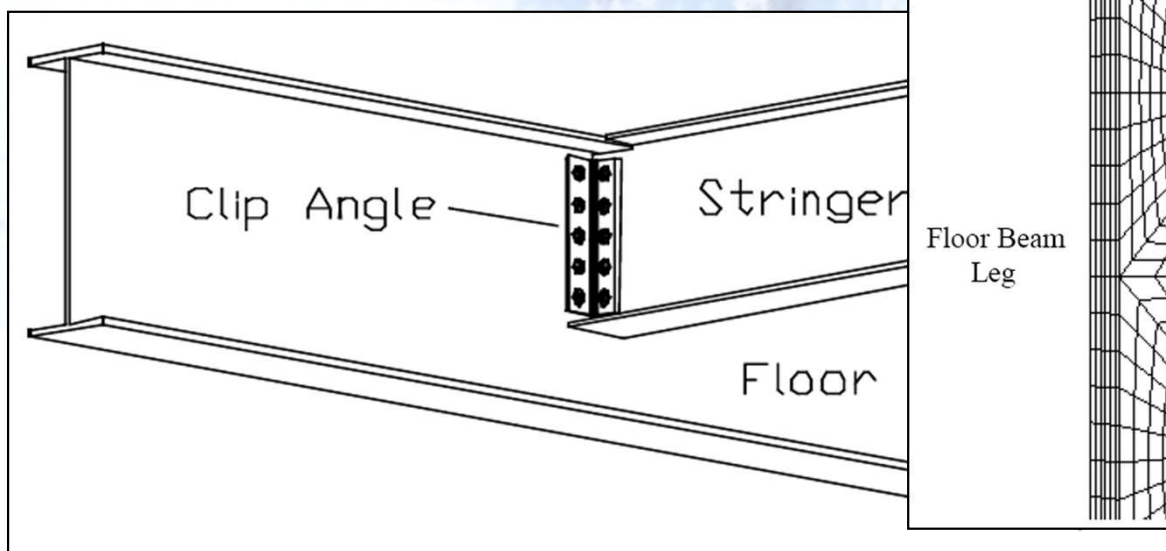
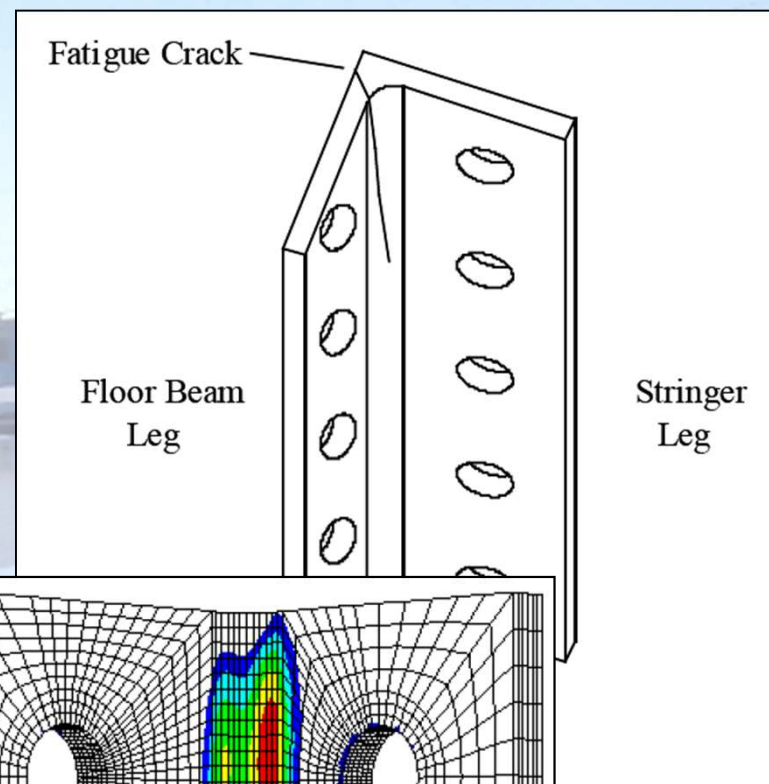
- 1903:** *James Alfred Ewing demonstruje vznik únavového poškození na mikroskopických trhlinách.*
- 1910:** *O. H. Basquin navrhuje úpravy nelineární Wöhlerovi únavové křivky pomocí dekadického logaritmu – lineární závislost.*
- 1921:** *A. A. Griffith zahajuje diskuzi na téma lomová mechanika*
- 1945:** *A. M. Miner popularizuje A. Palmgrenovu (1924) lineární hypotézu únavového poškození jako praktický nástroj pro navrhování.*
- 1954:** *L. F. Coffin a S. S. Manson popisují růst únavové trhliny pomocí plastických deformací na hrotu trhliny.*
- 1968:** *Tatsuo Endo and M. Matsuiski objevují třídící metodu Rainflow (Stékání deště) a umožňují tím použití Minerova zákona pro stochastická zatížení.*



## Pojmy :

### Únava

je mechanismus díky kterému v konstrukci vznikají a šíří se trhliny. Únava je způsobena opakovaným cyklickým zatížením, které vyvolává vnitřní poškození materiálu v důsledku fluktuace napětí a deformace. Únavové trhliny vznikají a šíří se v oblastech, kde jsou deformace nejvyšší.

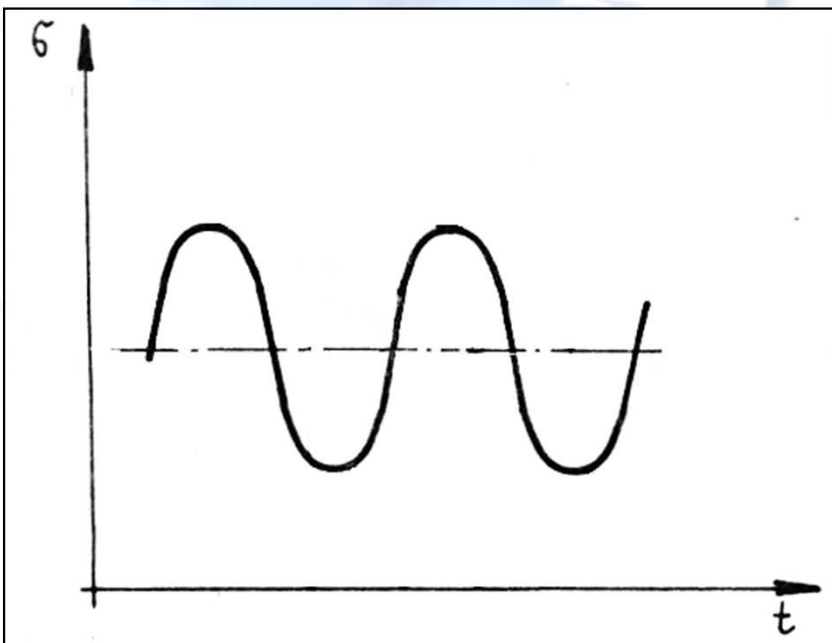


# Dynamické zatěžování a únava materiálu :

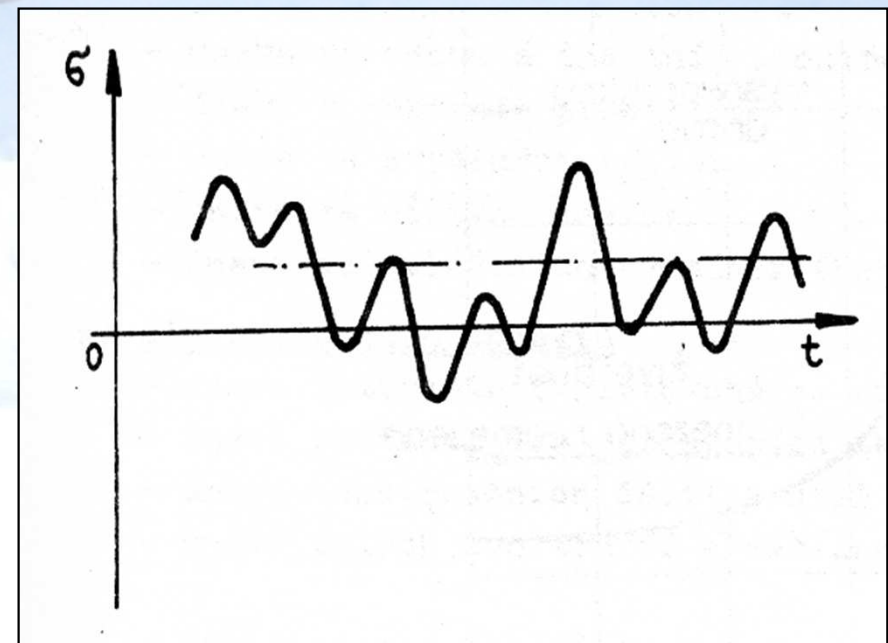
## Základní pojmy:

**Kmitavé zatížení :** Je charakterizováno časovou změnou zatížení se změnou polaritu (směru) zatěžování.

**zatížení cyklické**



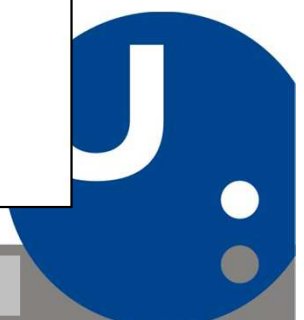
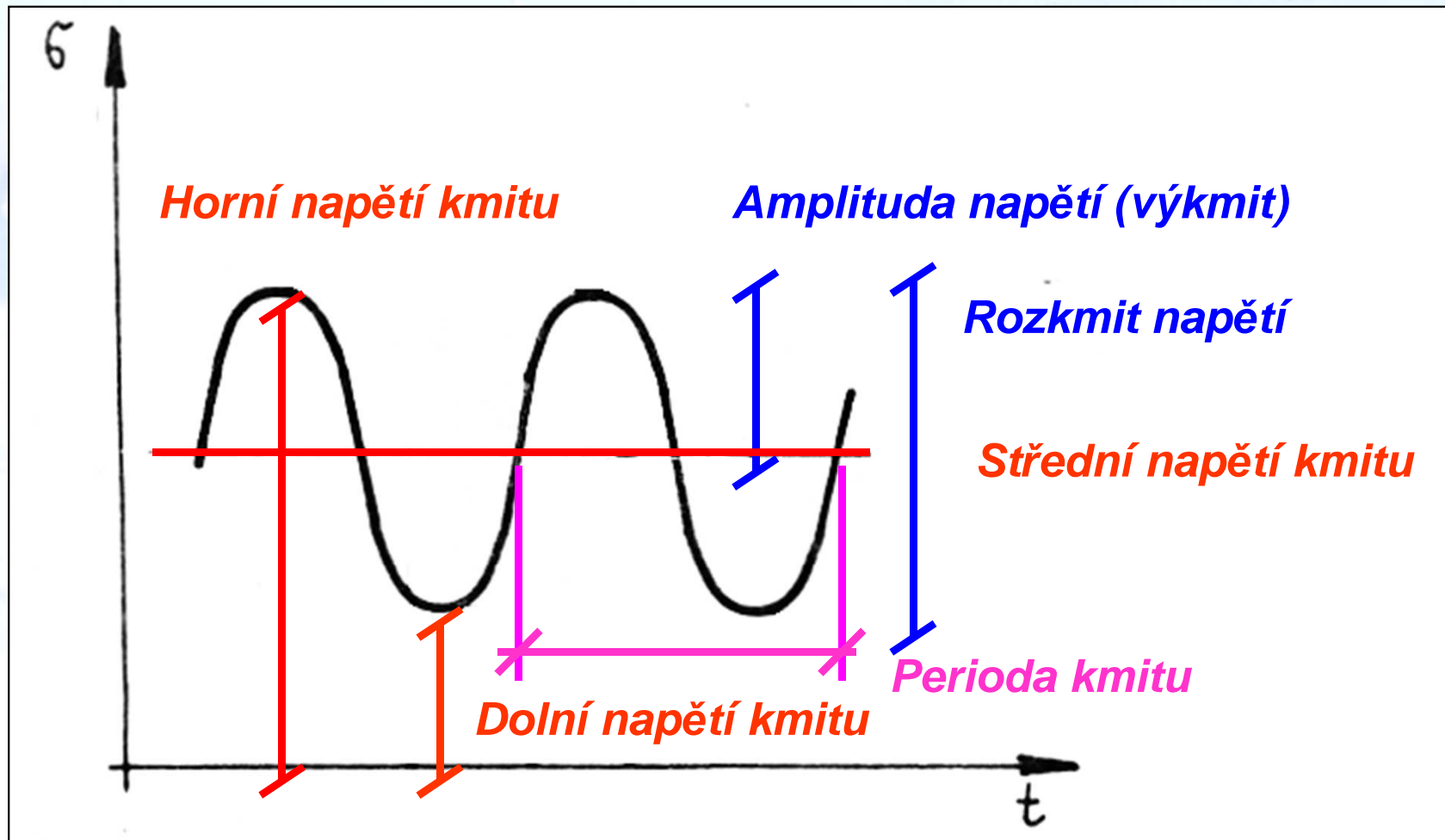
**zatížení náhodné**



# Dynamické zatěžování a únava materiálu :

## Základní pojmy:

Identifikace odezvy (napětí) cyklického zatížení :

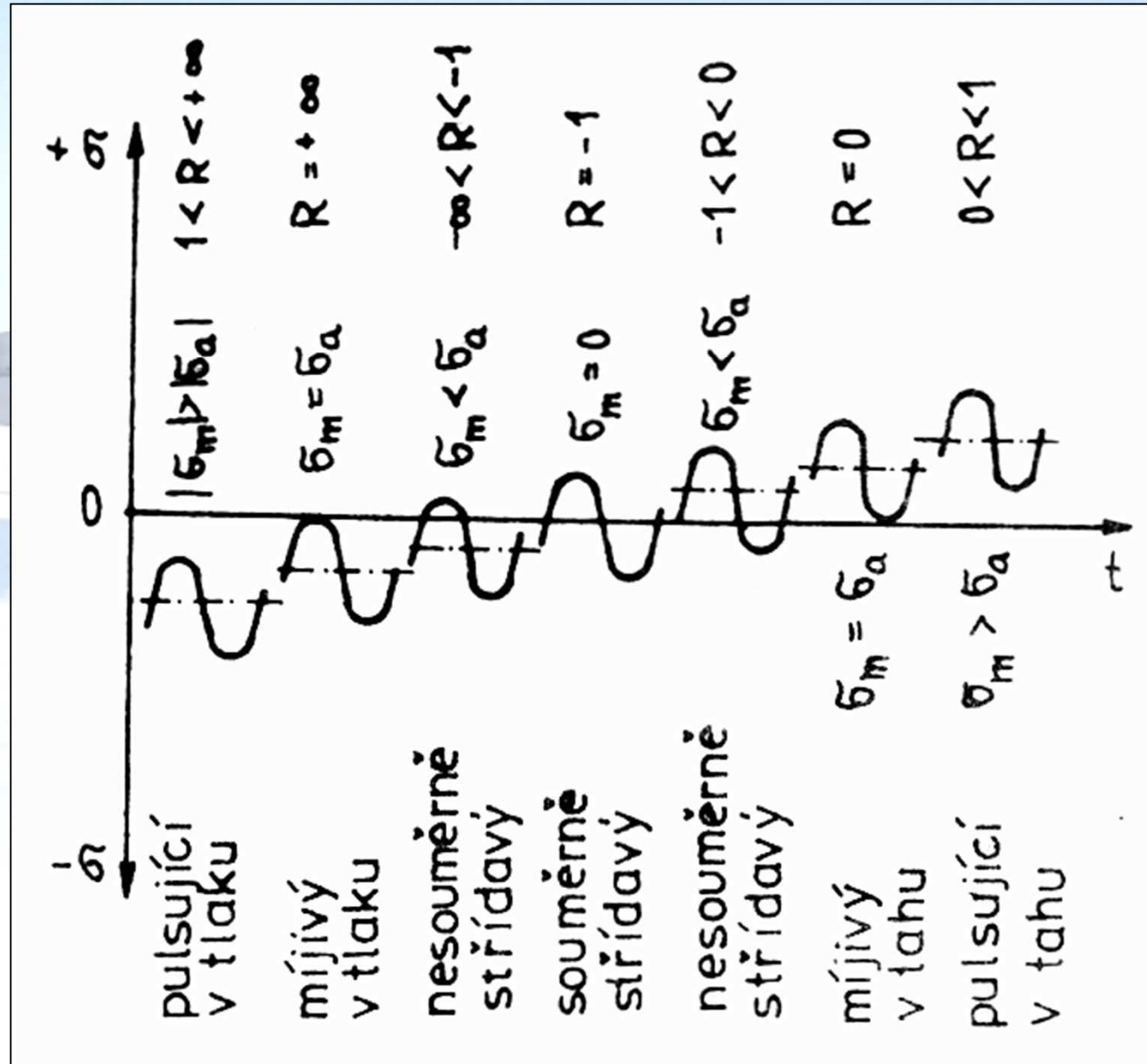


# Dynamické zatěžování a únava materiálu :

## Základní pojmy:

Koeficient  
asymetrie cyklu :

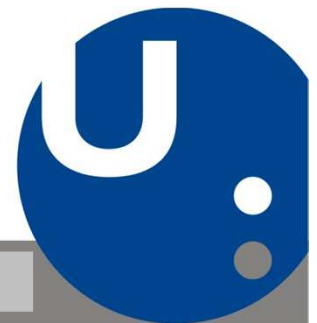
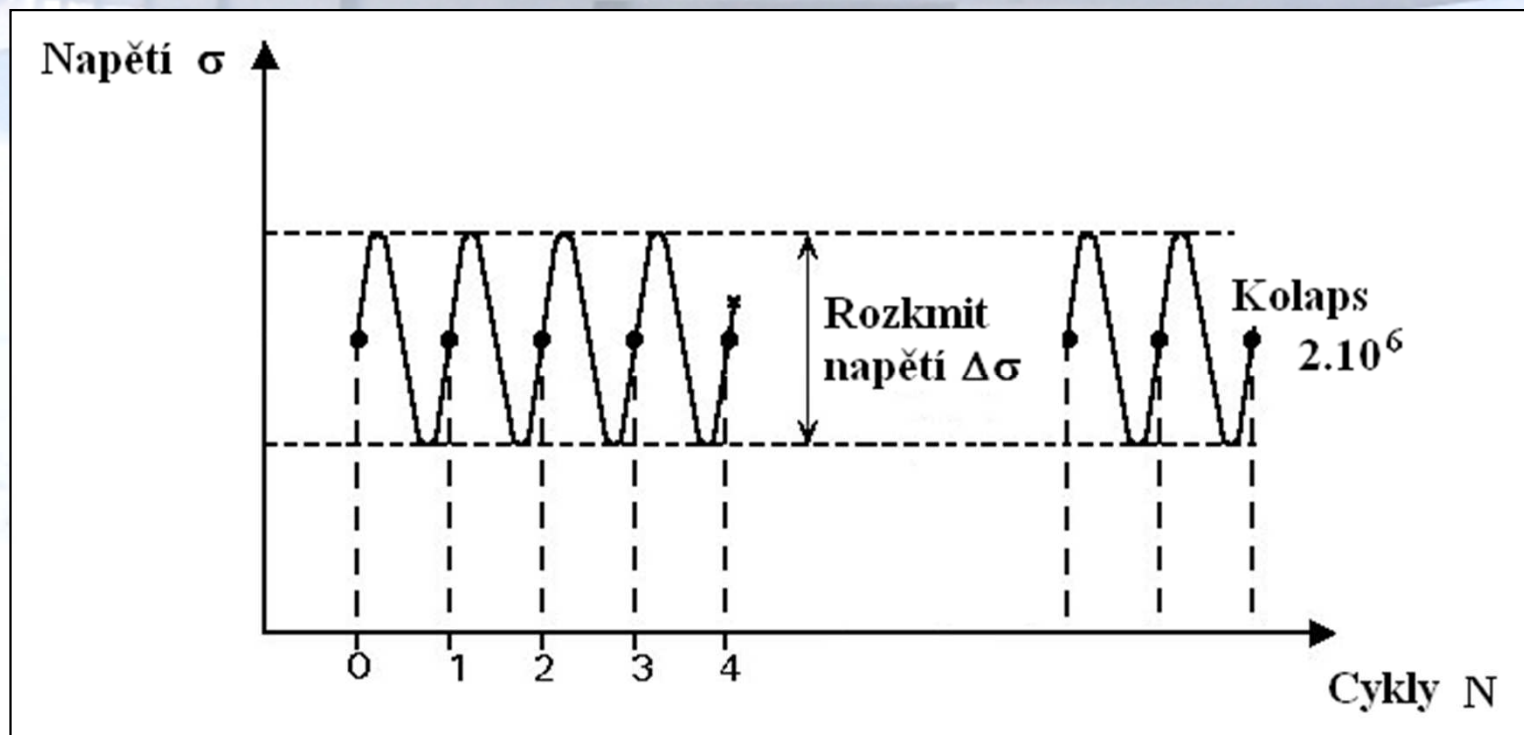
$$R = \frac{\sigma_d}{\sigma_h}$$



## ***Dynamické zatěžování a únava materiálu :***

### **Základní pojmy:**

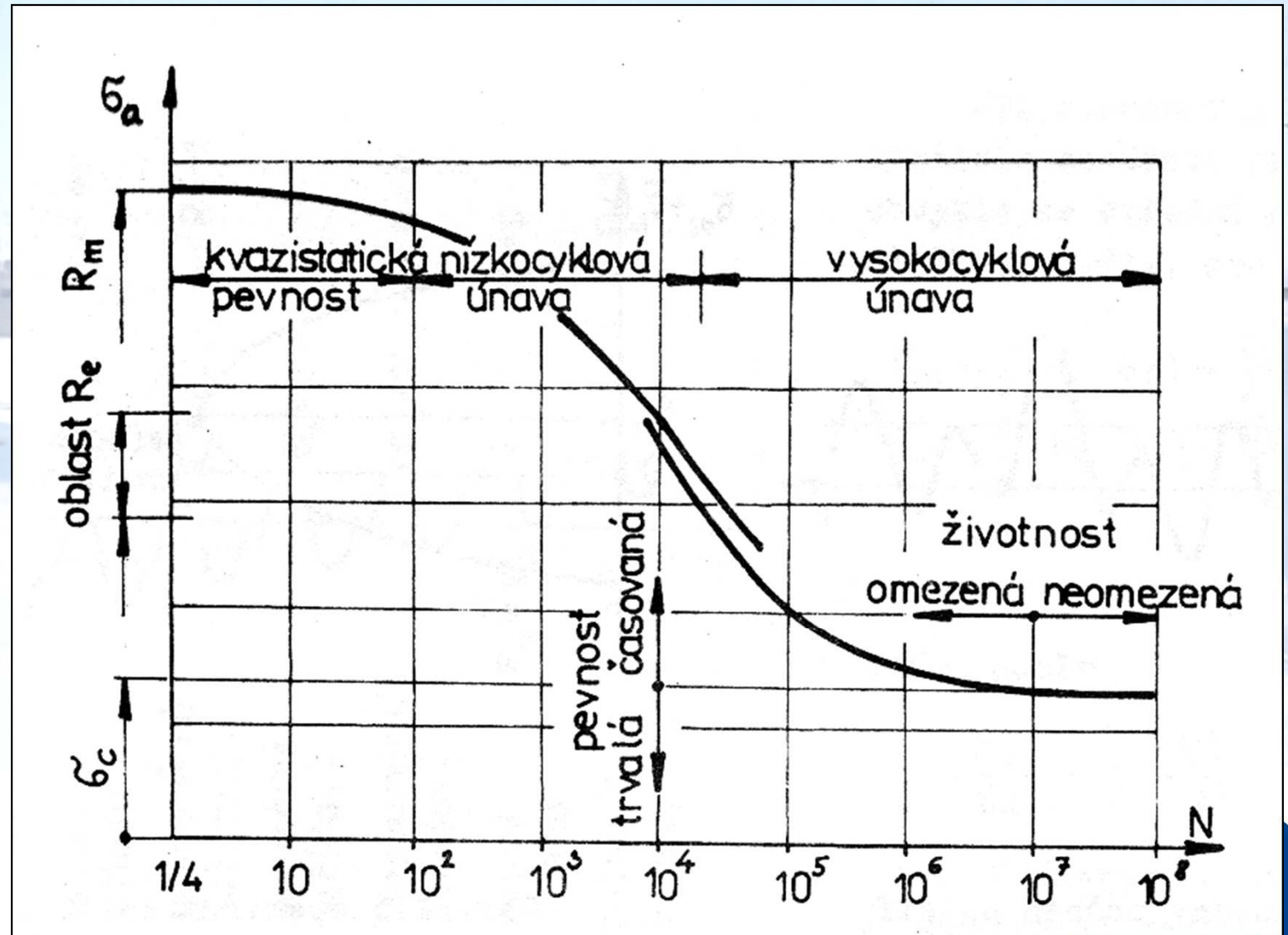
**Únavová pevnost :** *Je definována jako rozkmit napětí  $\Delta\sigma$ , které se cyklicky mění při konstantní amplitudě, kdy toto napětí vyvolá poruchu dané součásti při daném počtu cyklů (zpravidla  $2 \cdot 10^6$ ).*



# Dynamické zatěžování a únava materiálu :

## Základní pojmy:

### Wöhlerova únavová křivka :



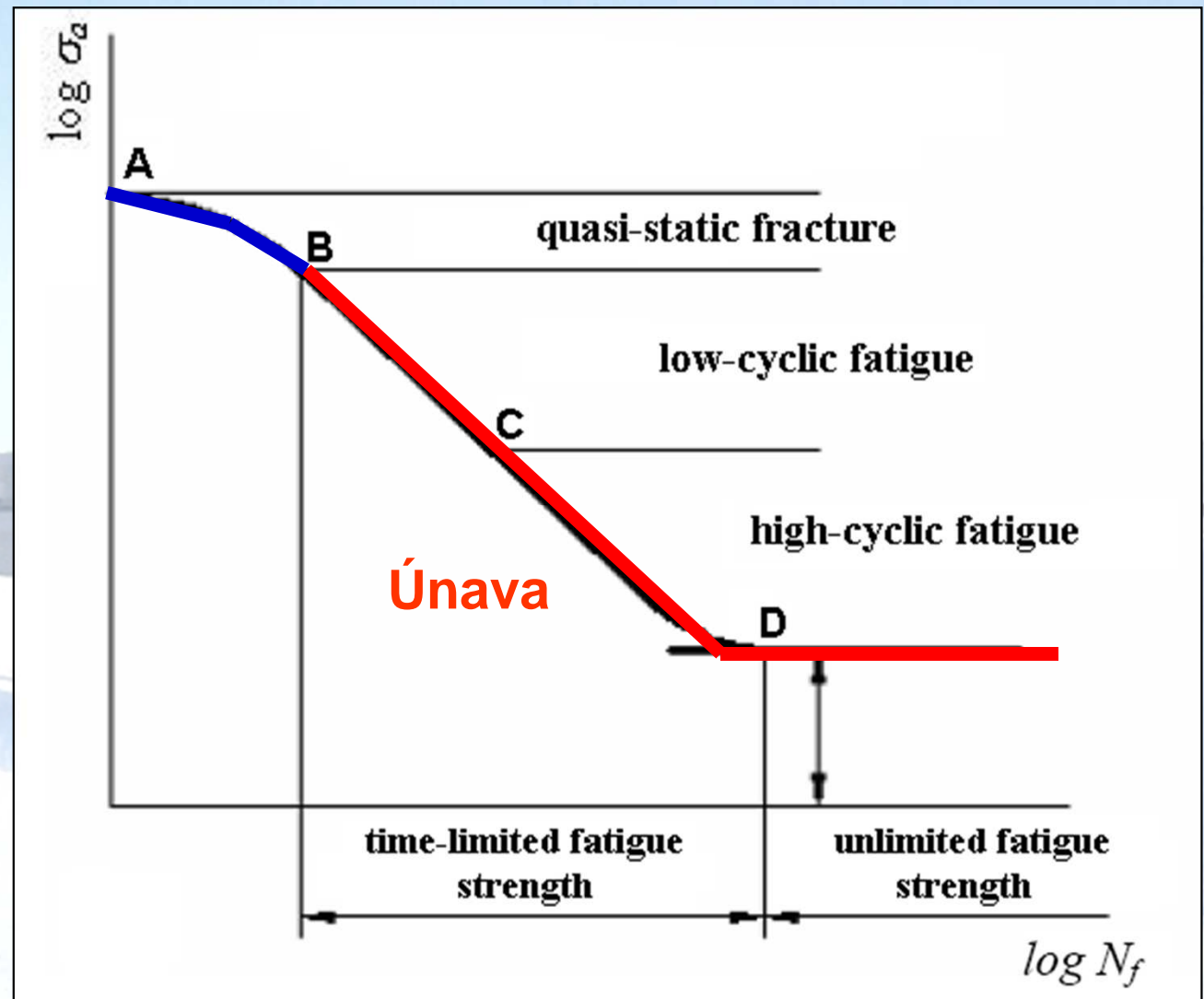


**Pojmy :****Kvazi-statická porucha**

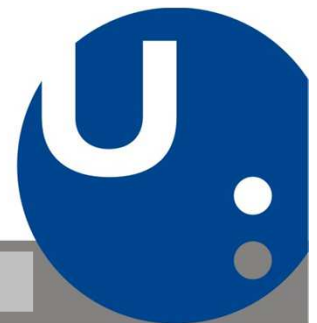
počet cyklů je méně než 10, odlišný princip poruchy (žádná nukleace trhliny), lomová plocha více odpovídá houževna-tému lomu než lomu únavovému.

**Nízkocyklová únava**

počet cyklů je menší než  $10^4$ , zatížení je vyšší než mez kluzu materiálu  $f_y$  (při zatížení dochází k celkové plastické deformaci)



General fatigue curve  
(S-N curve)



## Pojmy :

### Vysokocyklová únava

počet cyklů je vyšší než  $10^4$ , plastické deformace jsou pouze na hrotu trhliny, v ostatních částech jsou elastické deformace.

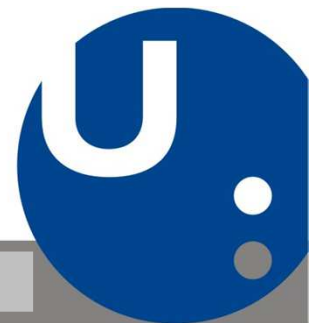
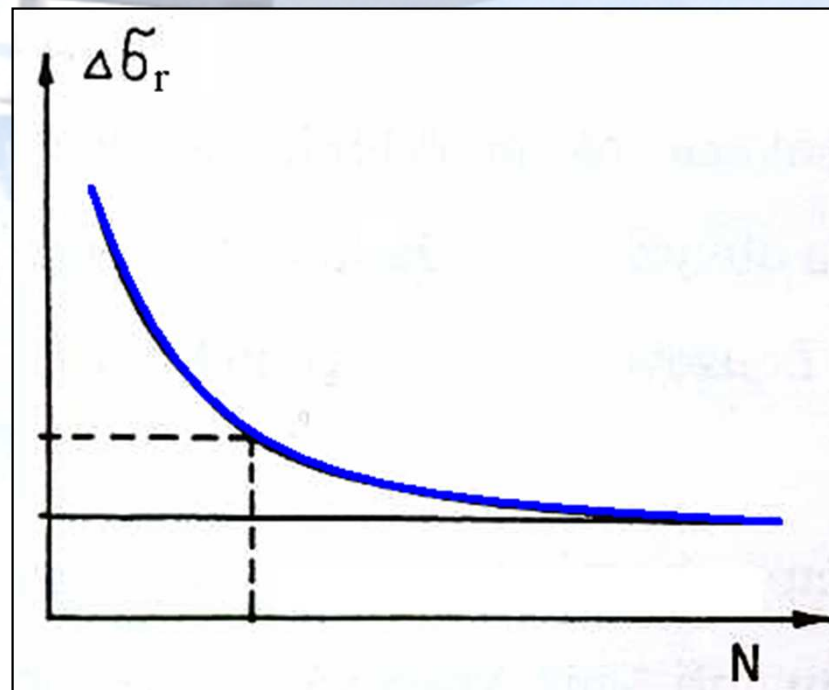
### S-N křivka pro vysokocyklovou únavu

popisuje únavovou pevnost daného konstrukčního detailu. Tato křivka byla sestavena Wöhlerem (1871):

$$N = \frac{C}{\Delta\sigma_r^m}$$

kde

C,m      materiálové  
            charakteristiky  
N          počet cyklů do  
            lomu  
 $\Delta\sigma_r$       rozkmit napětí v  
            místě vzniku  
            trhliny

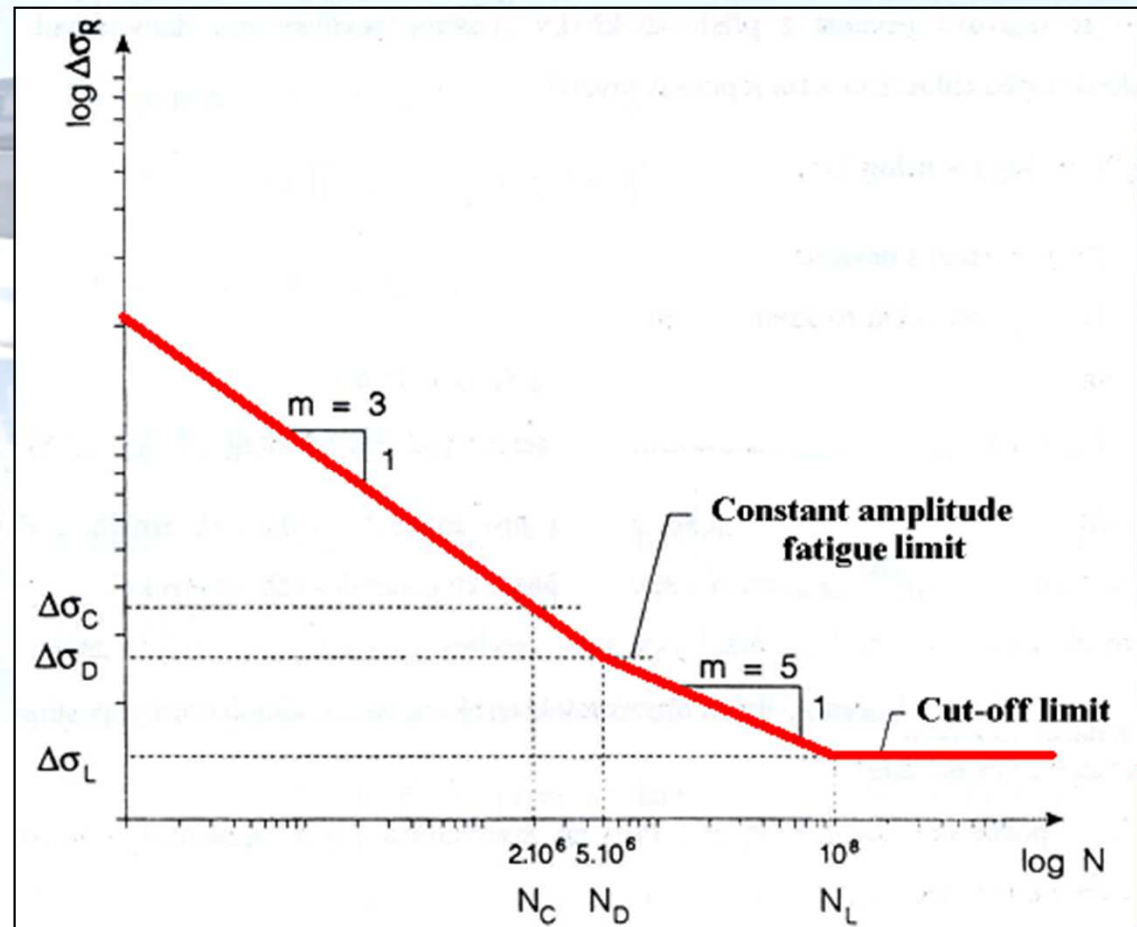
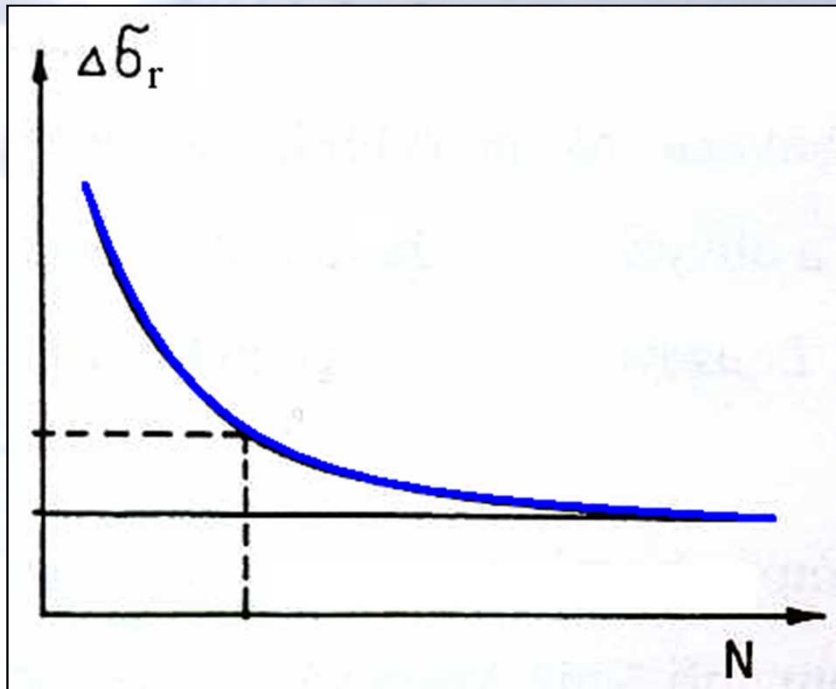


## S-N křivky pro vysokocyklovou únavu

Únavové S-N křivky se častěji vyjadřují v logaritmických souřadnicích :

$$N = \frac{C}{\Delta\sigma_r^m}$$

$$\log N = \log C - m \cdot \log \Delta\sigma_r$$



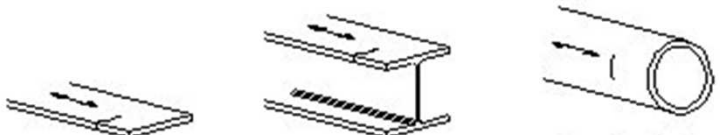
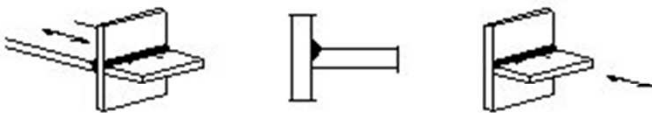



## S-N kategorie detailu

Protože únavové testy jsou vždy testy destrukčními, jsou v Euro kódech specifikovány nejčastěji se vyskytující typy konstrukčních detailů – kategorie detailů.


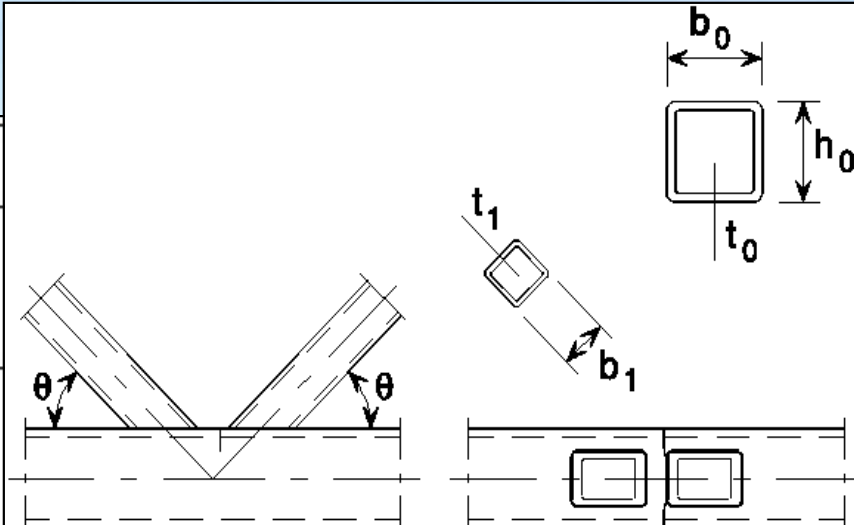
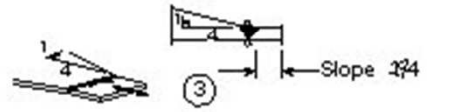
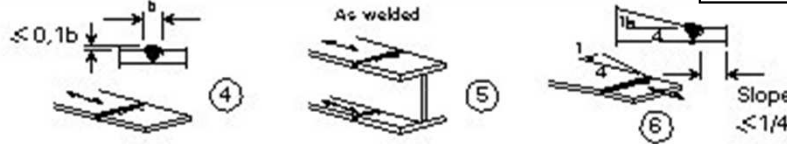
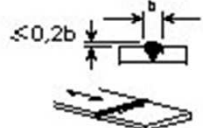
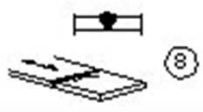
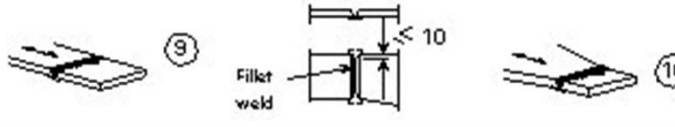

Kategorie detailů závisí na :

1) tvaru a způsobu namáhání detailu

2) místě vzniku trhliny

Detail category	Constructional details	Detail category	Constructional details
160	 <p>Plates and flats</p> <p>Rolled sections</p> <p>Seamless hollow sections</p>	71	 <p>Full penetration butt weld</p>
140	 <p>Machine gas cut or sheared material with no drag lines</p>		
125	 <p>Manually gas cut material or material with machine gas cut edges with shallow and regular drag lines</p>	36*	 <p>Partial penetration tee-butt joint</p>

## S-N kategorie detailu

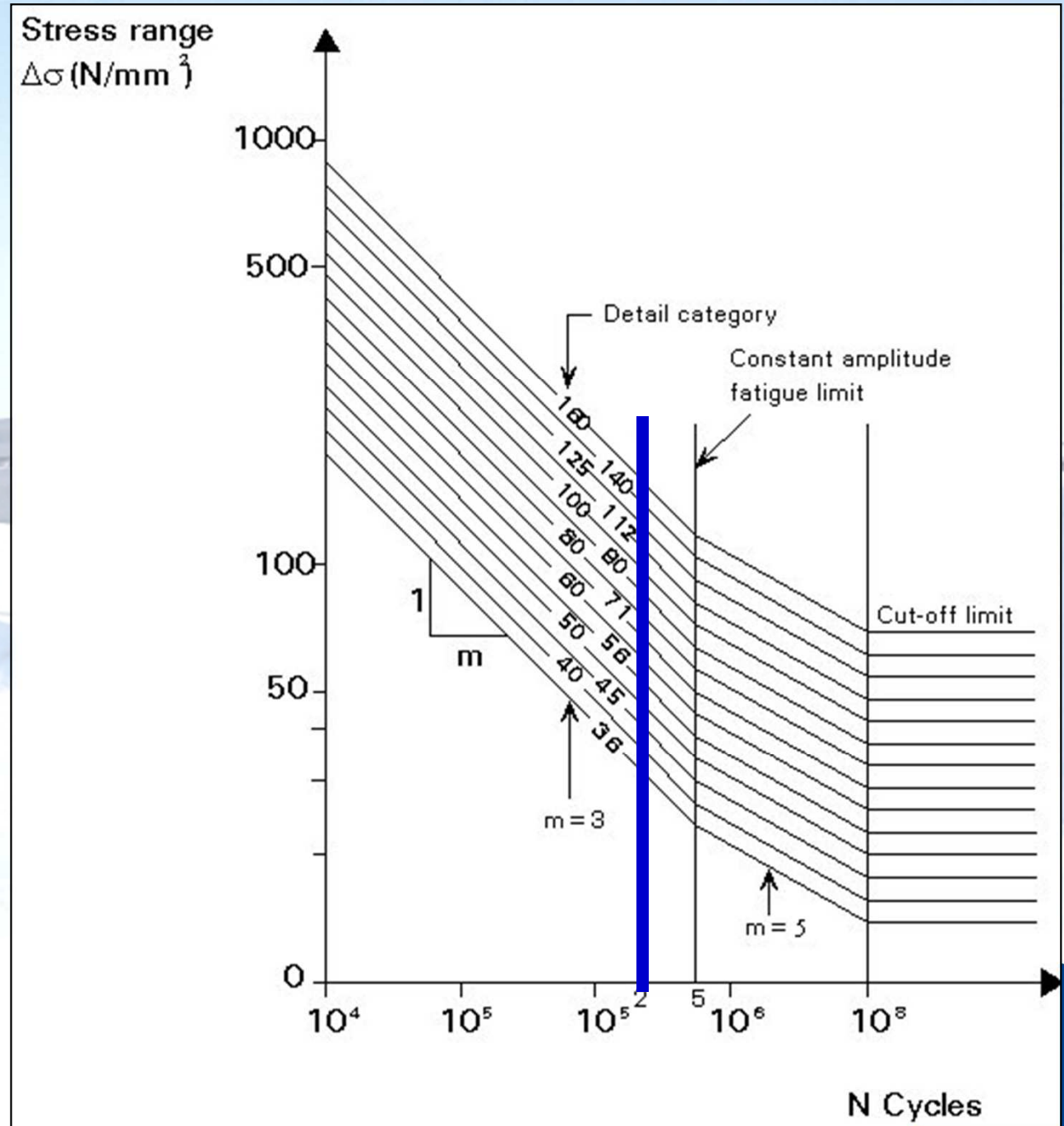
Detail category	Transverse butt welds	
112 or 125		
112		
90		112
80		100
36		80
71		71
50		

## S-N kategorie detailu

Kategorie detailu odpovídá  $\Delta\sigma_c$  (N/mm<sup>2</sup>)

$\Delta\sigma_c$  je tzv. “smluvní mez únavy”

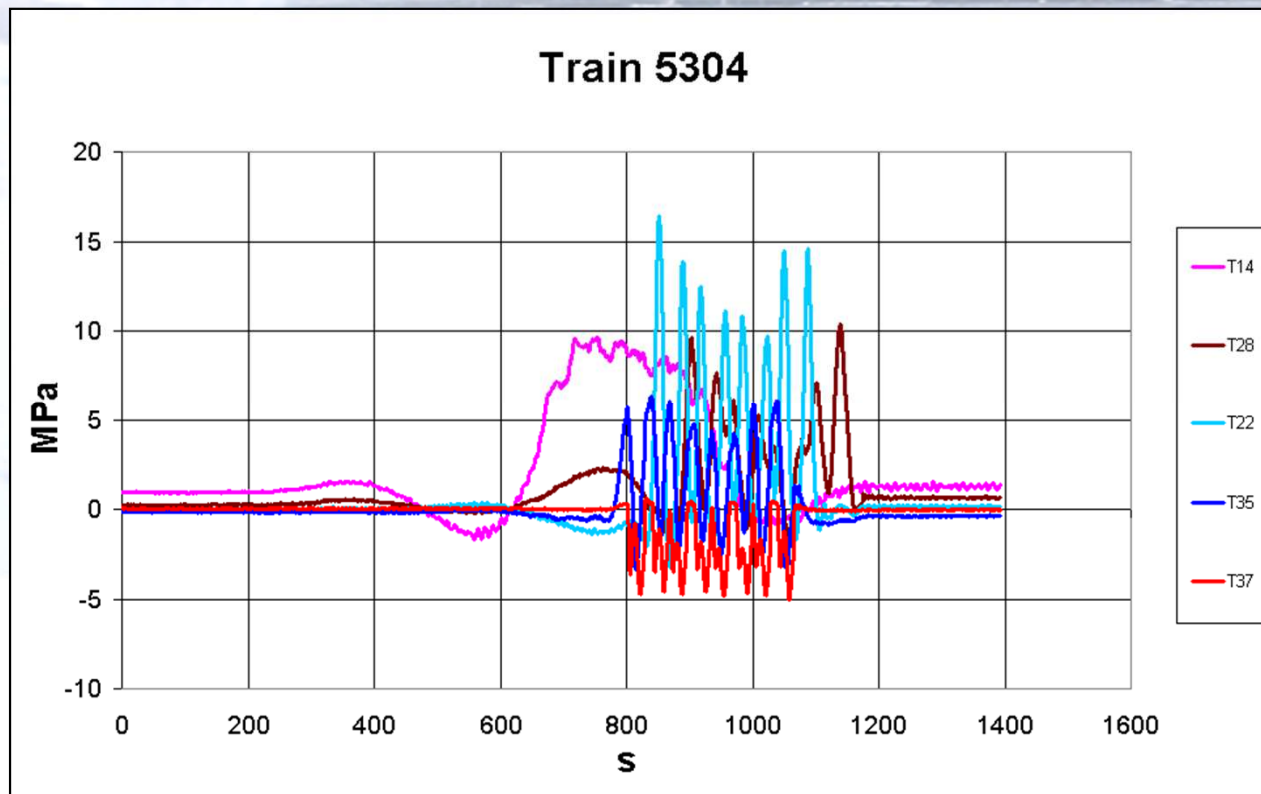
$\Delta\sigma_c$  je specifikována pro  $2 \times 10^6$  cyklů



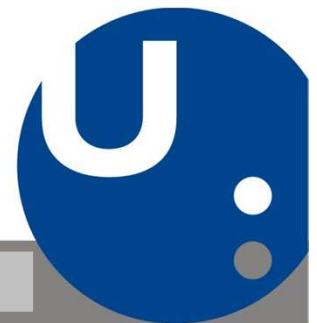
## Zatížení, poškození, životnost

V teorii kumulace únavového poškození (nejčastěji užívaná teorie, užita v Euro kódech) každý zátěžový cyklus způsobí v konstrukčním detailu velmi malé poškození, pokud je amplituda cyklu vyšší než tzv. cut-off limit.

praxi jsou záznamy napětí v reálných konstrukcích charakterizovány stochastickým nebo semi-stochastickým tvarem :

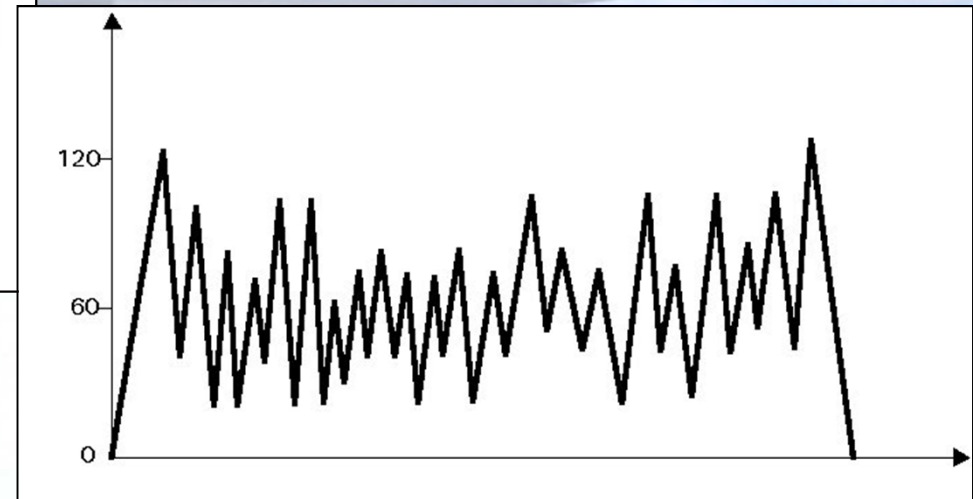
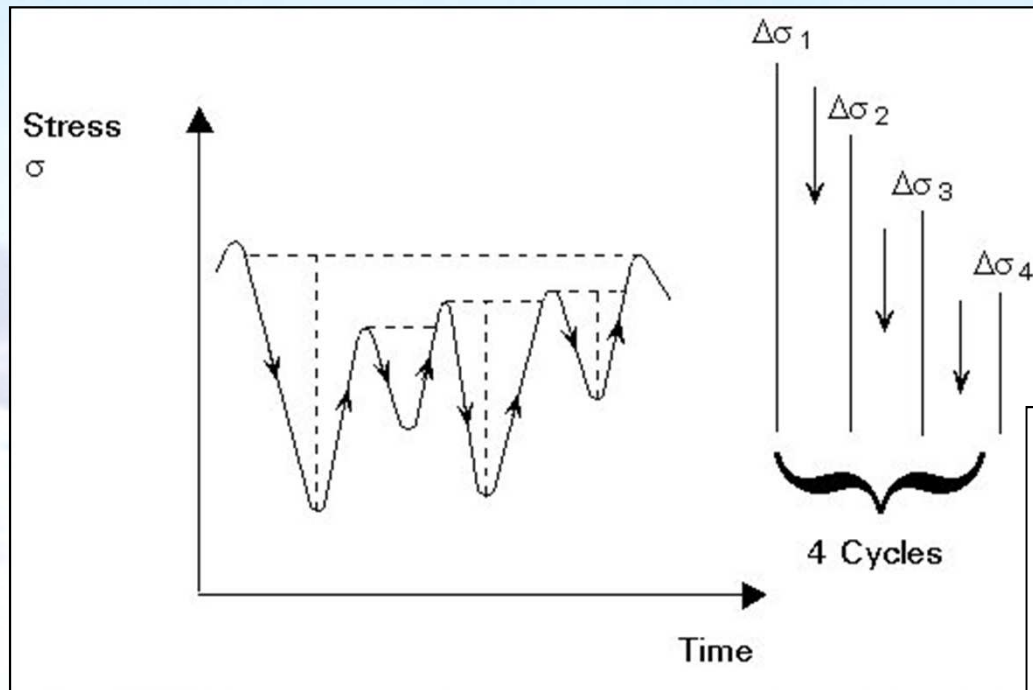


Napět'ový záznam odezvy mostu na zatížení.

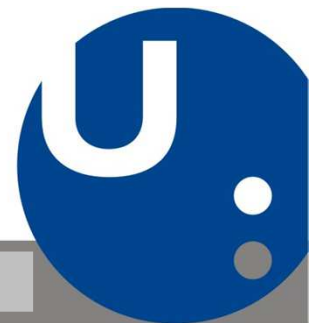


## Zatížení, poškození, životnost

Pro následnou kalkulaci poškození je nutné stanovit počet cyklů.



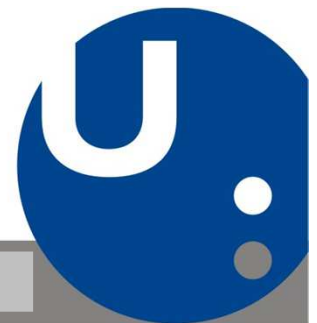
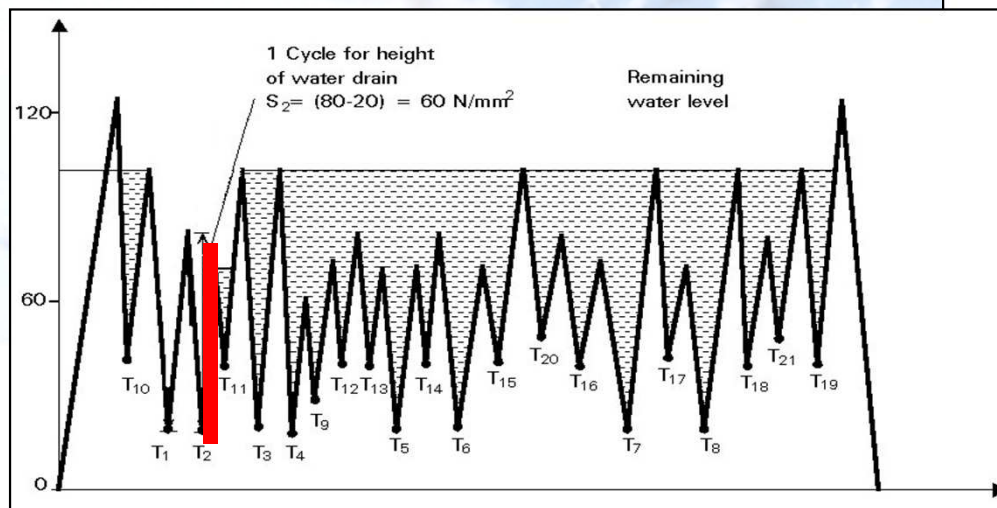
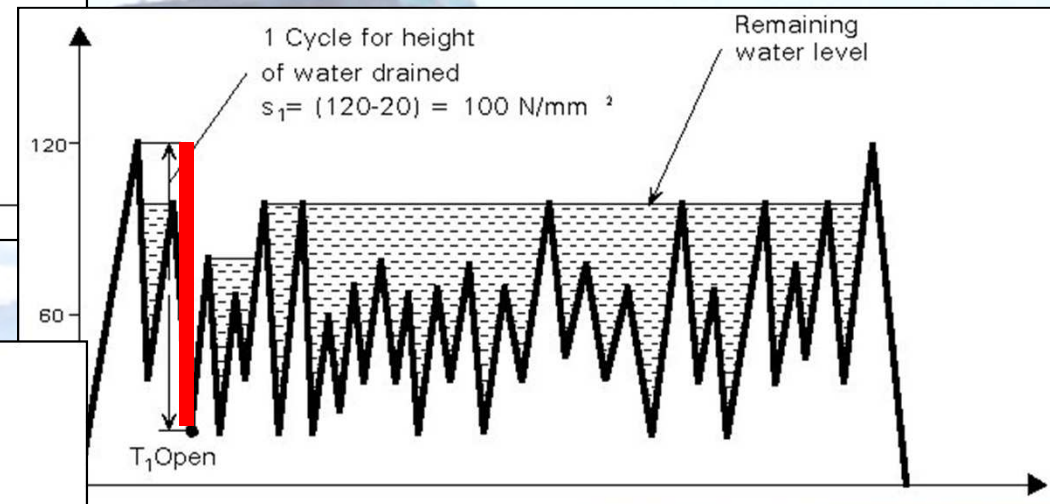
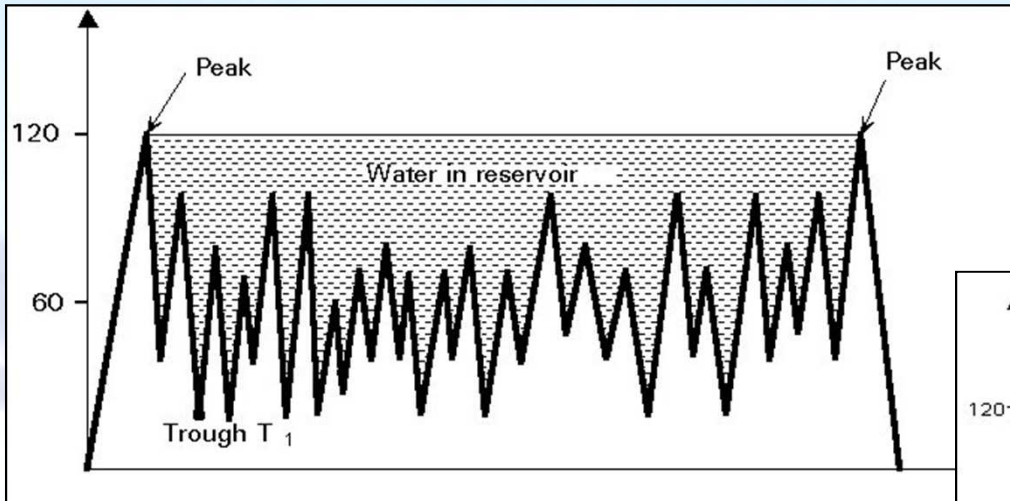
Pro stanovení počtu cyklů jsou užity ve většině kódech a normách metody “reservoáru” a “stékání deště – rain Flow”.





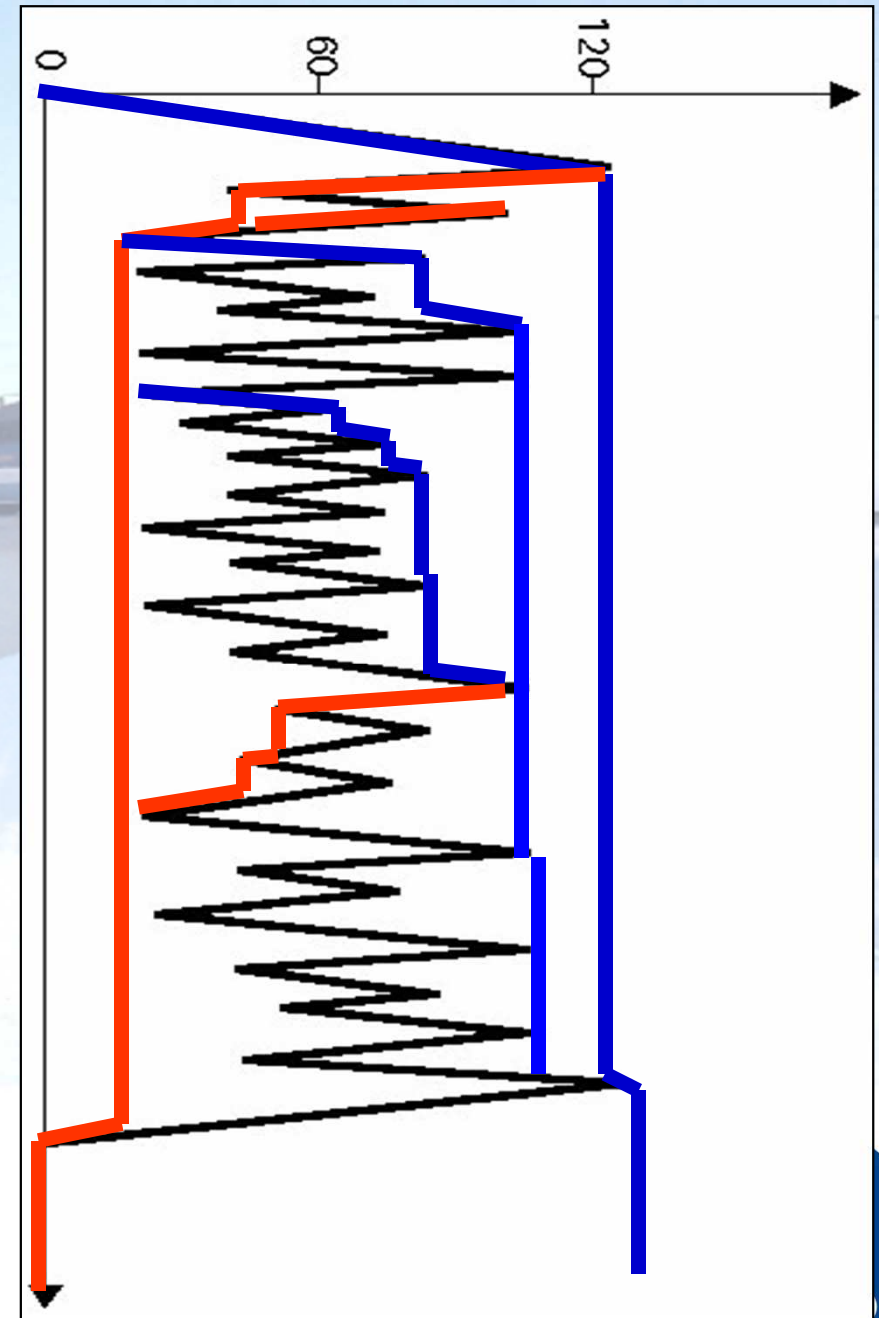
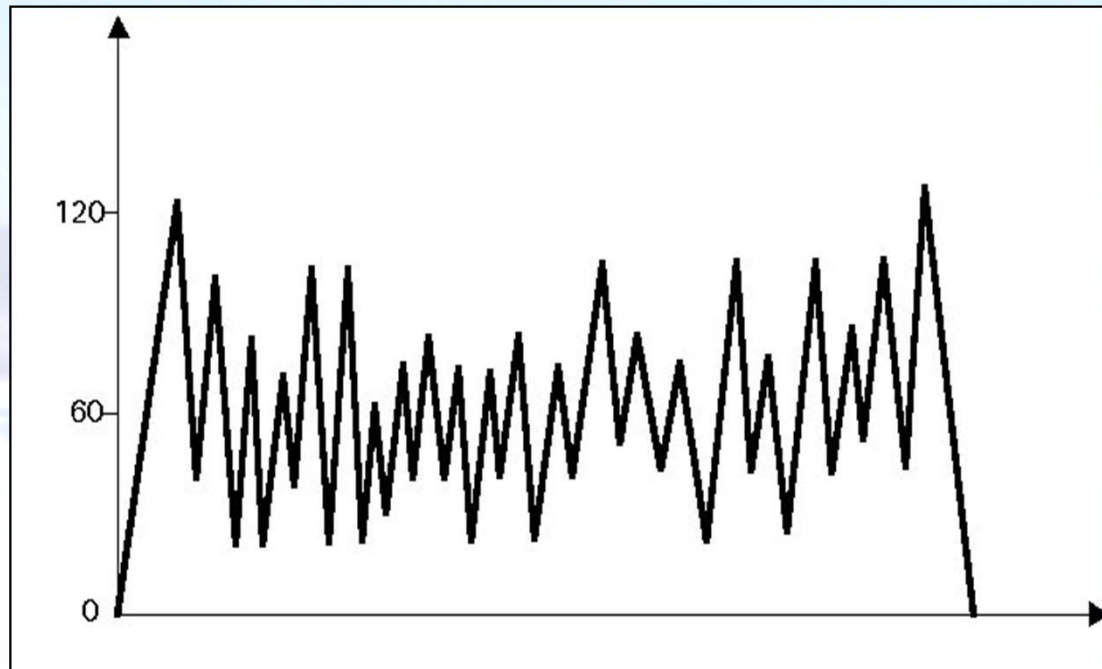
## Zatížení, poškození, životnost

### Metoda reservoáru :



## Zatížení, poškození, životnost

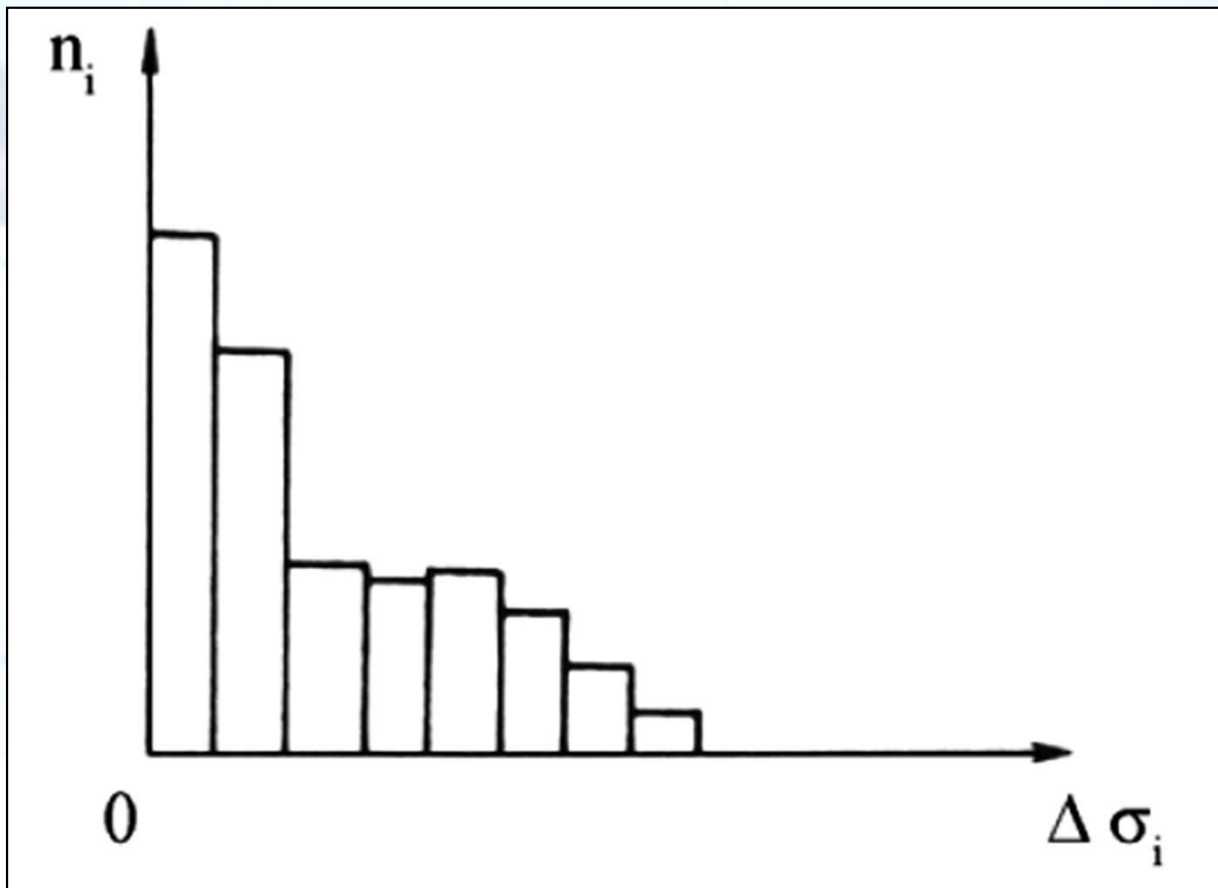
### Metoda Rain Flow



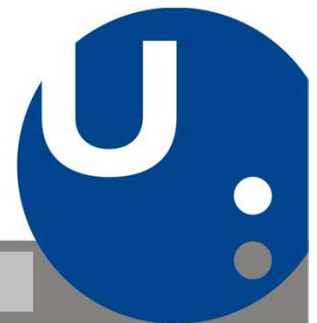
Metoda Rain Flow je v některých případech komplikovanější na použití než metoda reservoáru.

## Zatížení, poškození, životnost

Pro následnou kalkulaci poškození jsou obvykle zátěžové cykly jednoduše shrnuty do zátěžových spekter, které intervalově definují skupiny rozkmitů zatížení a počty cyklů ve skupinách.



V roce 1870 Wöhler definoval amplitudu napětí jako primární proměnnou v testování únavy, nicméně statická předpětí a střední hodnoty rozkmitu mají rovněž nezanedbatelný význam.



## Zatížení, poškození, životnost

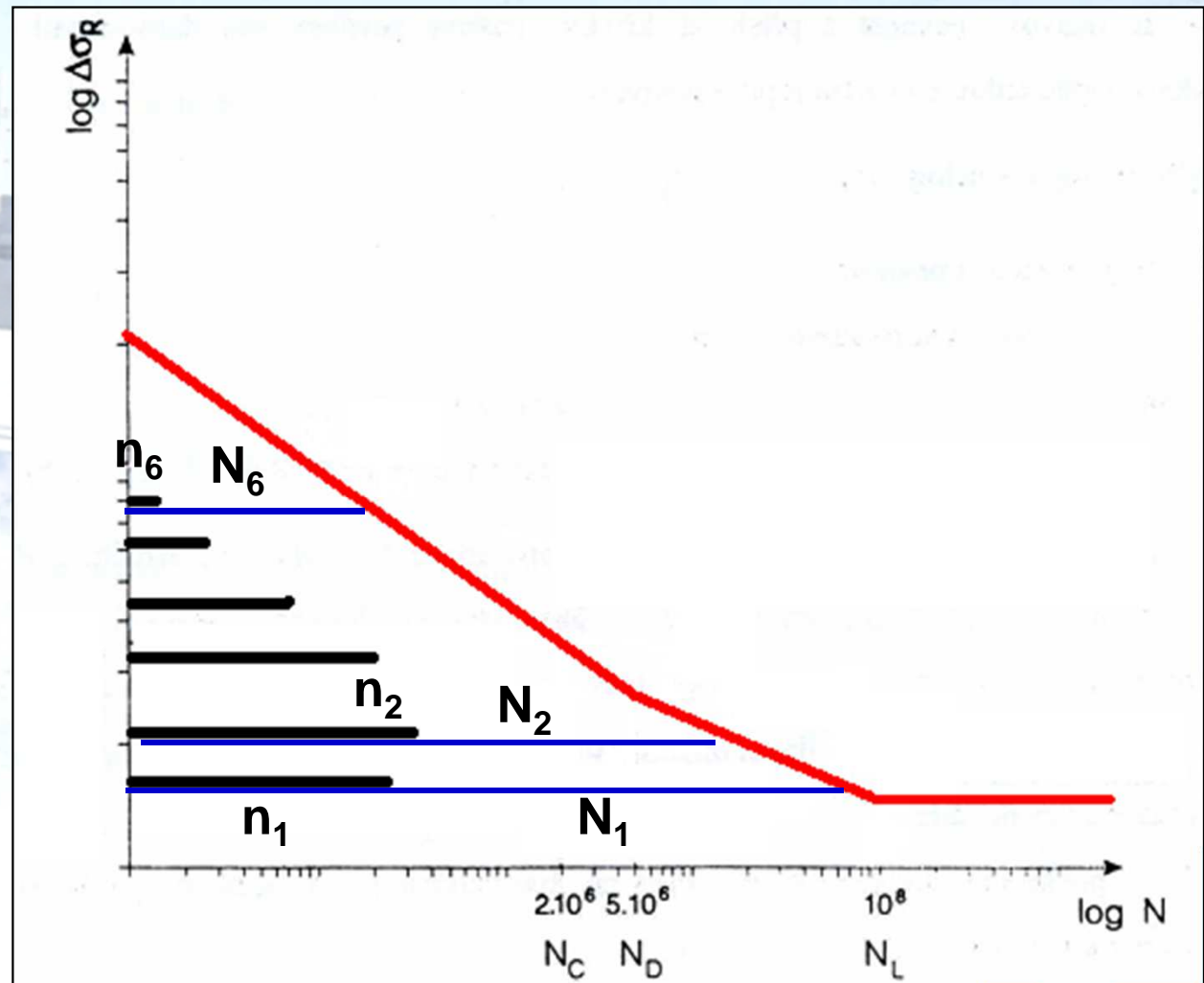
Při proměnném zatížení je životnost odhadována pomocí výpočtu celkového poškození daného každým cyklem ve spektru napětí.

Poškození vyvolané každou skupinou zatížení ve spektru je definováno jako :

$$D_i = \frac{n_i}{N_i}$$

$$D = \sum D_i$$

Poškození musí být vypočítáno pro každý histogram na dané střední hodnotě



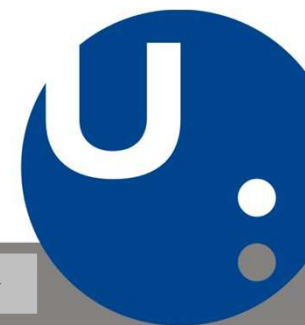
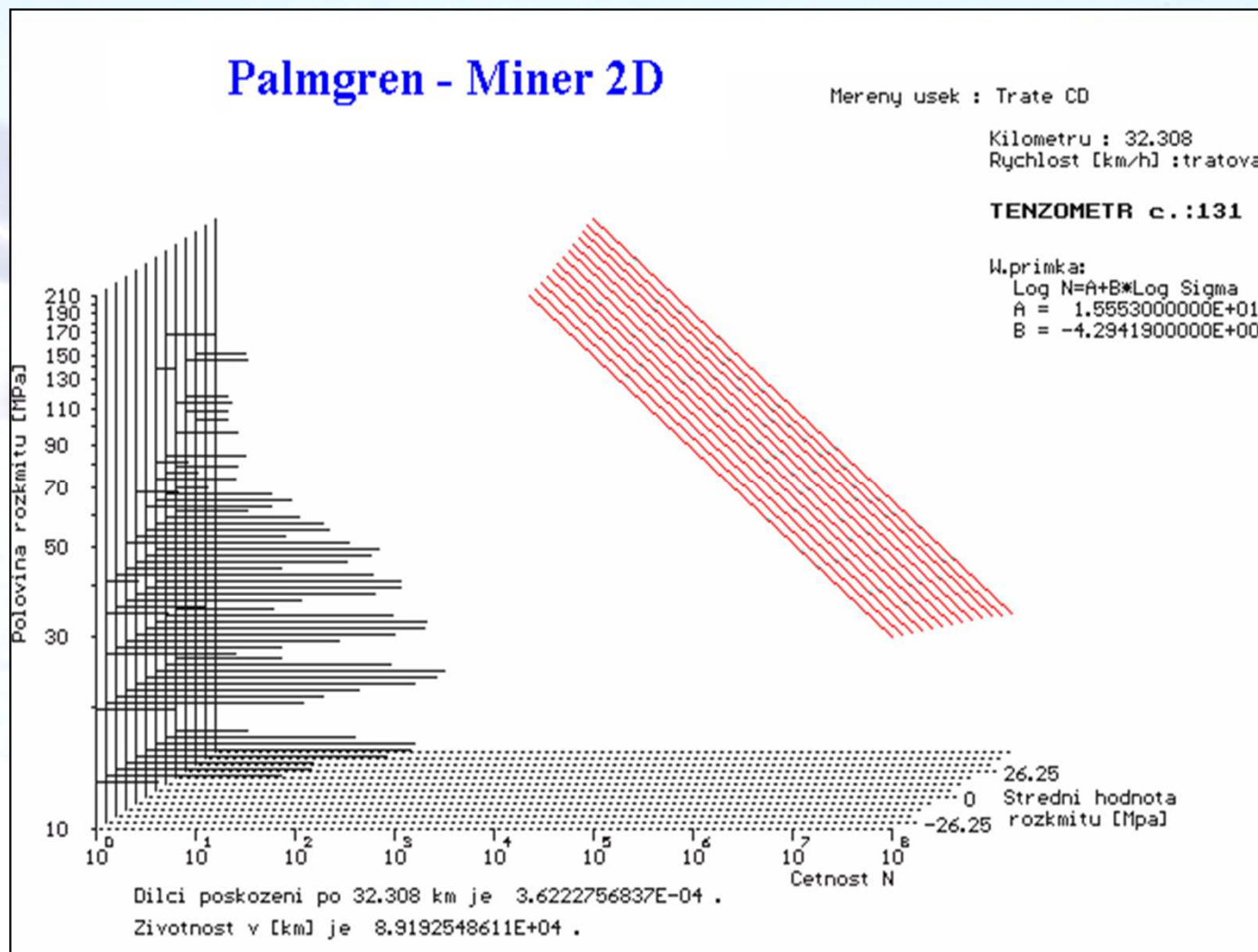
## Zatížení, poškození, životnost

Odhad životnosti je dán :

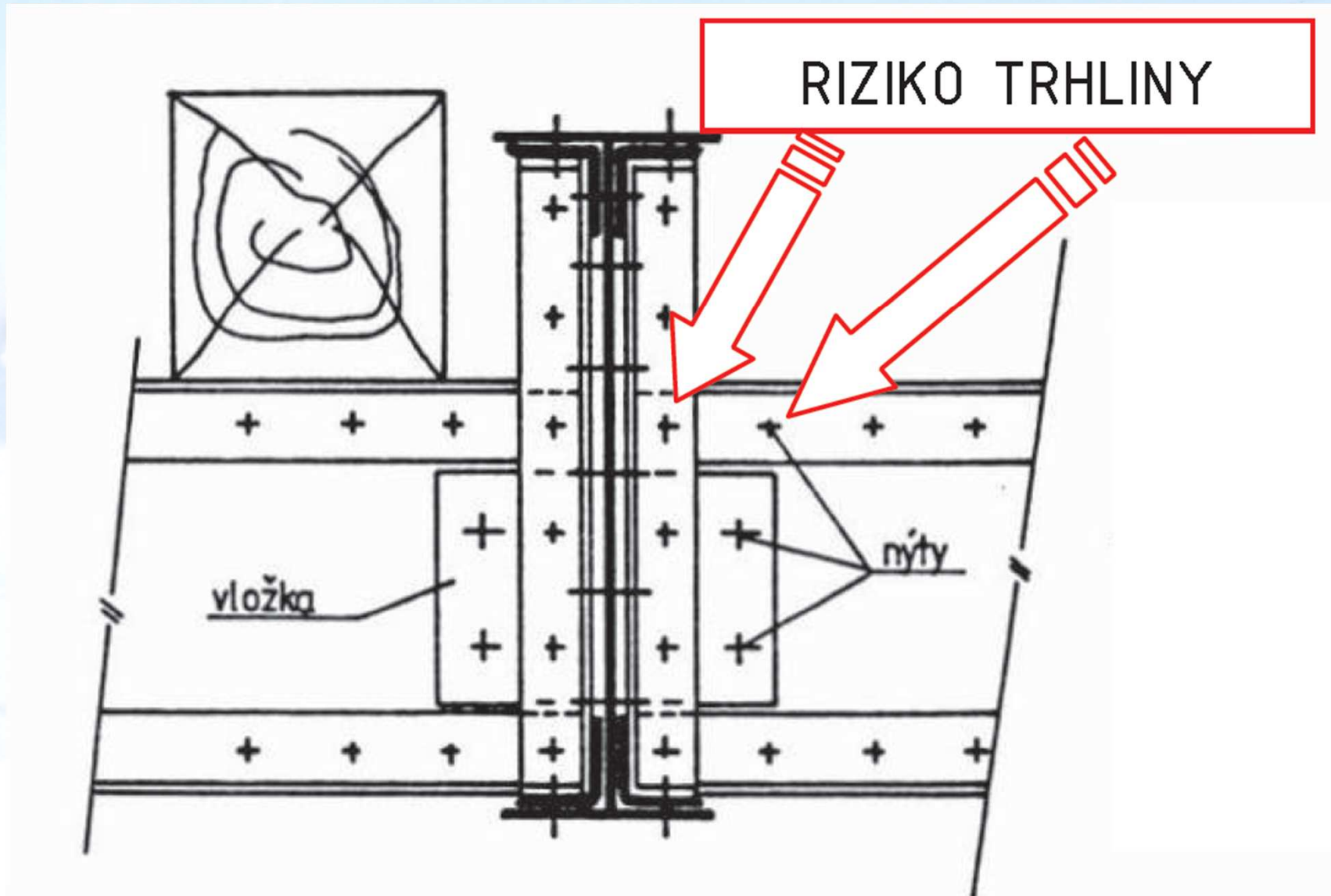
$$Z = \frac{1}{D} \cdot z$$

kde

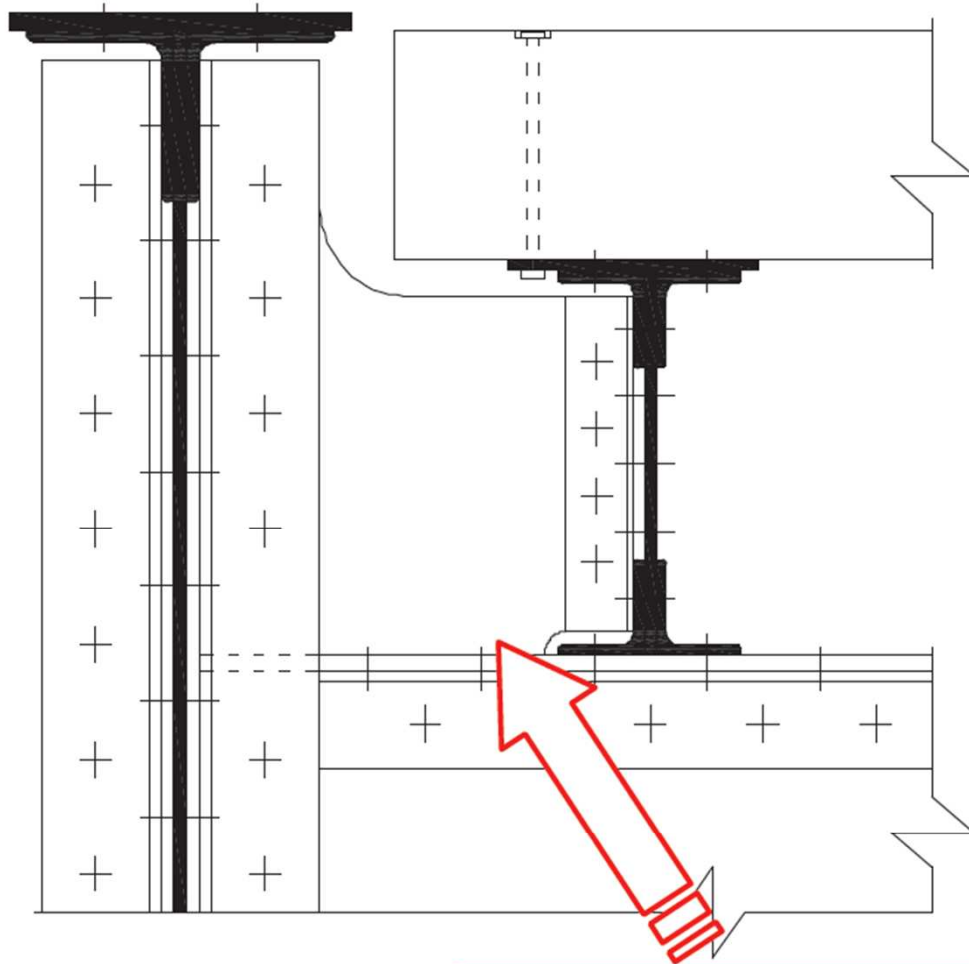
**Z** odhad  
životnosti  
**D** celkové  
poškození  
pro dané  
zatížení  
**z** časový  
interval při  
kterém  
působilo  
dané zatížení



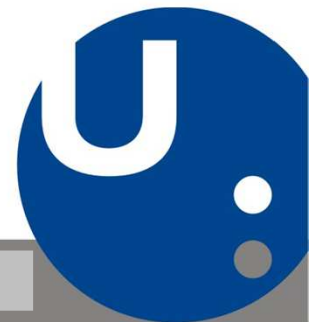
Potenciální místa vzniku únavových poruch železničních mostů  
(TÚDC 2009)



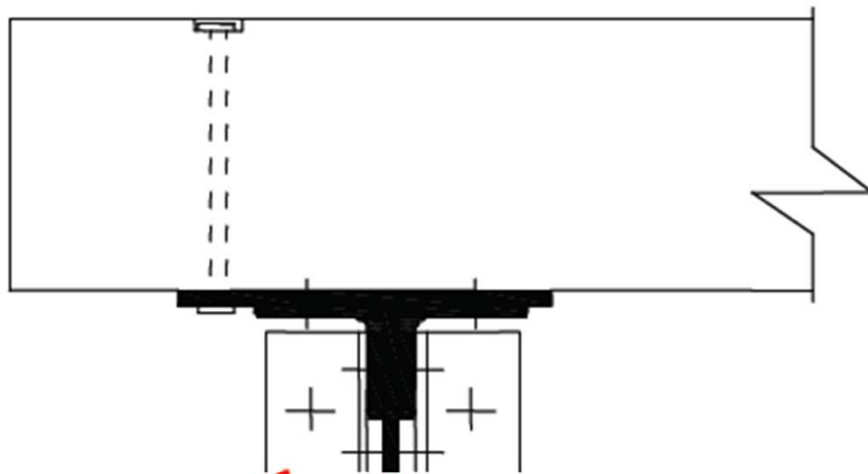
## Potenciální místa vzniku únavových poruch železničních mostů (TÚDC 2009)



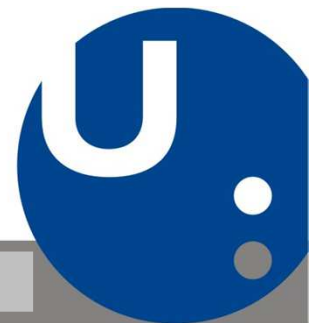
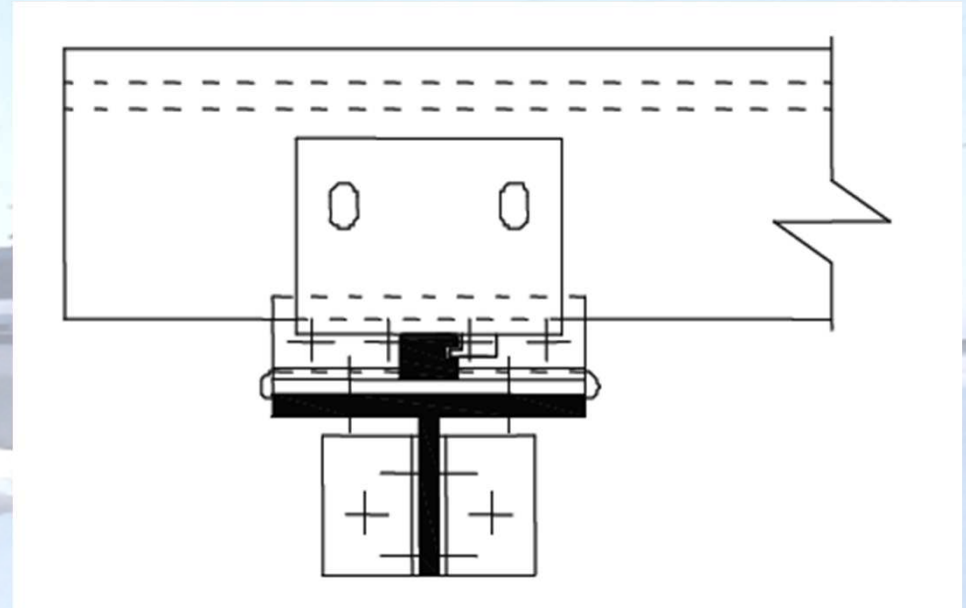
RIZIKO TRHLINY



## Potenciální místa vzniku únavových poruch železničních mostů (TÚDC 2009)

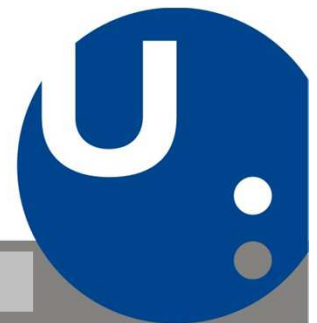
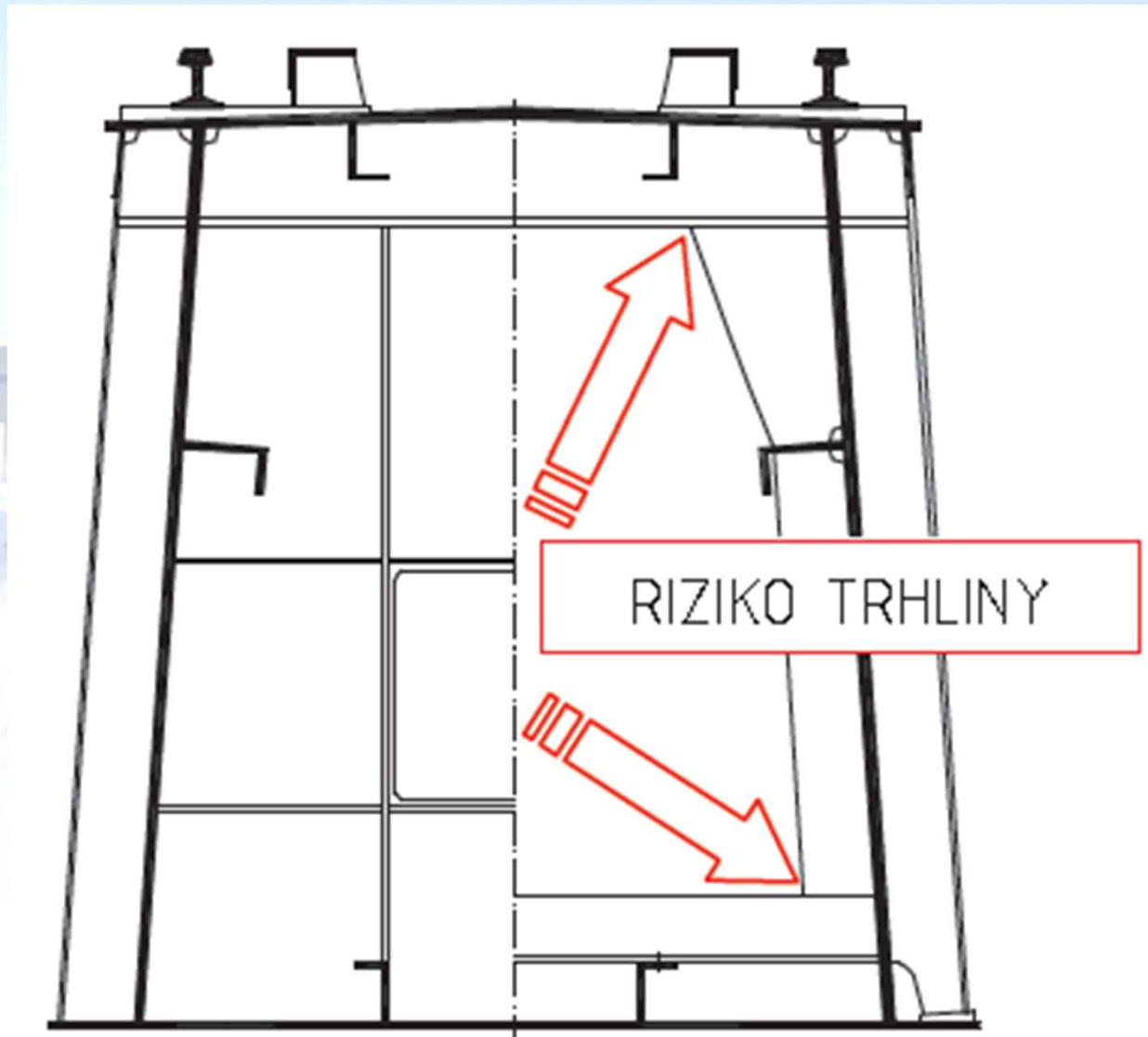


RIZIKO TRHLINY

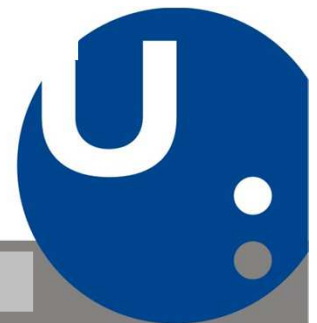
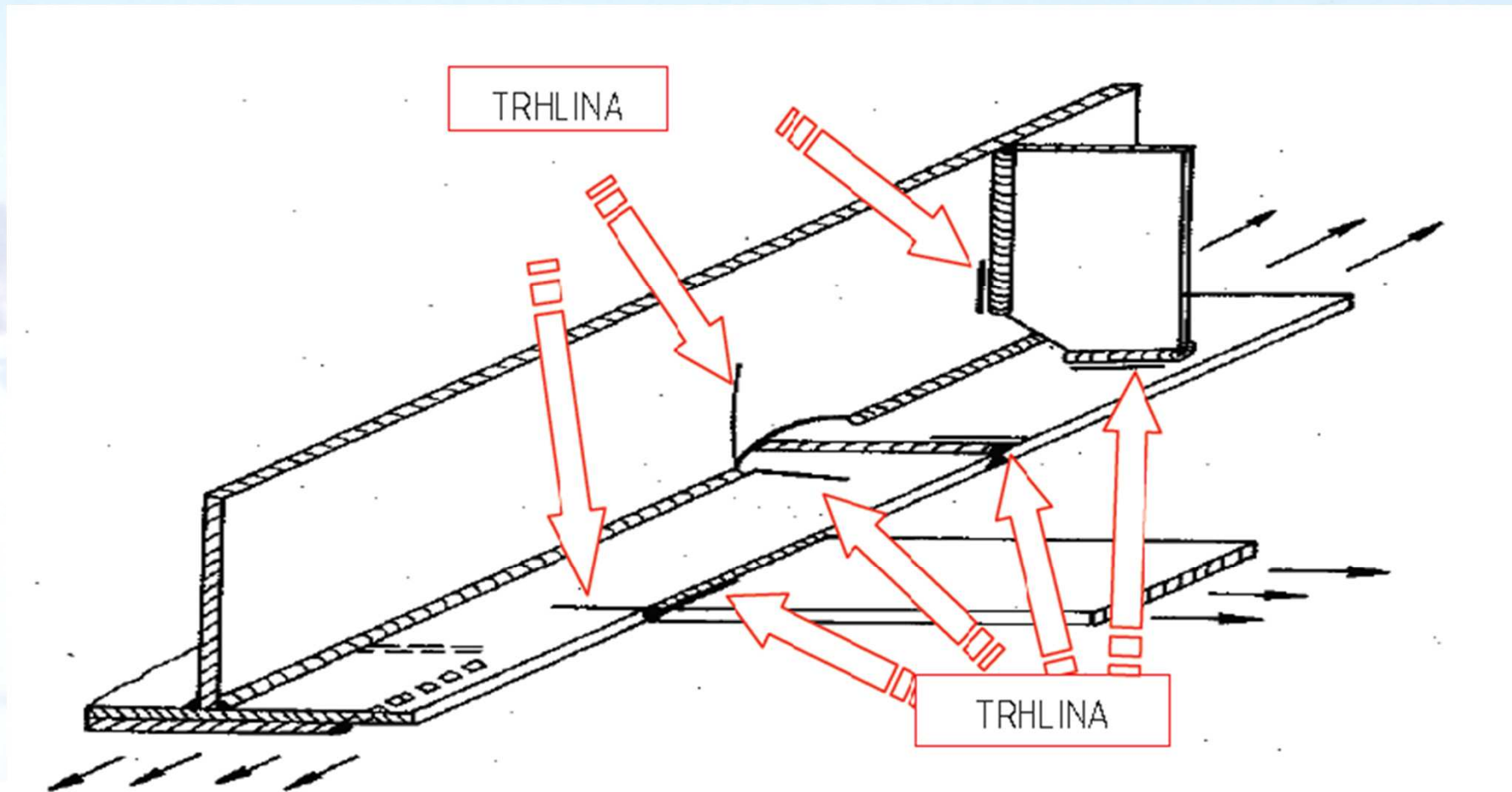




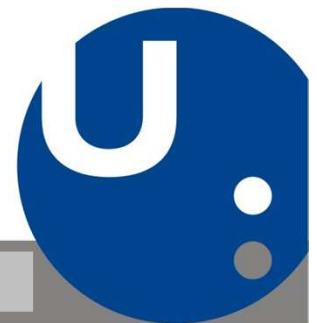
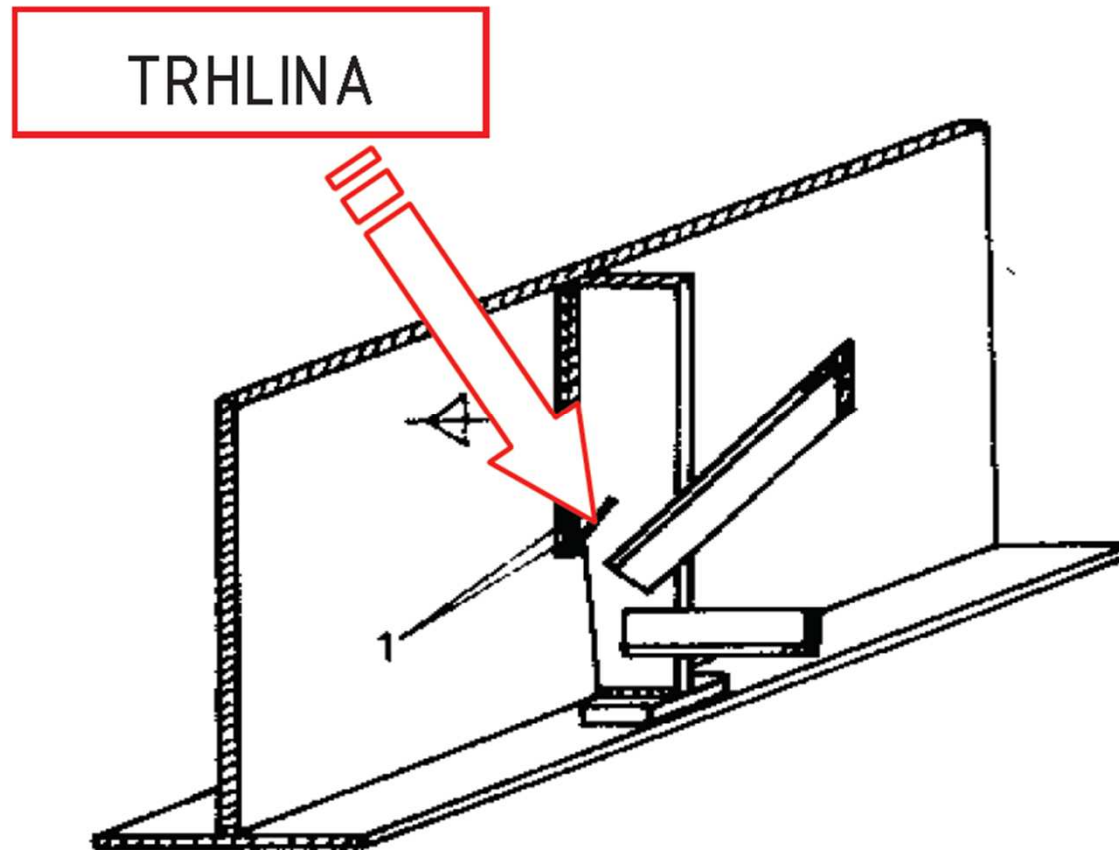
Potenciální místa vzniku únavových poruch železničních mostů  
(TÚDC 2009)



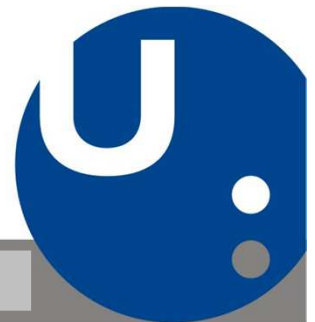
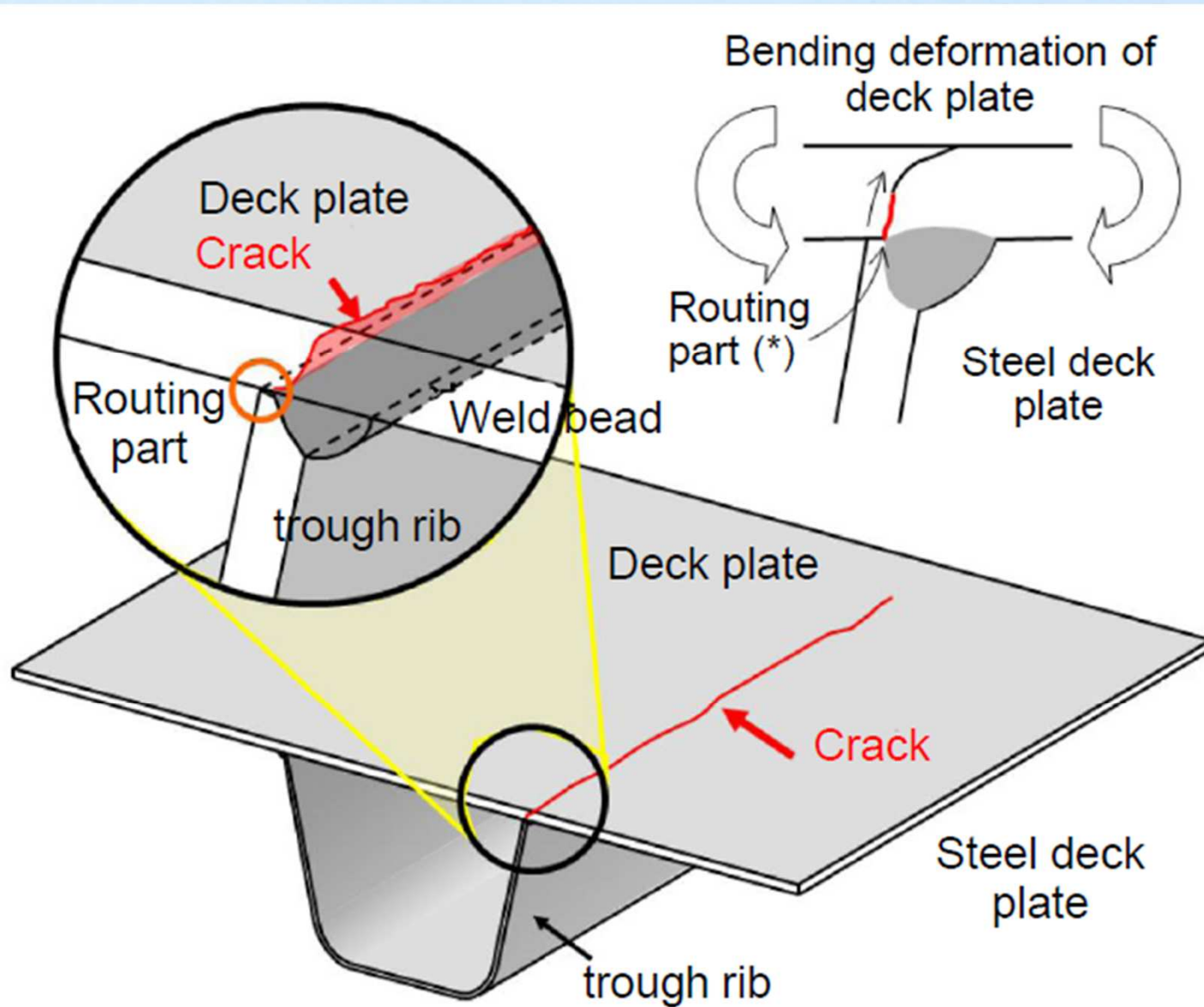
## Potenciální místa vzniku únavových poruch železničních mostů (TÚDC 2009)



Potenciální místa vzniku únavových poruch železničních mostů  
(TÚDC 2009)



## Mosty s ortotropními mostovkami



## Mosty s ortotropními mostovkami



**Mariánský most – Ústí  
nad Labem**



## Mosty s ortotropními mostovkami



Poděbrady – přes Labe



## Mosty s ortotropními mostovkami



**Most Vysočina – Velké  
Meziříčí**



**Mosty s ortotropními mostovkami**



**Most přes obchvat  
České Skalice**





## Mosty s prvkovými mostovkami



*Poloha: km 2.184, trať Rosice nad  
Labem – Hradec Králové*

*Překážka: vodoteč Laba  
inundační území*



*Typ: spojitý nosník s prvkovou  
mostovkou*

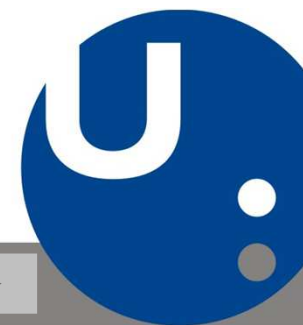
*Rozpětí: 29.97 + 39.41 +  
39.99 + 30.01 m*

*Osová vzdálenost nosníků: 6.5 m*

*Uvedení do provozu: 1966*

*Počet kolejí: 1*

*Traťová rychlost: 80 km/h*



## Vznik únavových trhlin

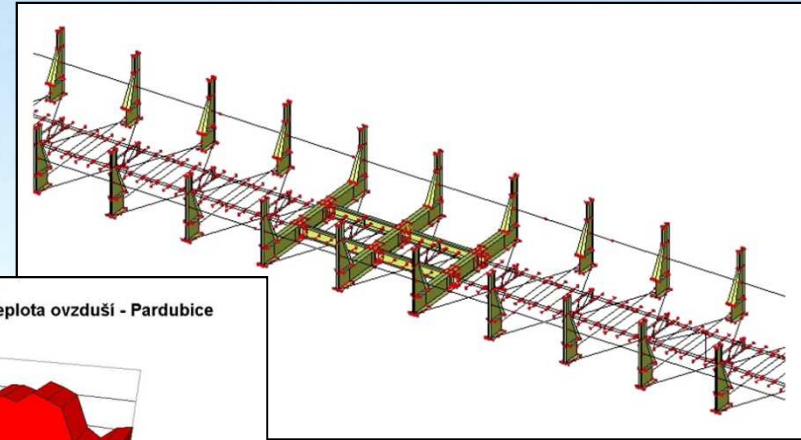


Ukázky reálných únavových trhlin

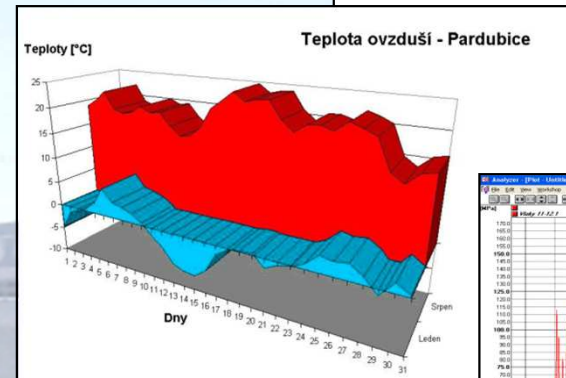


## Výpočet životnosti

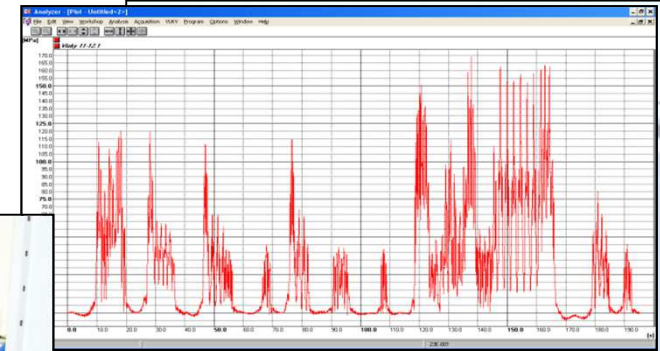
*MKP model skutečné konstrukce*



*Hydrometeorologická data*



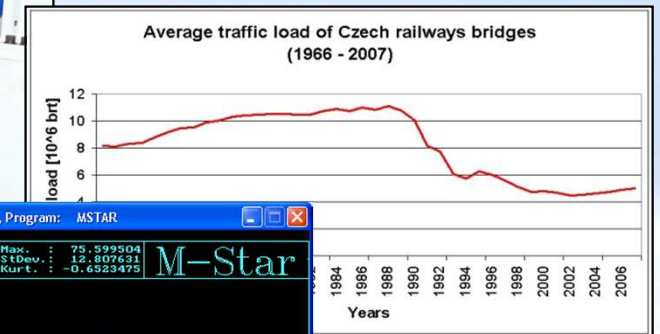
*Experimentální měření  
napětí kritického místa*



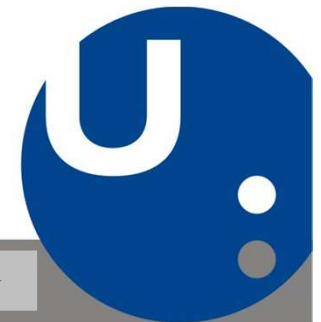
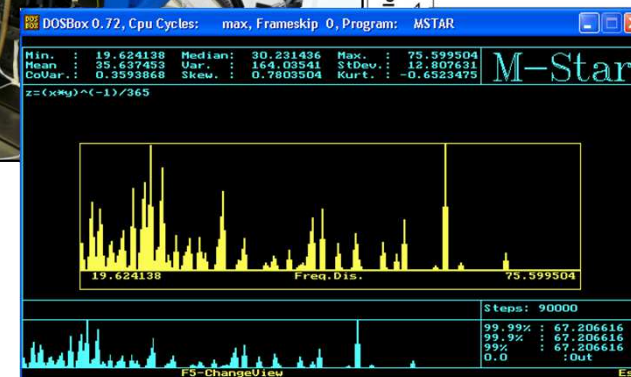
*Fyzikální model  
(stanovení únavové  
křivky*



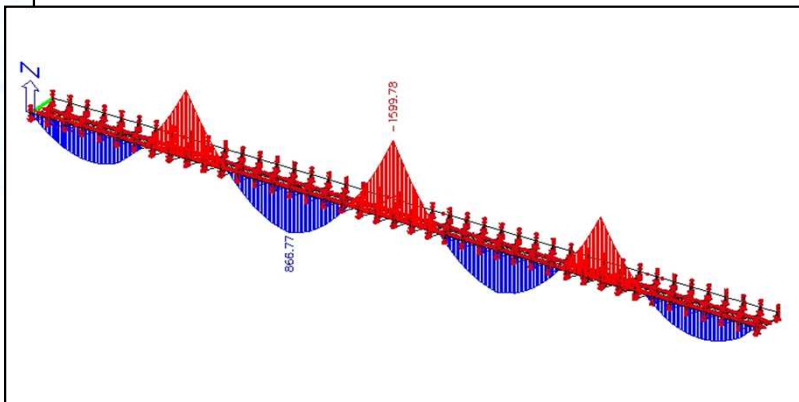
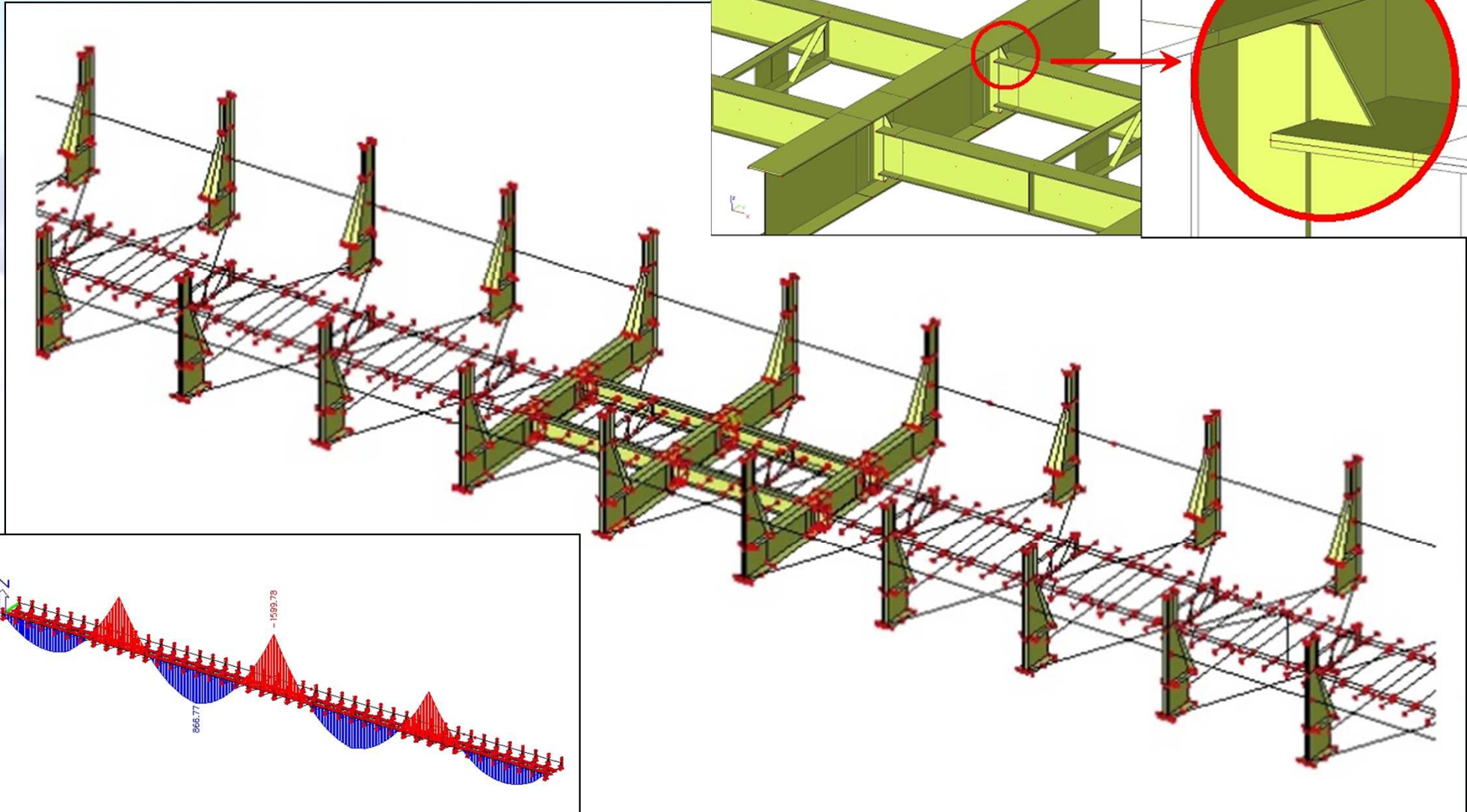
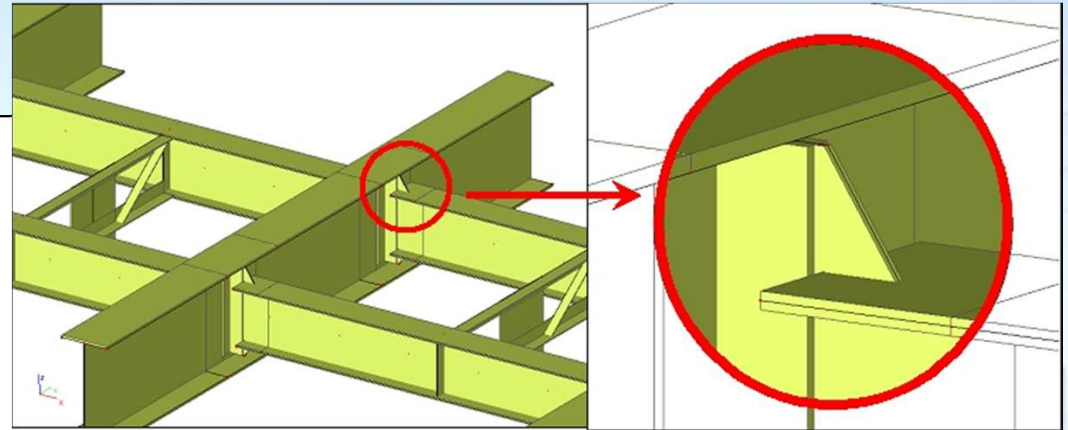
*Stanovení historie  
zatěžování*



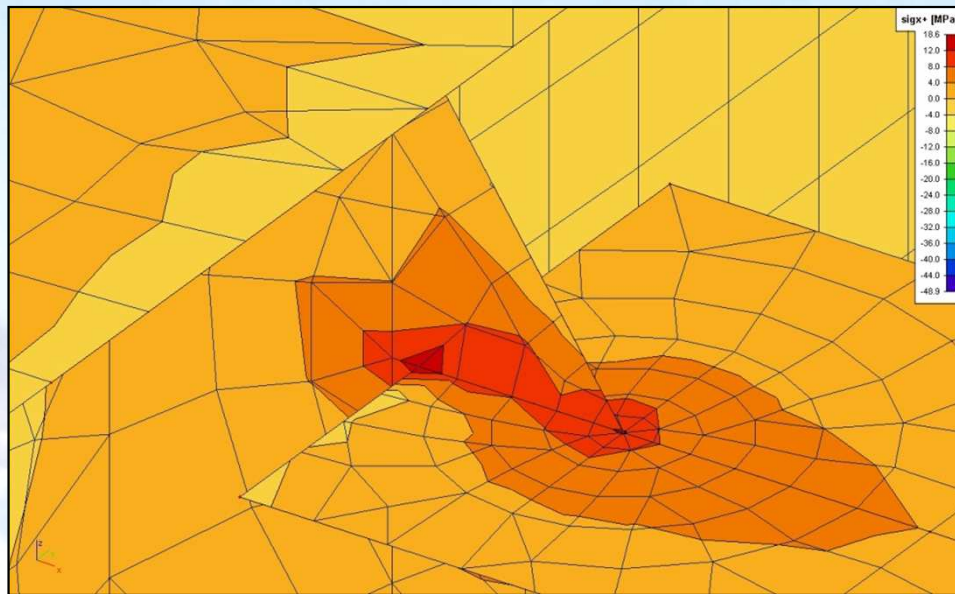
*Pravděpodobnostní  
výpočet životnosti*



## MKP model skutečné konstrukce



## MKP model skutečné konstrukce



Průřezy

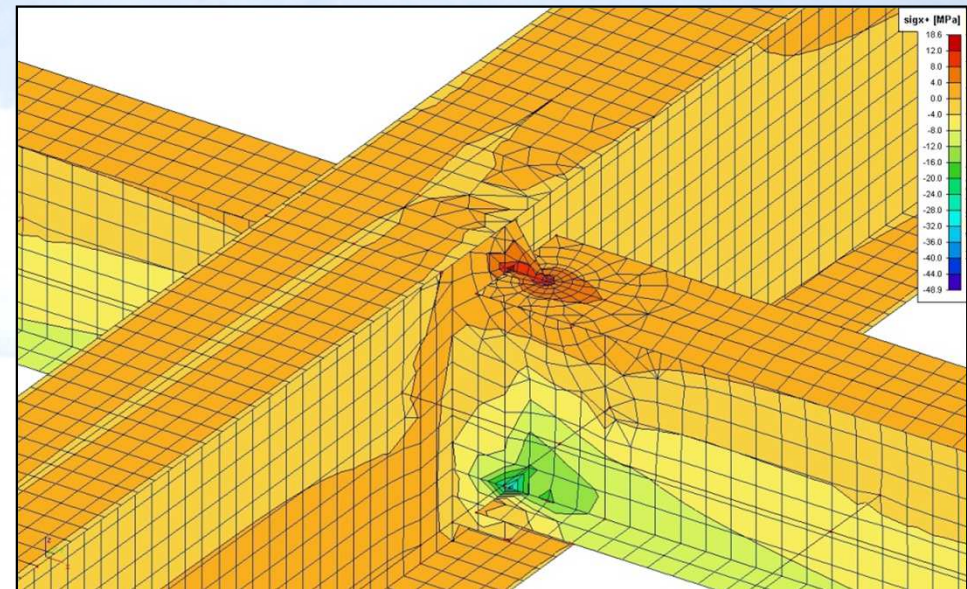
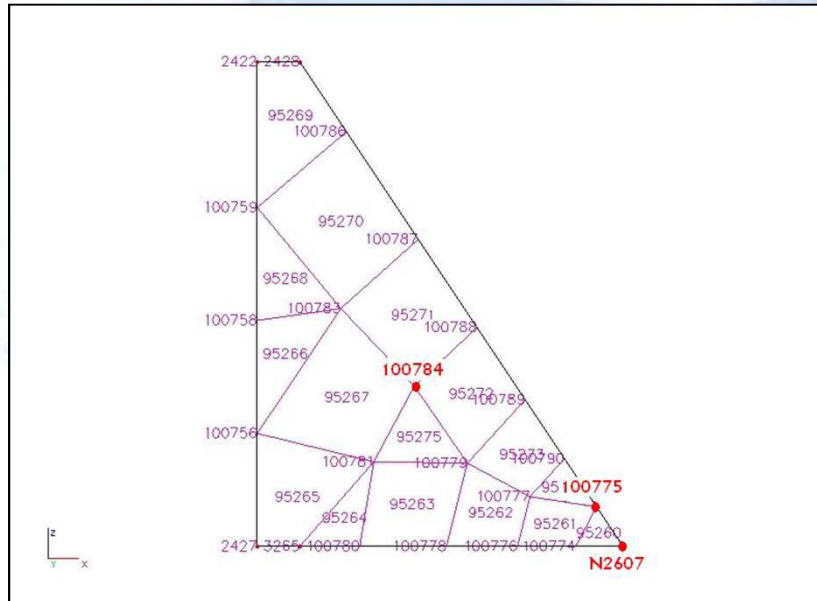
Všechny

Jméno	podélník
Typ	Obecný průřez
Parametry	
Mat 1	ocel37
Opravit	
Obecný	
Použitá barva	Standardní barva
Barva	
Editovatelné vlastnosti	<input type="checkbox"/>
Editovatelný vzpěr	<input checked="" type="checkbox"/>
Vzpěr y-y	c
Vzpěr z-z	c
Výroba	obecný
Výpočet FEM	<input type="checkbox"/>
Použít redukční součinitele	<input type="checkbox"/>
Opravit pojmenované položky	
Vlastnosti	

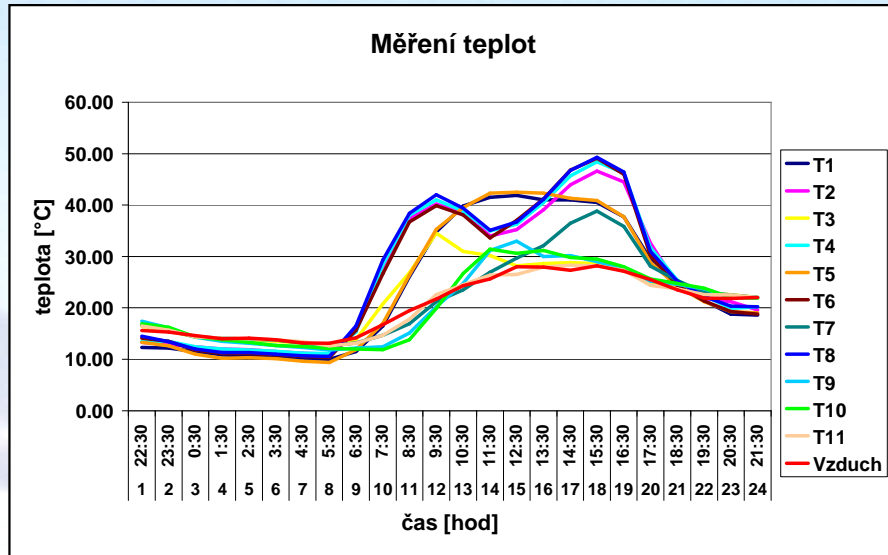
ZLSS

Diagram of a ZLSS cross-section, showing a vertical I-beam shape. The vertical axis is labeled 'z' and the horizontal axis is labeled 'y'. The label 'YLSS' is positioned to the right of the diagram.

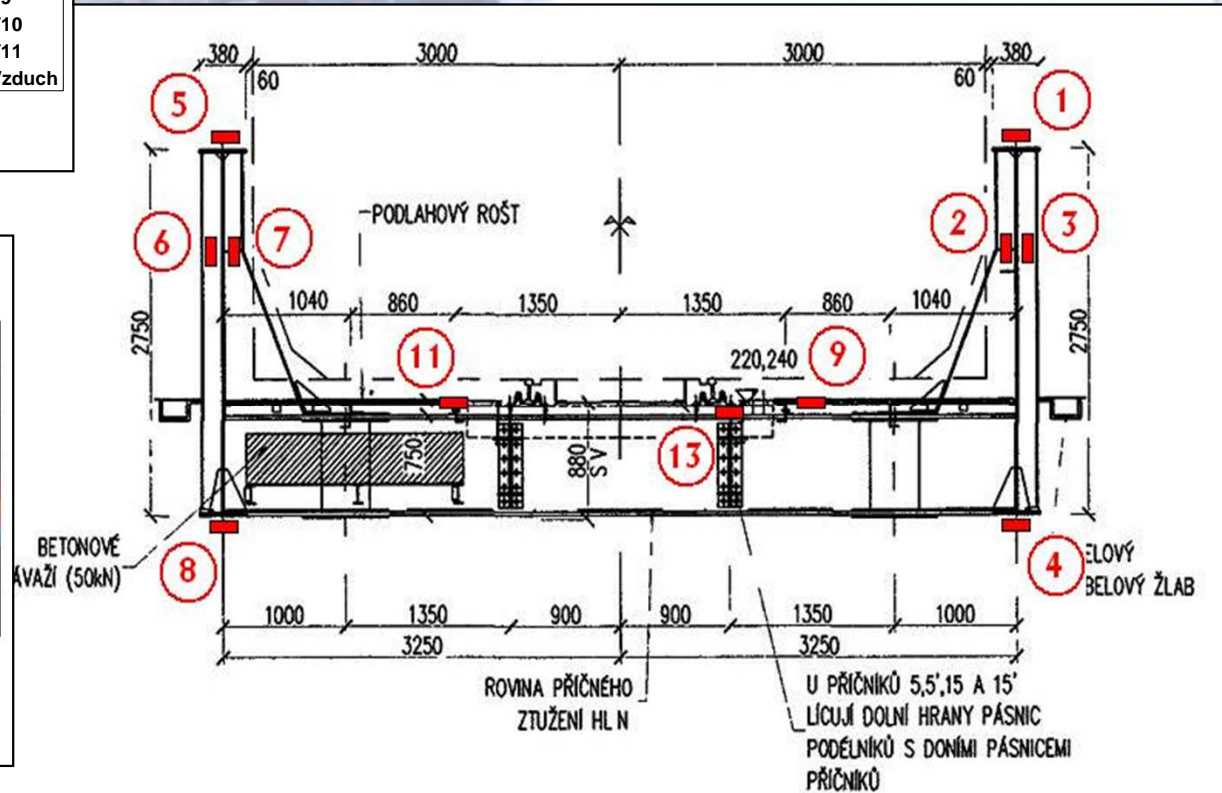
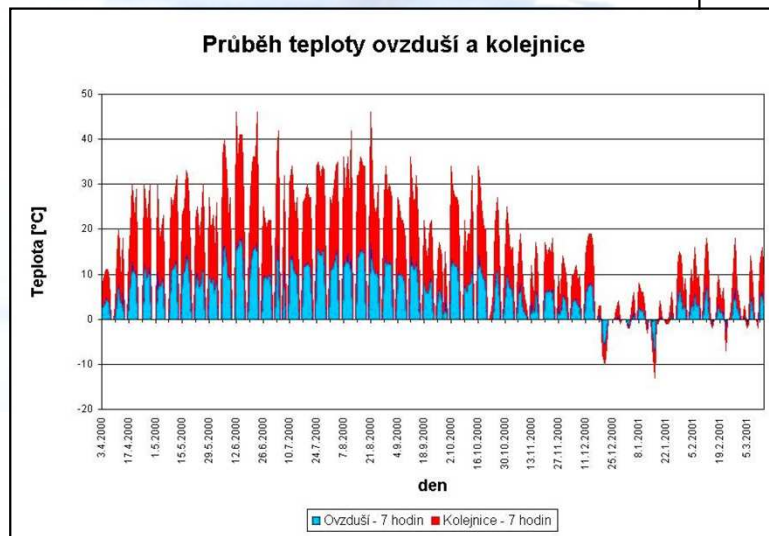
Nový Vložit Opravit Smazat Zavřít



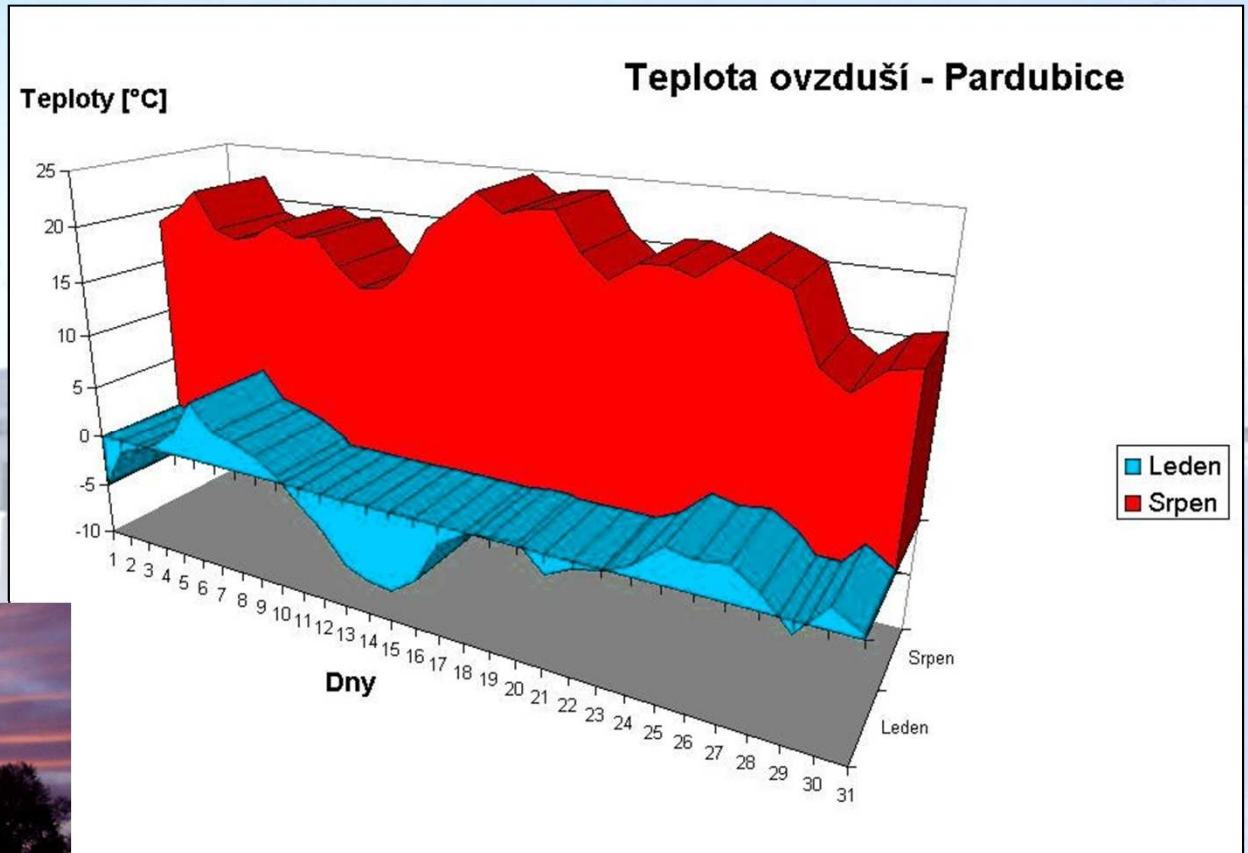
## Kvazistatické změny ovlivňující životnost



Kvazistatické změny pnutí konstrukce v důsledku nerovnoměrného oteplování.



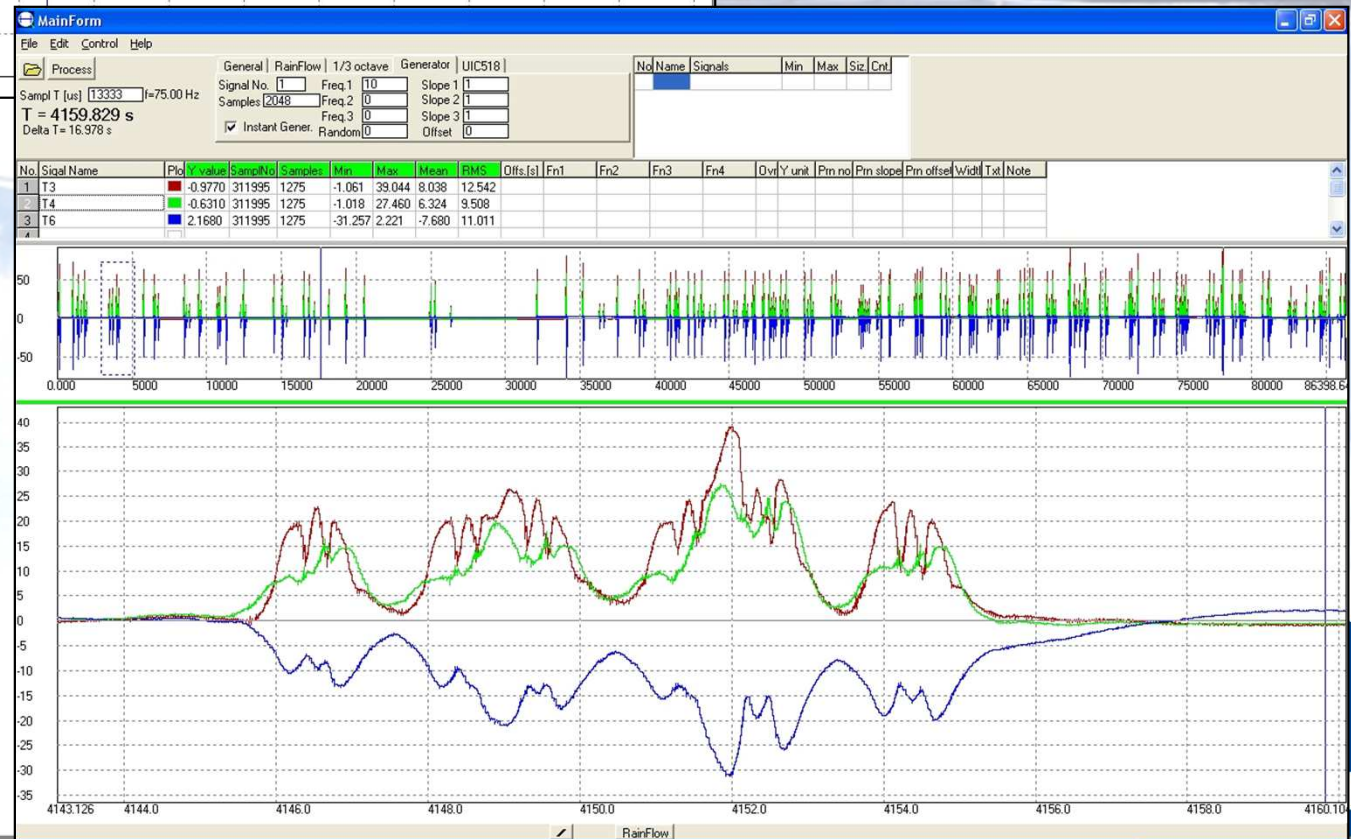
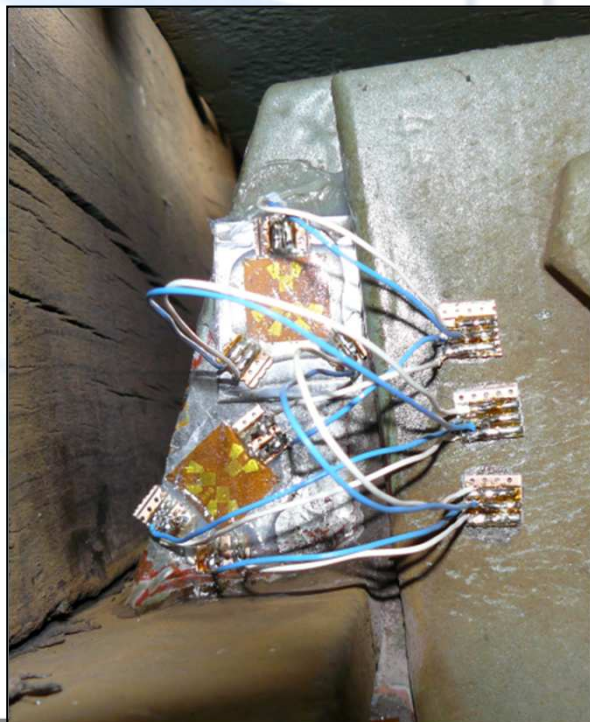
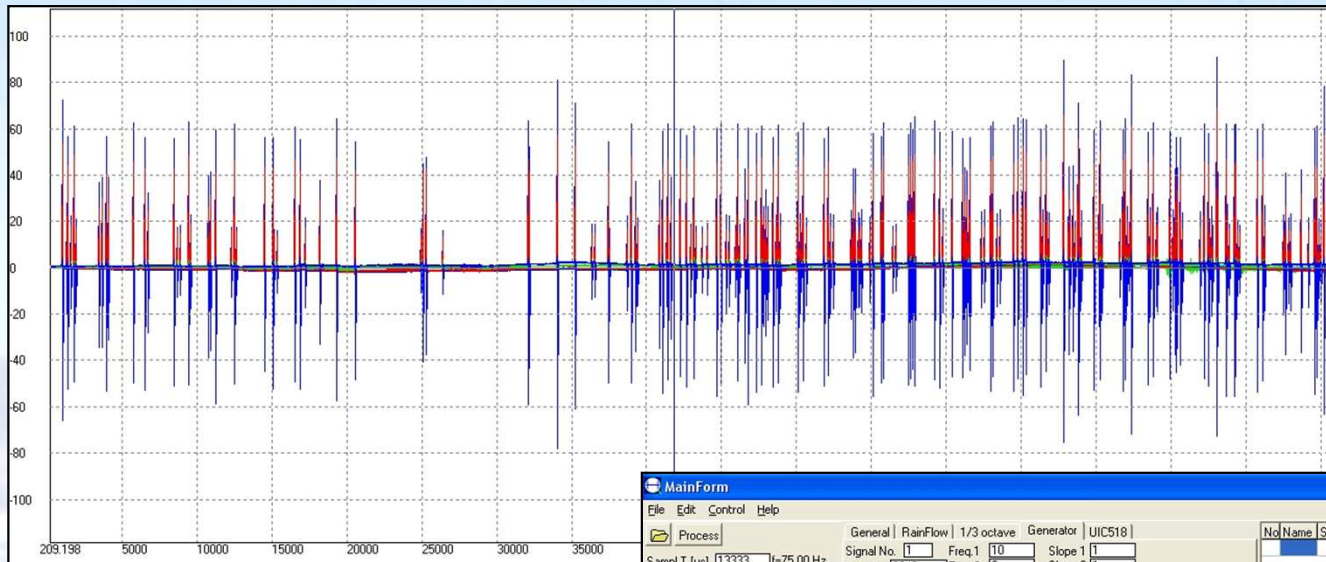
## Kvazistatické změny ovlivňující životnost





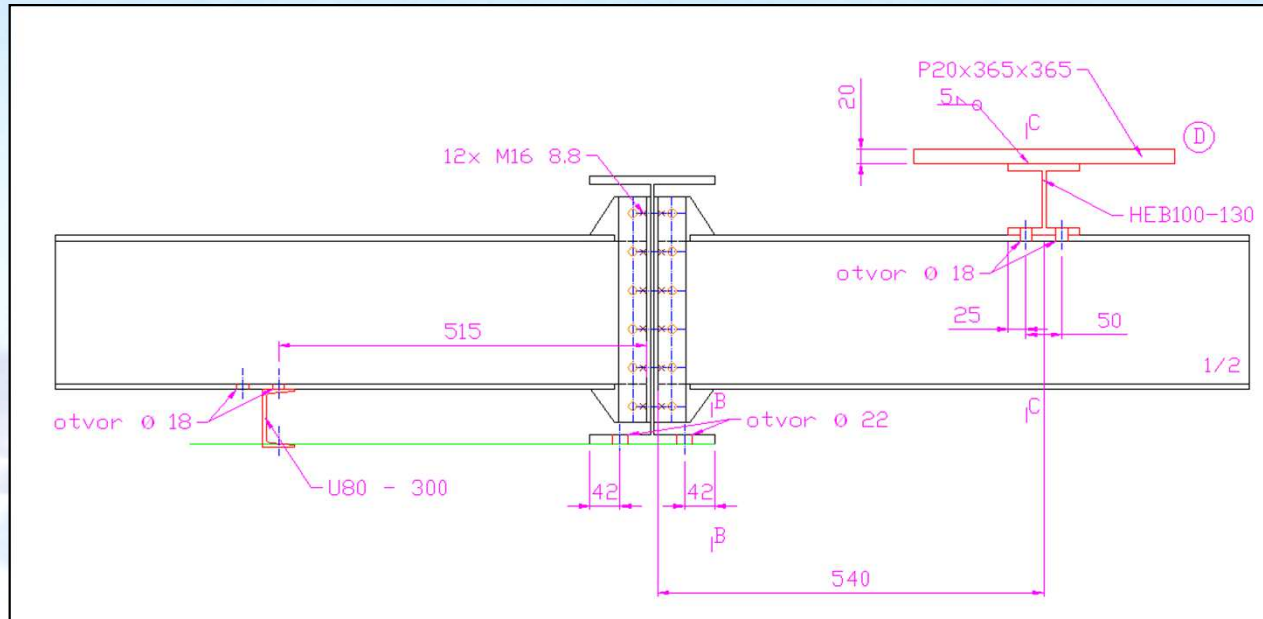


## Experimentální tenzometrické měření

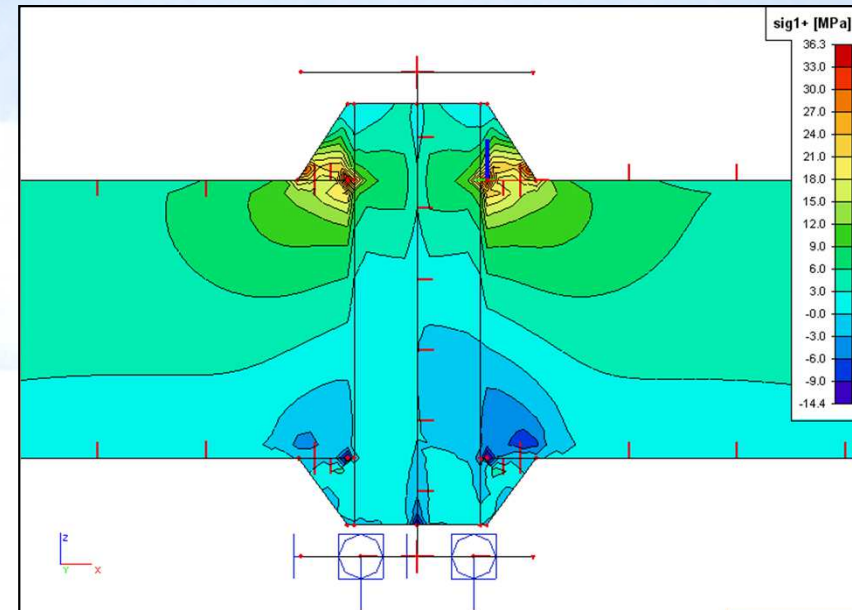
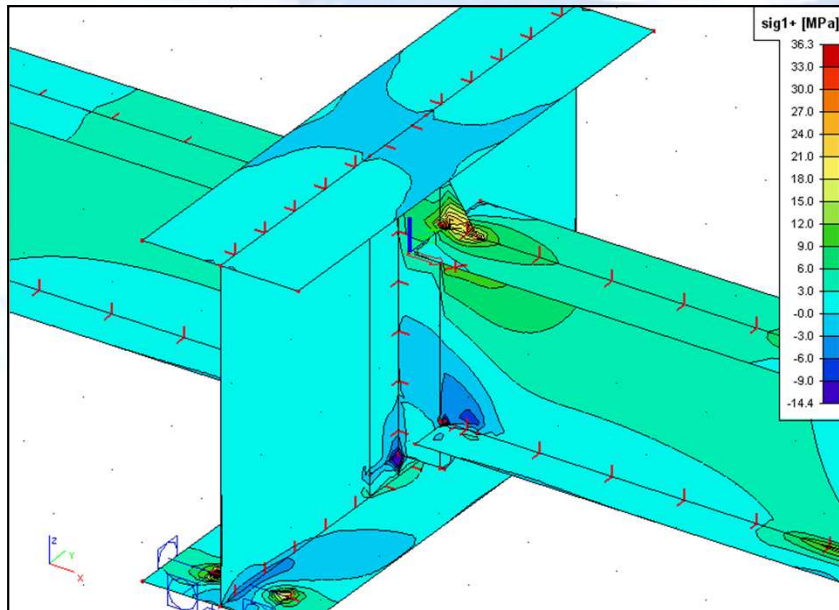
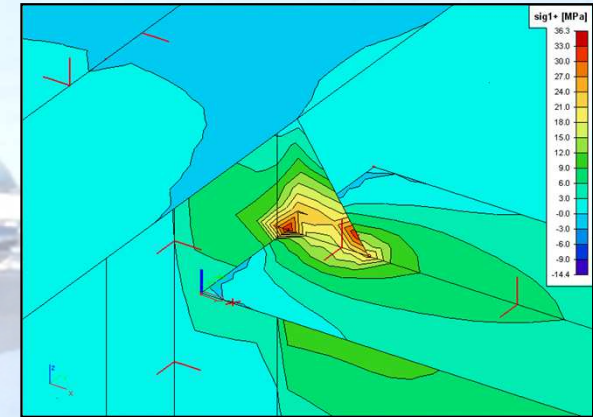




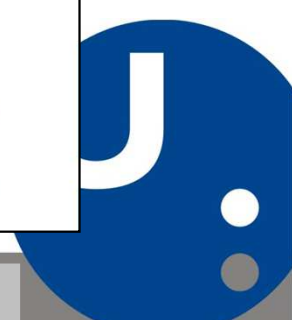
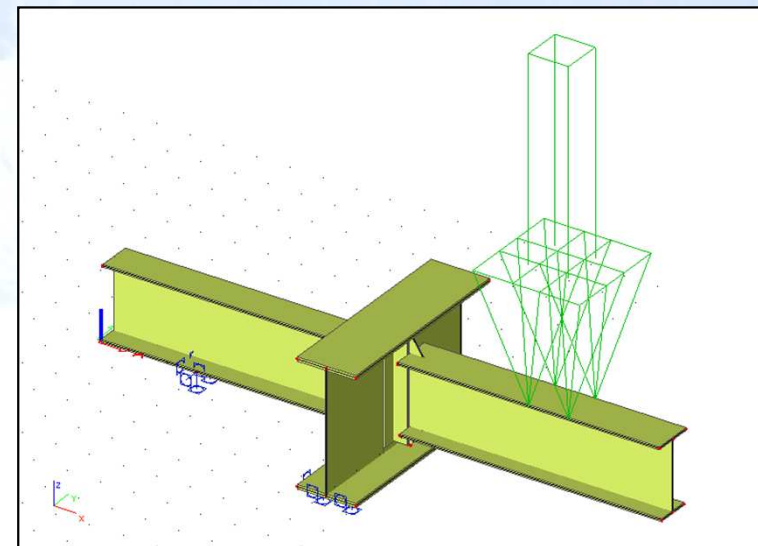
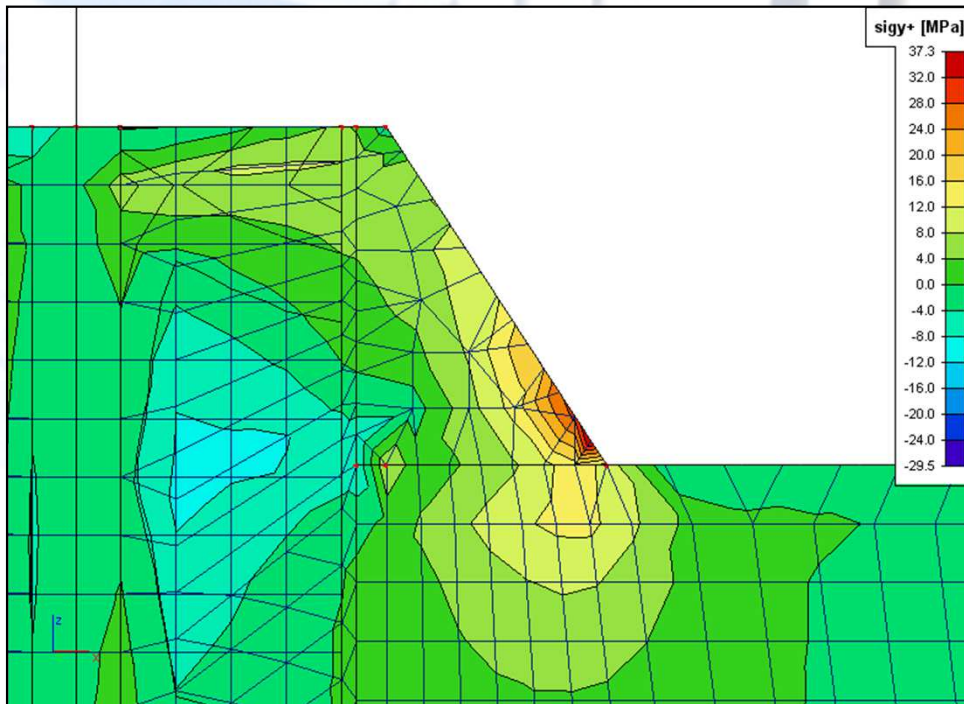
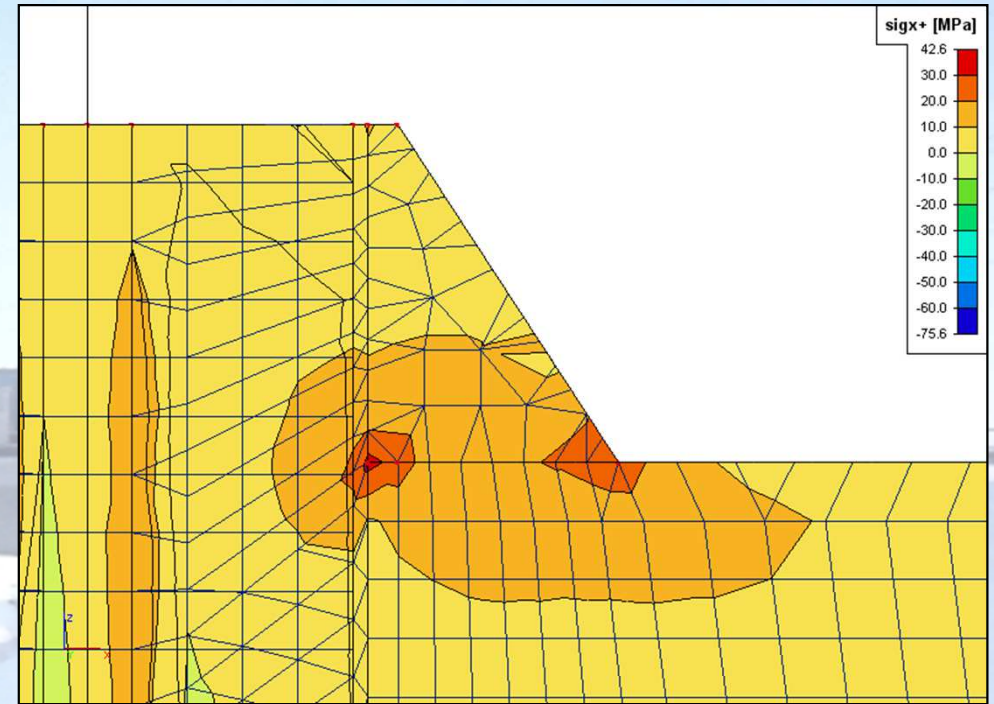
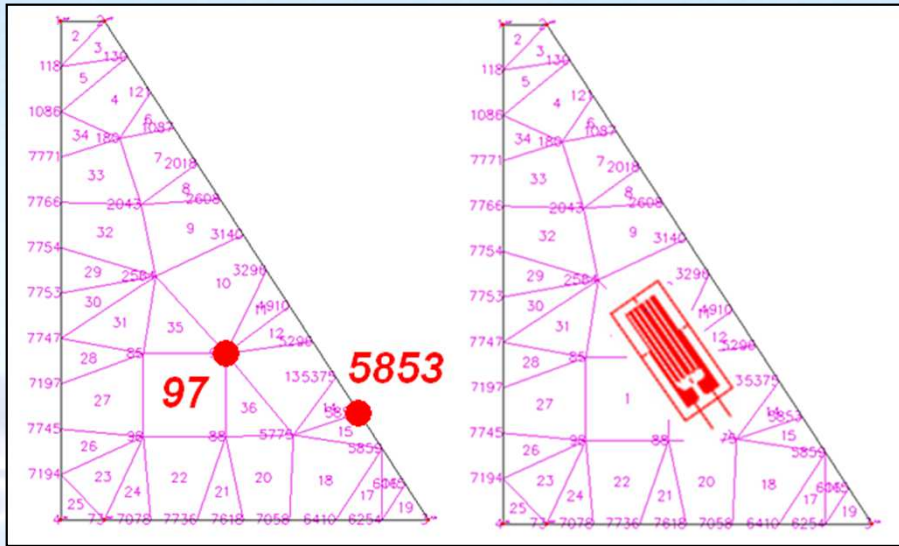
# MKP Výpočet zorku pro stanovení únavové křivky



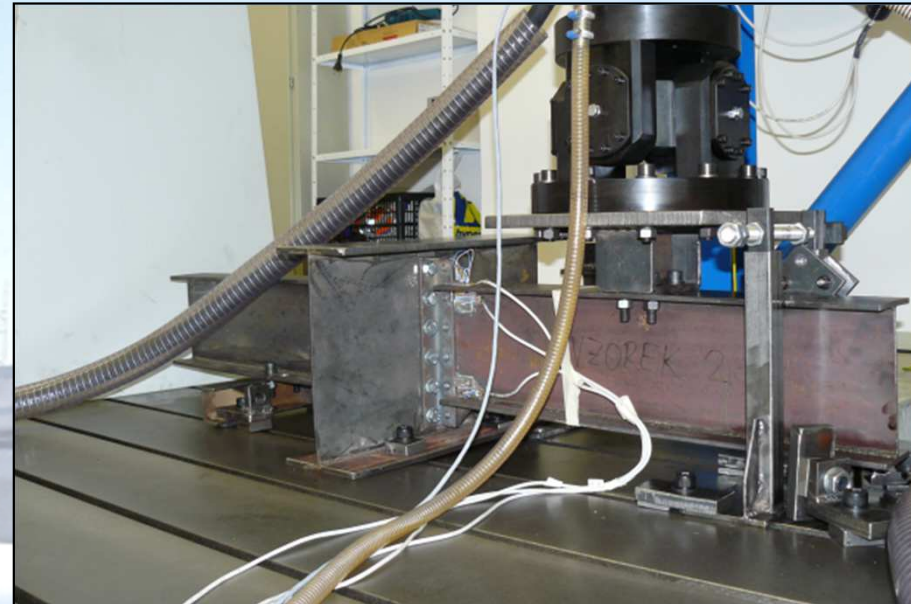
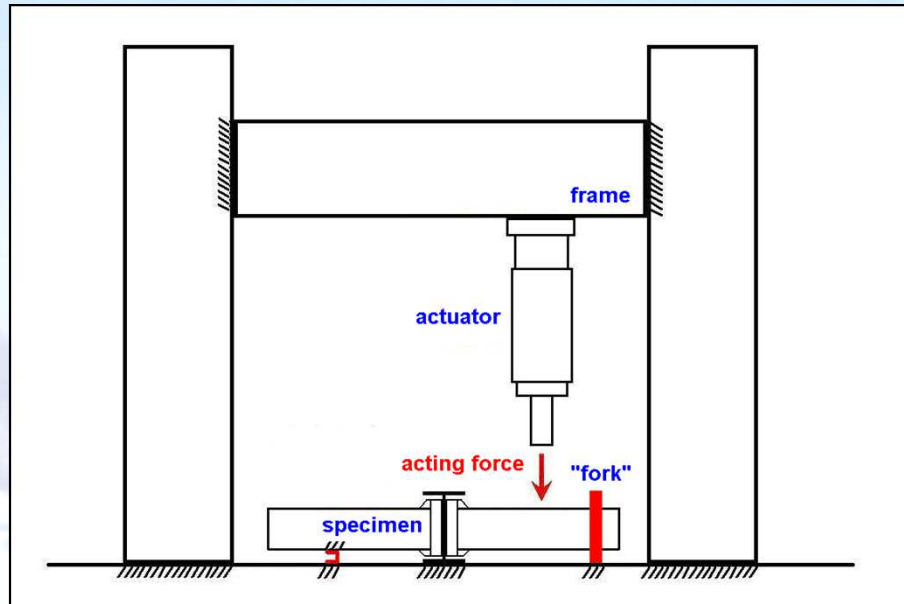
*Model III  
(odpovídající)*



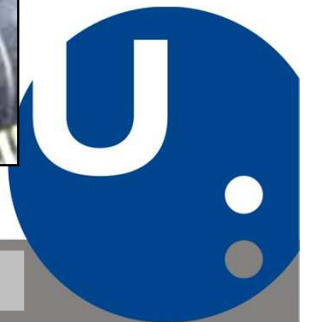
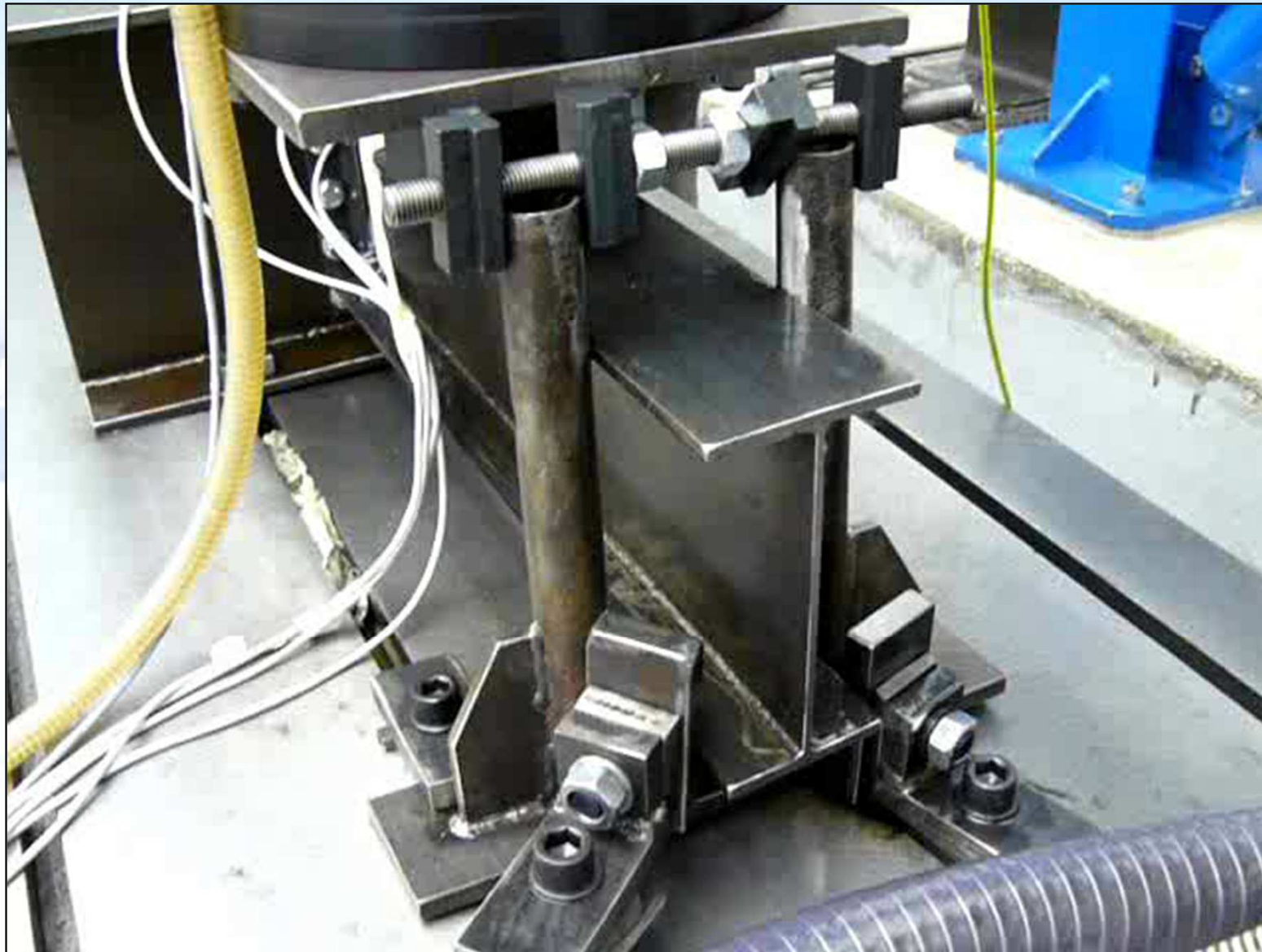
# Přepočet kritického místa fyzikálního vzorku (detailní)



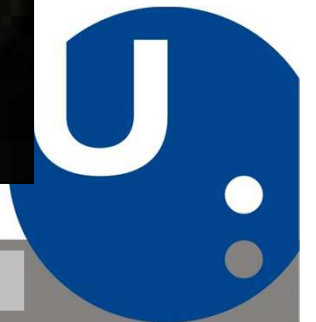
## Experimentální testy fyzikálního vzorku (zjišťování únavové křivky)



Experimentální testy fyzikálního vzorku (zjišťování únavové křivky)

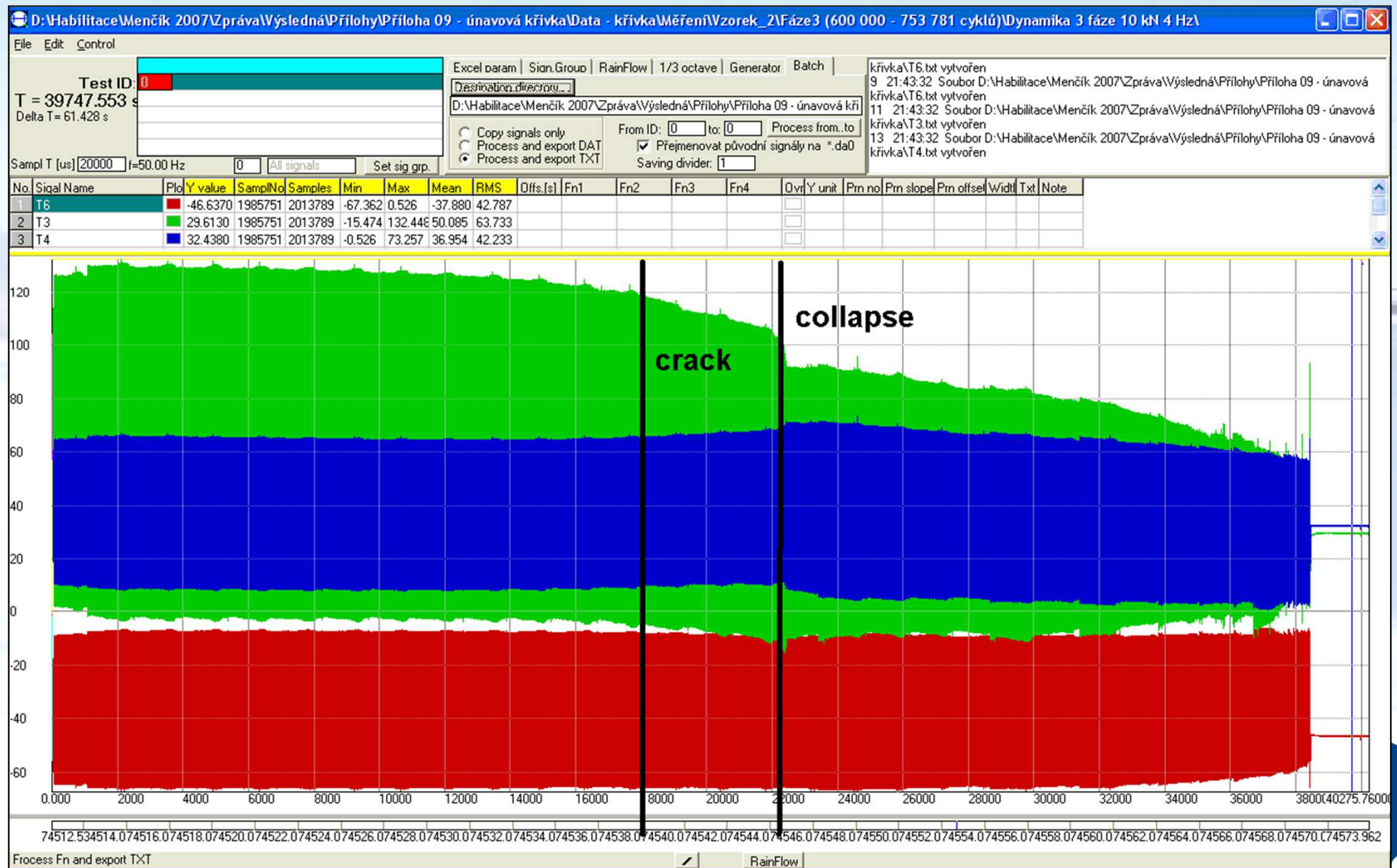


Experimentální testy fyzikálního vzorku (zjišťování únavové křivky)



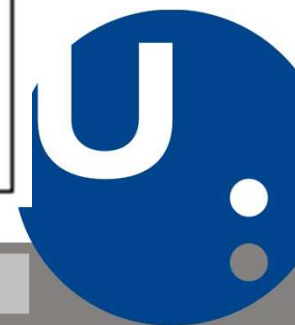
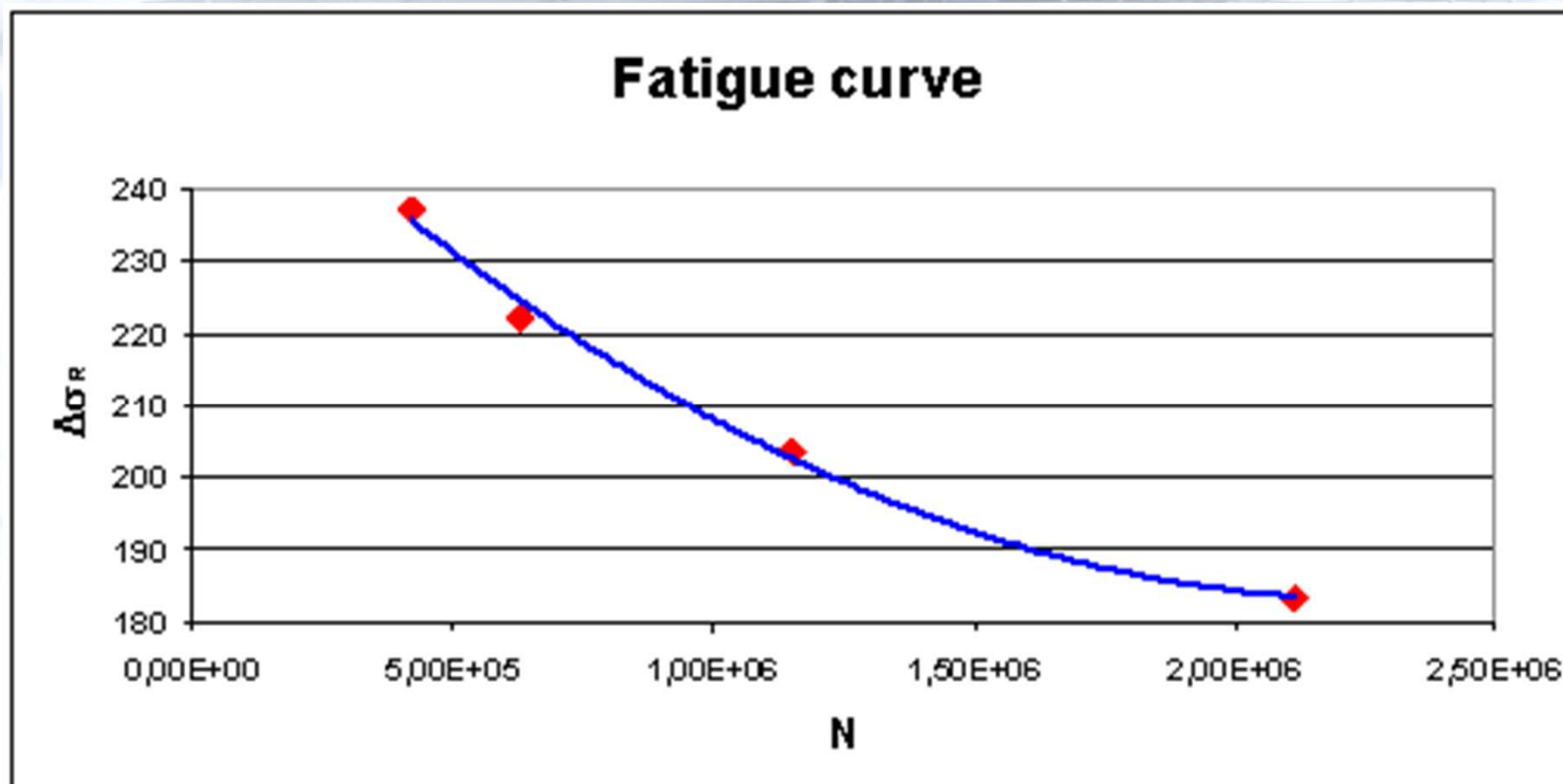


## Experimentální testy fyzikálního vzorku (zjišťování únavové křivky)

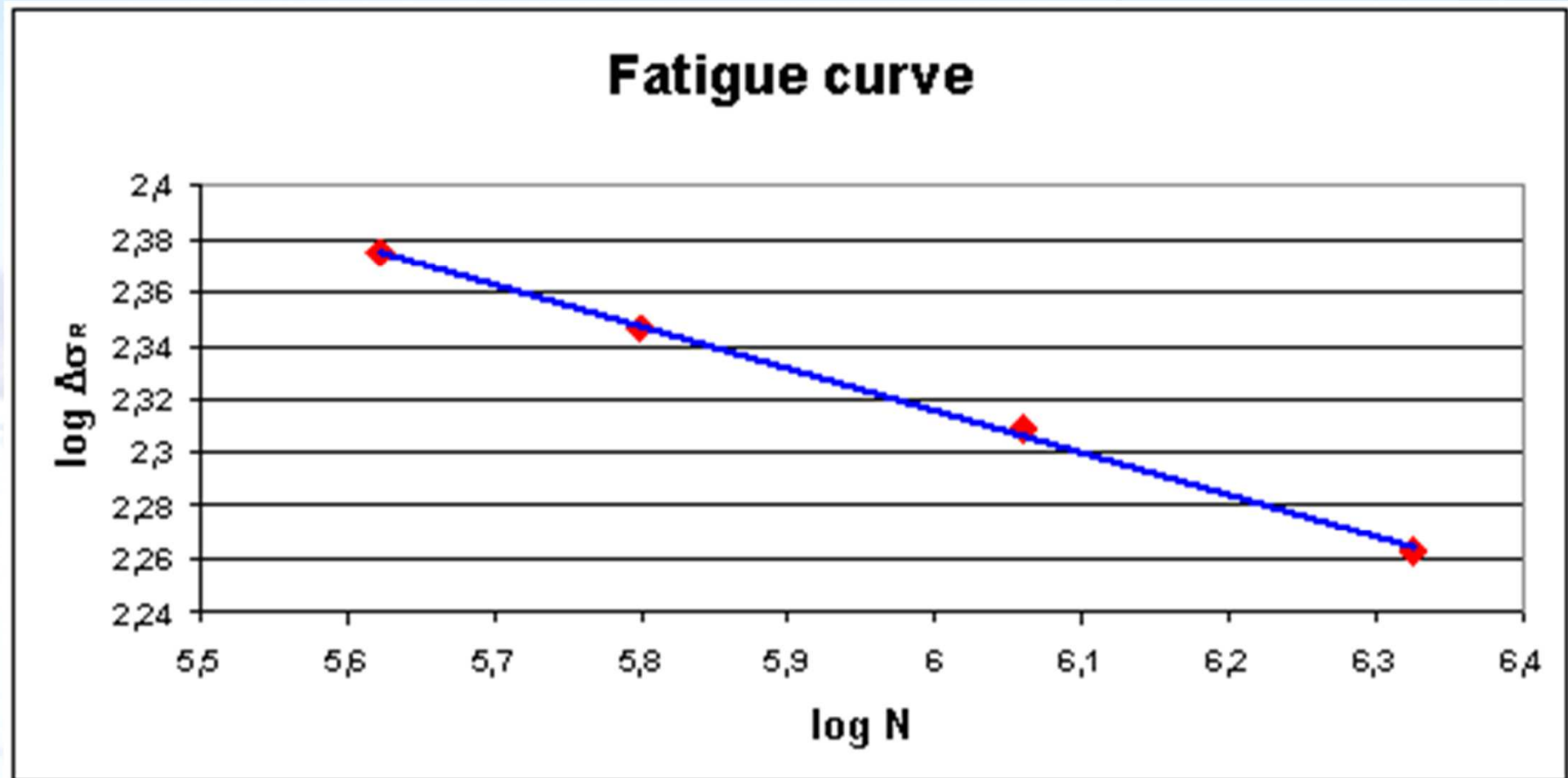


## Experimentální testy fyzikálního vzorku (zjišťování únavové křivky)

Specimen	Load [kN]	Stress in critical place [MPa]	Cycles till a crack
1	10	222	630 000
2	15	312	75 000
3	8	183	2 115 000
4	9	204	1 150 000
5	11	237	420 000



## Experimentální testy fyzikálního vzorku (zjišťování únavové křivky)



$$\log N = \log a - m \times \log \Delta \sigma_R$$

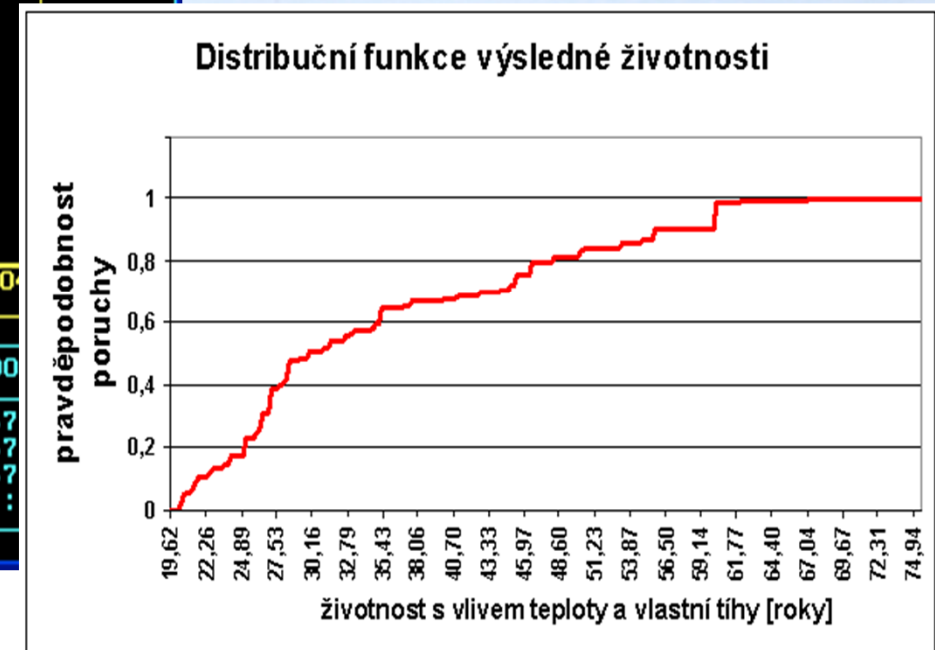
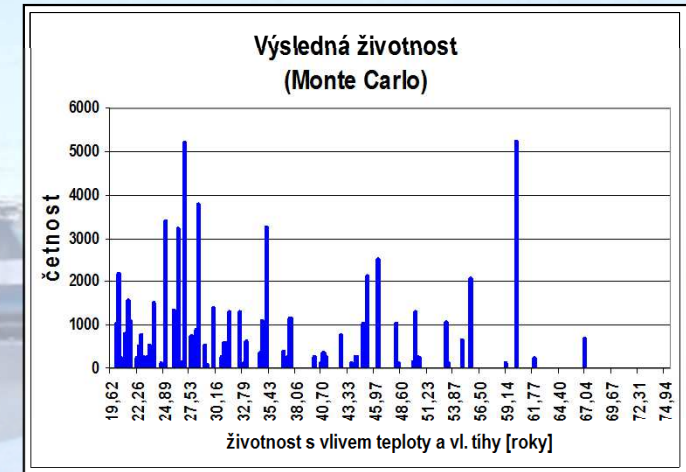
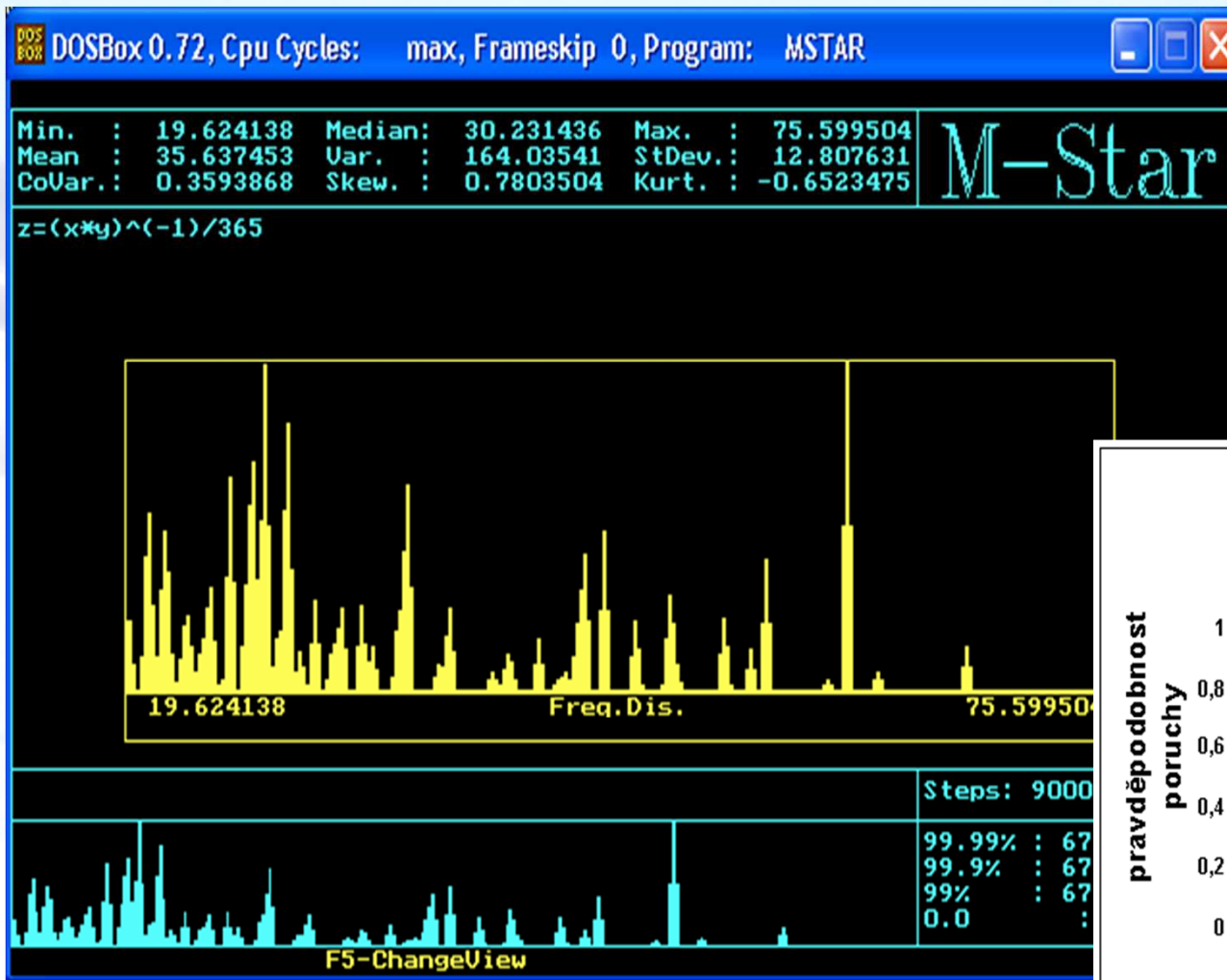
$$\log a = 20,666$$

$$m = 6,337$$



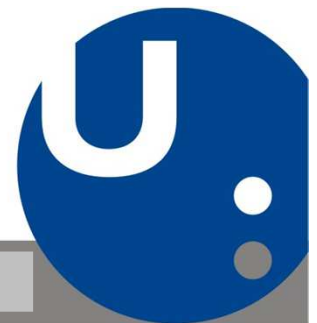
## Pravděpodobnostní výpočet

Výsledná životnost v kritickém místě konstrukce mostu = **30,0 let.**



Program eurokódů (současnost):

- EN 1990 Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí
- EN 1991 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí
- EN 1992 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí
- EN 1993 Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí**
- EN 1994 Eurokód 4: Navrhování spřažených ocelobetonových konstrukcí
- EN 1995 Eurokód 5: Navrhování dřevěných konstrukcí
- EN 1996 Eurokód 6: Navrhování zděných konstrukcí
- EN 1997 Eurokód 7: Navrhování geotechnických konstrukcí
- EN 1998 Eurokód 8: Navrhování konstrukcí odolných proti zemětřesení
- EN 1999 Eurokód 9: Navrhování konstrukcí z hliníkových slitin



**ČSN EN 1993 (Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí) :**

- ČSN EN 1993-1-1:       Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby**
- ČSN EN 1993-1-2:       Navrhování konstrukcí na účinky požáru**
- ČSN EN 1993-1-3:       Doplňující pravidla pro tenkostěnné za studena tvarované prvky a plošné profily**
- ČSN EN 1993-1-4:       Doplňující pravidla pro korozivzdorné oceli**
- ČSN EN 1993-1-5:       Boulení stěn**
- ČSN EN 1993-1-7:       Deskostěnové konstrukce příčně zatížené**
- ČSN EN 1993-1-8:       Navrhování styčníků**
- ČSN EN 1993-1-9:       Únava**
- ČSN EN 1993-1-10:      Houževnatost materiálu a vlastnosti napříč tloušťkou**
- ČSN EN 1993-1-11:      Navrhování ocelových tažených prvků**
- ČSN EN 1993-1-12:      Doplňující pravidla pro oceli vysoké pevnosti do třídy S 700**

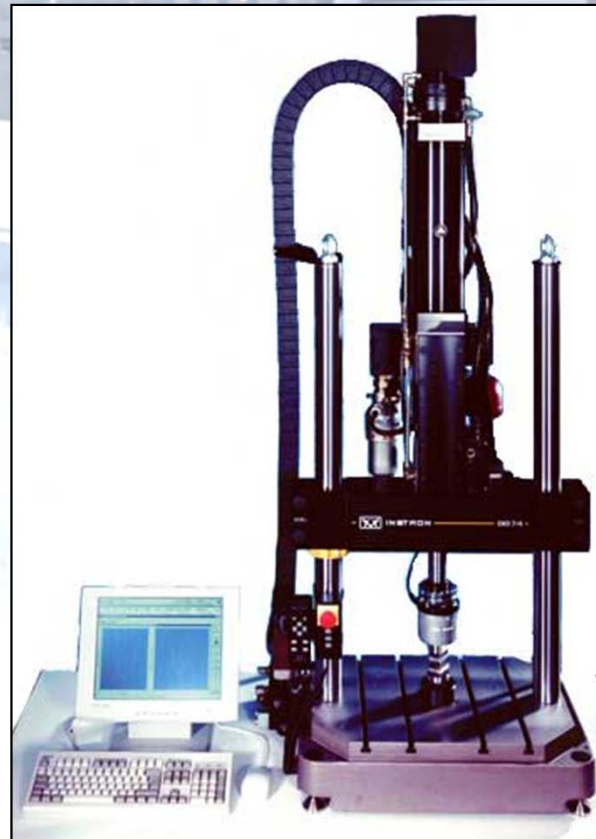


Experimentální zkoušení únavy

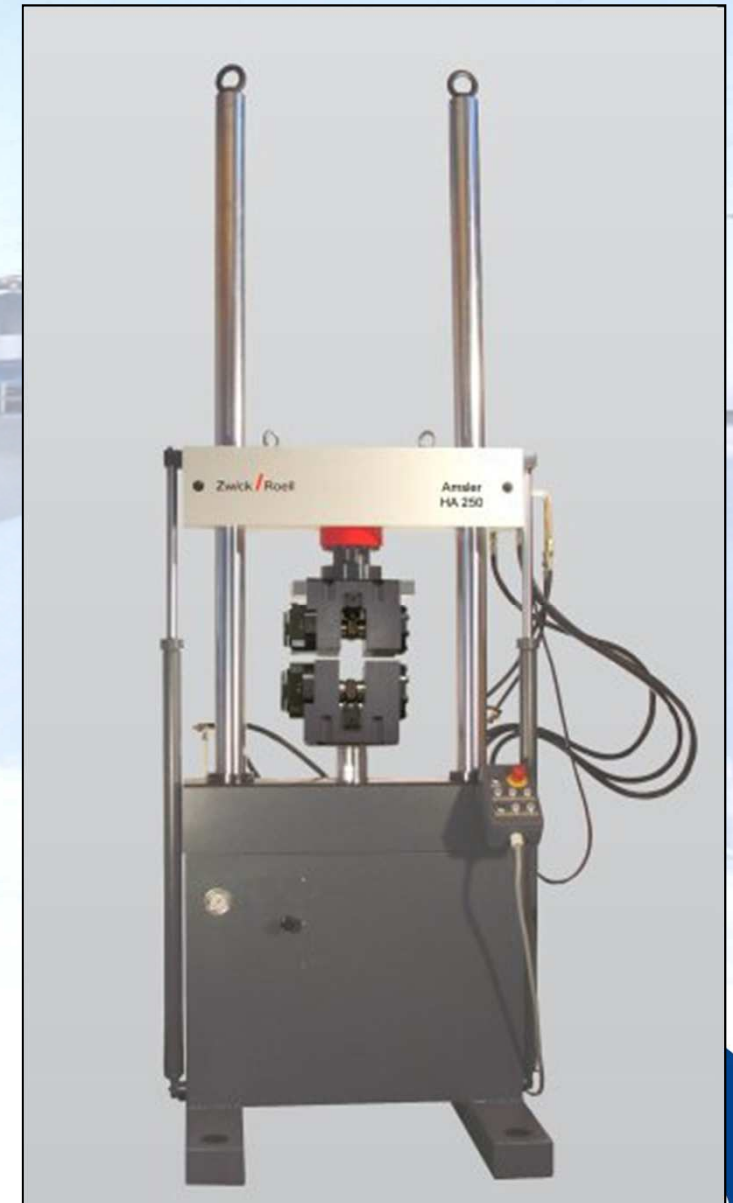
Zwick/Roell



MTS

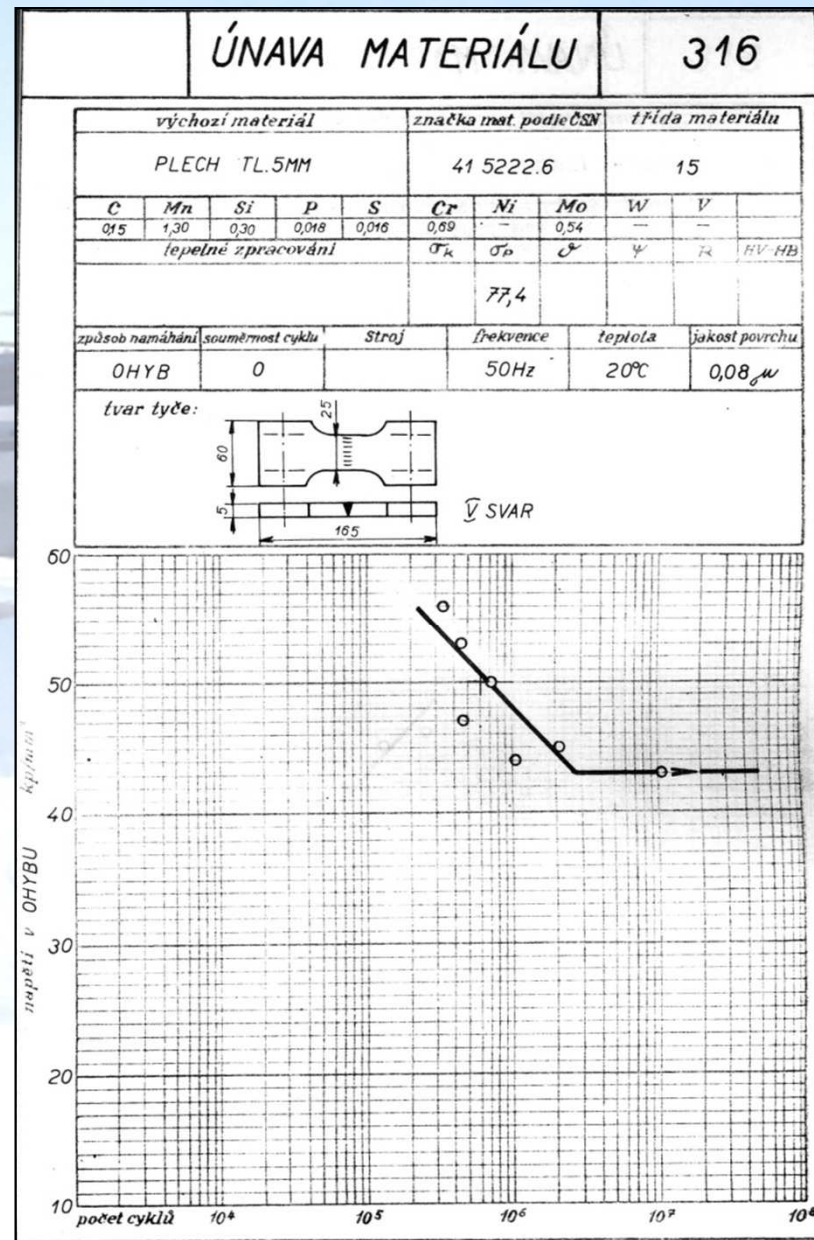
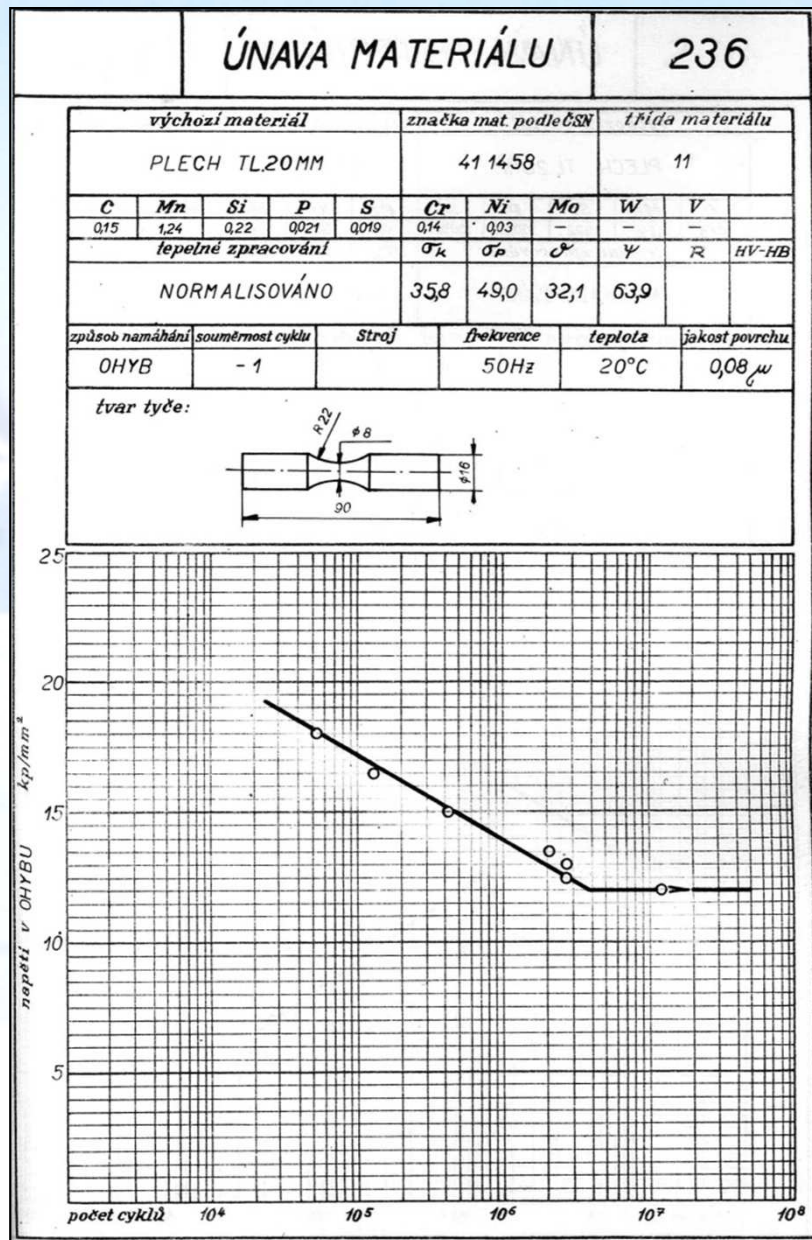


Instron



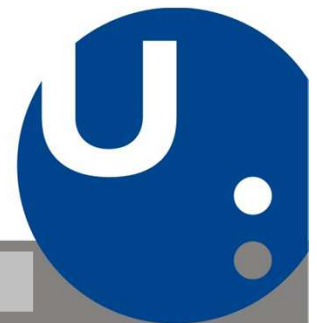


## Experimentální zkoušení únavy



## Hypotézy kumulace únavového poškození – stanovení životnosti

- 1) Hypotézy využívající **diskretizace** (dekompozice) **procesu napětí** :
  - *Hypotéza Palmgren-Minera (PM)*
  - *Hypotéza Corten-Dolanova (CD)*
- 2) Hypotézy vycházející ze znalosti **statistických charakteristik** procesu napětí :
  - *Hypotéza Rajcherova*
  - *Hypotéza Novarovova*
- 3) Hypotézy vycházející z **lokální napjatosti v kořeni vrubu**
  - *Hypotéza Langrafova*
  - *Hypotéza Wetzelova*



## Hypotézy kumulace únavového poškození – stanovení životnosti

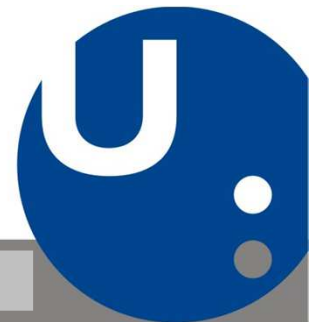
### Hypotéza Palmgren - Minerova

Celkový počet kmitů do lomu :

$$H_{(PM)} = H = \frac{\sum_{i=1}^p n_i}{\sum_{i=1}^p \frac{n_i}{N_i}} = \frac{h_z}{\sum_{i=1}^p \left( \frac{n_i}{N_p} * \left( \frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{ap}} \right)^w \right)} = \frac{N_p}{\sum_{i=1}^p \left( \frac{n_i}{h_z} * \left( \frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{ap}} \right)^w \right)}$$

kde

- $n_i$  je počet cyklů dané amplitudy
- $N_p$  je počet cyklů největší amplitudy do poruchy
- $h_z$  je celkový počet kmitů všech amplitud
- $\sigma_{ai}$  je výchylka dané amplitudy
- $\sigma_{ap}$  je výchylka maximální amplitudy
- $w$  je exponent únavové křivky
- $k$  je redukce únavové křivky



## Hypotézy kumulace únavového poškození – stanovení životnosti

### Hypotéza Novarovova

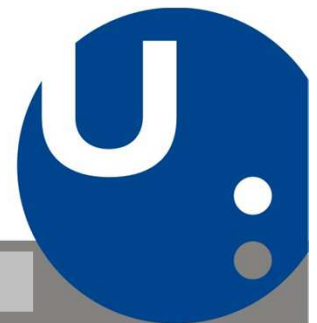
Únavové poškození, nakumulované v kritickém místě součásti za jednu sekundu při působení procesu namáhání s výkonovou spektrální hustotou  $F_\sigma(f)$  :

$$D = \frac{J_1 \left[ \int_0^\infty f^{\frac{m}{2}} * F_\sigma(f) df \right]^{\frac{m}{2}}}{\sigma_c^m * N_0}$$

$$J_1 = \int_{a^2}^\infty x^{m+1} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx = 2^{\frac{m}{2}} * \Gamma\left(\frac{m}{2} + 1\right) * P(\chi^2_{m+2} > a^2)$$

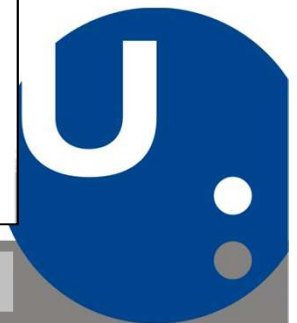
kde

- |                           |  |
|---------------------------|--|
| $m$                       | - sklon šikmé větve Wöhlerovy charakteristiky sledovaného místa součásti |
| $f$                       | - frekvence [Hz]   |
| $F_\sigma(f)$             | - výkonová spektrální hustota procesu namáhání [MPa <sup>2</sup> * s]    |
| $P(\chi^2_{m+2} > a^2)$   | - komplement distribuční funkce $\chi^2$ rozdělení                       |
| $\sigma_c$                | - mez únavy sledovaného místa součásti                                   |
| $N_0$                     | - bazový počet cyklů, tj. počet cyklů na mezi únavy                      |
| $a = \sigma_c / S_\sigma$ | - dolní mez integrace  |
| $S_\sigma$                | - směrodatná odchylka procesu namáhání.                                  |



## Hypotézy kumulace únavového poškození – stanovení životnosti

### Hypotéza Rajchera



**Literatura :**

- 1) Háša P.: Havárie střechy kotelny elektrárny Opatovice nad Labem, Konstrukce 3/2004
- 2) ČSN EN 1990 : Zásady navrhování konstrukcí, ČNI 2004
- 3) Růžička M, Hanke M., Rost M.: Dynamická pevnost a životnost, Praha 1992
- 4) Internet : [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)
- 5) Eurocode 3: "Design of Steel Structures": ENV1993-1-1,
- 6) Eurocode 1: "Basis of Design and Actions on Structures",
- 7) ESDEP: European Steel Design Education Program,
- 8) R.K. Paasch and A.H.DePietro: "Fatigue crack modeling in ridge deck connection details",
- 9) M.Tuma: "Fatigue resistance of girders with undulating web",
- 10) B.Culek jr.: "Evaluation of fatigue life of steel structures under complex stress",
- 11) H.Šertler, V.Tomice,J.Vičan: Steel structures,
- 12) J.Vojtíšek : Výpočty a ověřování životnosti strojních částí namáhaných proměnlivými kmitavými silami, Ústřední výzkumný ústav Škoda 1976.

