

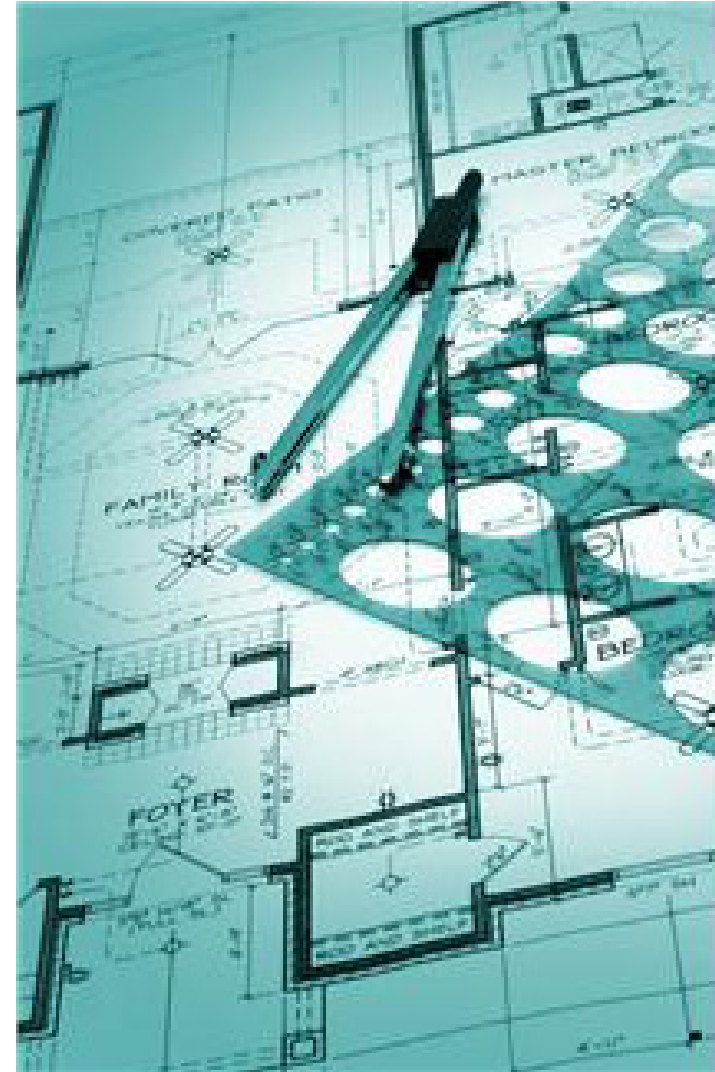
## Téma 9:

# Pravděpodobnostní výpočty v praxi (Aplikace metody POPV / DOProC)

- Pravděpodobnostní modelování únavového poškození cyklicky namáhané ocelové konstrukce
- Pravděpodobnostní návrh a posouzení spolehlivosti obloukové výztuže podzemních a důlních staveb

# Praktické využití metody POPV

- Pravděpodobnostní hodnocení kombinací zatížení,
- Pravděpodobnostní posudek spolehlivosti průřezů i systémů staticky (ne)určitých nosných konstrukcí,
- Pravděpodobnostní analýza betonových a drátkobetonových směsí,
- **Pravděpodobnostní návrh a posouzení svorníkové výztuže podzemních děl,**
- Posudek spolehlivosti nosných konstrukcí vystavených nárazu,
- **Pravděpodobnostní predikce šíření únavových trhlin v cyklicky namáhaných ocelových konstrukcích a mostech.**



# Šíření únavové trhliny

Šíření únavové trhliny pomocí **lineární lomové mechaniky**

**Paris-Erdoganův zákon law:**

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K^m$$

kde  $C, m$  jsou **materiálové konstanty** (získány experimentálně),

$a$  je **délka únavové trhliny**,

$N$  je **počet cyklů únavového zatížení**,

$\Delta K$  je rozsah **koeficientu intenzity napětí**.

Po úpravě:

$$\int_{a_1}^{a_2} \frac{da}{(\sqrt{\pi \cdot a} \cdot f(a))^m} = \int_{N_1}^{N_2} C \cdot \Delta \sigma^m dN$$

$$\Delta K = \Delta \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot f(a)$$

kde počet únavových cyklů od  $N_1$  do  $N_2$  potřebných k prodloužení **délky únavové trhliny** z délky  $a_1$  na délku  $a_2$ ,

$\Delta \sigma$  je konstantní **rozkmit špiček napětí**,

$f(a)$  je **kalibrační funkce** – sledující průběh šíření trhliny

(např. z okraje nebo povrchu, odvozena experimentálně).

# Pravděpodobnostní modelování šíření únavové trhliny

## Odolnost konstrukce:

kde

$a_0$  je **počáteční** délka únavové trhliny,

$a_d$  je **měřitelná** délka únavové trhliny,

$a_{ac}$  je **přípustná** délka únavové trhliny.

$$R(a_d) = \int_{a_0}^{a_d} \frac{da}{(\sqrt{\pi \cdot a} \cdot f(a))^m}$$

$$R(a_{ac}) = \int_{a_0}^{a_{ac}} \frac{da}{(\sqrt{\pi \cdot a} \cdot f(a))^m}$$

## Akumulace účinků zatížení:

kde  $N$  je **celkový počet rozkmitů špiček**

**napětí**  $\Delta\sigma$  při nárůstu délky trhliny z  $a_0$  na  $a_d$  nebo  $a_{ac}$ ,

$N_0$  počet rozkmitů špiček napětí v čase iniciace únavové trhliny.

$$E(N) = \int_{N_0}^N C \cdot \Delta\sigma^m dN = C \cdot \Delta\sigma^m \cdot (N - N_0)$$

## Funkce spolehlivosti, pravděpodobnost poruchy:

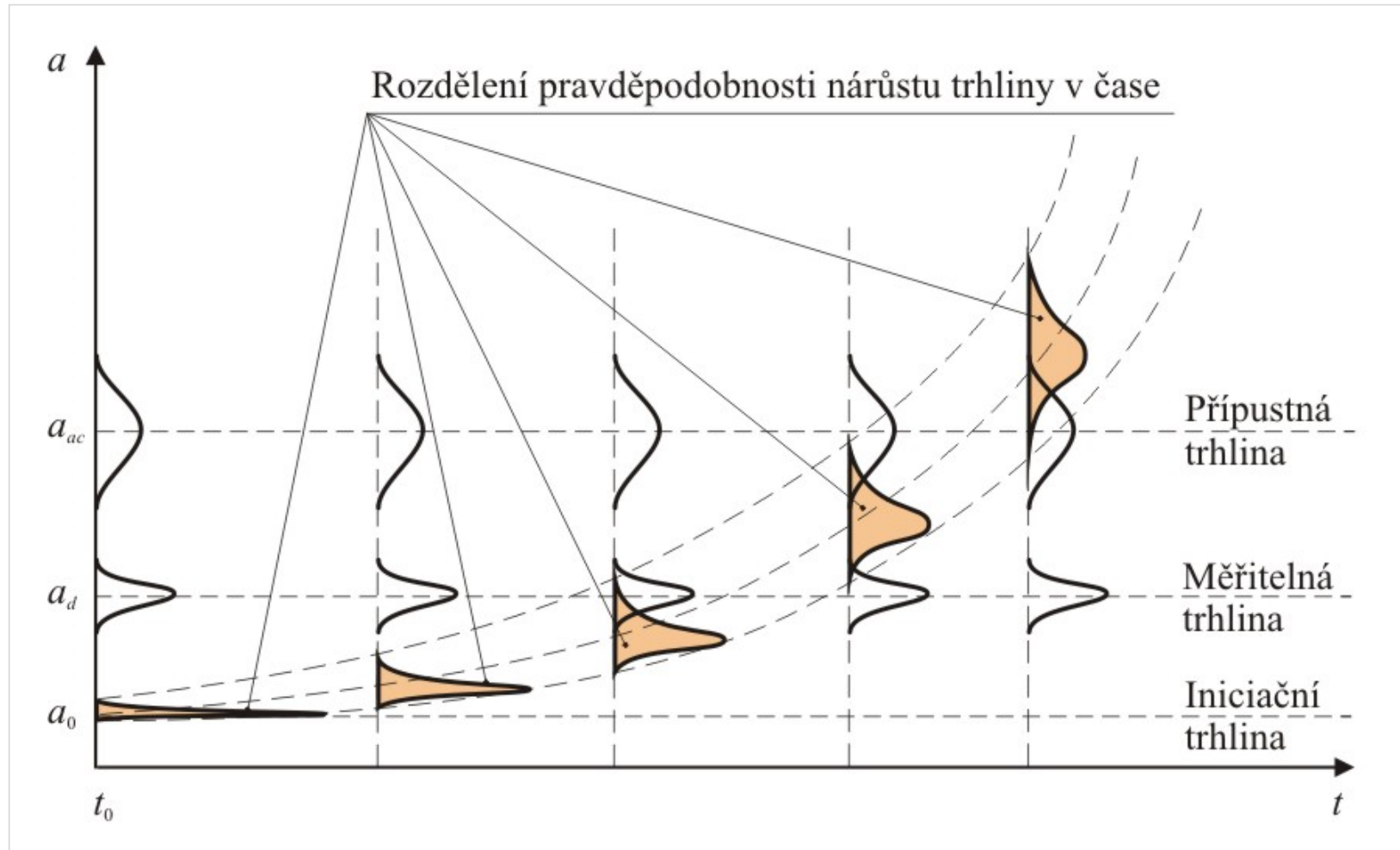
$$G_{fail}(X) = R(a_{ac}) - E(N)$$

$$P_f = P(G_{fail}(X) < 0) = P(R(a_{ac}) - E(N) < 0)$$

kde  $X$  je vektor náhodných fyzikálních vlastností.



# Probabilistic growth of the fatigue crack in time



Pravděpodobnostní nárůst únavové trhliny v čase

# Pravděpodobnost definovaných náhodných jevů

Pravděpodobnost **nezjištění trhliny** v čase  $t$ :  $P(U_{(t)}) = P(a_{(t)} < a_d)$

kde  $a_d$  je minimální **měřitelný** rozměr únavové trhliny.

Pravděpodobnost **zjištění únavové trhliny** v čase  $t$ , délka trhliny  $a_{(t)}$  je **menší než přípustný rozměr** trhliny  $a_{ac}$ :

$$P(D_{(t)}) = P(a_d \leq a_{(t)} < a_{ac})$$

Pravděpodobnost **zjištění únavové trhliny** v čase  $t$ , délka  $a_{(t)}$  je **větší nebo rovna přípustnému rozměru** trhliny  $a_{ac}$ :

$$P(F_{(t)}) = P(a_{(t)} \geq a_{ac})$$

$$P(F_{(t)}) \geq P_d \rightarrow \text{prohlídka konstrukce}$$

Tyto tři náhodné jevy tvoří **úplný prostor náhodných jevů**, které mohou nastat v čase  $t$ . Platí:

$$P(U_{(t)}) + P(D_{(t)}) + P(F_{(t)}) = 1$$

# Bayesova věta

**Bayesova věta** popisuje pravděpodobnost náhodného jevu na základě předchozí znalosti podmínek, které by mohly souviset s vybranou náhodnou událostí.

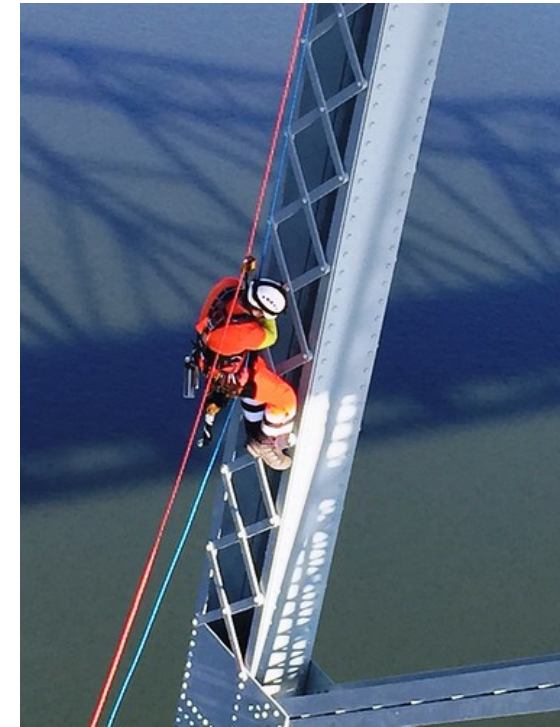
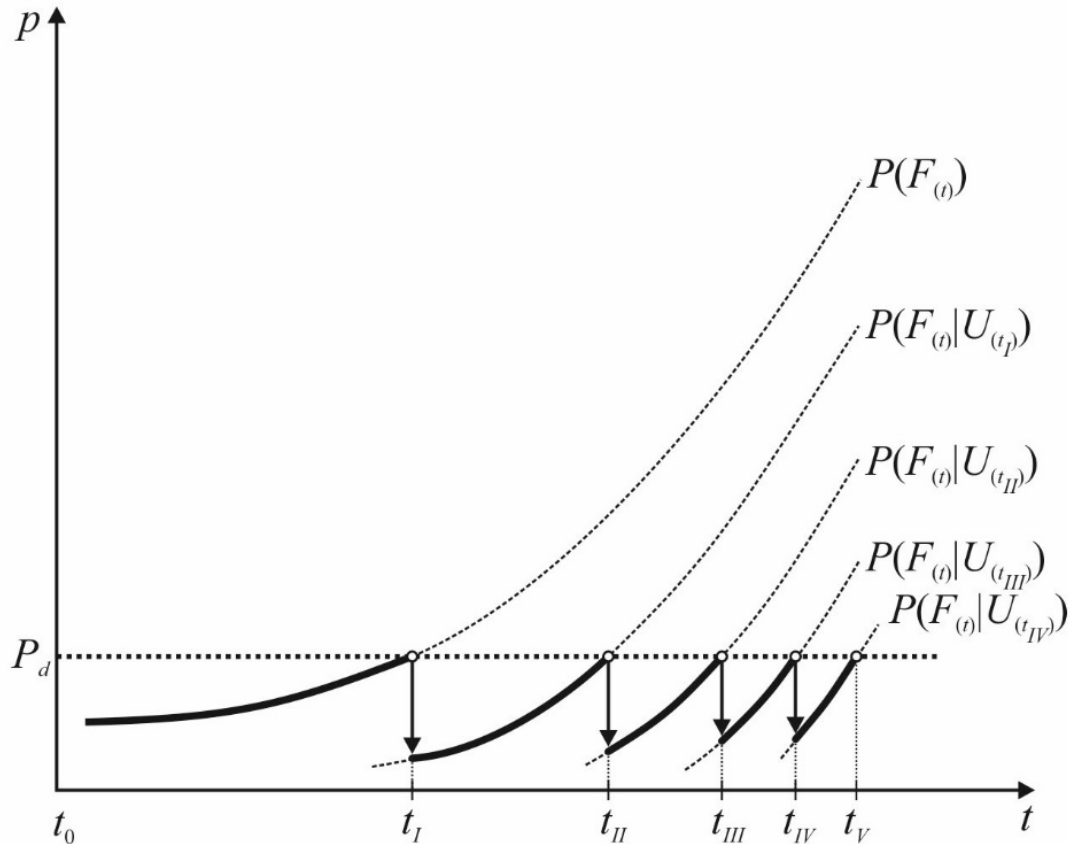
$$P(A|B) = \frac{P(B|A) \cdot P(A)}{P(B)} \quad P(B) > 0$$

Pravděpodobnost náhodného jevu  $F$  v čase  $T$  s ohledem na **výsledky prohlídky konstrukce** v čase  $t_I < T$ :

$$P\left(F_{(T)} \mid U_{(t_I)}\right) = \frac{P\left(F_{(T)}\right) - P\left(F_{(t_I)}\right) - P\left(D_{(t_I)}\right) \cdot P\left(F_{(T)} \mid D_{(t_I)}\right)}{P\left(U_{(t_I)}\right)}$$

$$P\left(F_{(T)} \mid D_{(t_I)}\right) = \frac{P\left(F_{(T)}\right) - P\left(F_{(t_I)}\right) - P\left(U_{(t_I)}\right) \cdot P\left(F_{(T)} \mid U_{(t_I)}\right)}{P\left(D_{(t_I)}\right)}$$

# Návrh systému prohlídek konstrukce



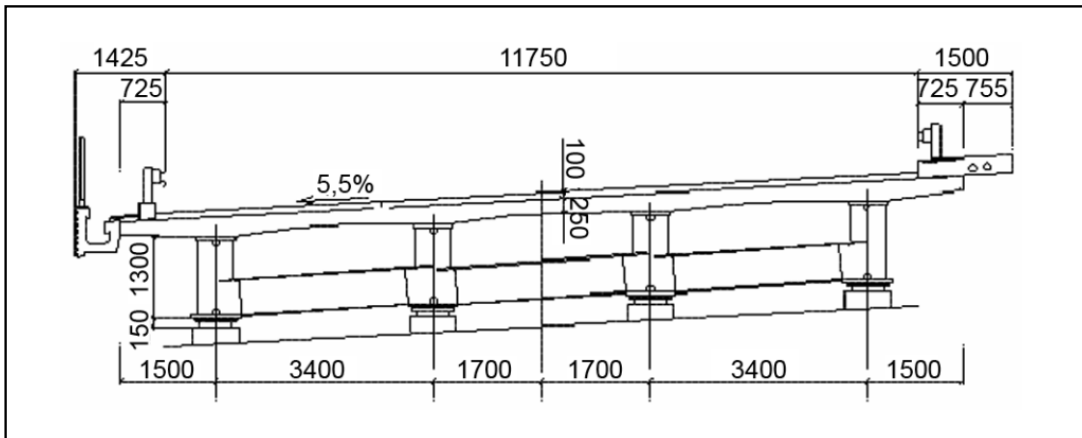
Návrh systému **prohlídek konstrukce** založený na pravděpodobnosti poruchy  $P_f$ , podmíněné pravděpodobnosti a požadované návrhové pravděpodobnosti  $P_d$ .

# Pravděpodobnostní posouzení tažené pásnice



Pohled na posuzovaný  
silniční most,  
foto: doc. Ing. Jaroslav Odrobiňák, PhD.

Detail posuzované tažené  
pásnice,  
foto: doc. Ing. Jaroslav Odrobiňák, PhD.

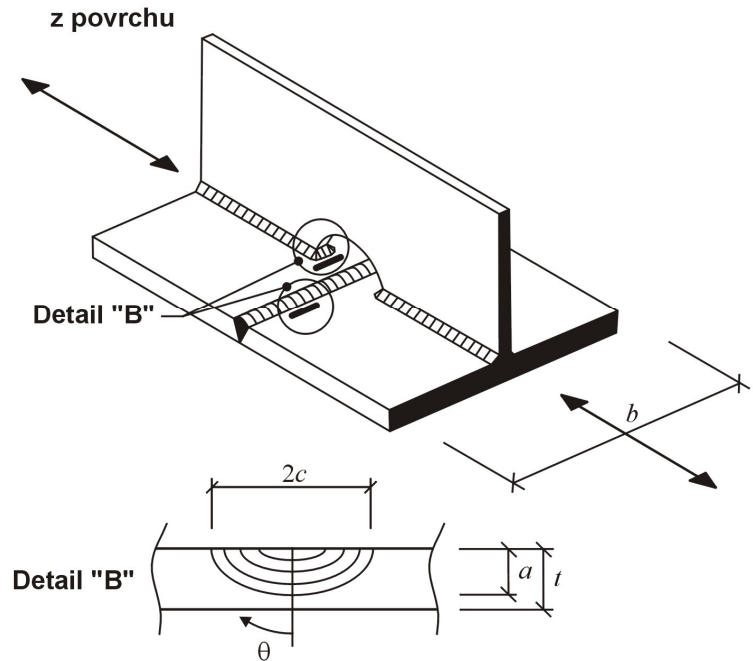
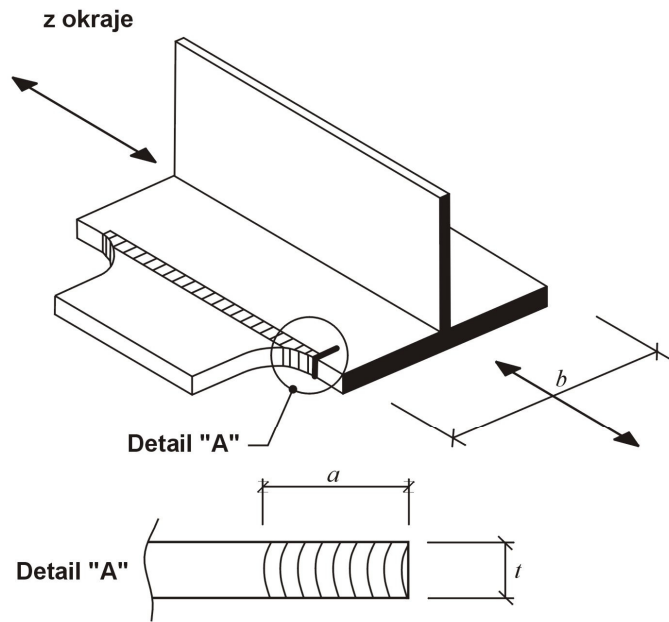


Příčný řez  
dálničním  
mostem



# Lokality koncentrace únavového poškození

Podle polohy iniciační trhliny je možné sledovat v lokalitách koncentrace únavového poškození šíření trhliny **z okraje** nebo **z povrchu**.



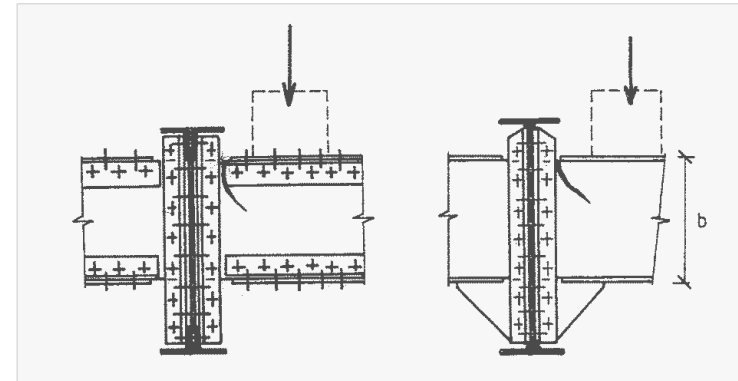
Oslabení pásnice roste u trhliny šířící se z okraje podstatně rychleji než šíření trhliny z povrchu.

# Šíření únavové trhliny z okraje



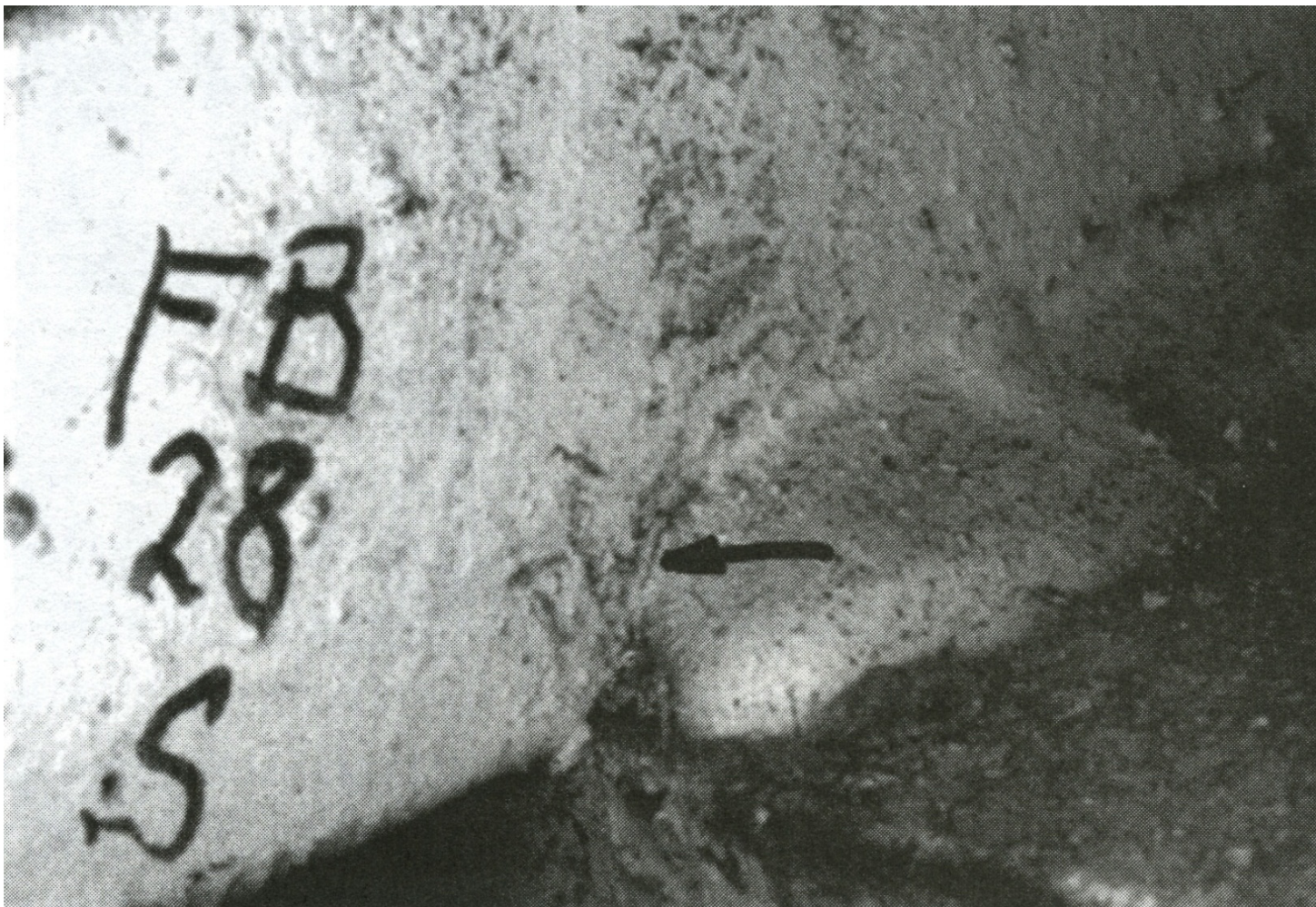
Ocelový železniční most z roku 1929  
u Hodonína,  
foto: prof. Ing. Vladimír Tomica, CSc.

Šíření únavové trhliny z okraje  
ve stojně podélníku





# Šíření únavové trhliny z okraje

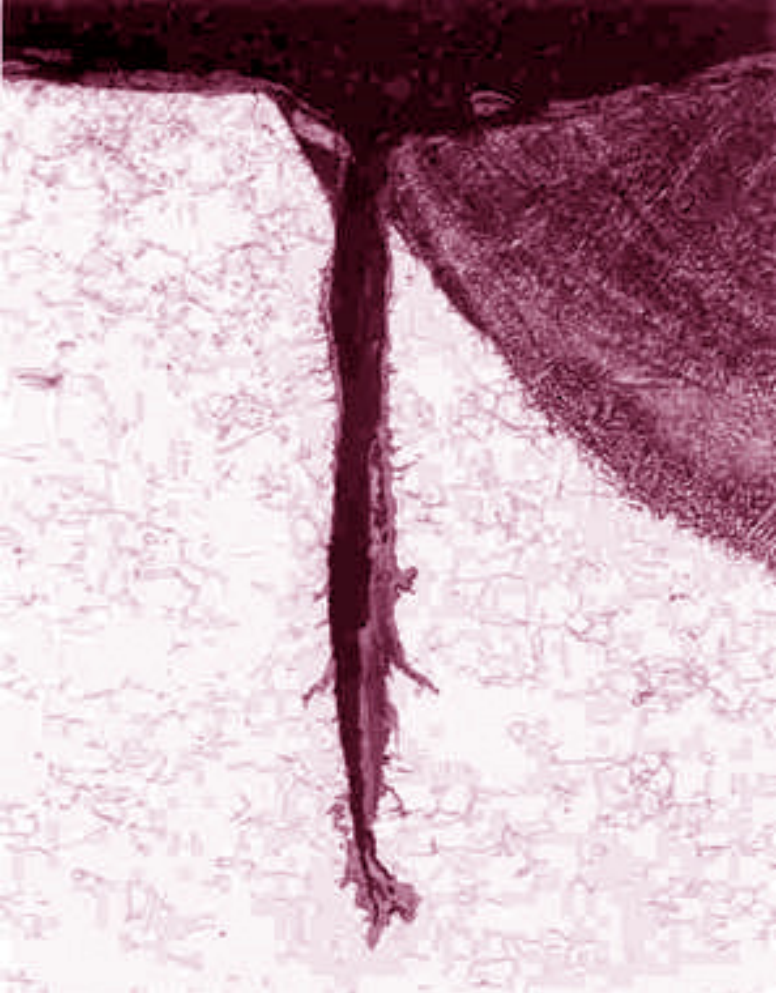


Únavová trhlina z okraje  
ve svaru připojeného  
příčnicku

Fisher a kol.,  
A Fatigue Primer for Structural  
Engineers, 1998.



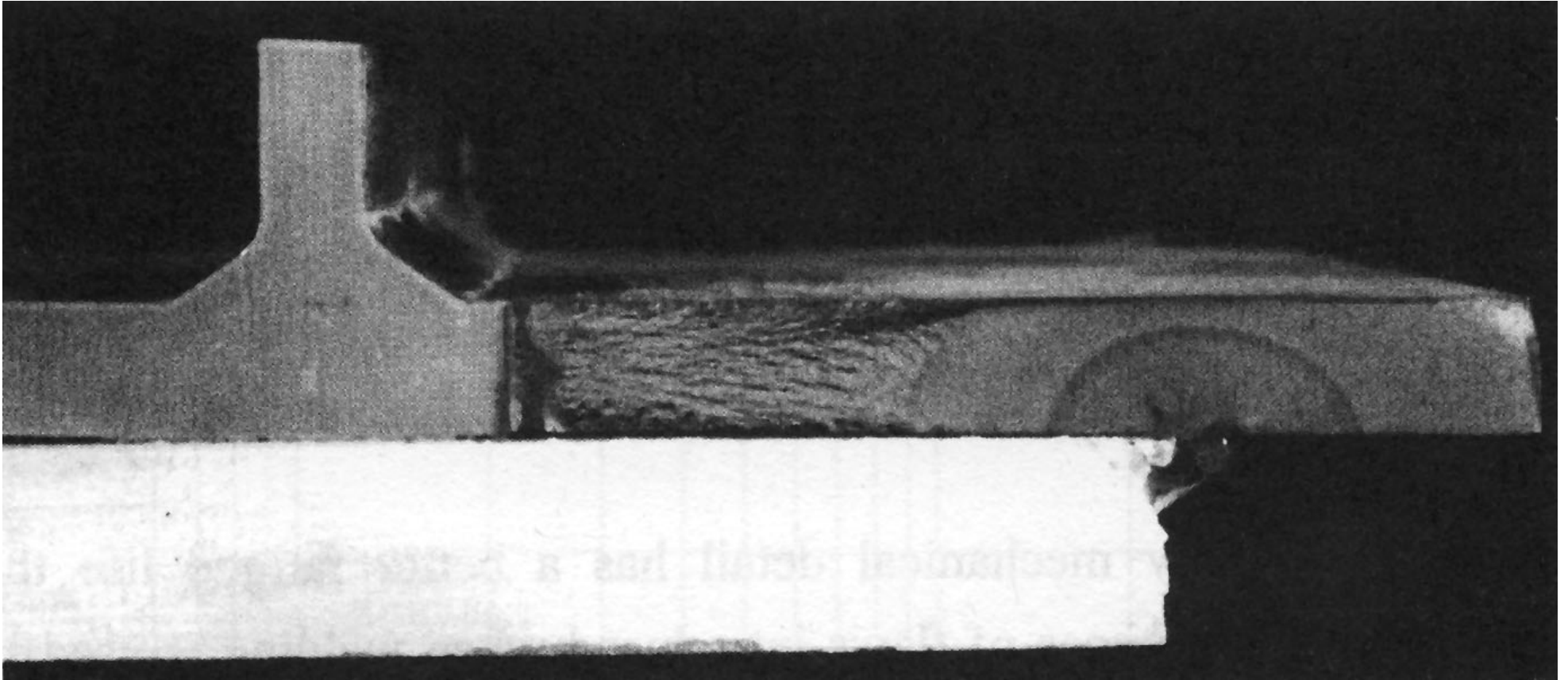
# Šíření únavové trhliny z okraje



Únavová trhlina z okraje, vznikající  
u levého okraje svaru  
(60x zvětšeno)

Corrosion Testing Laboratories, Inc., 2007

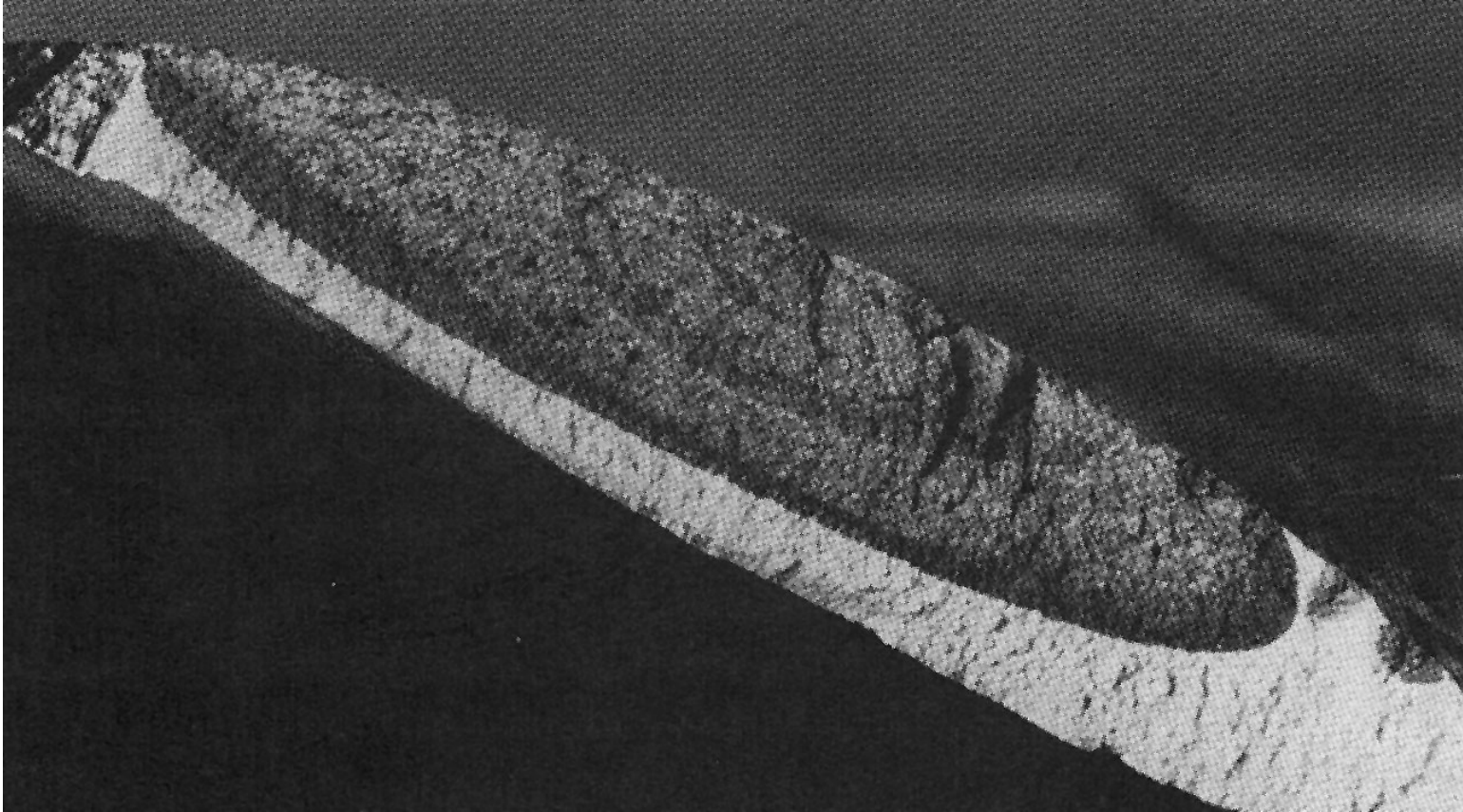
# Šíření únavové trhliny z povrchu



Řez nosným prvkem oslabeného šířící se únavovou trhlinou z povrchu

Fisher J. W. a kol. (1998) A Fatigue Primer for Structural Engineers

# Šíření únavové trhliny z povrchu



Poloeliptická únavová trhlina z povrchu oslabující průřez lodního šroubu

Sanford R. J. (2003) Principles of Fracture Mechanics

# Přehled vstupních veličin

Některé hodnoty vstupních veličin nelze získat měřením, lze je pouze odhadnout.

Přehled **variabilních** vstupních veličin

Veličina	Typ parametrického rozdělení	Parametry	
		Střední hodnota	Směrodatná odchylka
Rozkmit špiček napětí $\Delta\sigma$ [MPa]	Normální	30	3
Celkový počet zatěžovacích cyklů za 1 rok $N$ [-]	Normální	$10^6$	$10^5$
Počáteční rozměr únavové trhliny $a_0$ [mm]	Lognormální	0,2	0,05
Nejmenší měřitelný rozměr trhliny $a_d$ [mm]	Normální	10	0,6
Napětí na mezi kluzu $f_y$ [MPa]	Lognormální	280	28
Nominální napětí v pásnici $\sigma$ [MPa]	Normální	200	20

Veličina	Střední hodnota
Materiálová konstanta $m$	3
Materiálová konstanta $C$ [MPa $m^{m(m/2)+1}$ ]	$2,2 \cdot 10^{-13}$
Šířka pásnice $b_f$ [mm]	400
Tloušťka pásnice $t_f$ [mm]	25

Přehled  
**deterministických**  
vstupních veličin

**Skutečné** hodnoty

**Přibližné** hodnoty



# Program FCProbCalc

Probabilistic calculation of fatigue crack propagation in flange in tension of the cyclic loaded structures (Version 1. 2. 1. 0)

Function Set up Help

Input data Results Inspections

Fatigue crack progression from: the edge

Number of years n starting / step / end values: 0 / 1 / 150

Design value of the limit probability pd: 2.277E-2

Width of the flange in tension bf [ mm ]: 400

Thickness of the flange in tension tf [ mm ]: 25

Constant of material C: 2.2E-13

Constant of material m: 3

Parameter epsilon for bounded parametric histogram: 1E-8

Number of intervals: 100

	Parametric / Raw data	Parametric distribution	Mi	Sigma	N int
Oscillation of stress peaks DeltaS [ MPa ]	Parametric	Normal	30	3	100
Total number of oscillation of stress peaks per year	Parametric	Normal	1E6	1E5	100
Yield stress of material Fy [ MPa ]	Parametric	LogNormal_2P	280	28	100
Nominal stress in flange in tension Sigma [ MPa ]	Parametric	Normal	200	20	100
Initial size of the crack a0 [ mm ]	Parametric	LogNormal_2P	0.2	0.05	98
Detectable size of the crack ad [ mm ]	Parametric	Normal	10	0.6	100

Project: \_\_\_\_\_

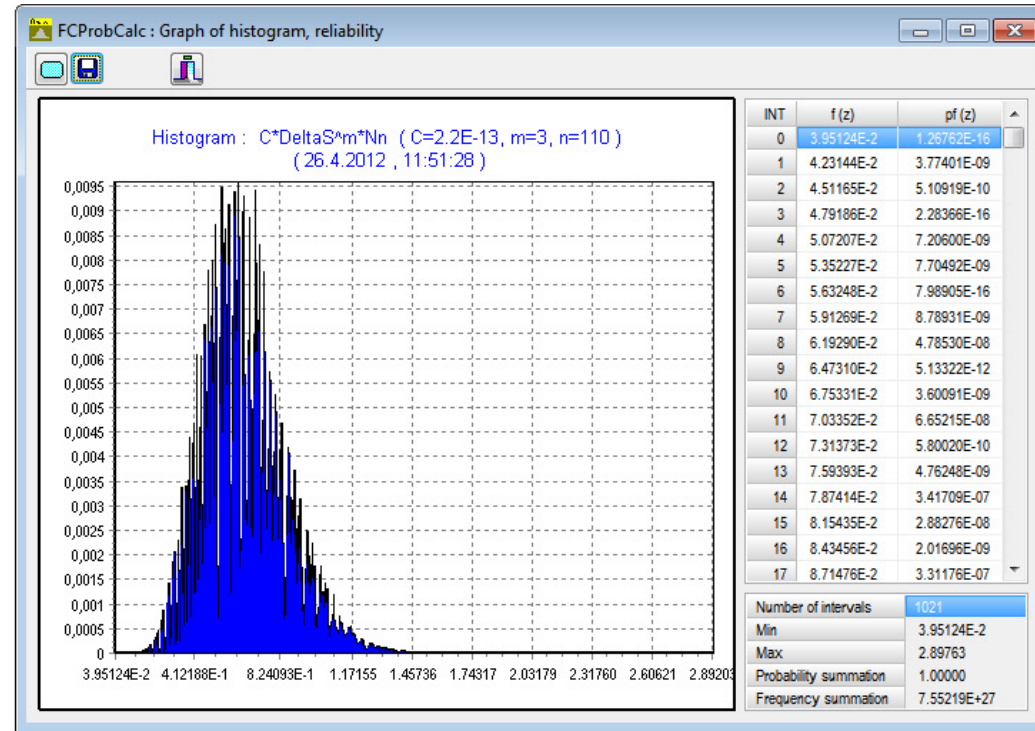
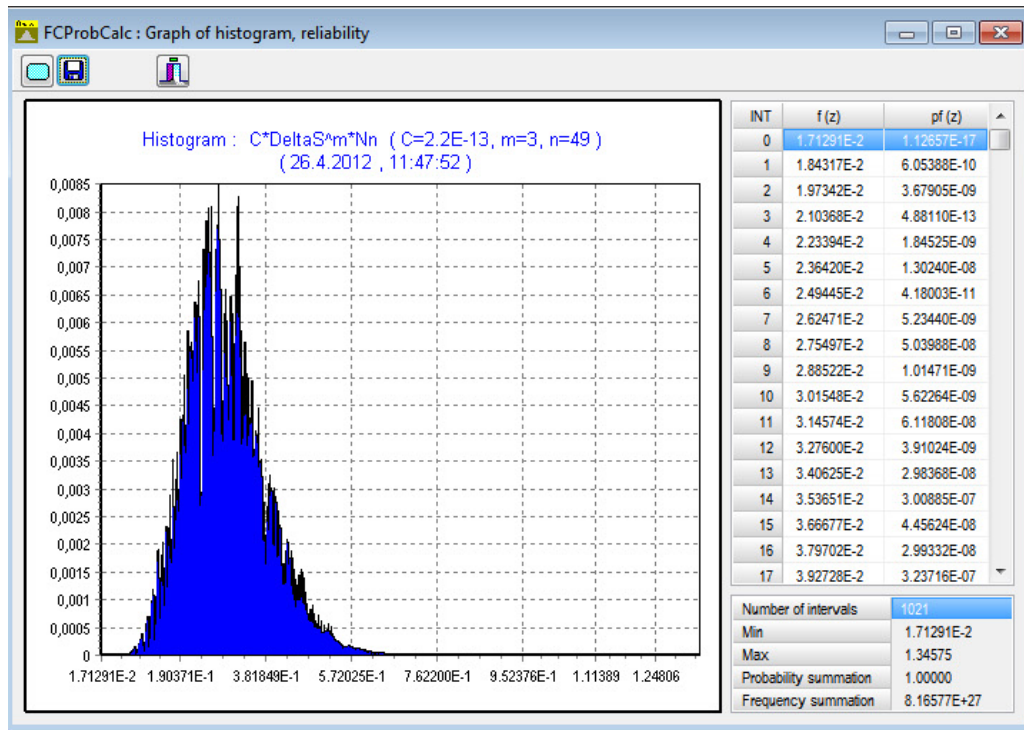
RUN

11:02:14

Pracovní plocha  
programu  
**FCProbCalc**: zadání  
vstupních veličin

# Akumulace účinků zatížení

Určeno pro každý rok provozu mostu pomocí časového kroku **1 rok**.

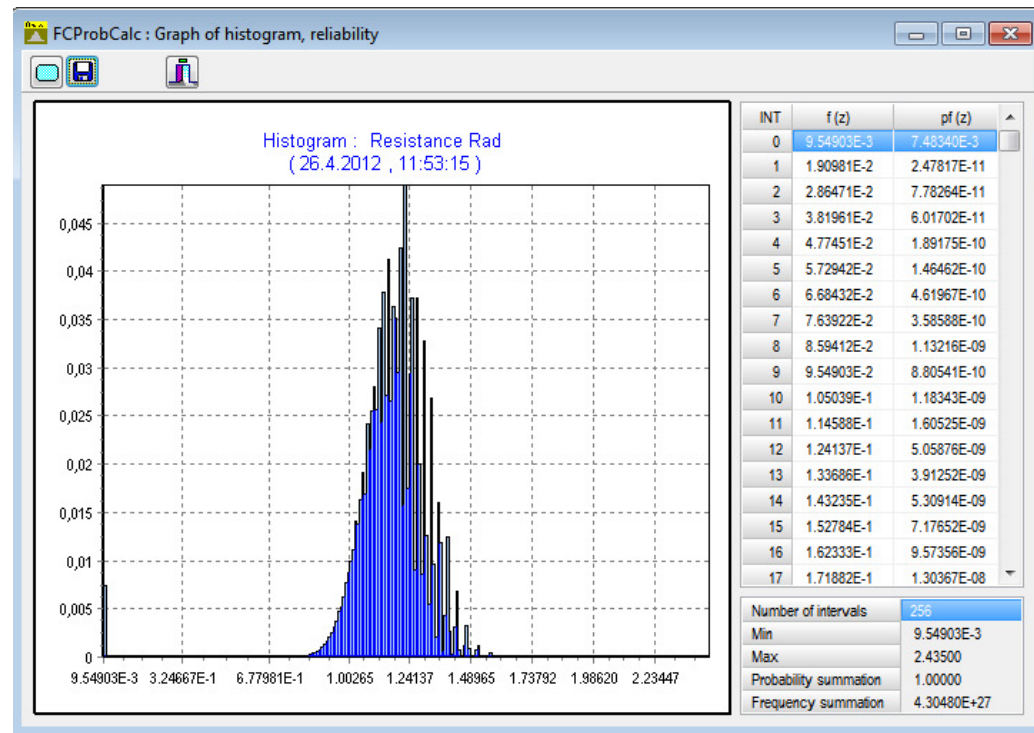
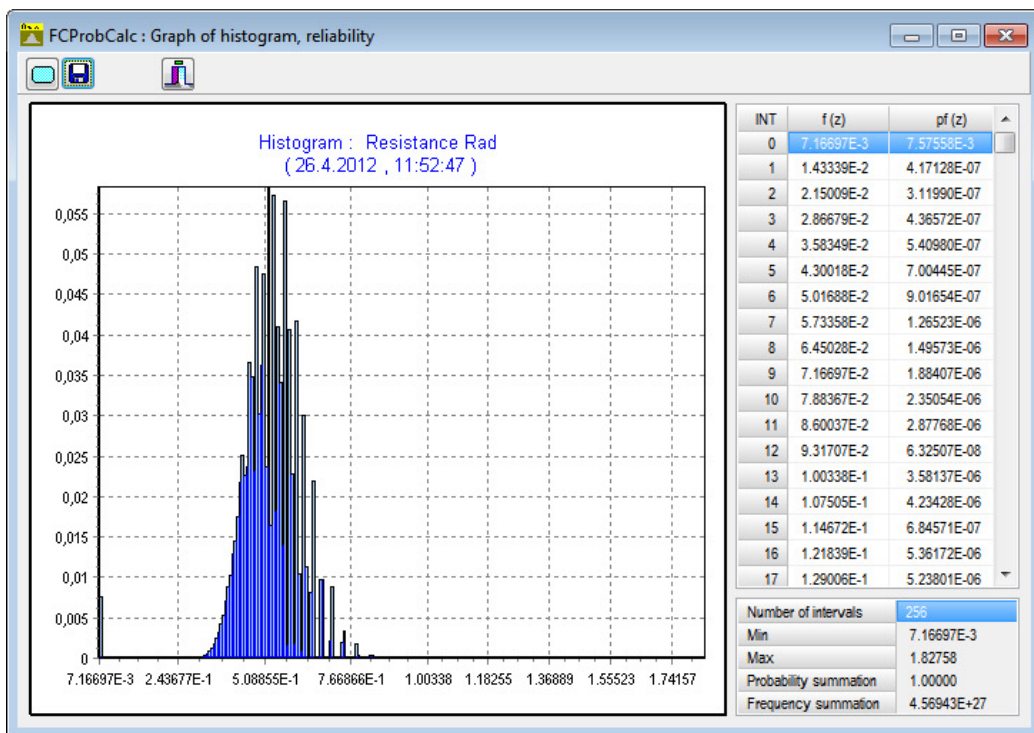


Celkový počet zatěžovacích cyklů za **110 let** provozu konstrukce

Celkový počet zatěžovacích cyklů za **49 let** provozu konstrukce

# Odolnost konstrukce

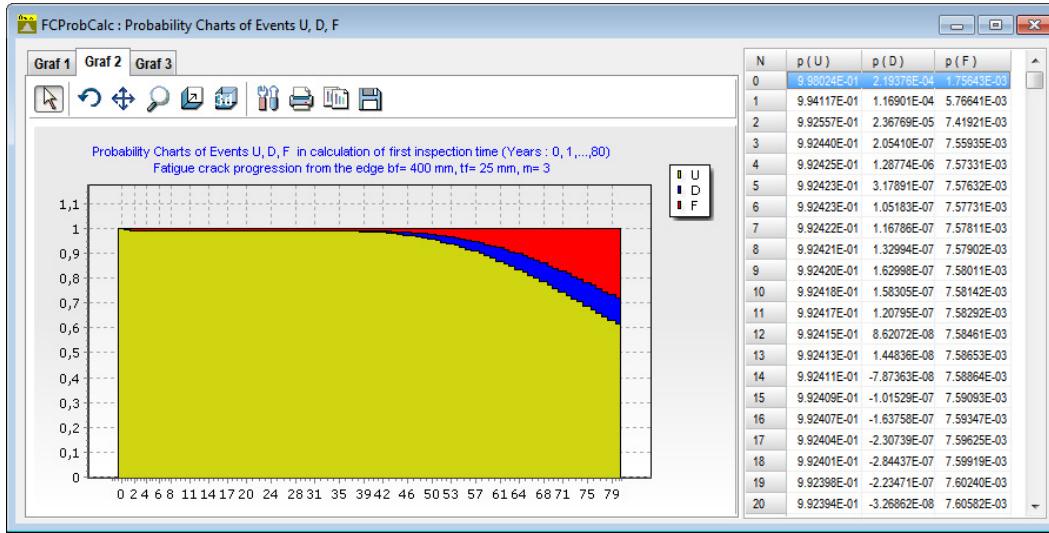
Při výpočtu je možné vybrat z 5 typů metod pro numerickou integraci



Šíření únavové trhliny  
z povrchu

Šíření únavové trhliny  
z okraje

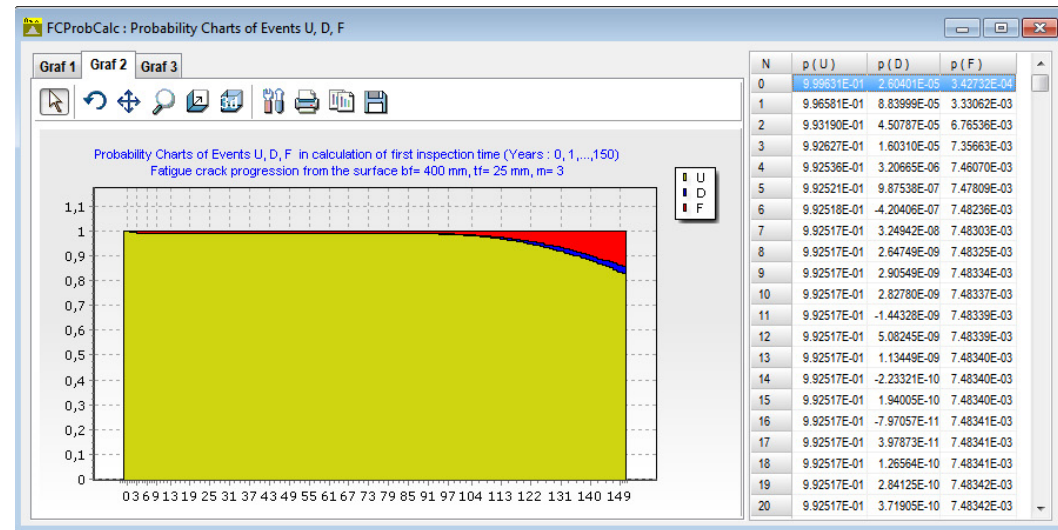
# Pravděpodobnost definovaných náhodných jevů



Únavová trhлина z okraje v době od 0 do 80 let provozu

Únavová trhлина z povrchu v době od 0 do 150 let provozu

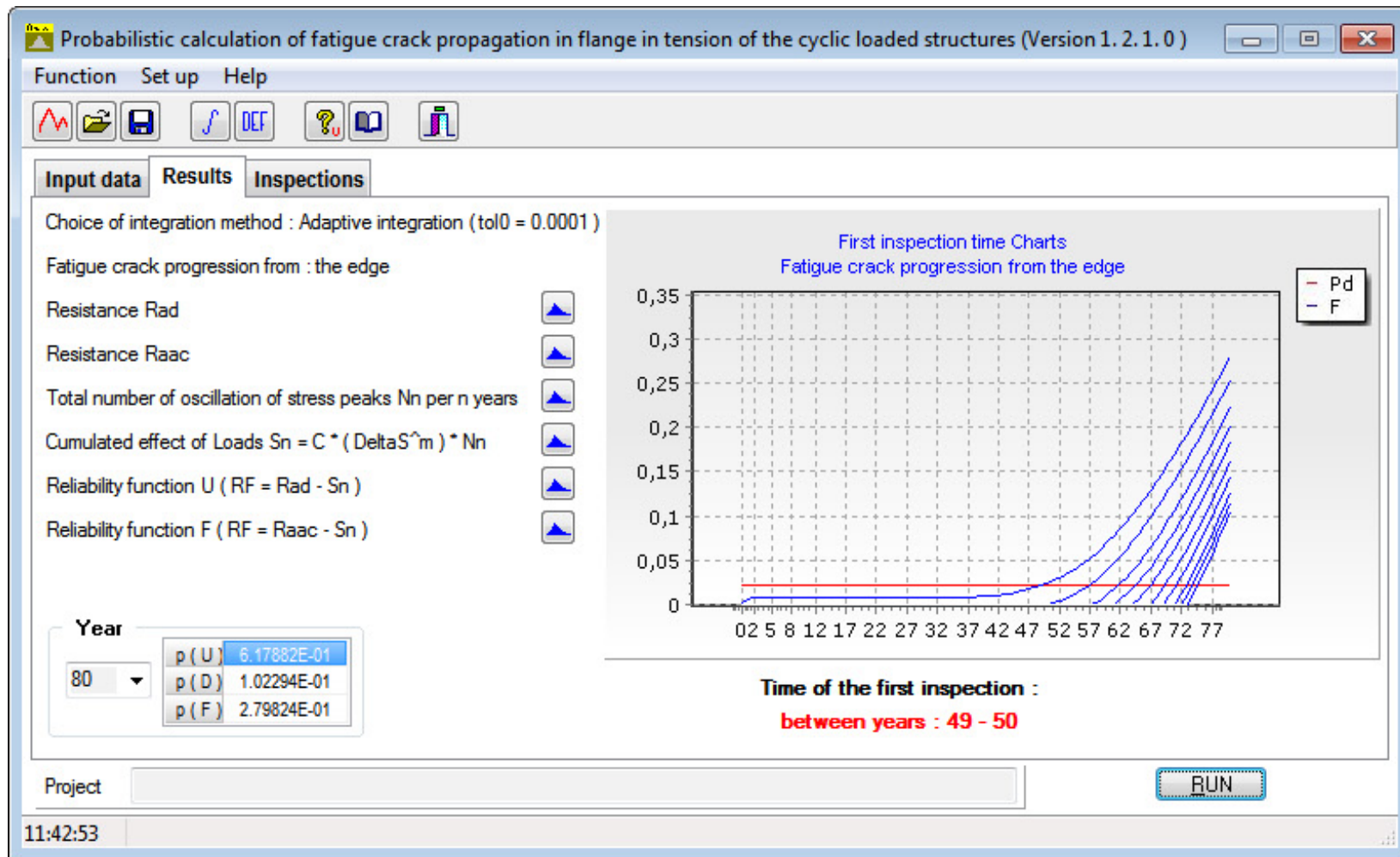
Pravděpodobnost jevů  $U$ ,  $D$  a  $F$  v závislosti na době provozu mostu.





# Návrh systému prohlídek konstrukce

## Únavová trhлина z okraje

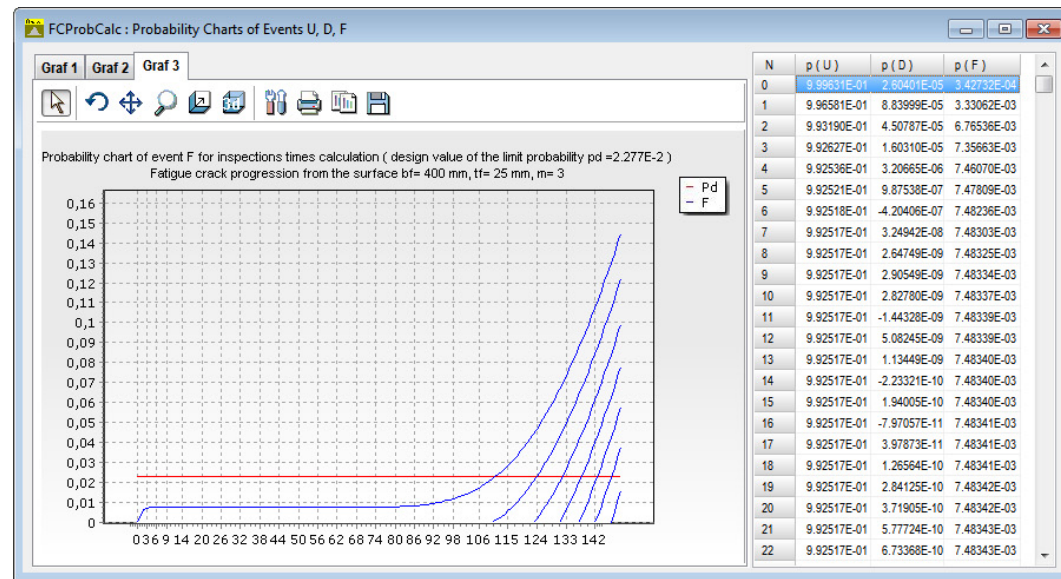
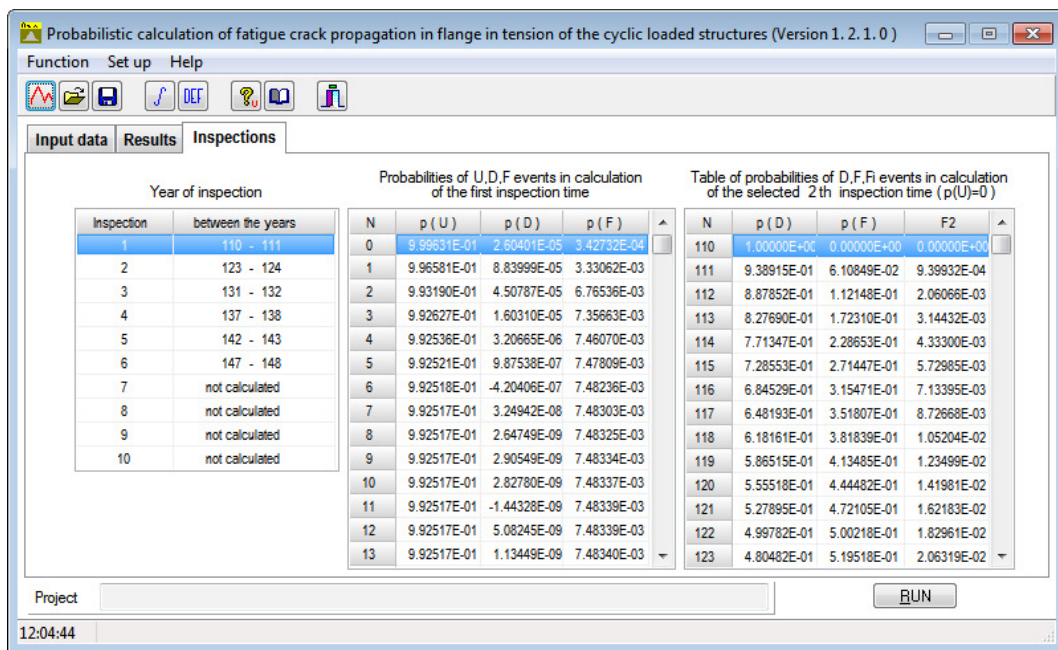


Pracovní plocha programu **FCProbCalc**

# Návrh systému prohlídek konstrukce

## Únavová trhlina z povrchu

Výsledné pravděpodobnosti jevů i návrh doby prohlídek konstrukce

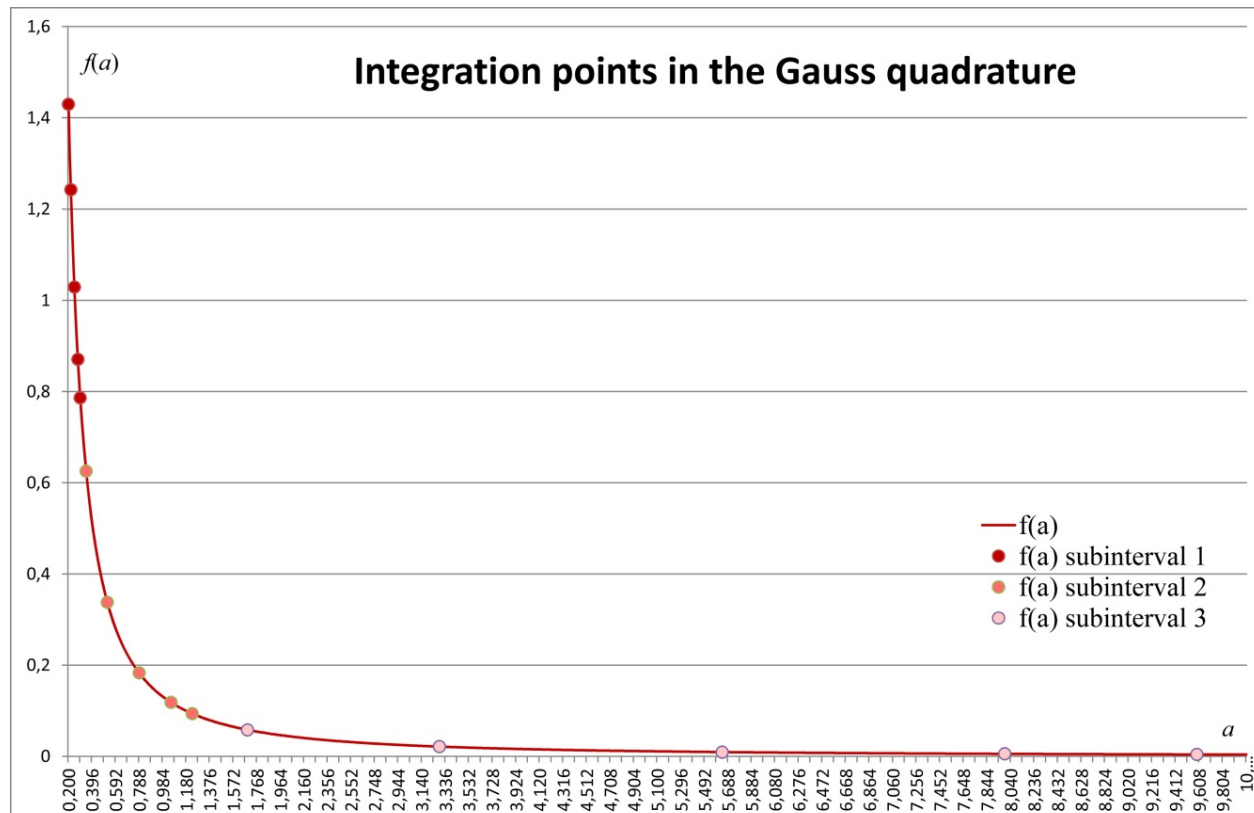


Závislost pravděpodobnosti poruchy  $P_f$  na délce doby provozu konstrukce (adaptivní metoda numerické integrace se vstupním parametrem  $tol_0 = 1 \cdot 10^{-4}$ )

# Numerická integrace

1. **Lichoběžníková metoda** (implicitně celkový počet diferencí 1000)
2. **Simpsonova metoda** (implicitně celkový počet diferencí 1000)
3. **Rombergova metoda**  
(implicitně parameter  $n = 10$ )
4. **Adaptive metoda** (implicitní hodnota tolerované nepřesnosti  $tol_0 = 10^{-4}$ )
5. **Gaussova kvadratura**

Integrovaná funkce s 15 zvolenými integračními body **Gaussovy kvadratury**

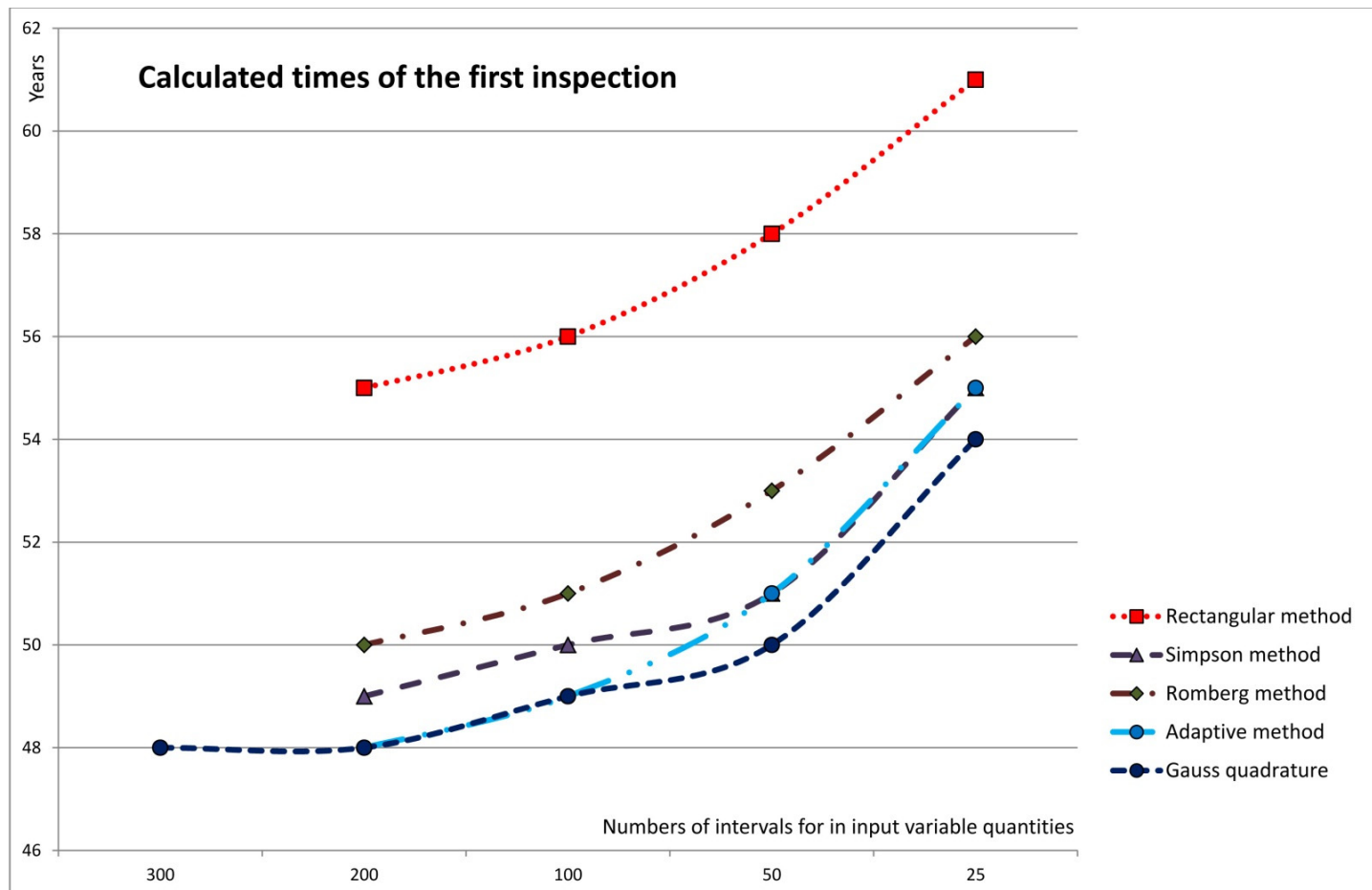


# Numerická integrace

Srovnání výsledného času 1. prohlídky

Únavová trhлина z okraje

Vypočtená doba 1. prohlídky mostu se zaměřením na použitou metodu numerické integrace a počet intervalů v histogramech vstupních náhodných veličin

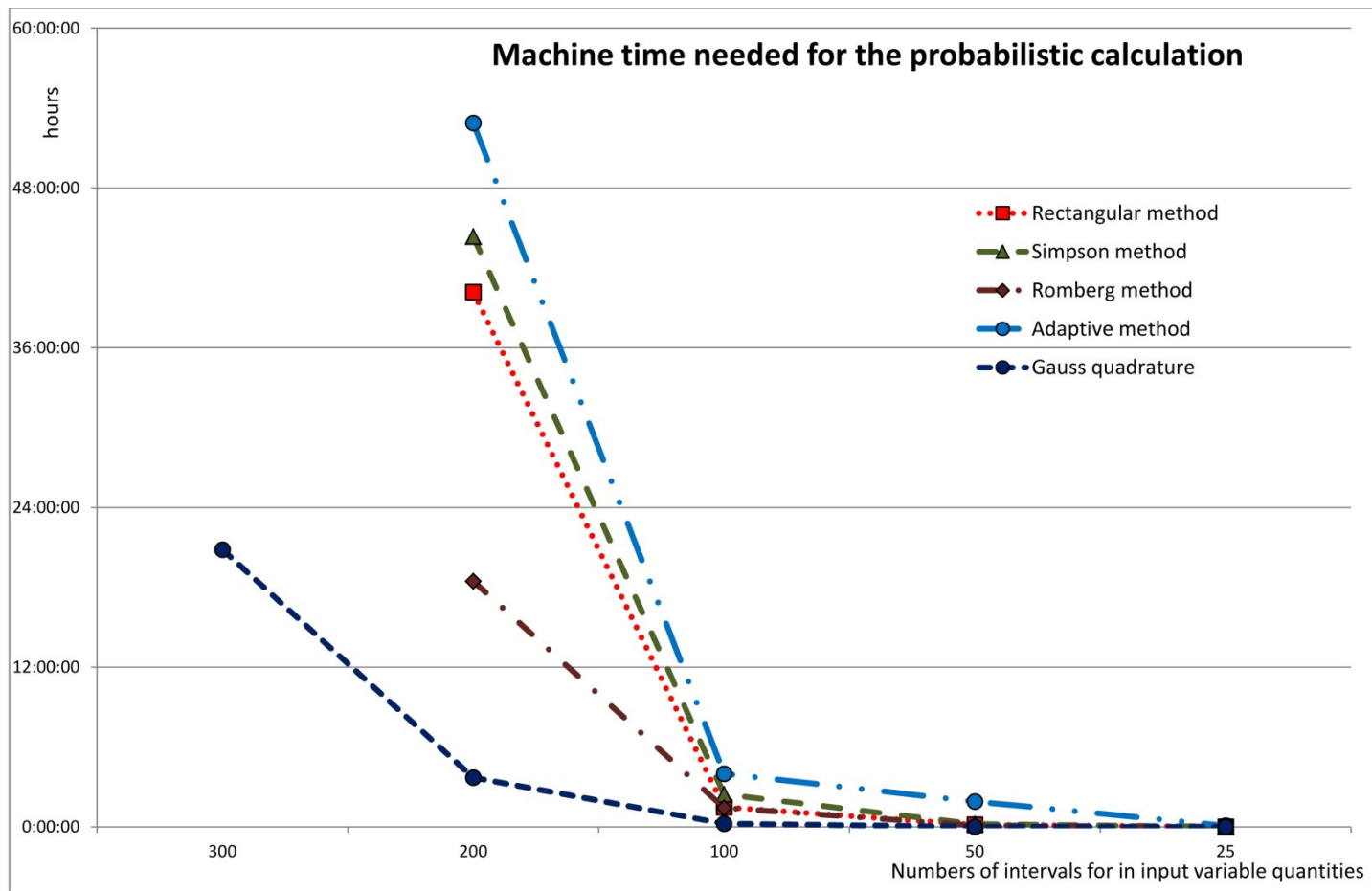


# Numerická integrace

Doba výpočtu

Únavová trhlina z okraje

**Výpočetní čas** pro každý typ numerické integrace v závislosti na **počtu intervalů** v histogramech vstupních náhodných veličin

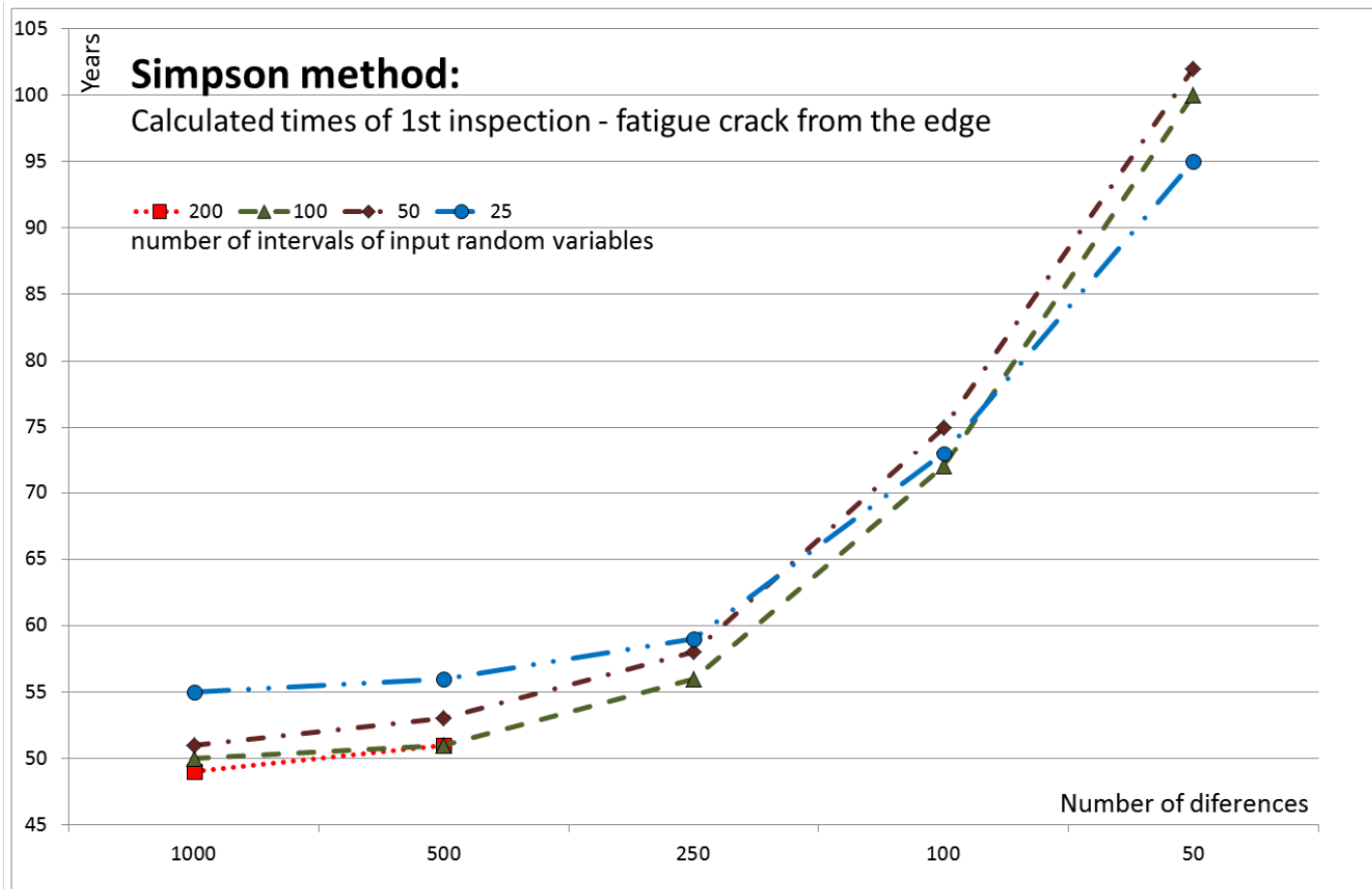


# Numerická integrace

Srovnání výsledného času 1. prohlídky

Únavová trhlina z okraje

Vypočtená doba 1. prohlídky mostu při použití Simpsonovy metody numerické integrace se zaměřením na počet intervalů v histogramech vstupních náhodných veličin a zadaný počet diferencí

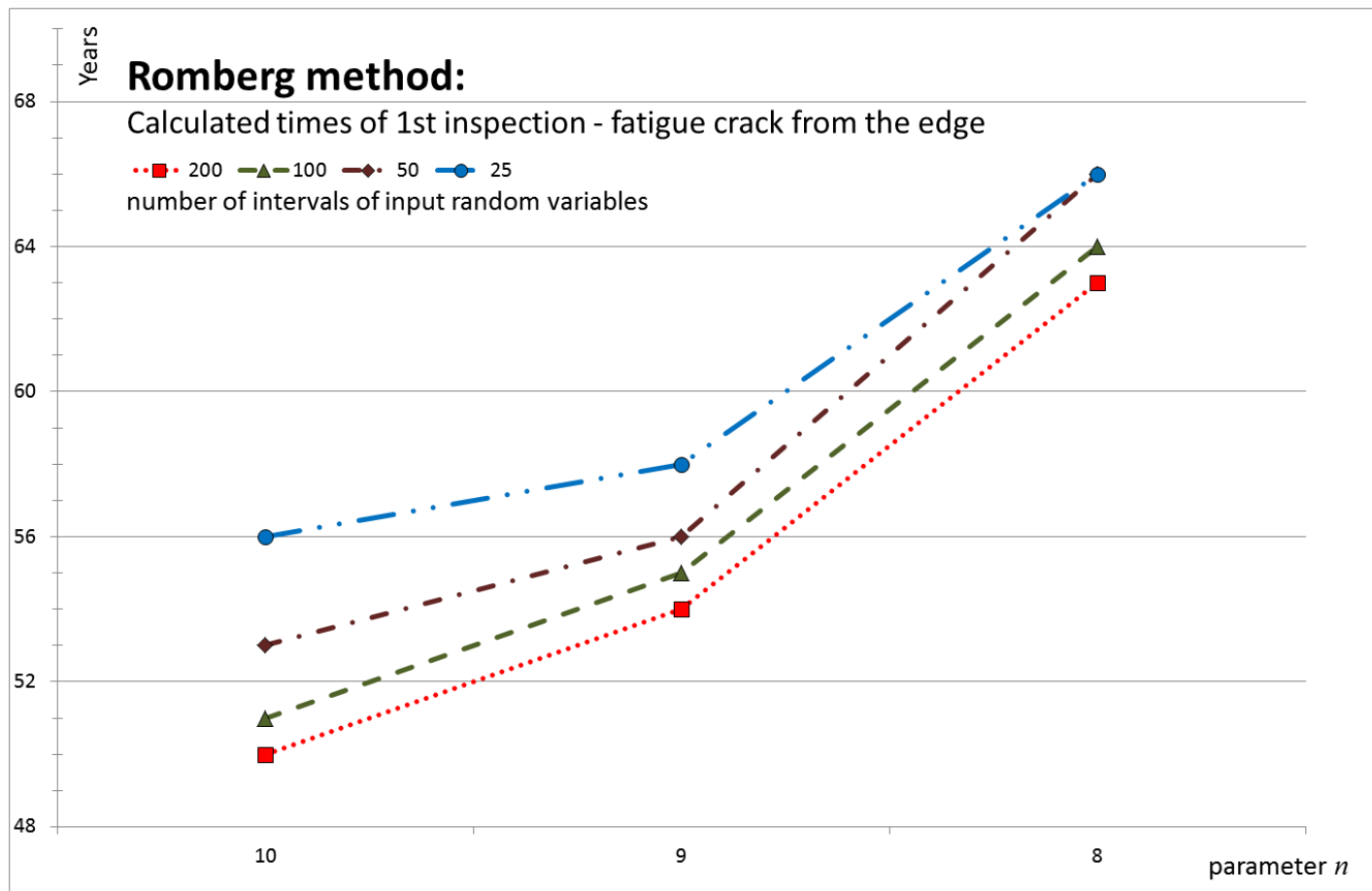


# Numerická integrace

Srovnání výsledného času 1. prohlídky

Únavová trhлина z okraje

Vypočtená doba 1. prohlídky mostu při použití **Rombergovy metody** numerické integrace se zaměřením na **počet intervalů** v histogramech vstupních náhodných veličin a zadaný **parametr  $n$**



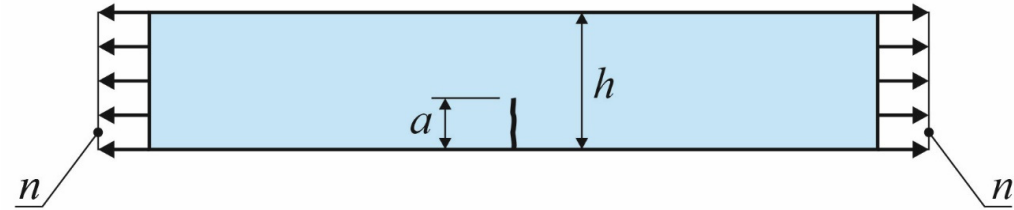
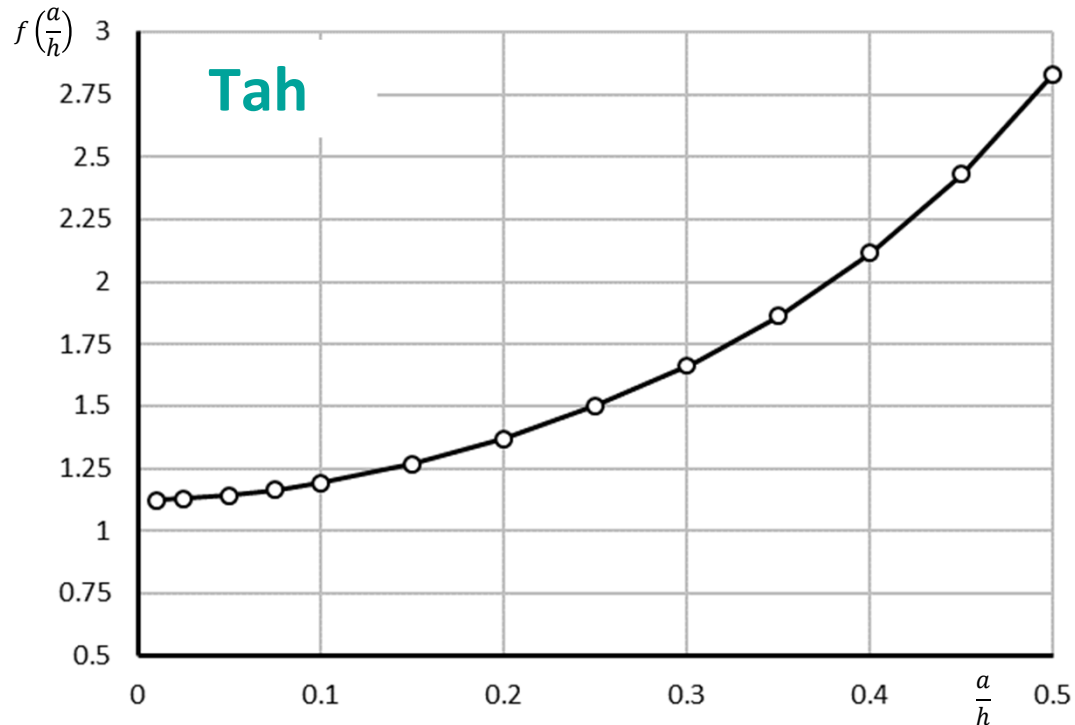


# Kalibrační funkce pro krátké trhliny z okraje

Kalibrační funkce pro krátké únavové trhliny z okraje při zvoleném zatížení:

$w$  je **šířka** obdélníhového průřezu,

$f_y$  je **napětí na mezi kluzu**.



$$\Delta\sigma = n = \frac{N}{w \cdot h}$$

$$N = n \cdot w \cdot h$$

$$a_{ac} = h - \frac{N}{w \cdot f_y}$$

$$f\left(\frac{a}{h}\right)_{tension} = +1,1082 + 0,6956 \cdot \left(\frac{a}{h}\right) + 1,2486 \cdot \left(\frac{a}{h}\right)^2 + 8,415 \cdot \left(\frac{a}{h}\right)^3$$

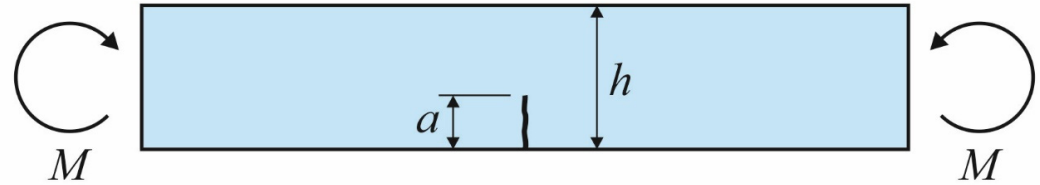
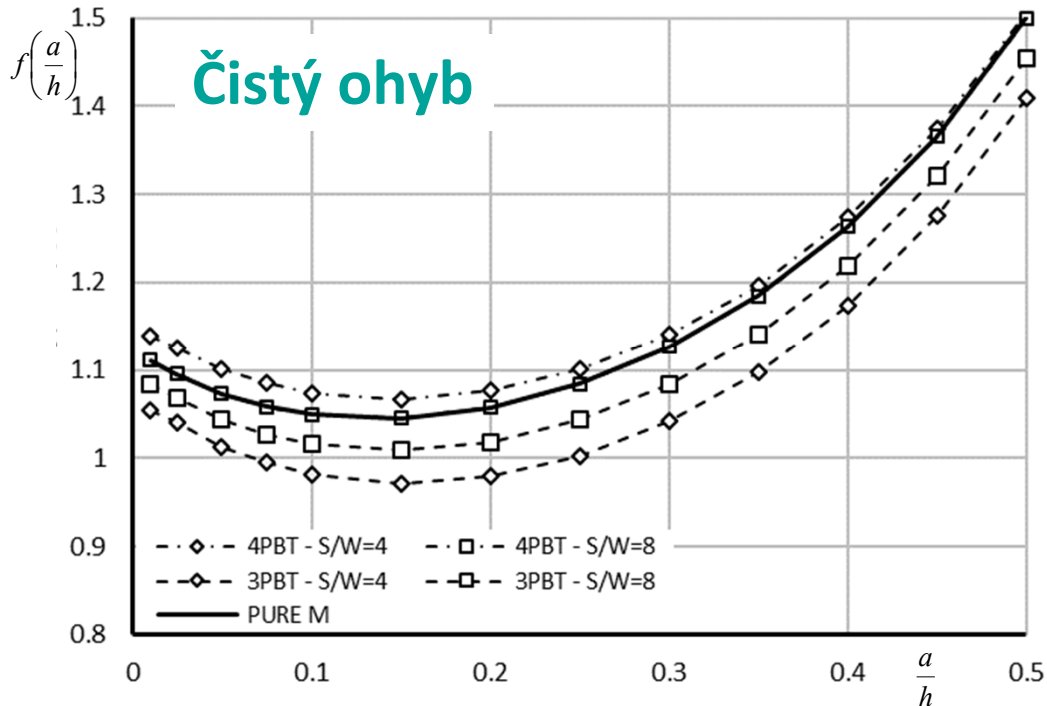


# Kalibrační funkce pro krátké trhliny z okraje

Kalibrační funkce pro krátké únavové trhliny z okraje při zvoleném zatížení:

$w$  je šířka obdélníhového průřezu,

$f_y$  je napětí na mezi kluzu.



$$\Delta\sigma = \frac{6 \cdot M}{w \cdot h^2}$$

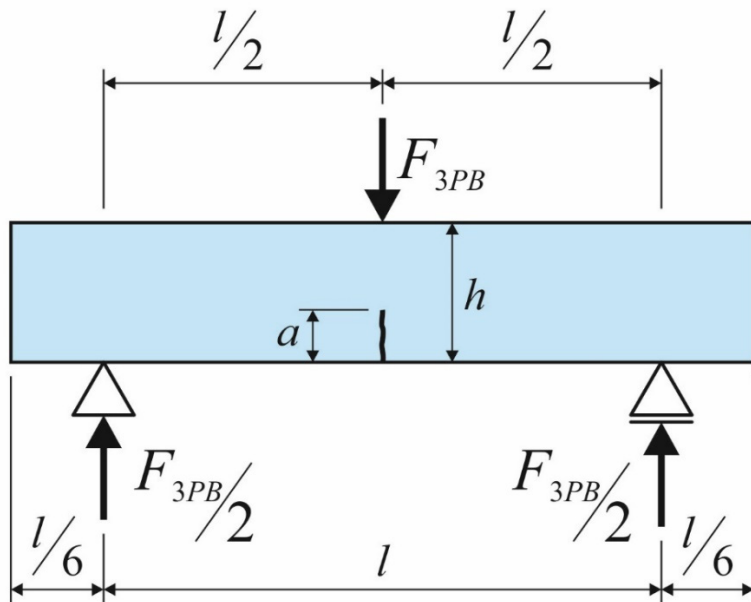
$$a_{ac} = h - \sqrt{\frac{6 \cdot M}{w \cdot f_y}}$$

$$f\left(\frac{a}{h}\right)_{pure} = +1,114 - 0,8975 \cdot \left(\frac{a}{h}\right) + 2,752 \cdot \left(\frac{a}{h}\right)^2 - 1,1323 \cdot \left(\frac{a}{h}\right)^3$$

# Kalibrační funkce pro krátké trhliny z okraje

Kalibrační funkce pro krátké únavové trhliny z okraje při zvoleném zatížení:

## Tříbodový ohyb



$$\Delta\sigma = \frac{3 \cdot F_{3PB} \cdot l}{2 \cdot w \cdot h^2}$$

$$a_{ac} = h - \sqrt{\frac{3 \cdot F_{3PB} \cdot l}{2 \cdot w \cdot f_y}}$$

$$f\left(\frac{a}{h}\right)_{3PBT \frac{l}{h}=2} = +1,0259 - 1,4659 \cdot \left(\frac{a}{h}\right) + 4,9318 \cdot \left(\frac{a}{h}\right)^2 - 2,4637 \cdot \left(\frac{a}{h}\right)^3$$

$$f\left(\frac{a}{h}\right)_{3PBT \frac{l}{h}=4} = +1,0691 - 1,3496 \cdot \left(\frac{a}{h}\right) + 5,1865 \cdot \left(\frac{a}{h}\right)^2 - 3,3509 \cdot \left(\frac{a}{h}\right)^3$$

$$f\left(\frac{a}{h}\right)_{3PBT \frac{l}{h}=8} = +1,0963 - 1,3052 \cdot \left(\frac{a}{h}\right) + 5,2829 \cdot \left(\frac{a}{h}\right)^2 - 3,5972 \cdot \left(\frac{a}{h}\right)^3$$

$$f\left(\frac{a}{h}\right)_{3PBT \frac{l}{h}=16} = +1,1079 - 1,2328 \cdot \left(\frac{a}{h}\right) + 5,0551 \cdot \left(\frac{a}{h}\right)^2 - 3,2837 \cdot \left(\frac{a}{h}\right)^3$$

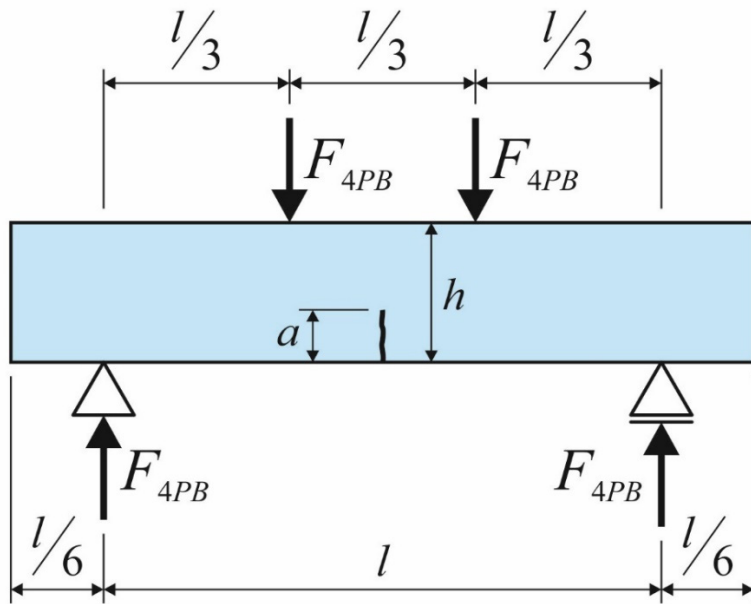
$$f\left(\frac{a}{h}\right)_{3PBT \frac{l}{h}=80} = +1,118 - 1,1964 \cdot \left(\frac{a}{h}\right) + 5,0176 \cdot \left(\frac{a}{h}\right)^2 - 3,3127 \cdot \left(\frac{a}{h}\right)^3$$

$w$  je **šířka** obdélníhového průřezu,  
 $f_y$  je **napětí na mezi kluzu**.

# Kalibrační funkce pro krátké trhliny z okraje

Kalibrační funkce pro krátké únavové trhliny z okraje při zvoleném zatížení:

## Čtyřbodový ohyb



$$\Delta\sigma = \frac{2 \cdot F_{4PB} \cdot l}{w \cdot h^2}$$

$$a_{ac} = h - \sqrt{\frac{2 \cdot F_{4PB} \cdot l}{w \cdot f_y}}$$

$$f\left(\frac{a}{h}\right)_{4PBT \frac{l}{h}=2} = +1,2505 - 1,7928 \cdot \left(\frac{a}{h}\right) + 6,3295 \cdot \left(\frac{a}{h}\right)^2 - 4,4492 \cdot \left(\frac{a}{h}\right)^3$$

$$f\left(\frac{a}{h}\right)_{4PBT \frac{l}{h}=4} = +1,1535 - 1,2847 \cdot \left(\frac{a}{h}\right) + 5,1957 \cdot \left(\frac{a}{h}\right)^2 - 3,5502 \cdot \left(\frac{a}{h}\right)^3$$

$$f\left(\frac{a}{h}\right)_{4PBT \frac{l}{h}=8} = +1,1202 - 1,1634 \cdot \left(\frac{a}{h}\right) + 4,8443 \cdot \left(\frac{a}{h}\right)^2 - 3,0085 \cdot \left(\frac{a}{h}\right)^3$$

$$f\left(\frac{a}{h}\right)_{4PBT \frac{l}{h}=16} = +1,1222 - 1,2277 \cdot \left(\frac{a}{h}\right) + 5,2654 \cdot \left(\frac{a}{h}\right)^2 - 3,7958 \cdot \left(\frac{a}{h}\right)^3$$

$$f\left(\frac{a}{h}\right)_{4PBT \frac{l}{h}=80} = +1,1179 - 1,1235 \cdot \left(\frac{a}{h}\right) + 4,5993 \cdot \left(\frac{a}{h}\right)^2 - 2,5619 \cdot \left(\frac{a}{h}\right)^3$$

$w$  je **šířka** obdélníhového průřezu,  
 $f_y$  je **napětí na mezi kluzu**.

# Přehled vstupních veličin

Veličina	Typ parametrického rozdělení	Parametry	
		Střední hodnota	Směrodatná odchylka
Celkový počet zatěžovacích cyklů za 1 rok $N$	Normal	$10^6$	$10^5$
Počáteční rozměr únavové trhliny $a_0$	Lognormal	0,2 mm	0,05 mm
Nejmenší měřitelný rozměr únavové trhliny $a_d$	Normal	10 mm	0,6 mm
Napětí na mezi kluzu $f_y$	Lognormal	280 MPa	28 MPa
Zatěžovací síla při testu tříbodovým ohybem $F_{3PB}$	Normal	6 kN	0,6 kN

Veličina	Střední hodnota
Materiálová konstanta $m$	3
Materiálová konstanta $C$	$2,2 \cdot 10^{-13} \text{ MPa}^m \text{ m}^{(m/2)+1}$
Výška obdélníkového průřezu $h$	0,1 m
Výška obdélníkového průřezu $b$	0,01 m
Rozpětí nosného prvku $l$	0,4 m
Návrhová pravděpodobnost $P_d$	0,02277 ( $\beta_d = 2$ )

Variabilní vstupní veličiny

Tříbodový ohyb

Deterministické vstupní veličiny

# Přehled vstupních veličin

Některé hodnoty vstupních veličin nelze získat měřením, lze je pouze odhadnout.

Přehled **variabilních** vstupních veličin

Veličina	Typ parametrického rozdělení	Parametry	
		Střední hodnota	Směrodatná odchylka
Rozkmit špiček napětí $\Delta\sigma$ [MPa]	Normální	30	3
Celkový počet zatěžovacích cyklů za 1 rok $N$ [-]	Normální	$10^6$	$10^5$
Počáteční rozměr únavové trhliny $a_0$ [mm]	Lognormální	0,2	0,05
Nejmenší měřitelný rozměr trhliny $a_d$ [mm]	Normální	10	0,6
Napětí na mezi kluzu $f_y$ [MPa]	Lognormální	280	28
Nominální napětí v pásnici $\sigma$ [MPa]	Normální	200	20

Veličina	Střední hodnota
Materiálová konstanta $m$	3
Materiálová konstanta $C$ [MPa $m^{m(m/2)+1}$ ]	$2,2 \cdot 10^{-13}$
Šířka pásnice $b_f$ [mm]	400
Tloušťka pásnice $t_f$ [mm]	25

Přehled  
**deterministických**  
vstupních veličin

**Skutečné** hodnoty

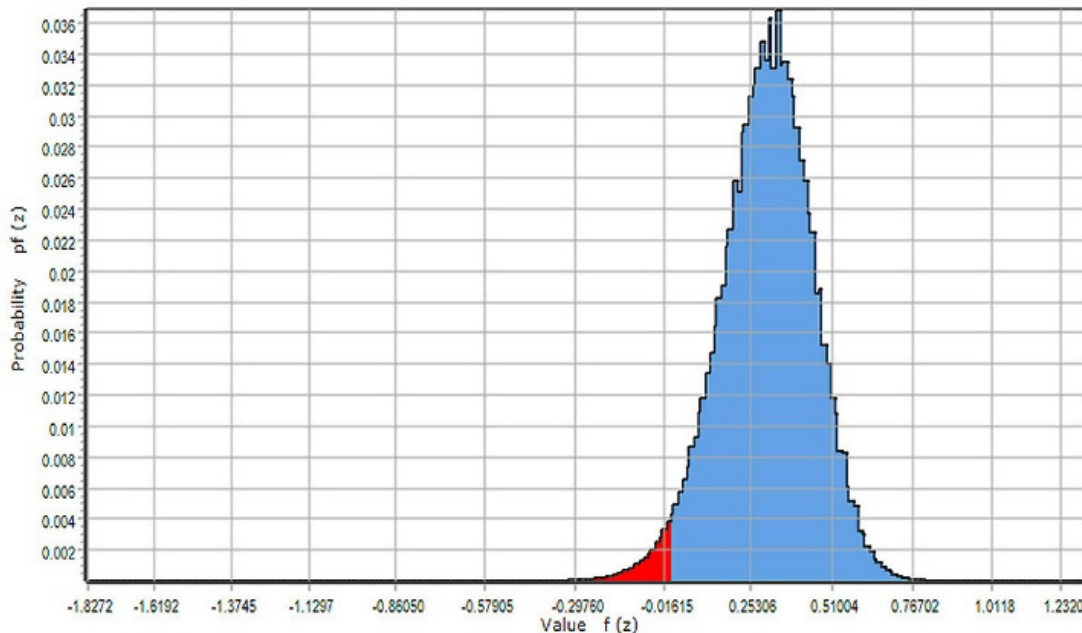
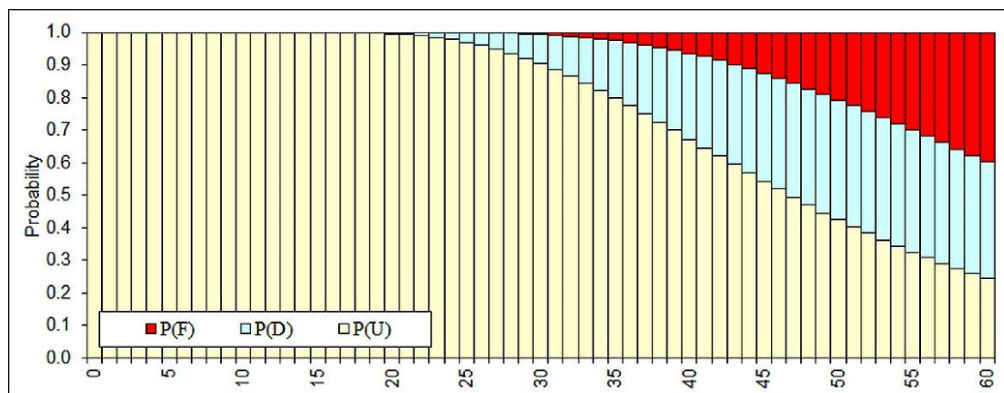
**Přibližné** hodnoty

# Návrh systému prohlídek nosného prvku

## Tříbodový ohyb

Prohlídka č.	Čas prohlídky [roky]
1	35
2	46
3	48
4	50
5	51

Vypočtené časy pro prvních 5 prohlídek nosného prvku konstrukce



Výsledný histogram funkce spolehlivosti pro  $t = 35$  let provozu konstrukce.

Výsledné **pravděpodobnosti náhodných jevů  $U$ ,  $D$  a  $F$**  pro prvních 60 let provozu konstrukce.



# Paralelní výpočet v programu MatLab

**Metoda POPV** umožňuje provést výpočet na paralelních systémech (testováno na superpočítači, prozatím využito na 12 jádrech).

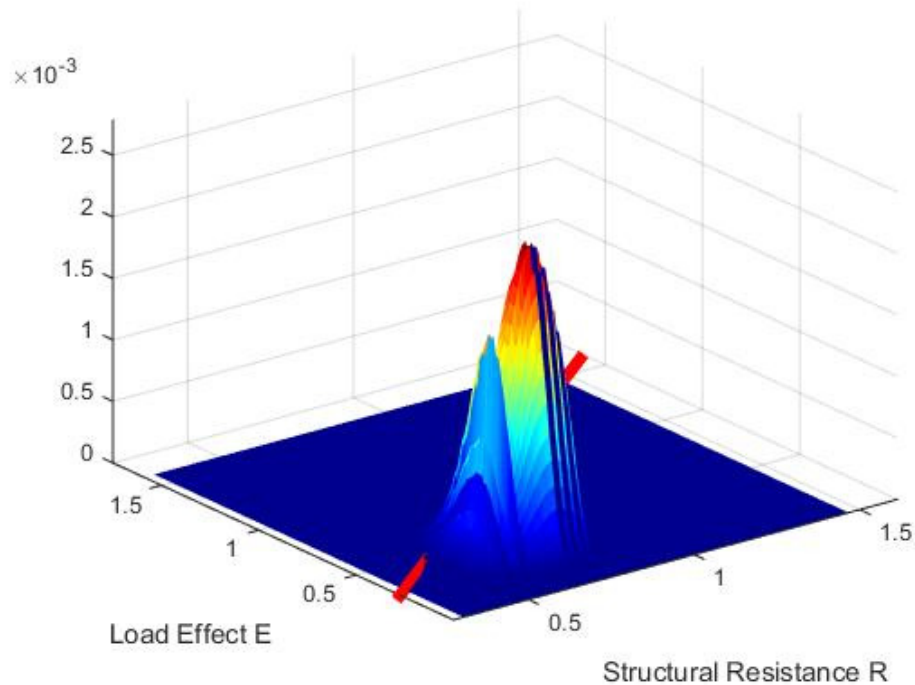


Národní superpočítačové centrum IT4Innovations, VŠB - Technická univerzita Ostrava,  
69. nejvýkonnější počítač světa podle seznamu Top500 (2021)

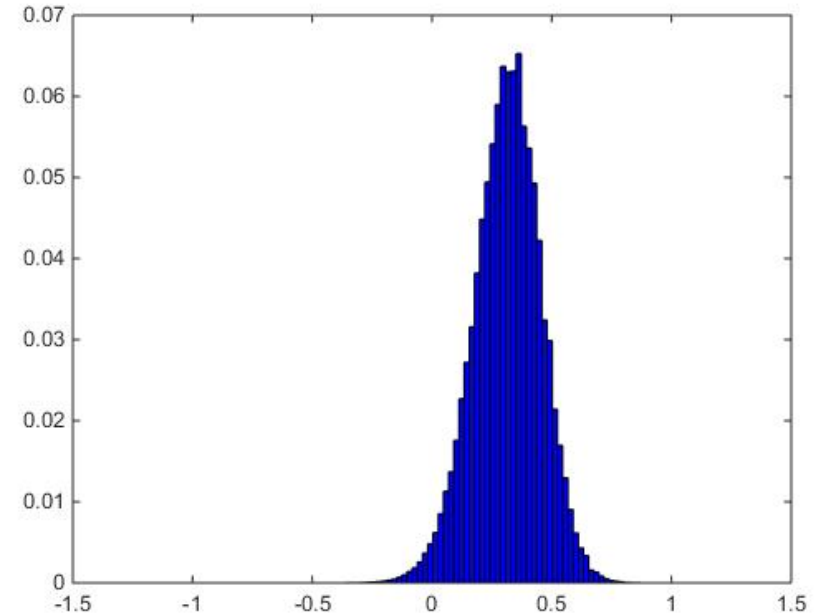
# Paralelní výpočet v programu MatLab

128 intervalů  
v každém histogramu

Výsledky pravděpodobnostního posouzení spolehlivosti nosného prvku namáhaného tříbodovým ohybem v Matlabu.



Pravděpodobnost poruchy:  $P_f = 0,01641$



Výsledný histogram funkce spolehlivosti pro  $t = 35$  let provozu konstrukce.

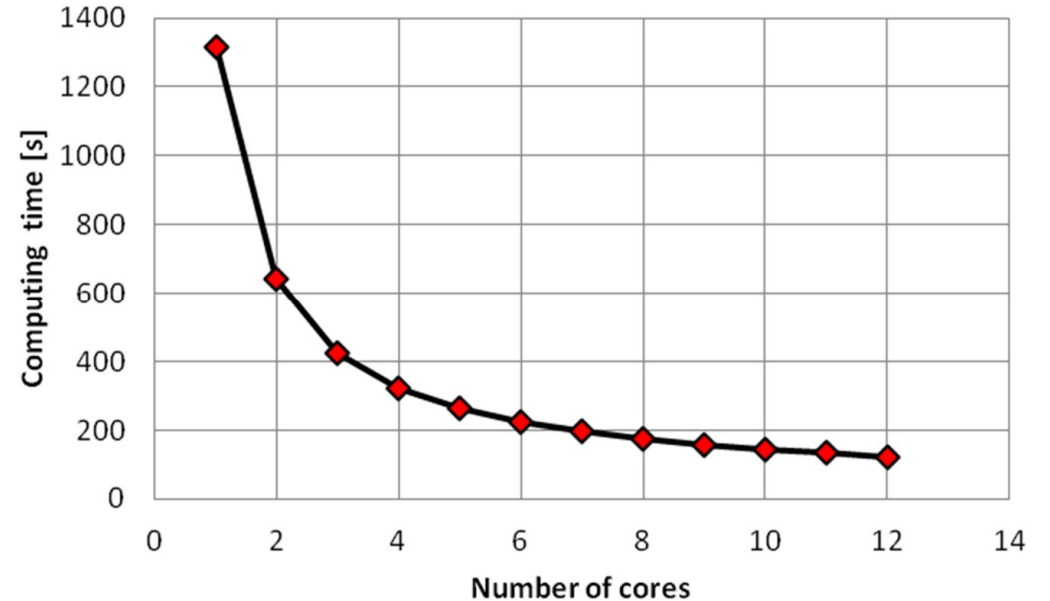
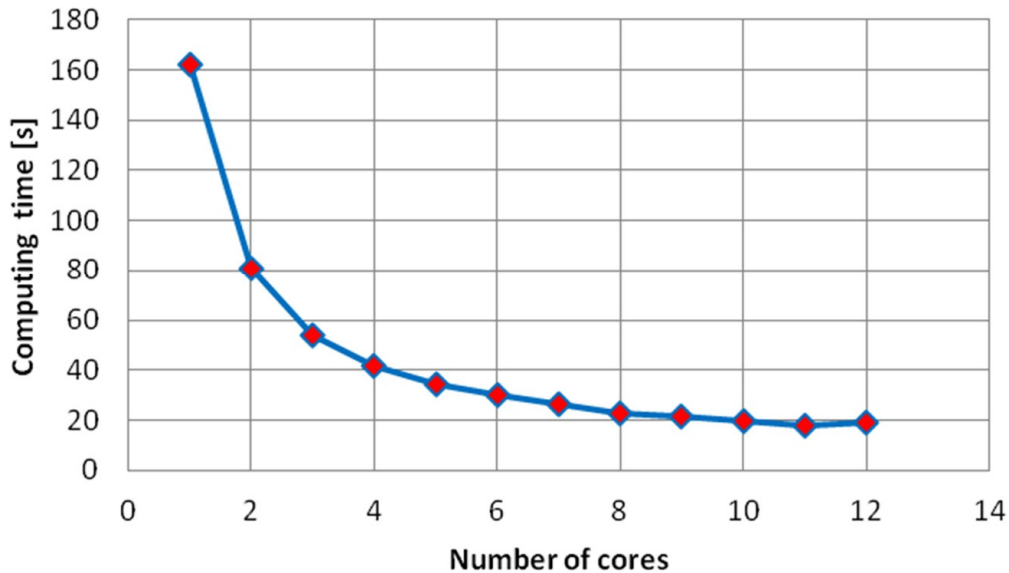


# Paralelní výpočet v programu MatLab

Počet intervalů	64		128		256		1024	
Počet jader	Čas [min]	Pravděp. poruchy	Čas [min]	Pravděp. poruchy	Čas [min]	Pravděp. poruchy	Čas [min]	Pravděp. poruchy
1	<b>0,39</b>	0,013495	<b>2,71</b>	0,01641	<b>21,91</b>	0,018427	-	-
3	<b>0,13</b>	0,013495	<b>0,90</b>	0,01641	<b>7,10</b>	0,018427	-	-
6	<b>0,08</b>	0,013495	<b>0,50</b>	0,01641	<b>3,77</b>	0,018427	-	-
9	<b>0,07</b>	0,013495	<b>0,36</b>	0,01641	<b>2,62</b>	0,018427	-	-
12	<b>0,06</b>	0,013495	<b>0,32</b>	0,01641	<b>2,03</b>	0,018427	<b>88,03</b>	0,019917

Porovnání **doby výpočtu** v závislosti na počtu jader a počtu intervalů ve vstupních histogramech včetně výsledné pravděpodobnosti poruchy

# Paralelní výpočet v programu MatLab



Snížení **výpočetního času** s vzrůstajícím **počtem výpočetních jednotek**, vstupní histogramy jsou rozděleny na **128 intervalů** (vlevo) nebo **256 intervalů** (vpravo).

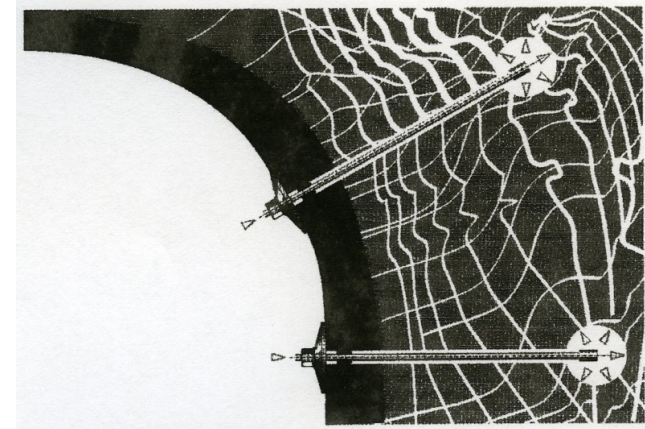
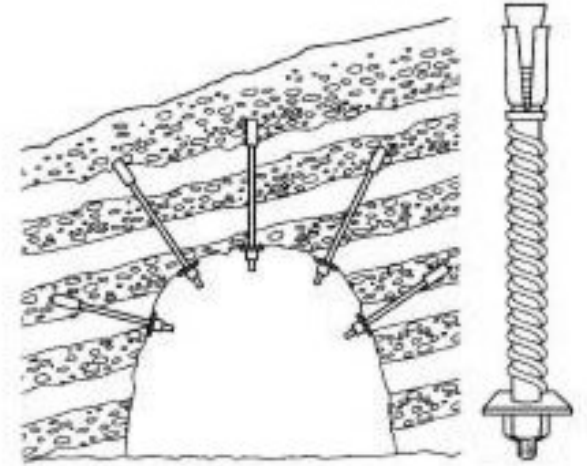
# Posouzení spolehlivosti existující konstrukce



Posouzení spolehlivosti staré jeřábové dráhy strojírny po **85 letech provozu**



# Kotvení výztuže podzemních děl





# Kotvení výztuže podzemních děl





# Kotvení výztuže podzemních děl





# Kotvení výztuže podzemních děl

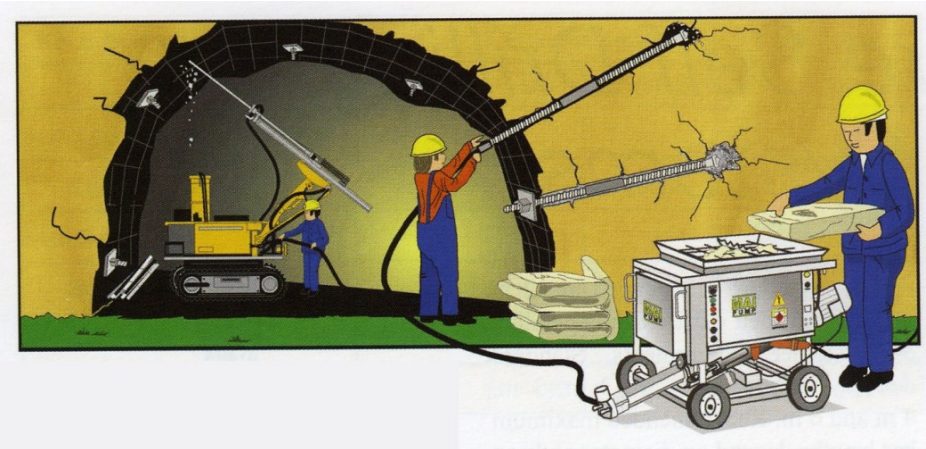




# Kotvení výztuže podzemních děl

Návrh kotevní výztuže vyžaduje pro dané podmínky určit zejména:

- délku kotev (svorníků),
- jejich počet a rozmístění v okolí důlního nebo podzemního díla,
- parametry kotev (typ, materiál, průměr, atd.) určujících jejich únosnost,
- zatížení kotev.

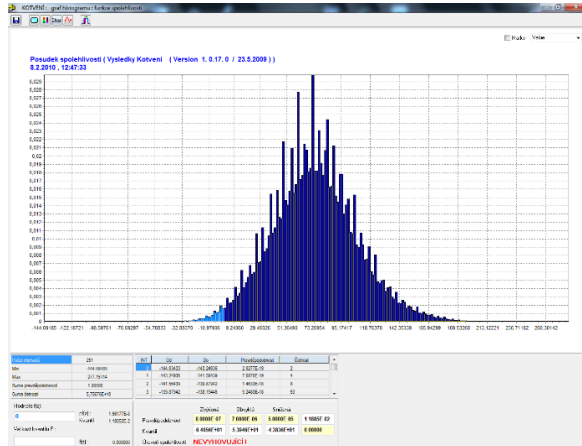


# Softwarový nástroj pro pravděpodobnostní návrh

Pomocí empiricko-analytických vztahů byl vyvinut programový systém **Anchor** pro pravděpodobnostní návrh a posouzení kotevní výztuže metodou POPV.

## Výstup:

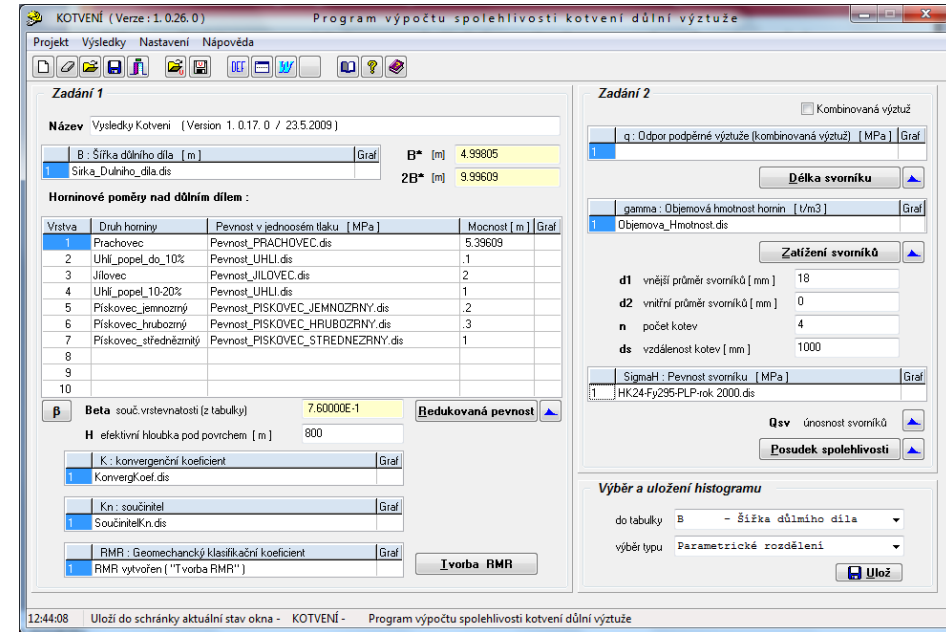
- délka kotev  $l$
- jejich počet  $n$
- odolnost  $Q_{sv}$  kotevní výztuže.



Histogram funkce spolehlivosti  $RF$

s výslednou

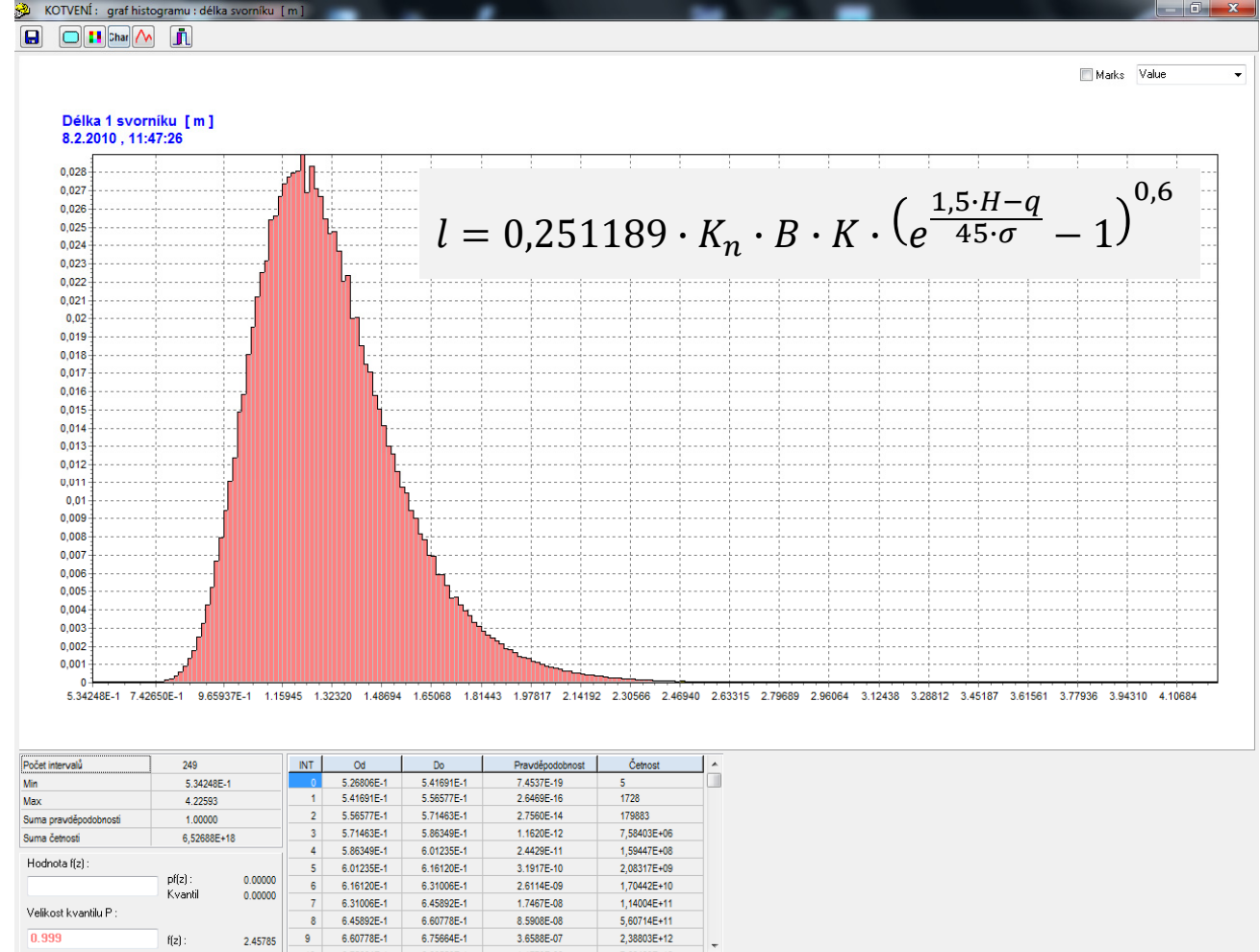
pravděpodobností poruchy  $P_f = 1,19 \cdot 10^{-2}$  pro 4 kotvy  $\varnothing 18$  mm / 1 m důlního díla



Pracovní plocha programu

# Softwarový nástroj pro pravděpodobnostní návrh

Výsledky:



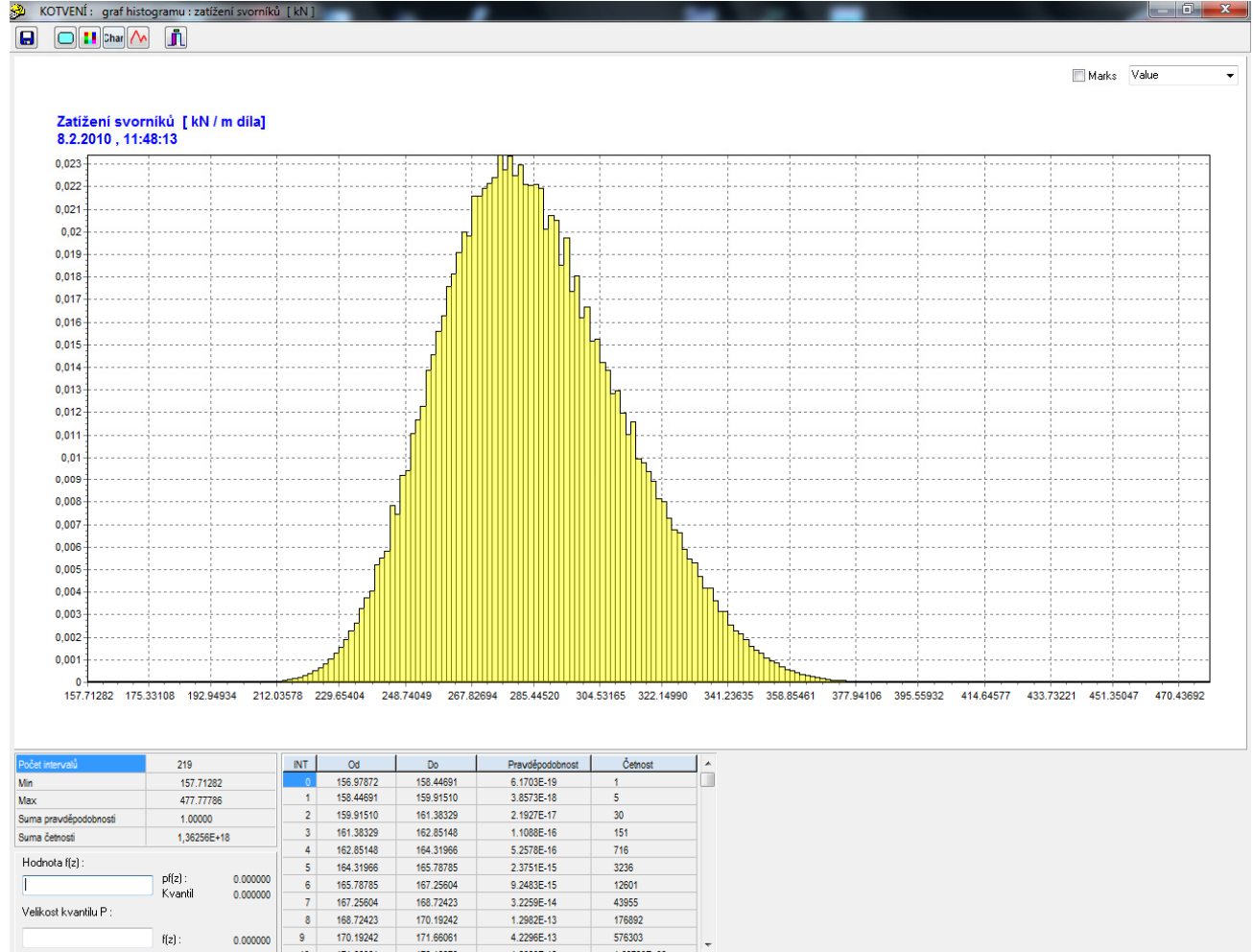
Histogram **délky kotvy**  $l$  [ m ]



# Softwarový nástroj pro pravděpodobnostní návrh

Výsledky:

Histogram **zatížení svorníku  $Q$  [kN/m]**

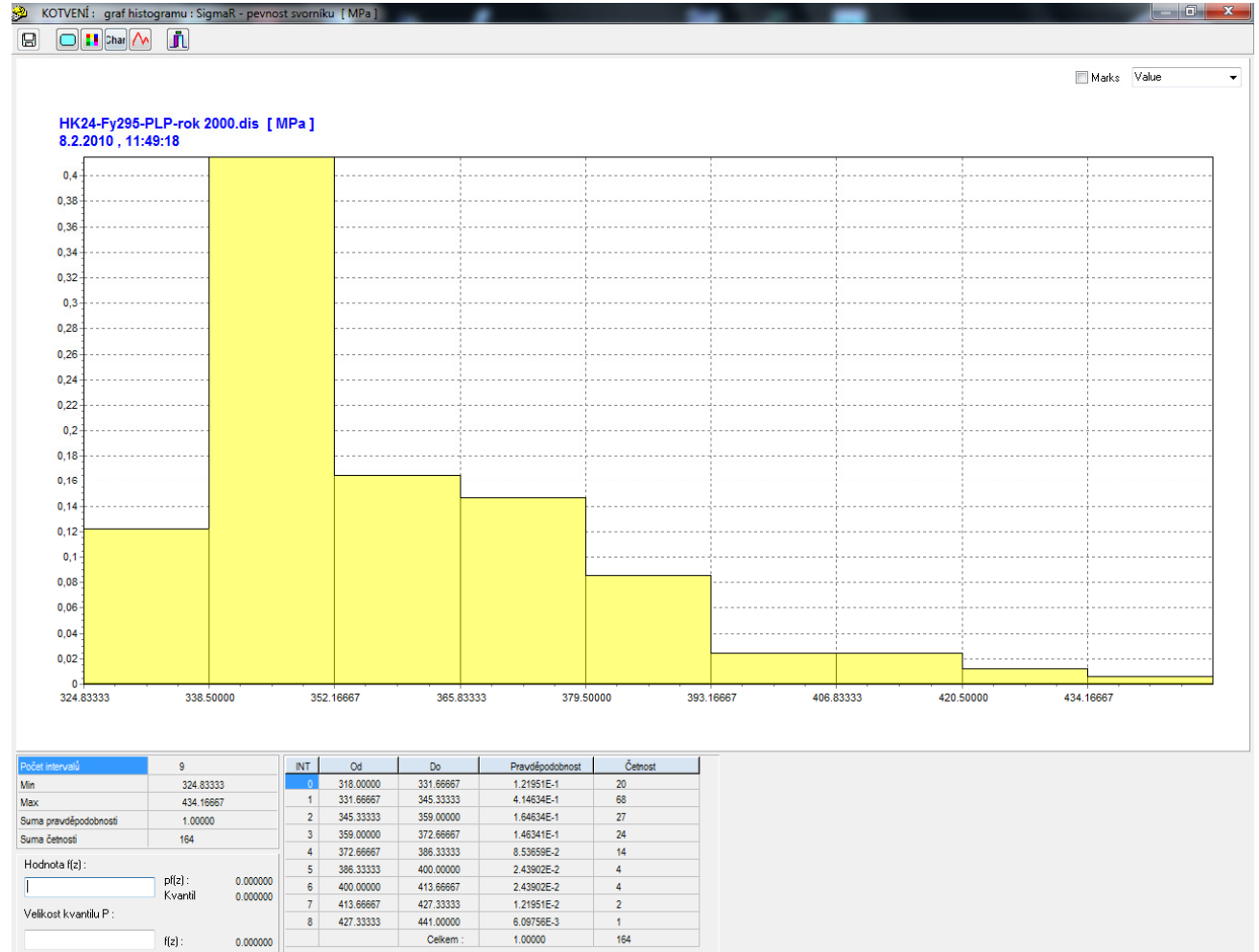


# Softwarový nástroj pro pravděpodobnostní návrh

Výsledky:

$$Q_{sv} = \frac{n \cdot q_{sv}}{d_s} =$$
$$= \frac{n \cdot \pi \cdot (d_1 - d_2)^2 \cdot \sigma_{sv}}{4 \cdot d_s}$$

Histogram  
únosnosti kotev  
 $Q_{sv}$  [kN]



# Softwarový nástroj pro pravděpodobnostní návrh

## Posouzení spolehlivosti kotevní výztuže

$$RF = Q_{sv} - Q$$

Histogram funkce  
spolehlivosti  $RF$   
s výslednou hodnotou  
pravděpodobnosti poruchy  $P_f$

