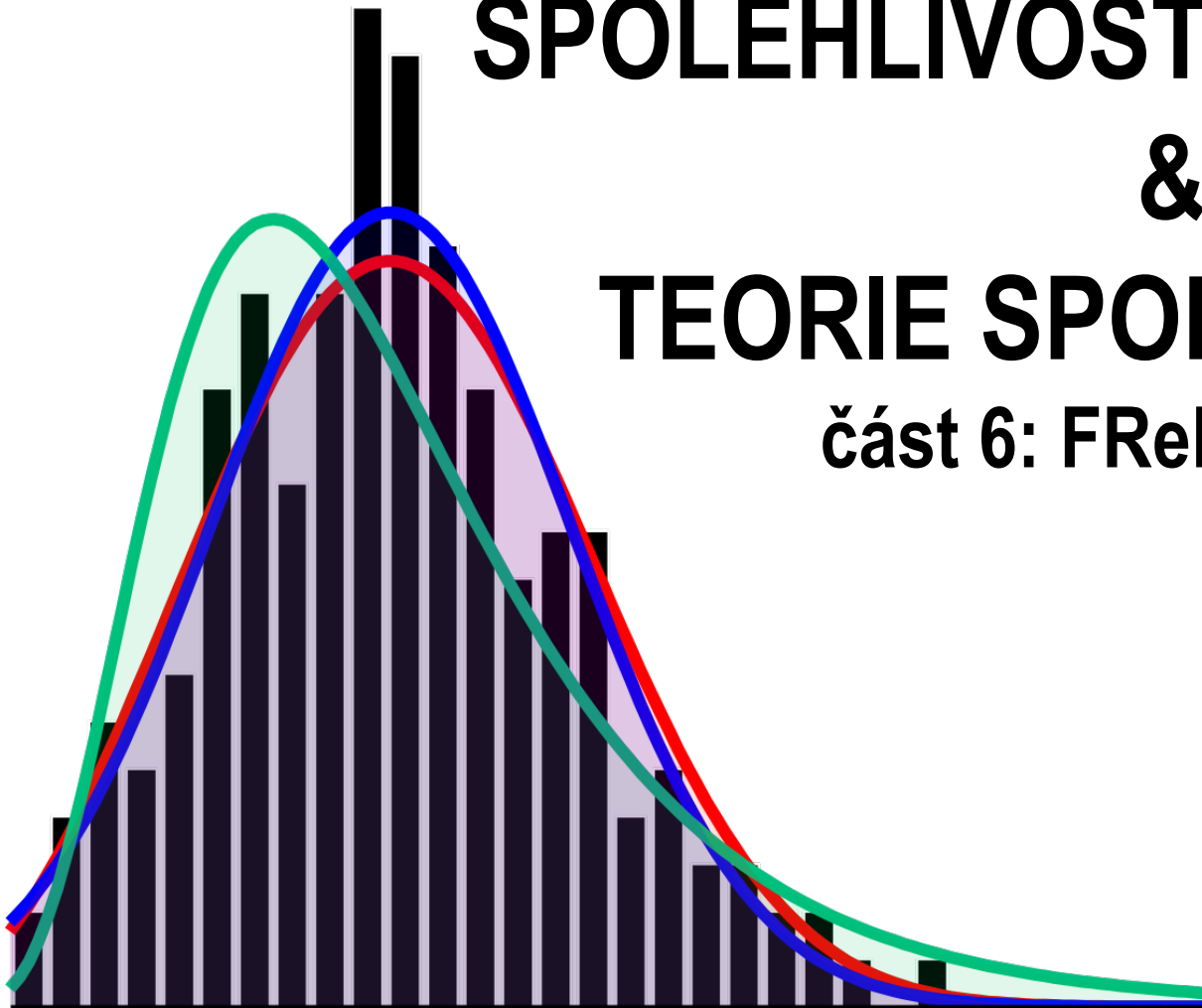


SPOLEHLIVOST KONSTRUKCÍ & TEORIE SPOLEHLIVOSTI

část 6: FReET – úvod

Drahomír Novák
Jan Eliáš



část 6 FReET - úvod



MC analýza na počítači

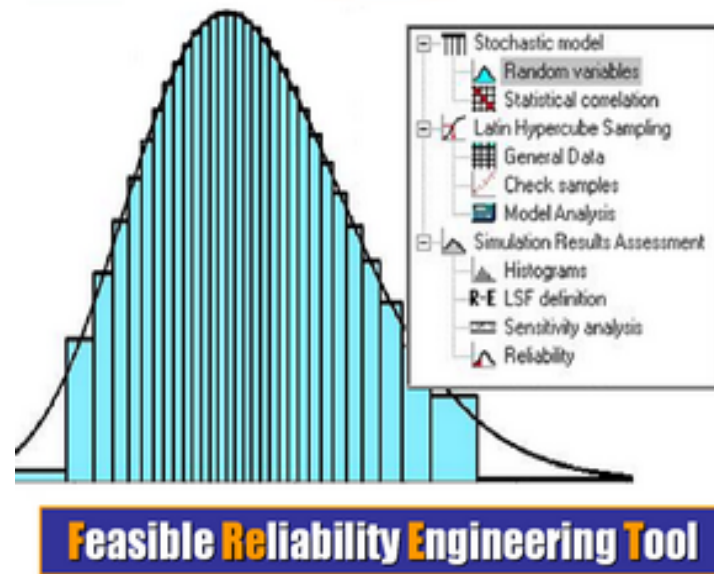
- **Excel**: možné, ale velmi málo typů rozdělení, nezle zavést korelace omezená grafika, pracné. **Crystal Ball**: nástavba na Excel
- **VAP, StruRel, Slang, M-Star, C-Fit, Codecal, Profes, Unipas, Proban, Phimeca-Soft, Nessus, Cossan, CalRel, PPDV, ...**
- často vyvíjeno nejprve na univerzitách a poté komerčně
- **Mathematica, Matlab, Maple, Statistica, ...** obrovské systémy určené k velmi obecnému použití
- současné trendy:
 - vývoj komplexních integrovaných systémů
 - implementace více spolehlivostních metod (hlavně simulačních)
 - důraz na “uživatelskou přívětivost”
 - **rozhraní k externím deterministickým programům**

FReET

- **F**easible **R**eliable **E**ngineering **T**ool
- FreET je víceúčelový **pravděpodobnostní software** pro statistickou, citlivostní a spolehlivostní analýzu inženýrských problémů. Umožňuje simulovat nejistoty problému na úrovni náhodných veličin (ve stavebním/strojném inženýrství typicky materiálové vlastnosti, zatížení, imperfekce,...).
- vyvíjeno na **Vysokém Učení Technickém v Brně** (Drahomír Novák, Miroslav Vořechovský & Radoslav Rusina)



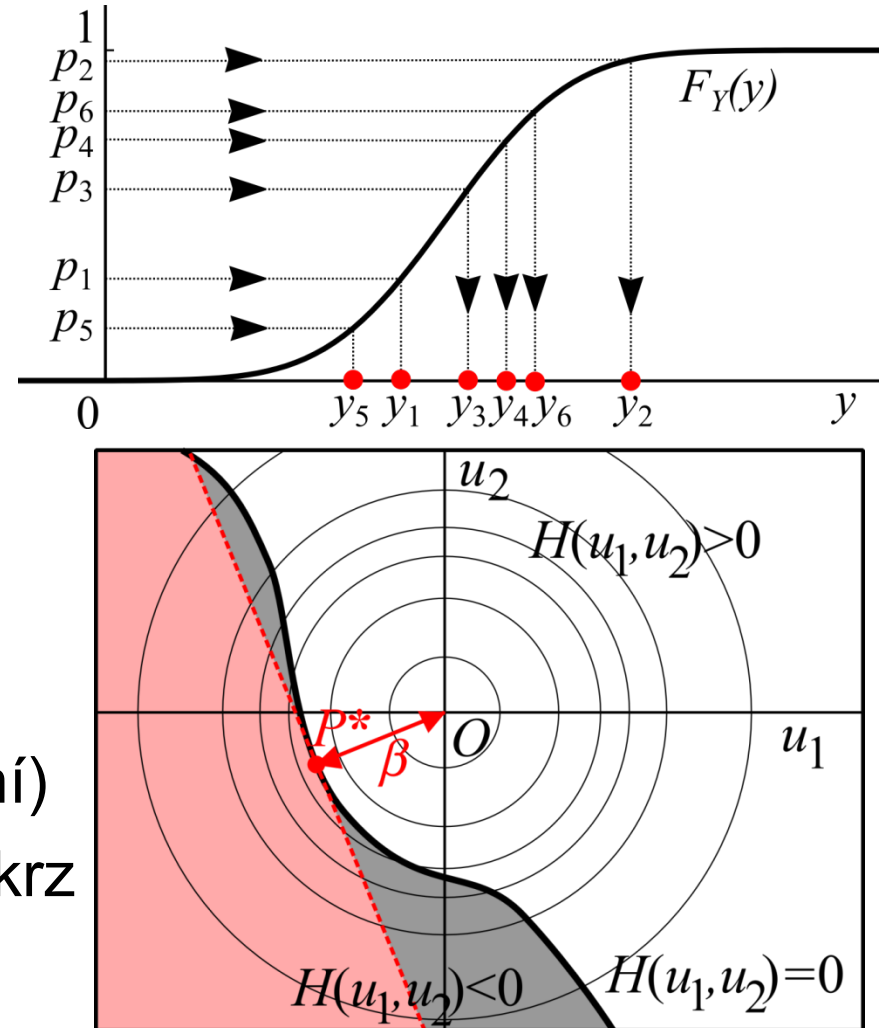
Obrázek 1. FReET ikona



Obrázek 2. FReET logo

FReET pravděpodobnostní techniky

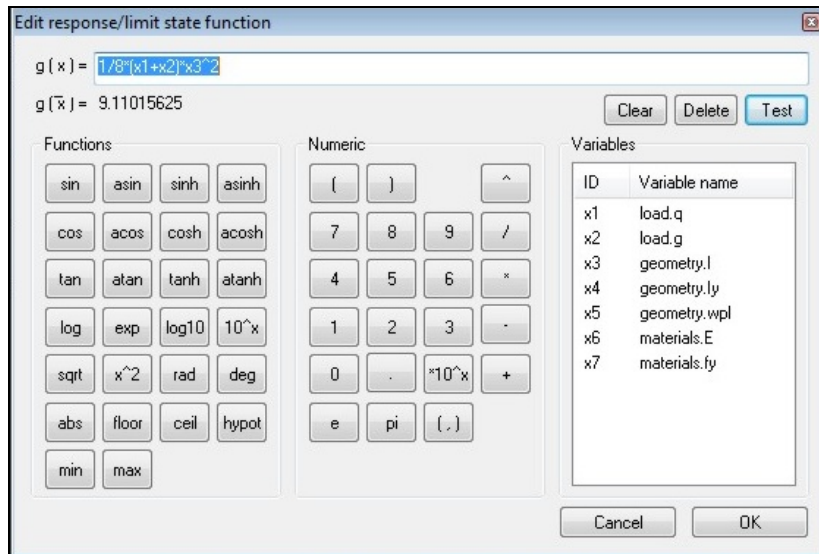
- pravděpodobnostní techniky
 - MC simulace
 - LHS (3 typy)
 - LHS mean
 - LHS median
 - LHS random
 - FORM
- odhad rozdělení (určení nejvhodnějšího modelu rozdělení)
- robustní zavedení korelace skrz **Simulované Žihání**



Obrázek 3. MC & FORM

FReET funkce odezvy/mezního stavu

- uzavřená forma (**přímo**) přes editor rovnic
 - přímá definice pomocí “kalkulačky”
- **nepřímo** přes uživatelem vloženou DLL knihovnu
 - rozhraní k napojení DLL knihoven
- rozhraní k propojení se softwarem třetích stran



```
__declspec(dllexport) double __stdcall  
summation(int *num, double *input) {
```

```
double a = input[0];  
double b = input[1];
```

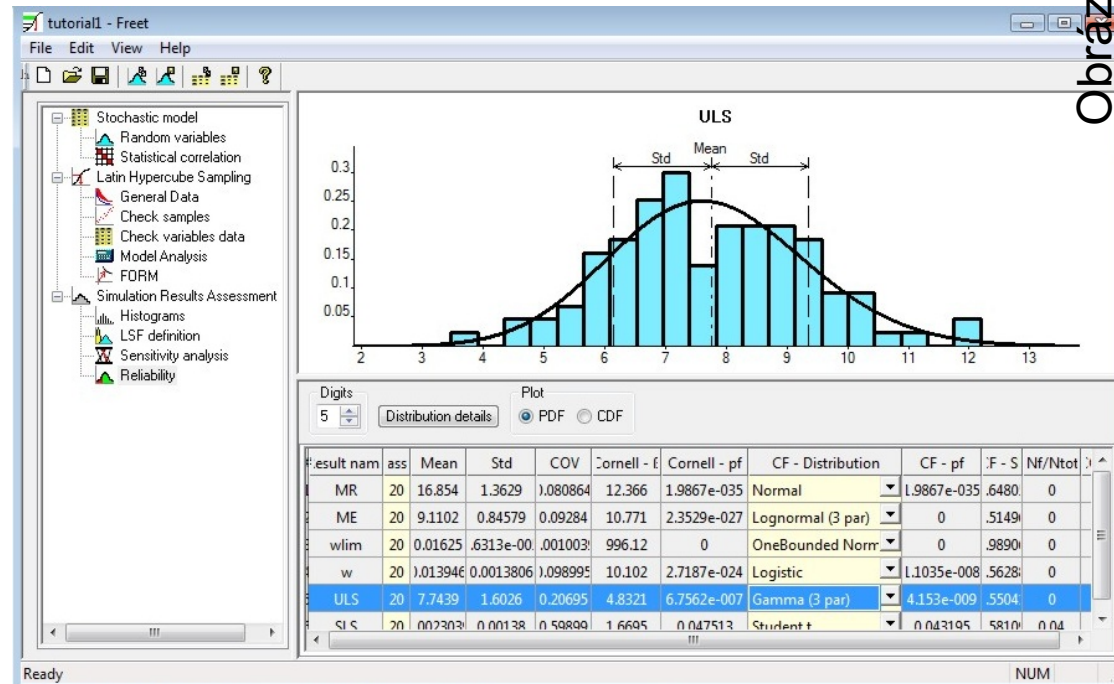
```
double x = a+b;
```

```
return x;  
}
```

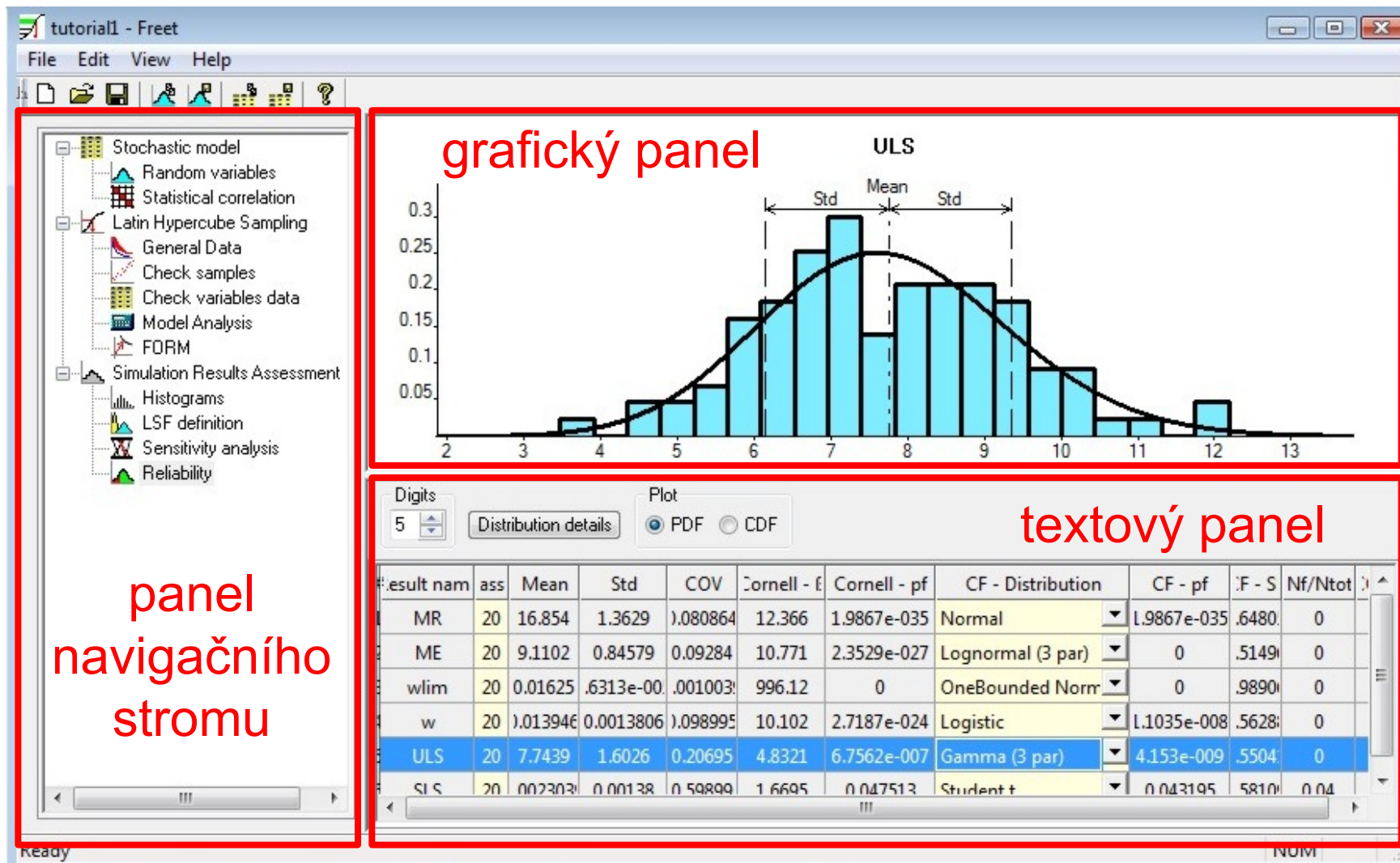
Obrázek 4. “Kalkulačka” & kód DLL funkce

FReET vlastnosti

- rozsáhlá knihovna rozdělení
- přátelské GUI, pokročilá vizualizace
- **parametrizace** analýzy
- spolehlivost: **pravděpodobnost poruchy**, index spolehlivosti
- statistika odezvy
- neparametrická pořadová **citlivostní analýza**
- Bayesovské vylepšení
- statistické testy pro nejvhodnější PDF
- dávkový mód



FReET hlavní okno



Obrázek 6. FReET hlavní okno

FReET tutorial – definice problému

- prostý nosník o rozpětí $l=3.25$ m, ocel S235, průřez I120
- dvě rezervy spolehlivosti:
 - **ULS** (mezní stav únosnosti)

$$Z_{\text{ULS}} = M_R - M_E$$

- $$M_R = w_{pl} f_y; \quad M_E = \frac{1}{8} (g + q) l^2$$
- **SLS** (mezní stav použitelnosti)

$$Z_{\text{SLS}} = w_{\text{lim}} - w$$

$$w_{\text{lim}} = \frac{l}{200}; \quad w = \frac{5}{384} \frac{(g + q) l^4}{EI}$$



FReET tutorial – vstupy

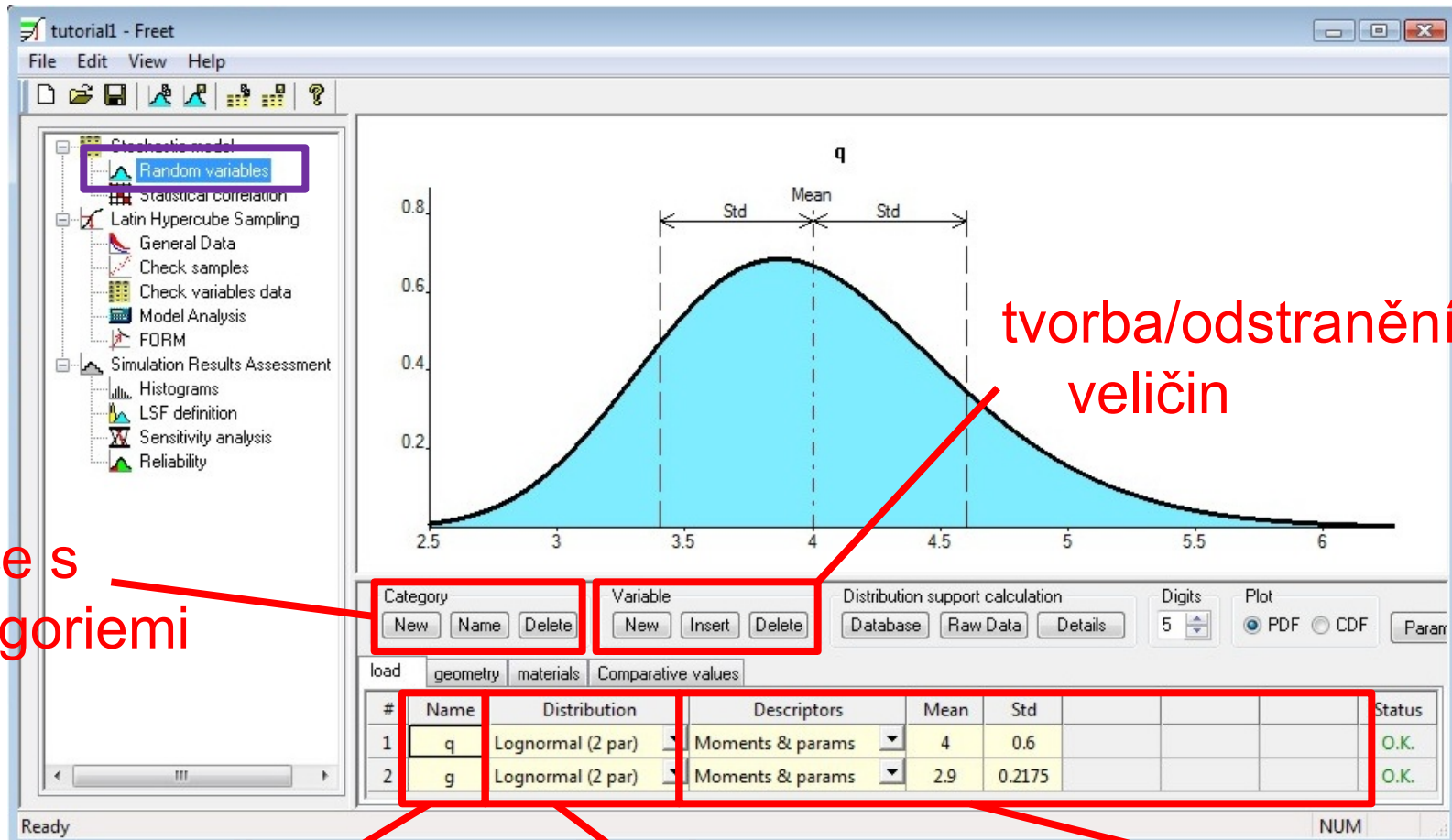
– specifikace vstupních veličin

jméno		rozdělení	střední hodnota	sm. odchylka	CoV
q	kN/m	Lognormal (2 par)	4	0.6	0.15
g	kN/m	Normal	2.9	0.2175	0.075
l	m	Normal	3.25	0.00325	0.001
I_y	m ⁴	Normal	$3.27 \cdot 10^{-3}$	$1.63 \cdot 10^{-4}$	0.05
w_{pl}	m ³	Normal	$6.36 \cdot 10^{-5}$	$5.09 \cdot 10^{-6}$	0.08
E	GPa	Lognormal (2 par)	220	6.6	0.03
f_y	MPa	Lognormal (2 par)	265	18.55	0.07

Tabulka 1. Vstupní veličiny tutoriálu

FReET tutorial – vstupní veličiny

- vstupní veličiny lze rozdělit do kategorií



tvorba/odstranění
veličin

práce s
kategoriemi

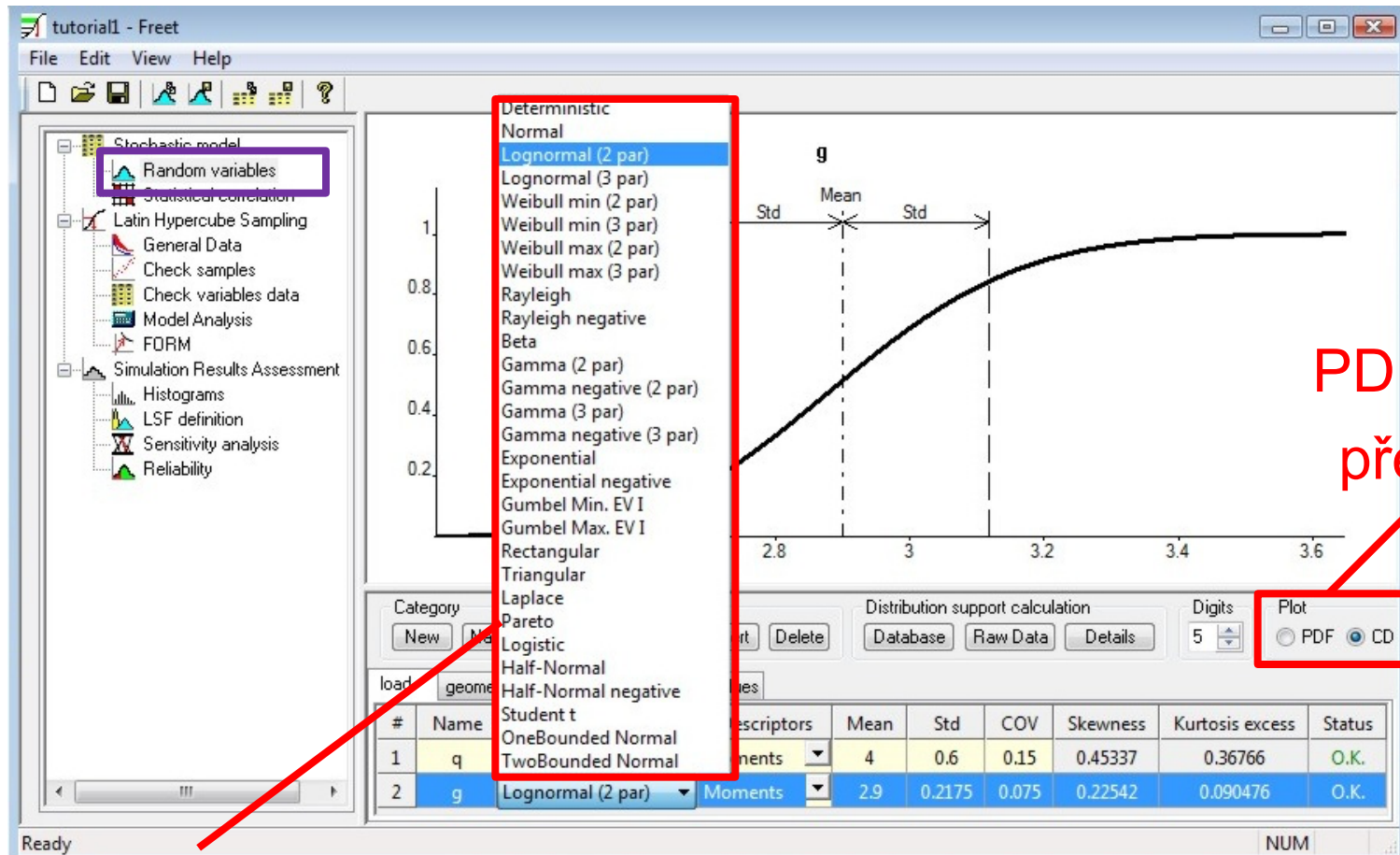
jména veličin

rozdělení

momenty a/nebo parametry

FReET tutorial – vstupní veličiny

– na výběr mnoho rozdělení

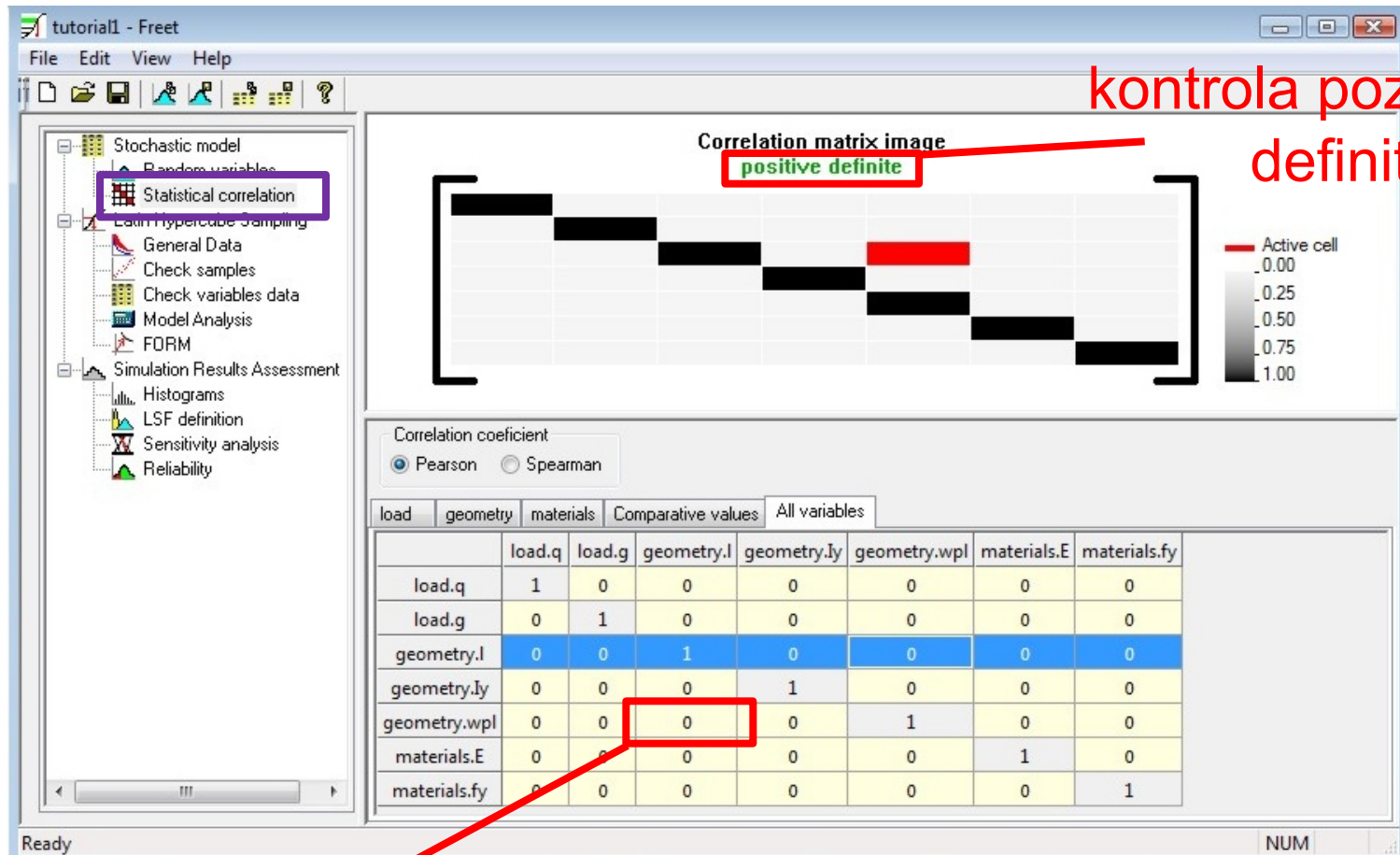


výběr rozdělení

PDF/CDF
přepínač

FReET tutorial – stanovení korelace

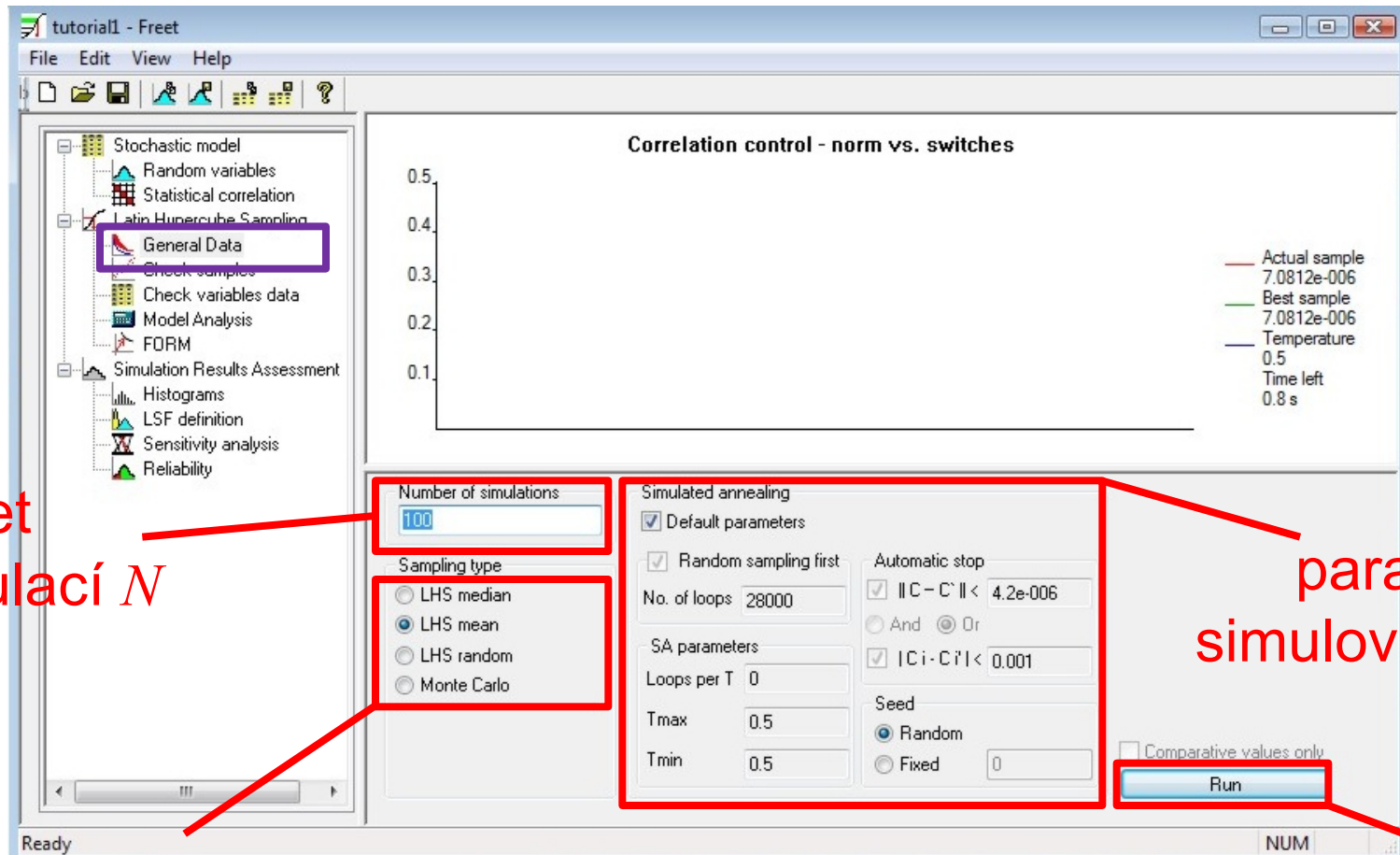
- povolena indefinitní korelační matice



jednotlivé korelační koeficienty

FReET tutorial – vzorkování veličin

– čtyři vzorkovací typy



počet
simulací N

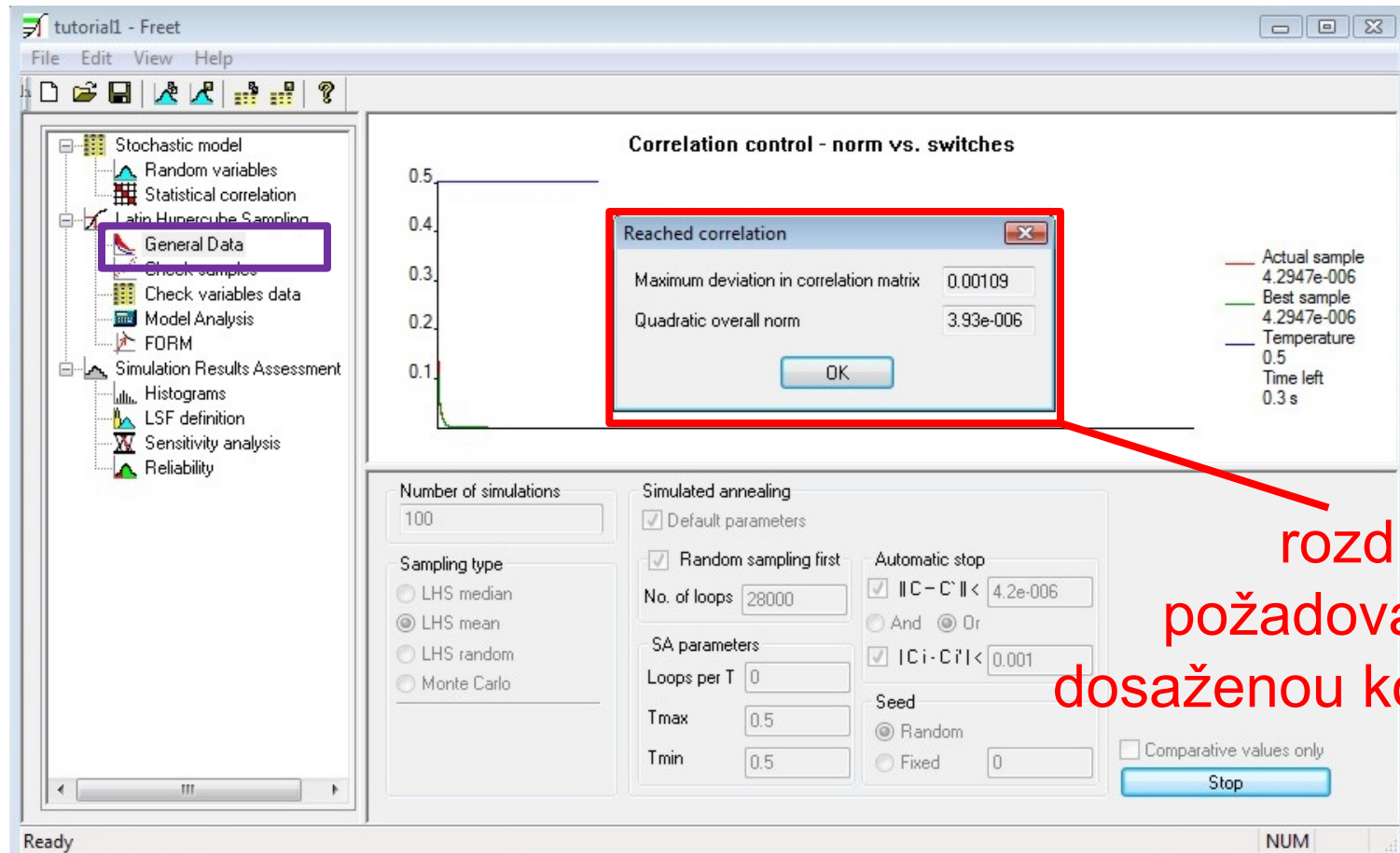
parametry
simulovaného
žíhání

vzorkovací metoda

tlačítko start

FReET tutorial – zavádění korelace

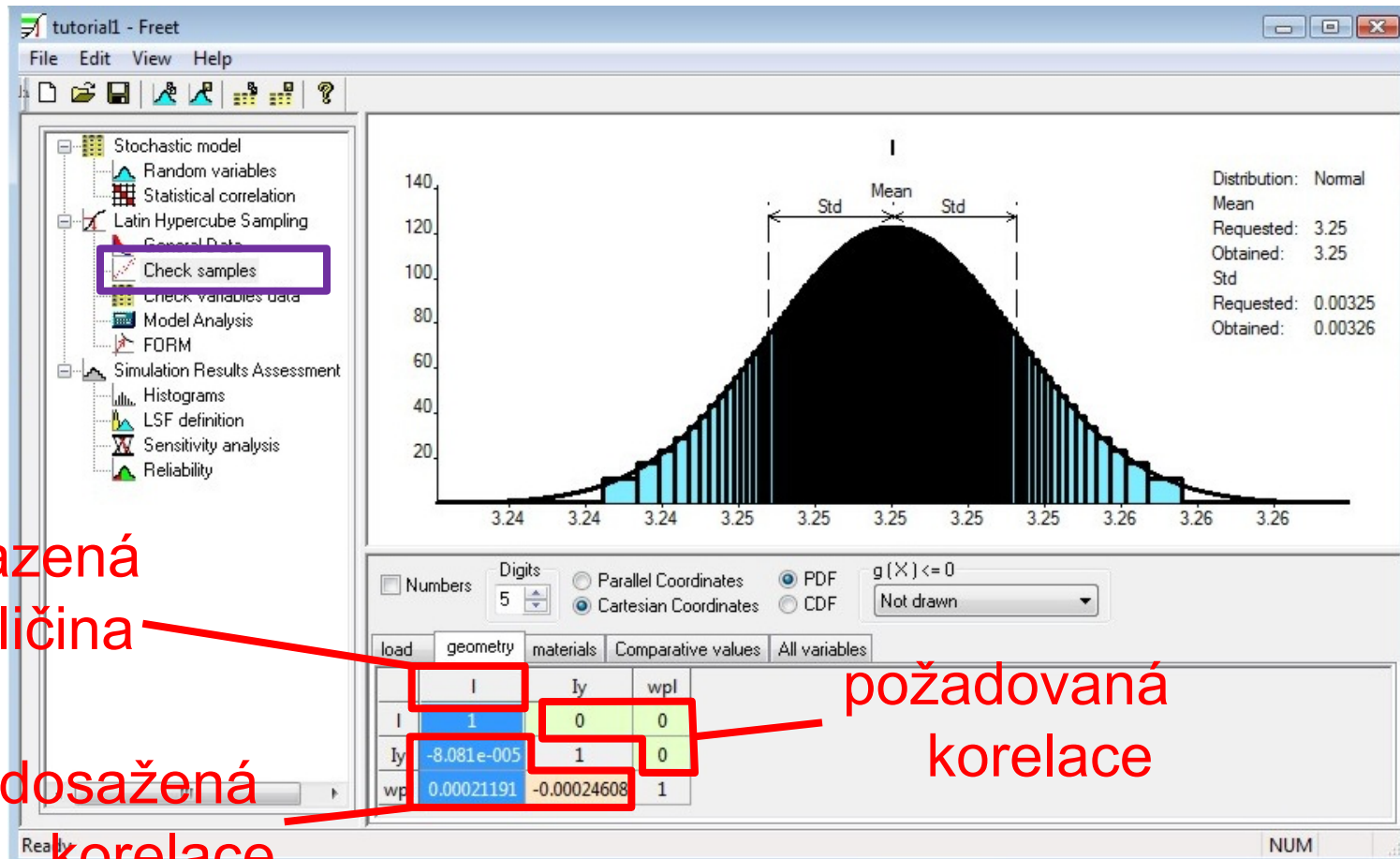
- proběhne optimalizace pořadí pomocí simulovaného žíhání



rozdíl mezi
požadovanou a
dosaženou korelací

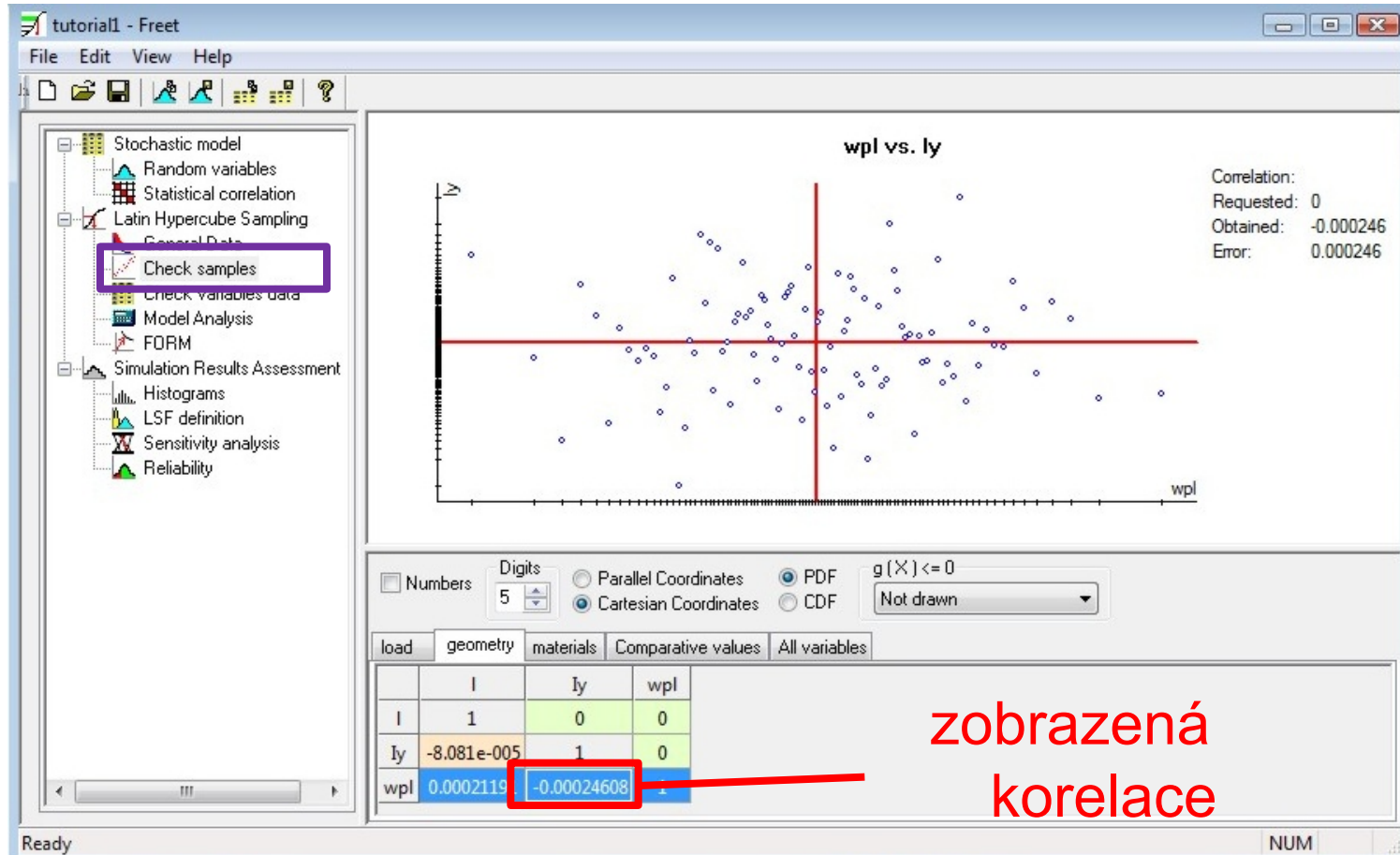
FReET tutorial – prohlížení histogramů

- kliknutí na veličinu zobrazí histogram



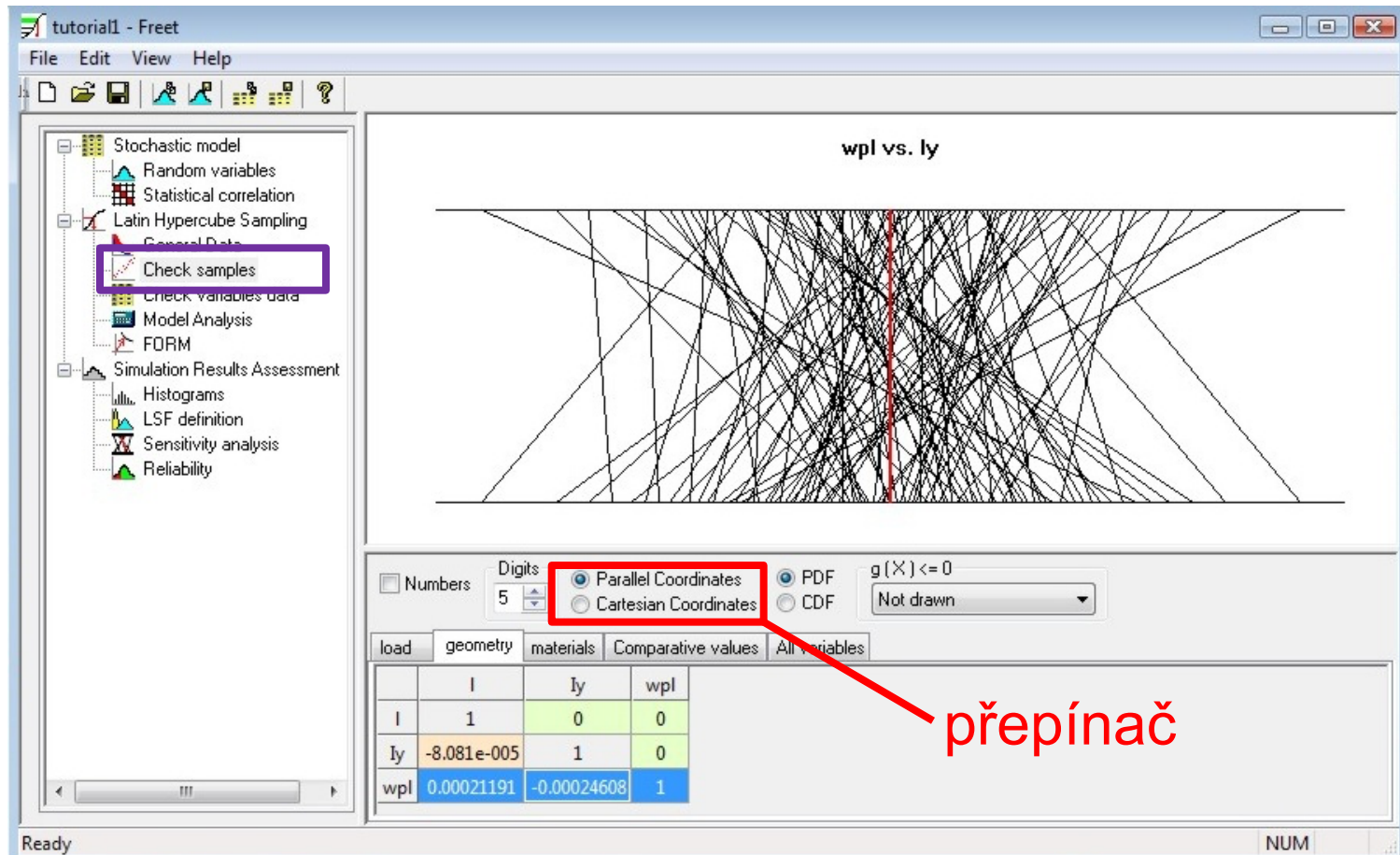
FReET tutorial – kontrola korelací

- kliknutí do korelační matice zobrazí vygenerované body



FReET tutorial – paralelní souřadnice

- ||||| = pozitivní korelace, X = negativní korelace



FReET tutorial – prohlížení hodnot

- rozděleno podle kategorií

vygenerované hodnoty
“seřazené” tak, aby odpovídaly požadovaným korelacím

N

	E	fy
1	221.66	264.58
2	215.39	265.05
3	213.57	257.08
4	222.19	274.5
5	215.19	232.88
6	216.19	293.88
7	220.15	263.66
8	223.88	234.79
9	215.99	318.58
10	216.93	254.58
11	238.21	268.83
12	219.16	273.41
13	216.38	249.56
14	210.14	292.35
15	208.26	248.93
16	218.82	297.64

FReET tutorial – funkce modelu

- transformace vstupních veličin na funkce modelu

The screenshot shows the FReET software interface with the following components and annotations:

- Left Panel (Tree View):** Contains a list of model components. The **Model Analysis** item is highlighted with a red box and labeled "výpočet funkcí" (function calculation).
- Buttons:**
 - New Model Function:** Labeled "nová funkce" (new function).
 - Delete Model Function:** Unlabeled.
 - Run Model Analysis:** Labeled "vstup přes přímé zadání rovnic" (input via direct equation entry).
- Table:** A table with 4 columns: #, Name of the DLL, Exported functions, and Result name.

#	Name of the DLL	Exported functions	Result name
1	Expression Evaluator	$5 \times 7 \times 1000 - 1/8 \times (x_1 + x_2) \times x_3^2$	ULS
2	Expression Evaluator	$x_3 / 200 - 5/384 \times (x_1 + x_2) \times x_3^4 / x_6 / x_4 / 1e3$	SLS

Annotations for the table:

 - Expression Evaluator:** Labeled "vstup přes DLL" (input via DLL).
 - Exported functions:** Labeled "vstup přes přímé zadání rovnic" (input via direct equation entry).
 - Result name:** Labeled "název funkce" (function name).

FReET tutorial – zadání rovnic

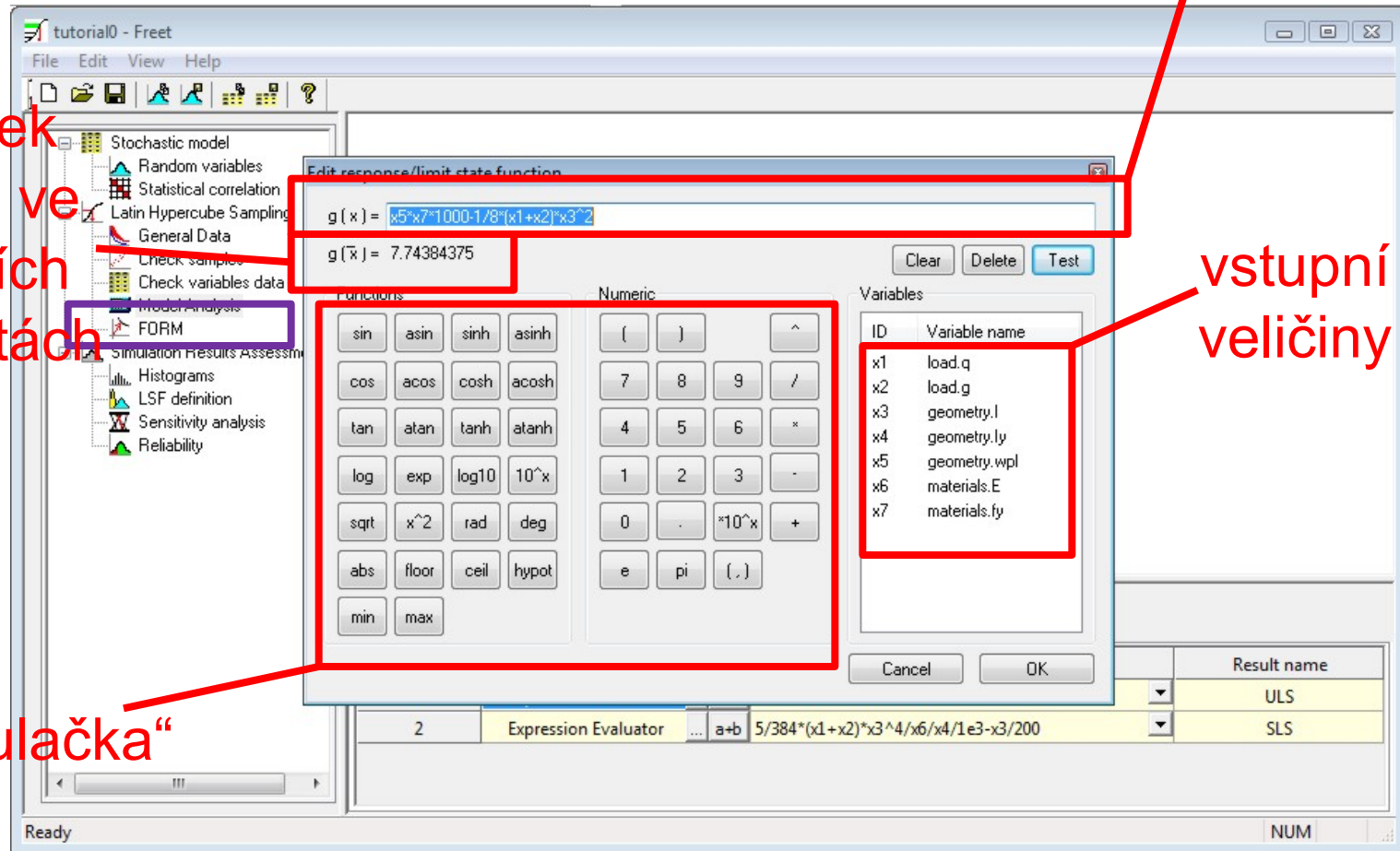
– jednoduchý editor explicitních funkcí

funkce

výsledek
funkce ve
středních
hodnotách
veličin

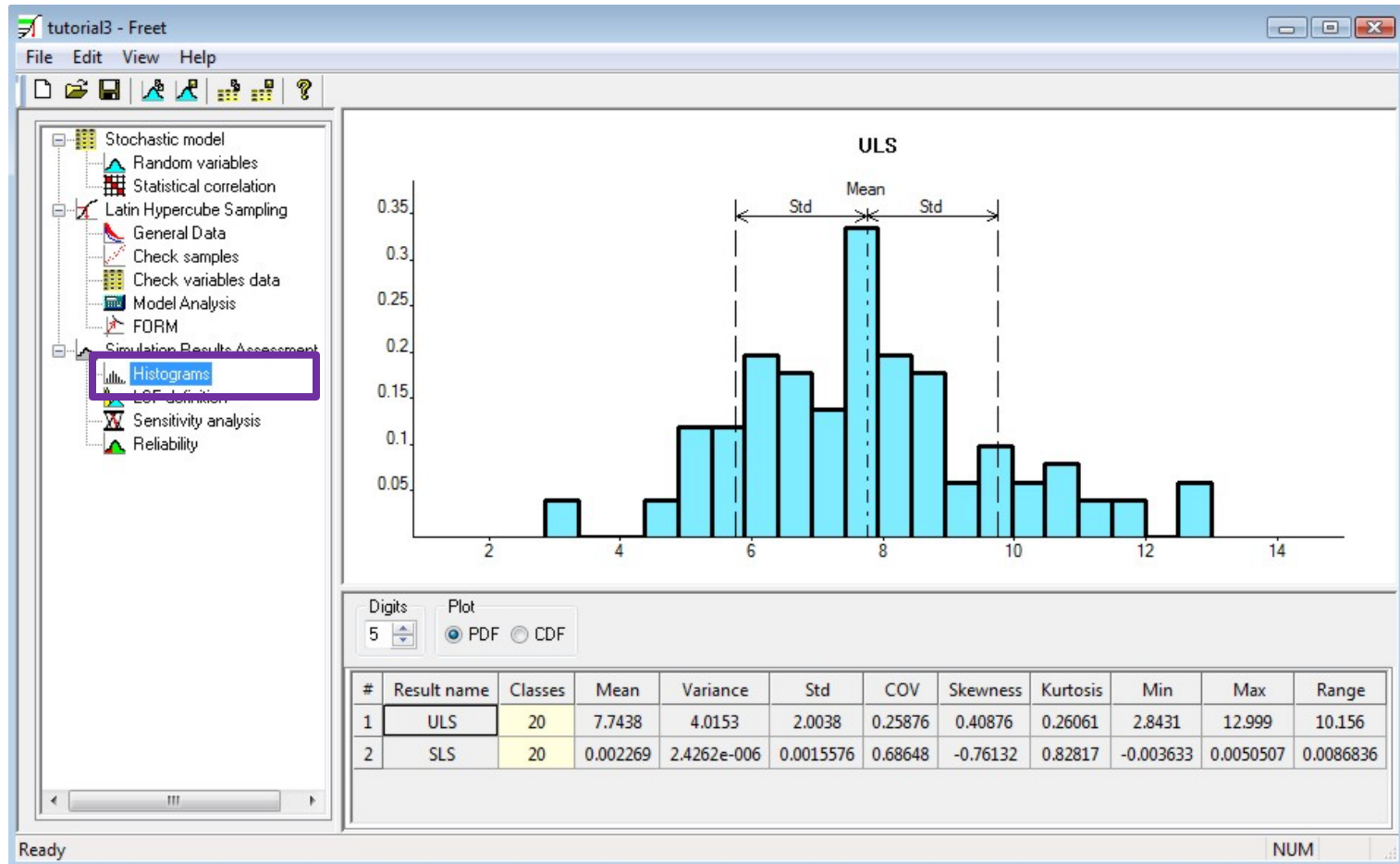
vstupní
veličiny

“kalkulačka”



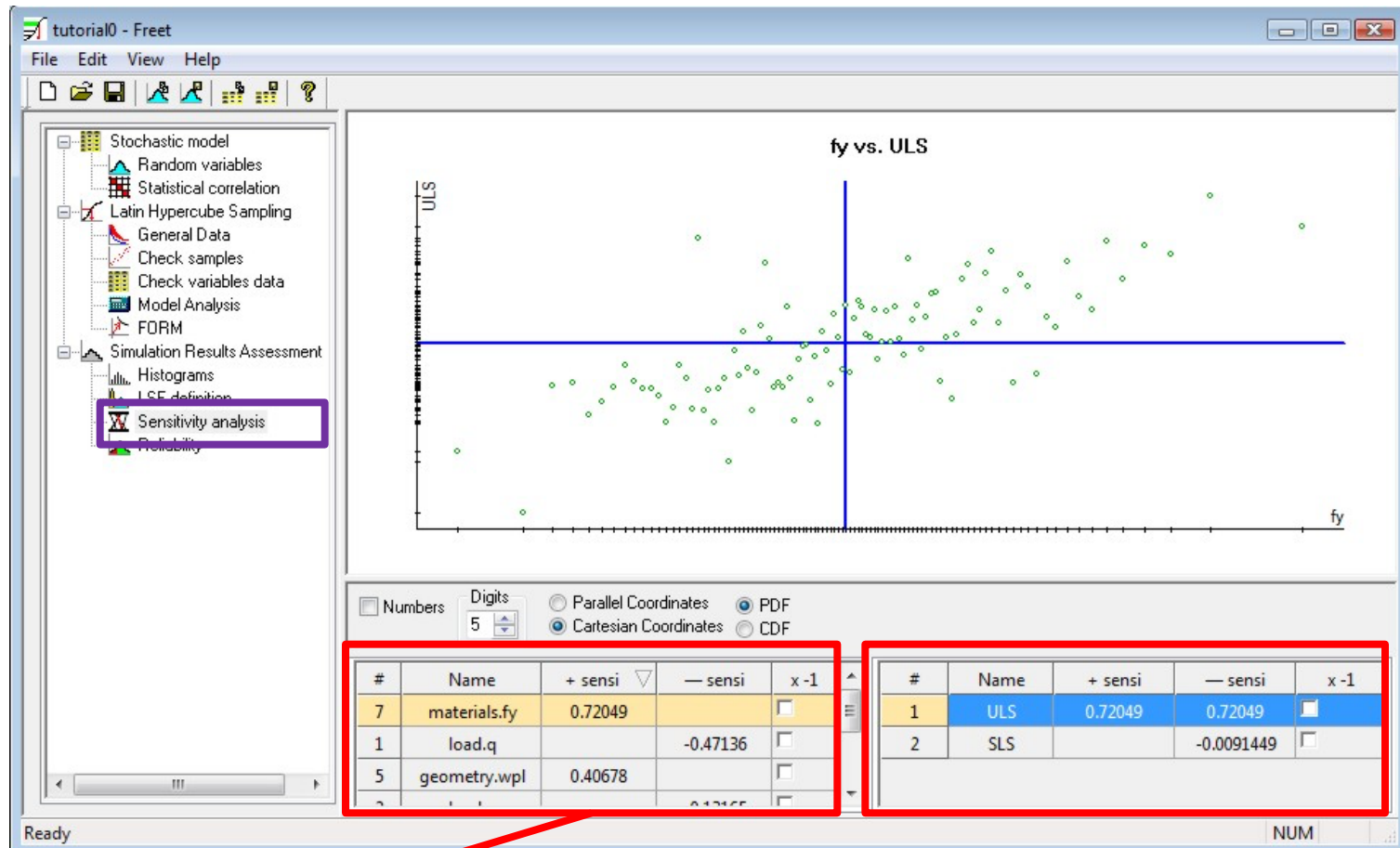
FReET tutorial – histogramy funkcí

- výpočet charakteristik funkcí modelu + zobrazení histogramů



FReET tutorial – citlivostní analýza

- vizualizace v paralelních & kartézských souřadnicích, seřazení

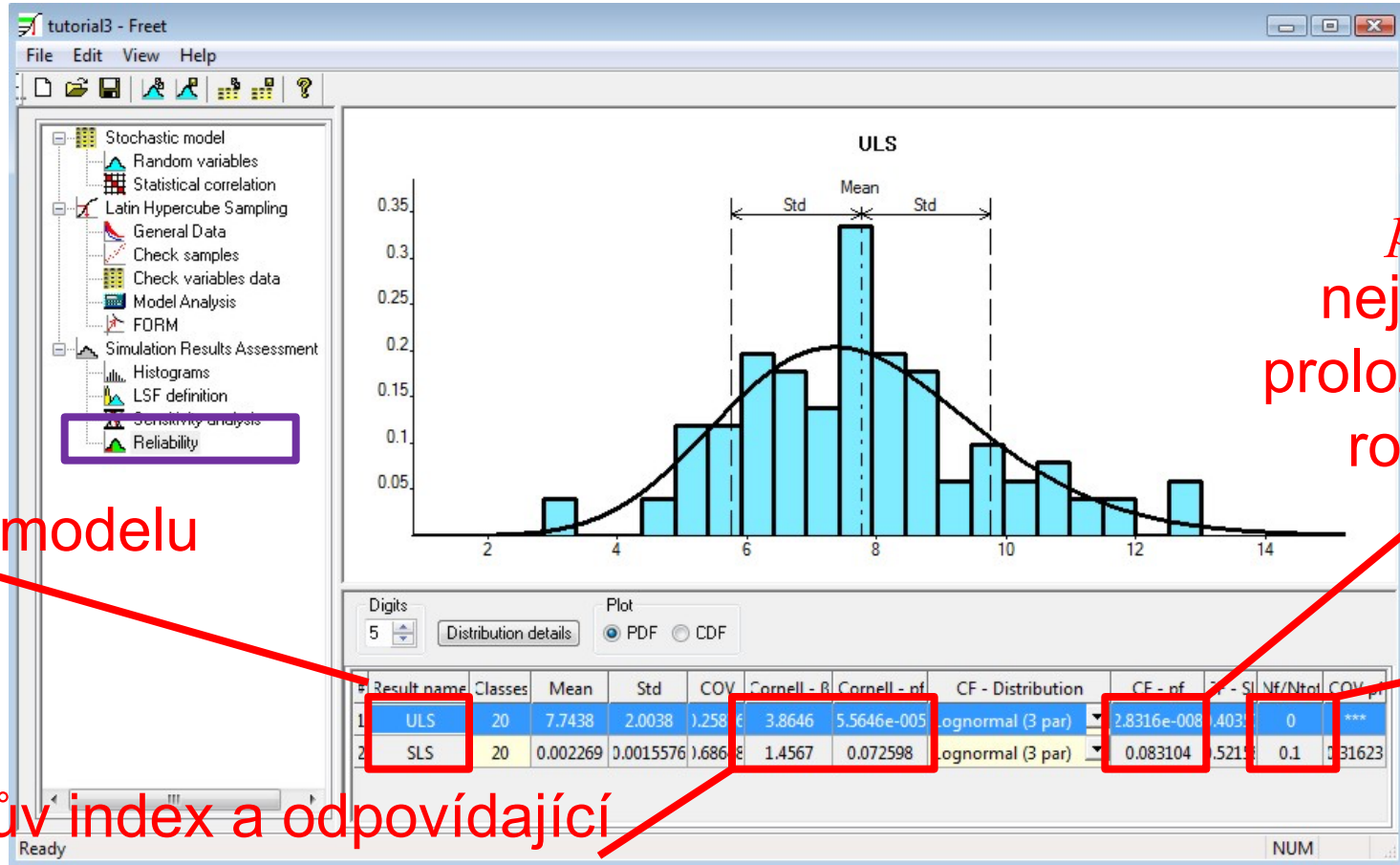


vstupní veličiny

výstupní veličiny

FReET tutorial – spolehlivost

- 3 druhy odhadu spolehlivost (pravděpodobnosti poruchy)



LSF +
funkce modelu

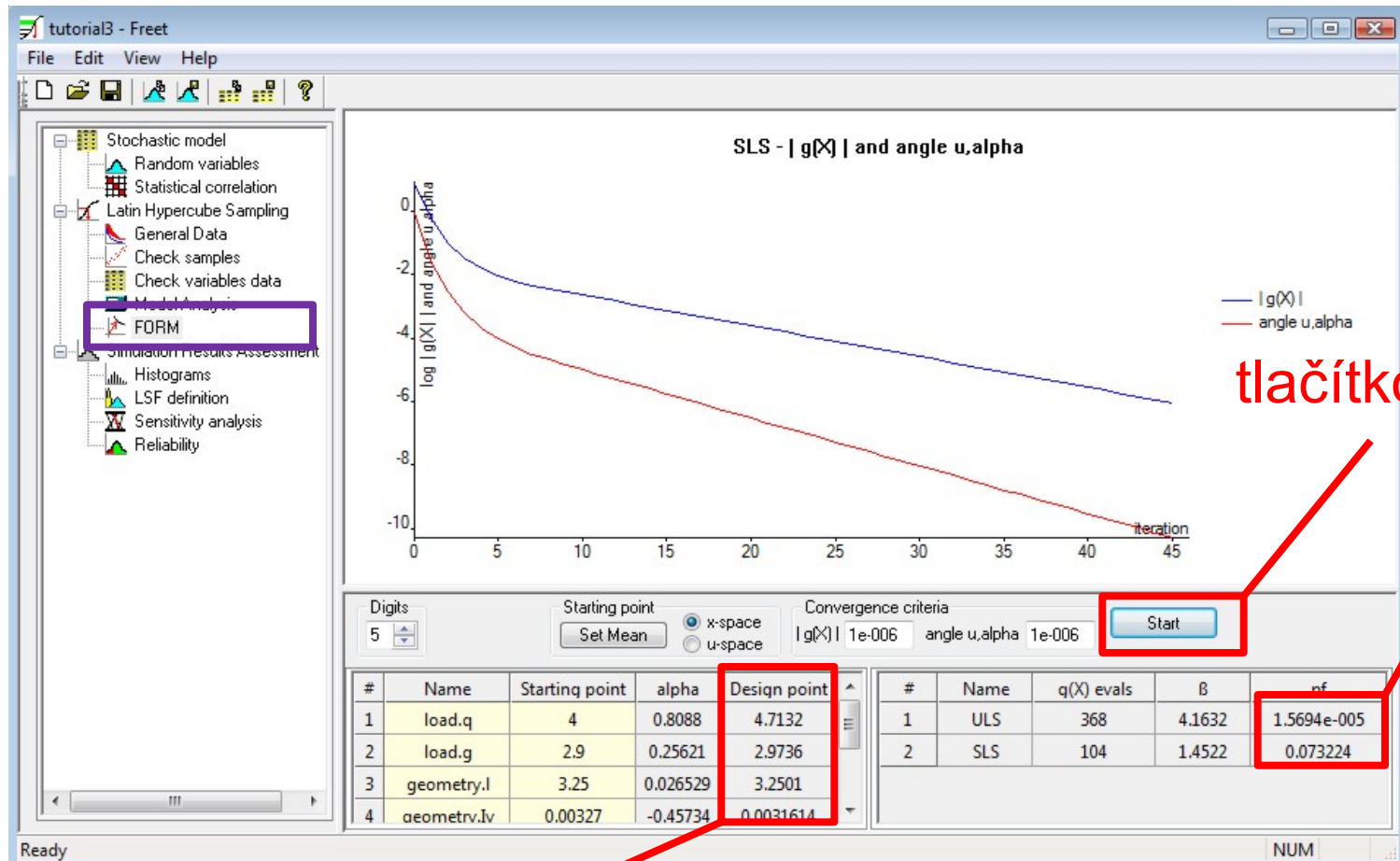
p_f podle
nejlepšího
proloženého
rozdělení

N_f/N

Cornellův index a odpovídající
pravděpodobnost poruchy

FReET tutorial – FORM

– First Order Reliability Method



souřadnice návrhového bodu



FReET tutorial – Výsledky

U
L
S

S

L
S

Tabulka 1. ULS pravděpodobnost poruchy

metoda	p_f
FORM	$1.57 \cdot 10^{-5}$
LHS mean ($N_{\text{tot}}=100$)	$2.83 \cdot 10^{-8}$ LogNormal(3 par)
LHS mean ($N_{\text{tot}}=1000$)	$1.77 \cdot 10^{-5}$ LogNormal(3 par)
LHS mean ($N_{\text{tot}}=10000$)	$6.75 \cdot 10^{-6}$ LogNormal(3 par)
LHS mean ($N_{\text{tot}}=100000$)	$1.02 \cdot 10^{-5}$ LogNormal(3 par)

Tabulka 2. SLS pravděpodobnost poruchy

metoda	p_f	N_f / N_{tot}	CoV of p_f
FORM	0.073		
LHS mean ($N_{\text{tot}}=100$)	0.083 LogNormal(3 par)	0.010	0.31
LHS mean ($N_{\text{tot}}=1000$)	0.076 LogNormal(3 par)	0.069	0.12
LHS mean ($N_{\text{tot}}=10000$)	0.077 LogNormal(3 par)	0.079	0.04
LHS mean ($N_{\text{tot}}=100000$)	0.077 LogNormal(3 par)	0.077	0.01

FReET tutorial – rezerva spolehlivosti

- nejprve definujeme **složky** rezervy spolehlivosti(LSF)

The screenshot shows the FReET software interface. On the left, a tree view under 'Simulation Results Assessment' includes 'Histograms', 'LSF definition', 'Sensitivity analysis', and 'Reliability'. The 'LSF definition' option is selected. Below the tree, there are three buttons: 'New Model Function', 'Delete Model Function', and 'Run Model Analysis'. A table displays the defined model functions:

#	Name of the DLL	Exported functions	Result name
1	Expression Evaluator ... a+b	$x5 \cdot x7 \cdot 1000$	MR
2	Expression Evaluator ... a+b	$1/8 \cdot (x1 + x2) \cdot x3^2$	ME
3	Expression Evaluator ... a+b	$x3/200$	wlim
4	Expression Evaluator ... a+b	$5/384 \cdot (x1 + x2) \cdot x3^4 / x6 / x4 / 1e3$	w

The status bar at the bottom shows 'Ready' and 'NUM'.

FReET tutorial – rezerva spolehlivosti

- poté je **složíme** do výsledné funkce (LSF)

The screenshot shows the FReET software interface. On the left is a tree view with categories like 'Stochastic model', 'Simulation Results Assessment', and 'Histograms'. The 'LSF definition' option under 'Histograms' is highlighted with a red box. The main area displays three histograms: 'MR' (top left), 'ME' (top right), and 'ULS' (bottom left). Below the histograms are 'New LSF' and 'Delete LSF' buttons. At the bottom is a table for defining LSFs.

funkce modelu a veličiny z kategorie “comparative values”

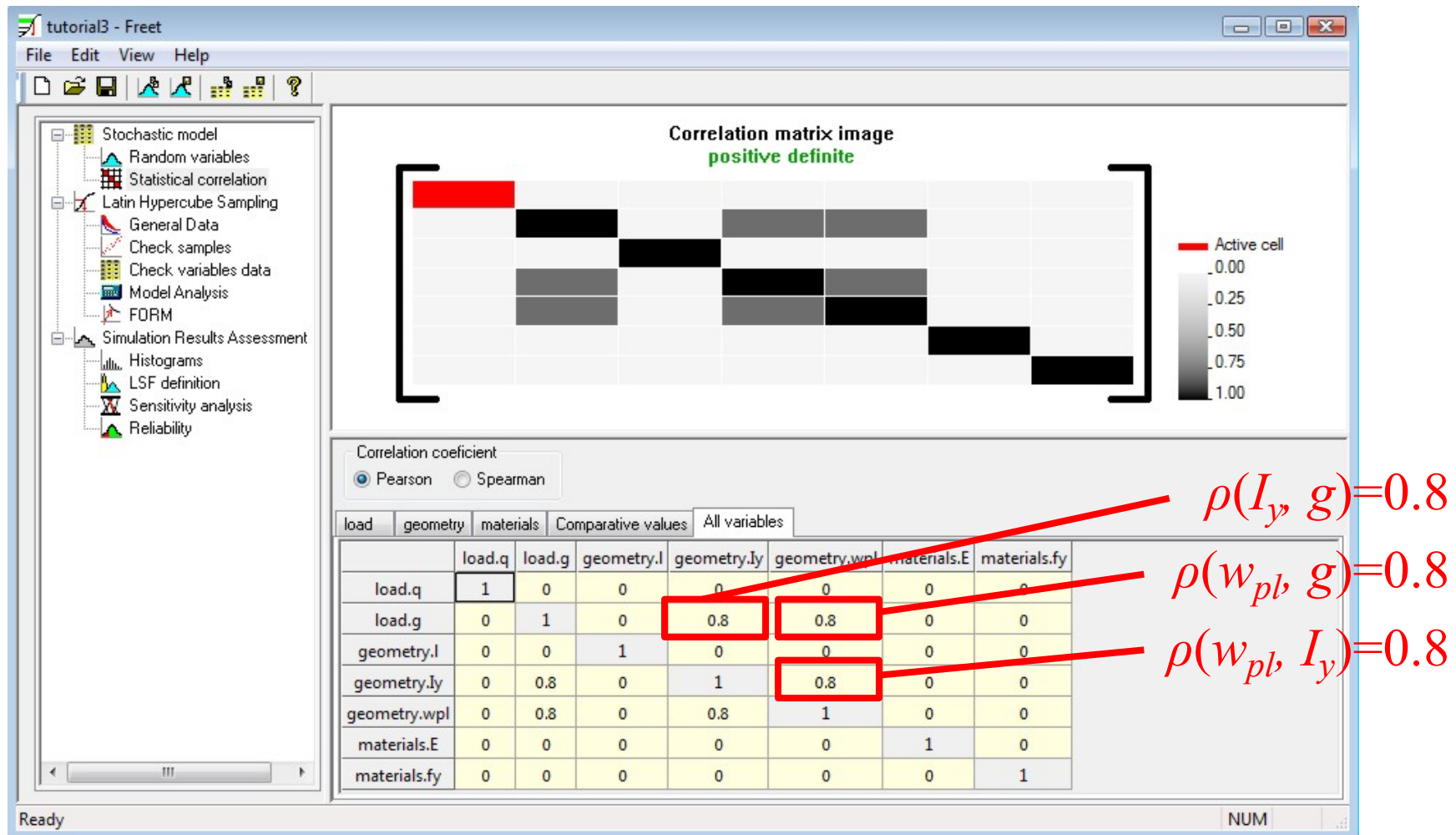
nová rezerva spolehlivosti

#	LSF Name	Classes	I	Operation	II
1	ULS	20	MR	-	ME
2	SLS	20	wlim	-	

+, -, X, :

FReET tutorial – korelace

- uvažujme nenulovou korelaci mezi některými veličinami





FReET tutorial – korelace

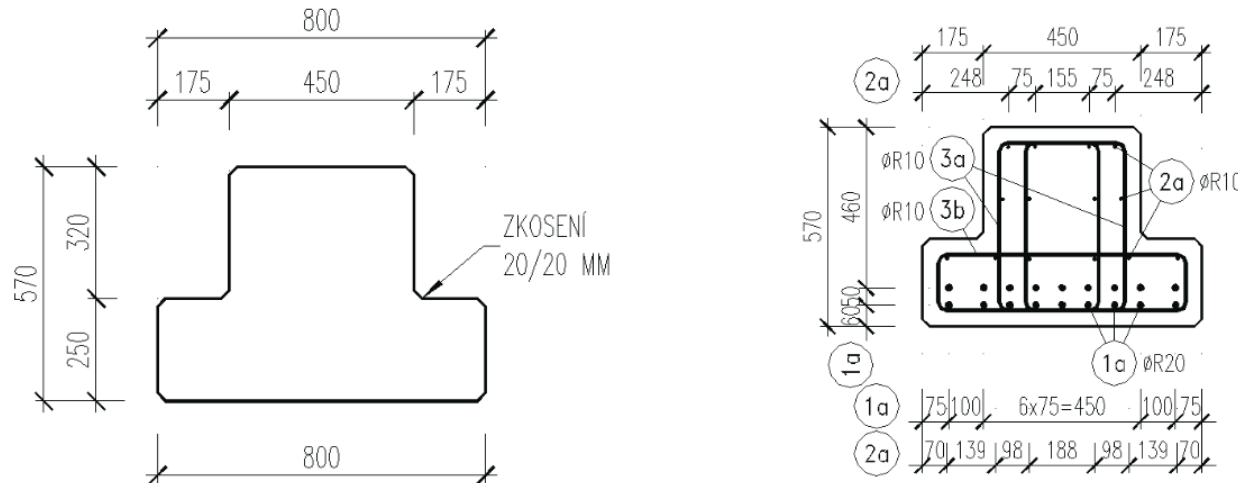
- efekt korelace na spolehlivost nosníku

Tabulka 3. Pravděpodobnost poruchy s korelací a bez korelace vstupních veličin

mezní stav		p_f	N_f / N_{tot}	CoV p_f
ULS	nekorelované	$1.02 \cdot 10^{-5}$ LogNormal(3 par)	0	-----
	korelované	$9.47 \cdot 10^{-5}$ LogNormal(3 par)	$1 \cdot 10^{-5}$	1
SLS	nekorelované	0.077 LogNormal(3 par)	0.077	0.01
	korelované	0.057 LogNormal(3 par)	0.056	0.01

Aplikace s využitím JCSS

- Joint Committee on Structural Safety - poskytuje statistické modely pro vstupní veličiny a jejich případnou závislost
- příklad a obrázky převzaty ze skript: Sadílek, V., Doležel, J. a Vořechovský, M. Řešené úlohy z oblasti spolehlivosti stavebních konstrukcí, Brno, 2010
- ověření únosnosti ŽB průvlaku T-průřezu, který je součástí skeletového systému výrobní haly



Obrázek 6.
Řez
průvlakem,
vyztužení



Aplikace s využitím JCSS

- působí jako prostý nosník, efektivní délka 7.75 m, vzdálenost mezi průvlaky je 7 m, celková plocha 350 m²
- JCSS geometrie betonových dílců: CoV=0.006
- JCSS vlastní tíha betonu: $\mu=24$ kN/m³, CoV=0.04
- JCSS užité zatížení: $\mu=m_q$ $\sigma^2 = \sigma_v^2 + \sigma_u^2 A_0 \kappa / A$
lehký průmysl: $m_q = 1$ kN/m², $\sigma_v = 1$ kN/m², $\sigma_u = 2.8$ kN/m²,
 $A_0 = 100$ m², κ přibližně 1
- JCSS poloha výztuže: min 5 cm, max 10 cm
- JCSS plocha výztuže: CoV = 0.02
- JCSS tahová pevnost: s=40 MPa
- JCSS tlaková pevnost: CoV = 0.06

Aplikace s využitím JCSS

veličina	symbol		rozdělení	mean	CoV
konstrukce stropu	g	kN/m^2	normální	5.5	0.1
tíha železobetonu	g_b	kN/m^3	normální	2.4	0.04
plocha průvlaku	A	m^2	normální	0.343	0.01
nahodilé dlouhodobé z.	g_t	kN/m^2	Gamma	1	1.8
délka průvlaku	l	m	normální	7.75	0.006
šířka	b	m	normální	0.45	0.006
výška	h	m	normální	0.57	0.006
poloha výztuže	d	m	Beta	0.085	0.07
plocha výztuže	A_s	m^2	normální	0.005283	0.02
tahová pevnost	f_y	MPa	lognormální	580	0.07
tlaková pevnost	f_c	MPa	lognormální	43	0.06

Aplikace s využitím JCSS

- moment od zatížení

$$M_e = \frac{1}{8} l^2 (7.5g + Ag_b + 7.5g_l)$$

- únosnost

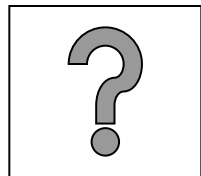
$$M_r = A_s f_y \left(h - d - \frac{A_s f_y}{b f_c} \right)$$

- rezerva spolehlivosti $g = M_r - M_e$
- pravděpodobnost poruchy: 0.000716

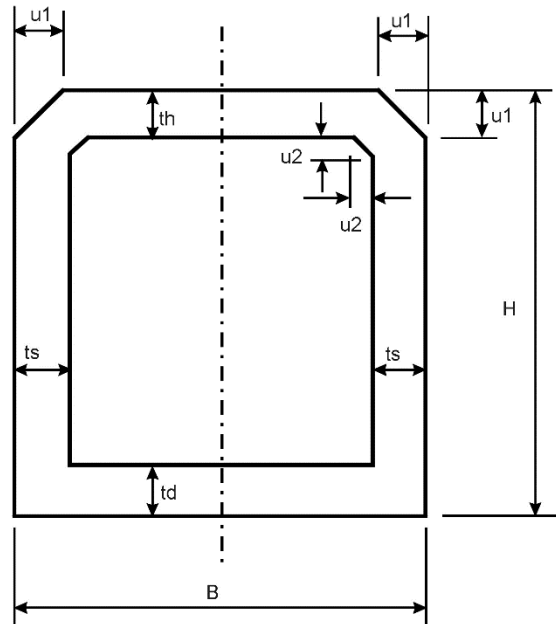
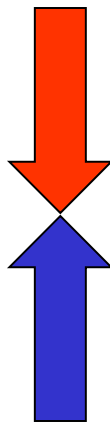
Aplikace: tunel metra

- betonový tunel metra pod řekou Vltavou v Praze (2002)
- **cíl**: určit potřebnou hmotnost barelů s vodou k minimalizaci nebezpečí nadnášení tunelu při jeho výstavbě

hmotnost
tunelu



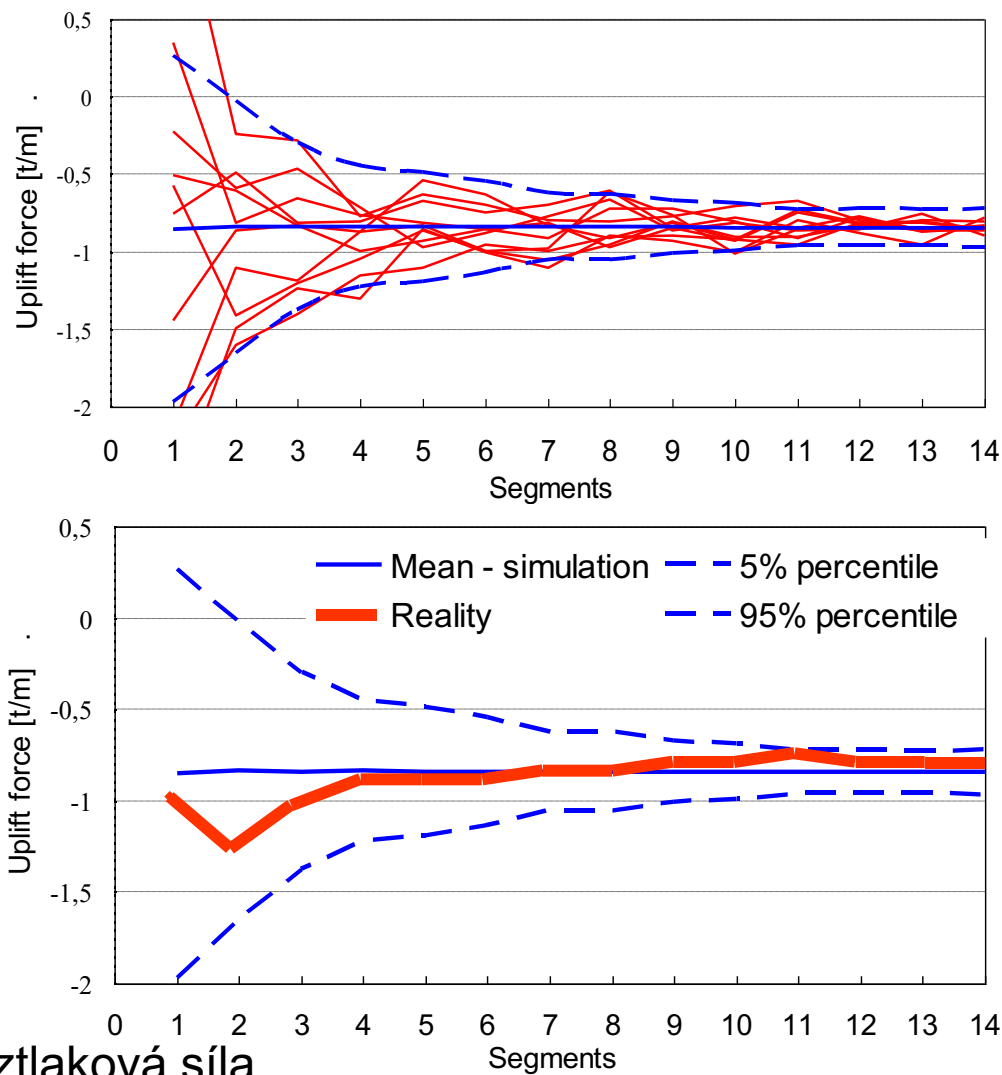
vztlaková
síla



Obrázek 7. Tunel metra

Aplikace: tunel metra

- 211 náhodných veličin
- imperfekce v geometrii, 14 segmentů
- výpočet vztlakové síly pomocí metody Monte Carlo ve FReETu
- stanovení 5% a 95% kvantilů
- potvrzeno měřením na skutečné konstrukci

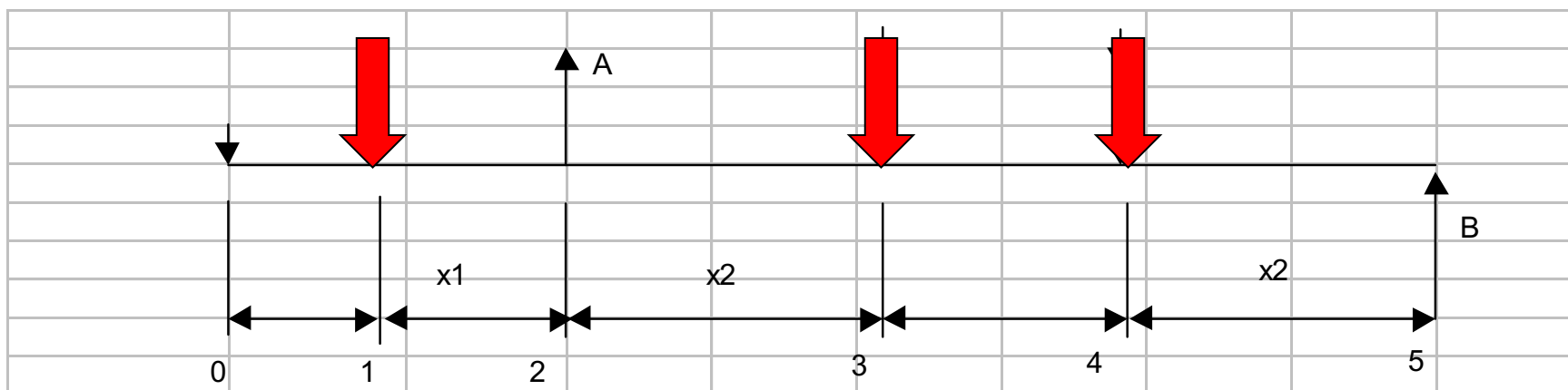
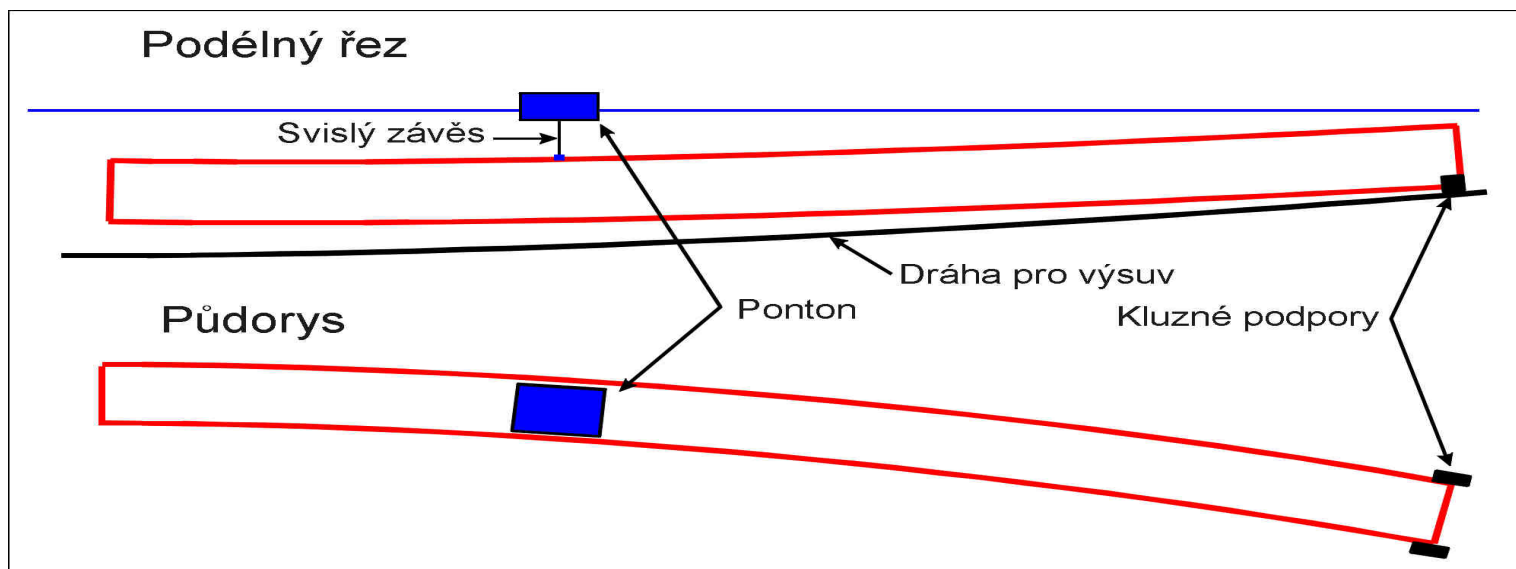


Obrázek 8. Měřená a simulovaná vztlaková síla

Aplikace: tunel metra



Obrázek 9. Poloha barelů s vodou



Obrázek 10. Hmotnost barelů s vodou

