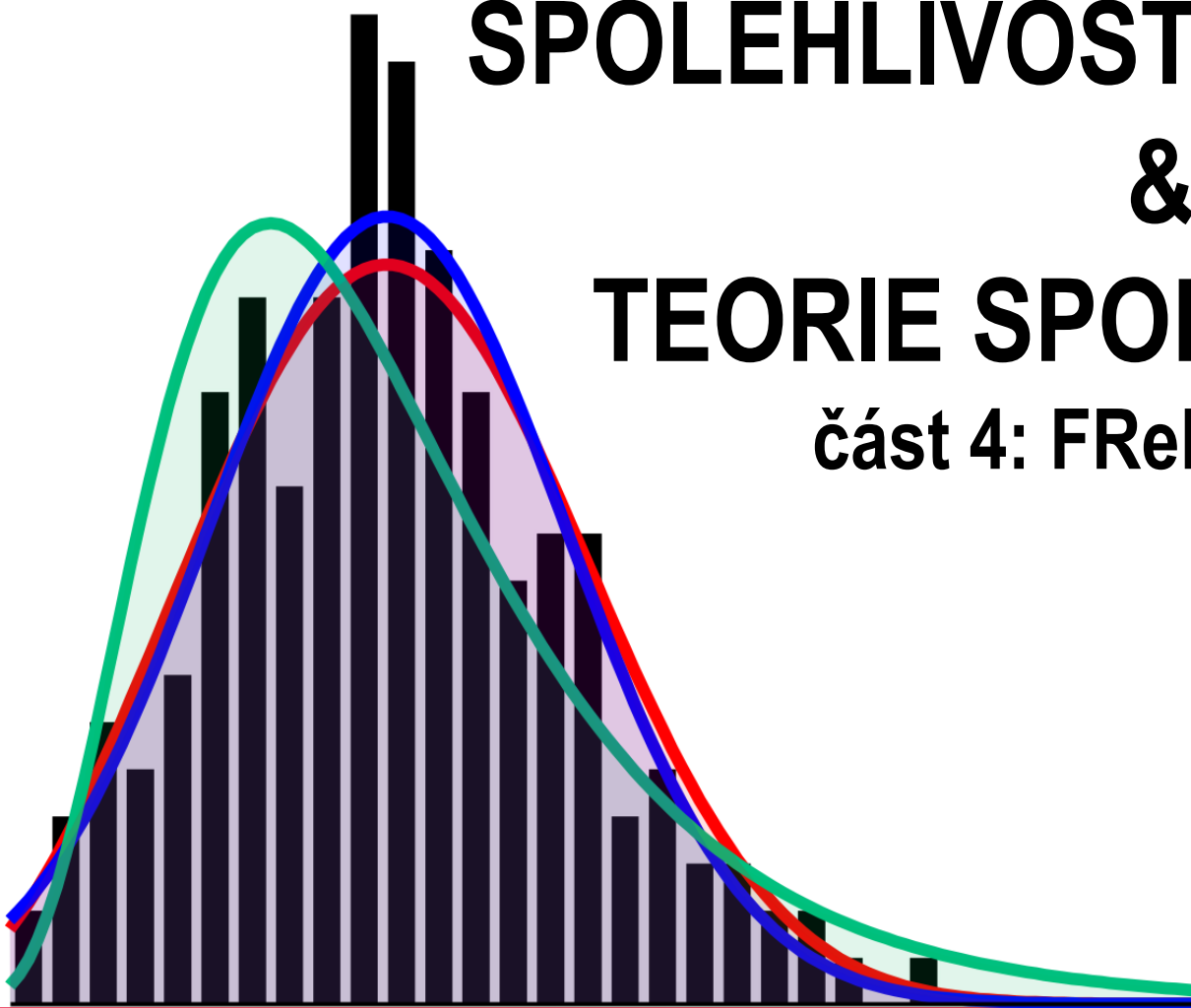




SPOLEHLIVOST KONSTRUKCÍ & TEORIE SPOLEHLIVOSTI

část 4: FReET – úvod



Drahomír Novák
Jan Eliáš



část 4 FReET - úvod

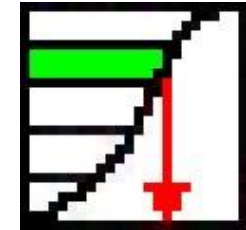


MC analýza na počítači

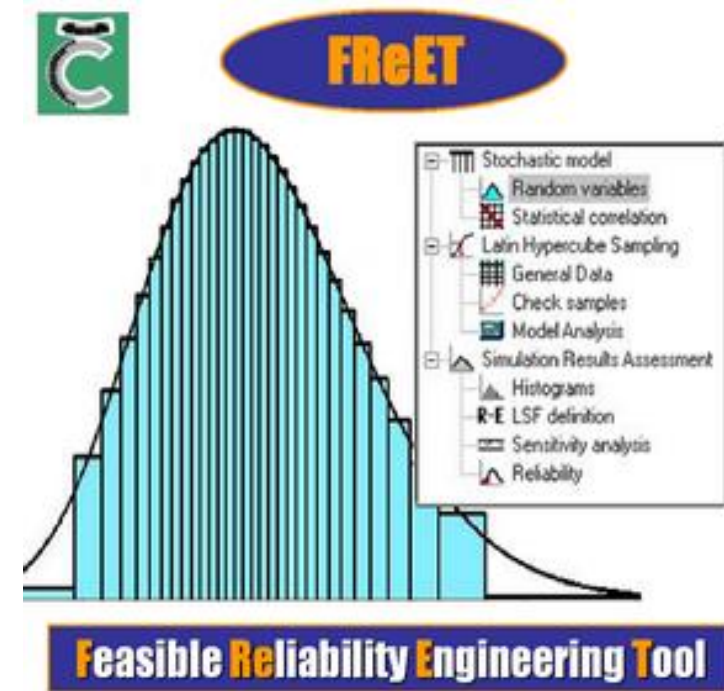
- **Excel**: možné, ale velmi málo typů rozdělení, nezle zavést korelace omezená grafika, pracné. **Crystal Ball**: nástavba na Excel
- **VAP, StruRel, Slang, M-Star, C-Fit, Codecal, Profes, Unipas, Proban, Phimeca-Soft, Nessus, Cossan, CalRel, PPDV, ...**
- často vyvíjeno nejprve na univerzitách a poté 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

- Feasible **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/strojním inženýrství typicky materiálové vlastnosti, zatížení, imperfekce,...).
- vyvíjeno na **Vysokém Učení Technickém v Brně** (Drahomír Novák, Miroslav Vořechovský & Radoslav Rusina)



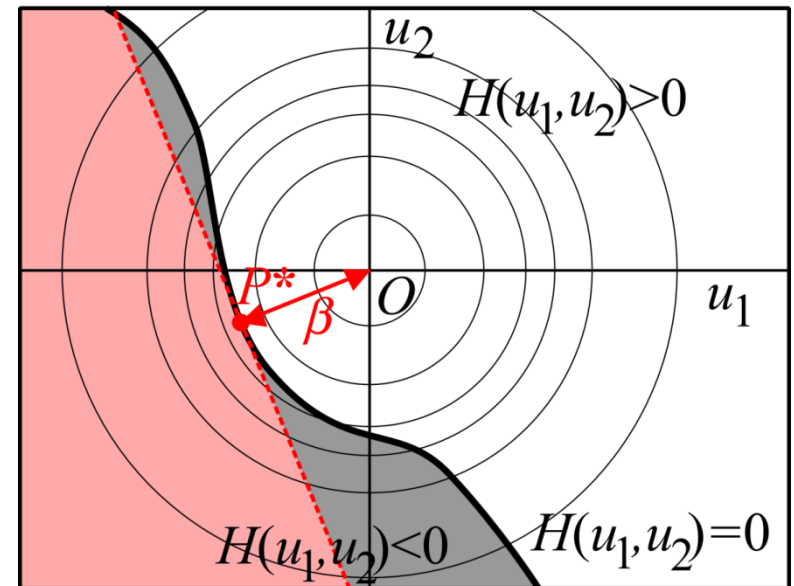
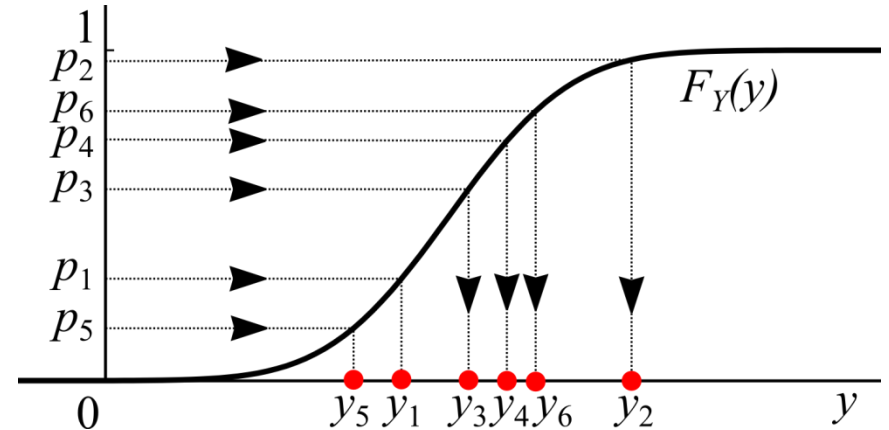
Obrázek 1. FReET ikona



Obrázek 2. FReET logo

FReET pravděpodobnostní techniky

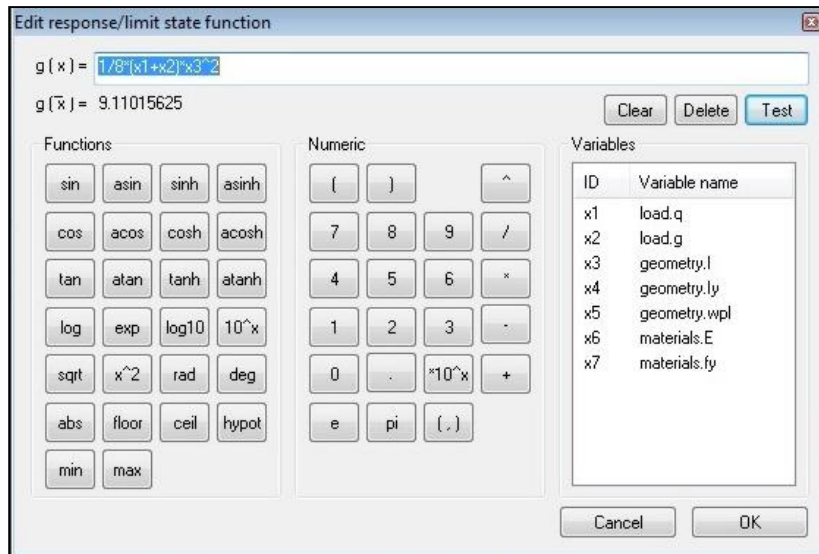
- pravděpodobnostní techniky
 - MC simulace
 - LHS (3 typy)
 - LHS mean
 - LHS median
 - LHS random
 - FORM
- odhad rozdělení (určení nejvhodnějšího modelu rozdělení)
- robustní zavedení korelace skrz **Simulované Žihání**



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;

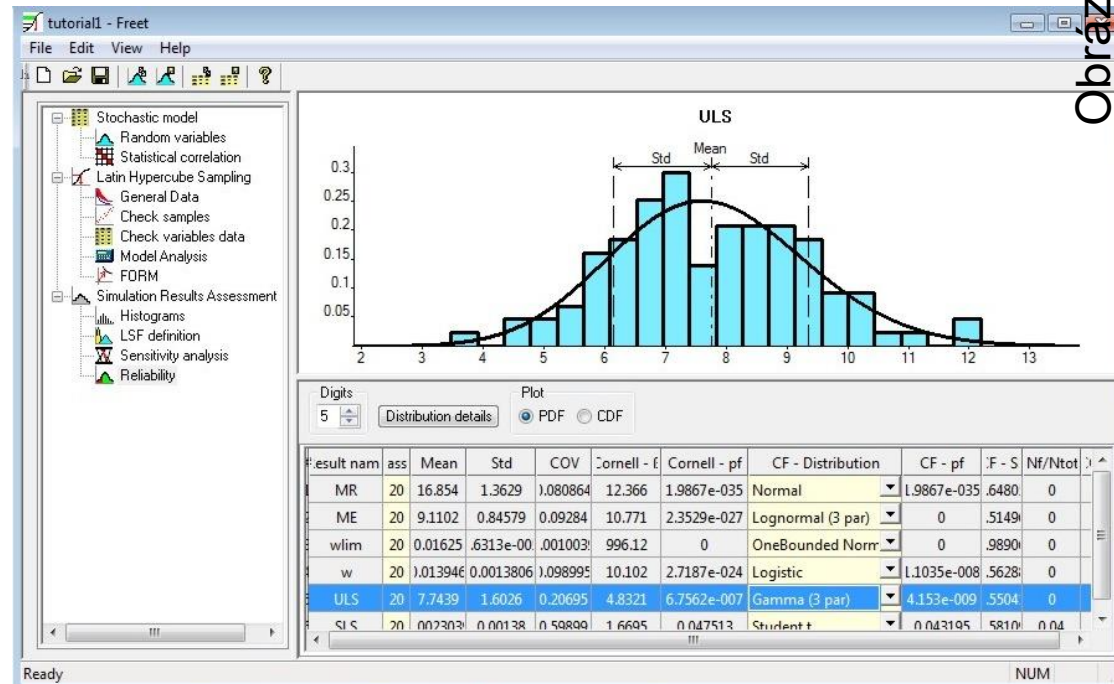
return x;
}
    
```

Obrázek 4. “Kalkulačka” & kód DLL funkce



FReET vlastnosti

- rozsáhlá knihovna rozdění
- 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



Obrazek 5. FReET GUI



FReET hlavní okno

The screenshot shows the FReET software interface. On the left is a navigation tree with categories like 'Stochastic model', 'Latin Hypercube Sampling', 'Model Analysis', and 'Simulation Results Assessment'. The main area is divided into two panels:

- grafický panel (graphical panel):** Displays a histogram for the 'ULS' variable. The x-axis ranges from 2 to 13, and the y-axis ranges from 0 to 0.3. A normal distribution curve is overlaid on the histogram. The mean is approximately 7.7, and the standard deviation is approximately 1.6. The histogram bars are light blue.
- textový panel (textual panel):** Shows a table of simulation results. The table has columns for 'result nam', 'ass', 'Mean', 'Std', 'COV', 'Cornell - f', 'Cornell - pf', 'CF - Distribution', 'CF - pf', 'F - S', and 'Nf/Ntot'. The 'ULS' row is highlighted in blue.

Below the histogram, there are controls for 'Digits' (set to 5), 'Plot' (PDF selected), and 'Distribution details'. The table below shows the following data:

result nam	ass	Mean	Std	COV	Cornell - f	Cornell - pf	CF - Distribution	CF - pf	F - S	Nf/Ntot
MR	20	16.854	1.3629	0.080864	12.366	1.9867e-035	Normal	1.9867e-035	.6480	0
ME	20	9.1102	0.84579	0.09284	10.771	2.3529e-027	Lognormal (3 par)	0	.5149	0
wlim	20	0.01625	.6313e-00	.001003	996.12	0	OneBounded Norm	0	.9890	0
w	20	0.013946	0.0013806	0.098995	10.102	2.7187e-024	Logistic	1.1035e-008	.5628	0
ULS	20	7.7439	1.6026	0.20695	4.8321	6.7562e-007	Gamma (3 par)	4.153e-009	.5504	0
SI S	20	0.02303	0.00138	0.59899	1.6695	0.047513	Student t	0.043195	.5810	0.04

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)

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

$$M_R = w_{pl} f_y; \quad M_E = \frac{1}{8} (g + q) l^2$$

- **SLS** (mezní stav použitelnosti)

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

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



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	0.05
I_y	m ⁴	Normal	$3.27 \cdot 10^{-3}$	$1.63 \cdot 10^{-4}$	0.08
w_{pl}	m ³	Normal	$6.36 \cdot 10^{-5}$	$5.09 \cdot 10^{-6}$	0.04
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

The screenshot shows the FReET software interface. On the left is a tree view with 'Random variables' highlighted. The main window displays a normal distribution plot for variable 'q' with mean 4 and standard deviation 0.6. Below the plot is a control panel with 'Category' and 'Variable' buttons, and a table of variables.

#	Name	Distribution	Descriptors	Mean	Std	Status
1	q	Lognormal (2 par)	Moments & params	4	0.6	O.K.
2	g	Lognormal (2 par)	Moments & params	2.9	0.2175	O.K.

tvorba/odstranění veličin

práce s kategoriemi

jména veličin

rozdělení

momenty a/nebo parametry



FReET tutorial – vstupní veličiny

– na výběr mnoho rozdělení

The screenshot shows the FReET software interface. On the left, a tree view under 'Stochastic model' has 'Random variables' highlighted with a purple box. A red box highlights a list of distribution options, with 'Lognormal (2 par)' selected. The main window displays a plot of a distribution curve with 'Mean' and 'Std' markers. Below the plot, a table shows the distribution parameters for variable 'g'.

#	Name	Descriptors	Mean	Std	COV	Skewness	Kurtosis excess	Status
1	q	Moments	4	0.6	0.15	0.45337	0.36766	O.K.
2	g	Moments	2.9	0.2175	0.075	0.22542	0.090476	O.K.

PDF/CDF
přepínač

výběr rozdělení



FReET tutorial – stanovení korelace

- povolena indefinitní korelační matice

The screenshot shows the FReET software interface. On the left is a tree view with 'Statistical correlation' highlighted. The main window displays a 'Correlation matrix image' with a red box around the text 'positive definite'. Below it is a table of correlation coefficients for variables: load.q, load.g, geometry.l, geometry.ly, geometry.wpl, materials.E, and materials.fy. A red box highlights the value '0' in the cell for geometry.l and geometry.wpl. A legend on the right indicates 'Active cell' with a color scale from 0.00 to 1.00.

	load.q	load.g	geometry.l	geometry.ly	geometry.wpl	materials.E	materials.fy
load.q	1	0	0	0	0	0	0
load.g	0	1	0	0	0	0	0
geometry.l	0	0	1	0	0	0	0
geometry.ly	0	0	0	1	0	0	0
geometry.wpl	0	0	0	0	1	0	0
materials.E	0	0	0	0	0	1	0
materials.fy	0	0	0	0	0	0	1

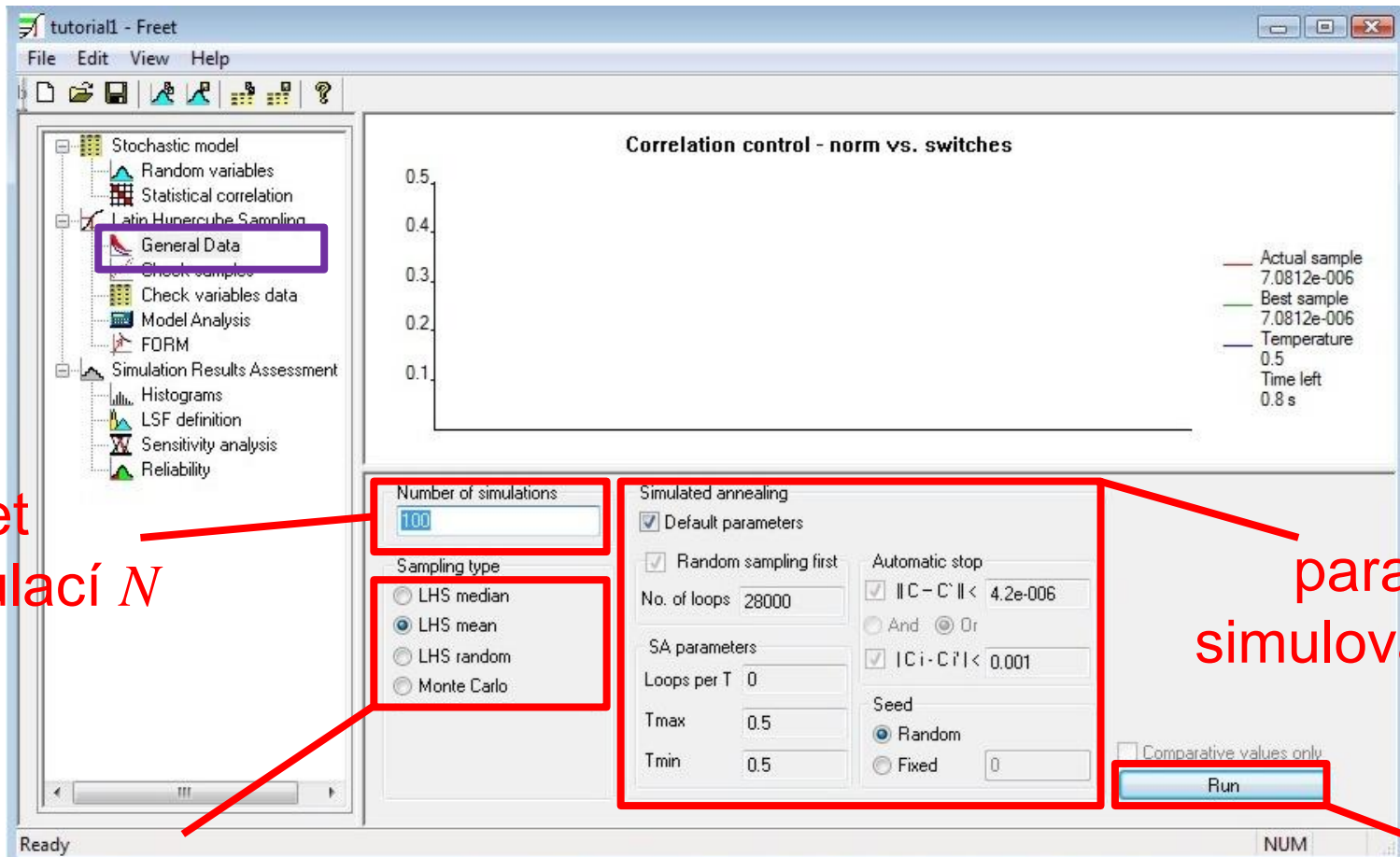
kontrola pozitivní
definitnosti

jednotlivé korelační koeficienty



FReET tutorial – vzorkování veličin

– čtyři vzorkovací typy



počet simulací N

Number of simulations
100

Sampling type
 LHS median
 LHS mean
 LHS random
 Monte Carlo

Simulated annealing
 Default parameters
 Random sampling first
No. of loops 28000
SA parameters
Loops per T 0
Tmax 0.5
Tmin 0.5
Automatic stop
 $\|C - C^*\| < 4.2e-006$
 And Or
 $|C_i - C^*| < 0.001$
Seed
 Random
 Fixed 0

parametry simulovaného žihání

Run

tlačítko start

vzorkovací metoda



FReET tutorial – zavádění korelace

- proběhne optimalizace pořadí pomocí simulovaného žíhání

The screenshot shows the FReET software interface. On the left is a tree view with 'General Data' highlighted. The main window displays a graph titled 'Correlation control - norm vs. switches' with a y-axis from 0.1 to 0.5. A red-bordered dialog box titled 'Reached correlation' is overlaid on the graph, containing the following information:

Maximum deviation in correlation matrix	0.00109
Quadratic overall norm	3.93e-006

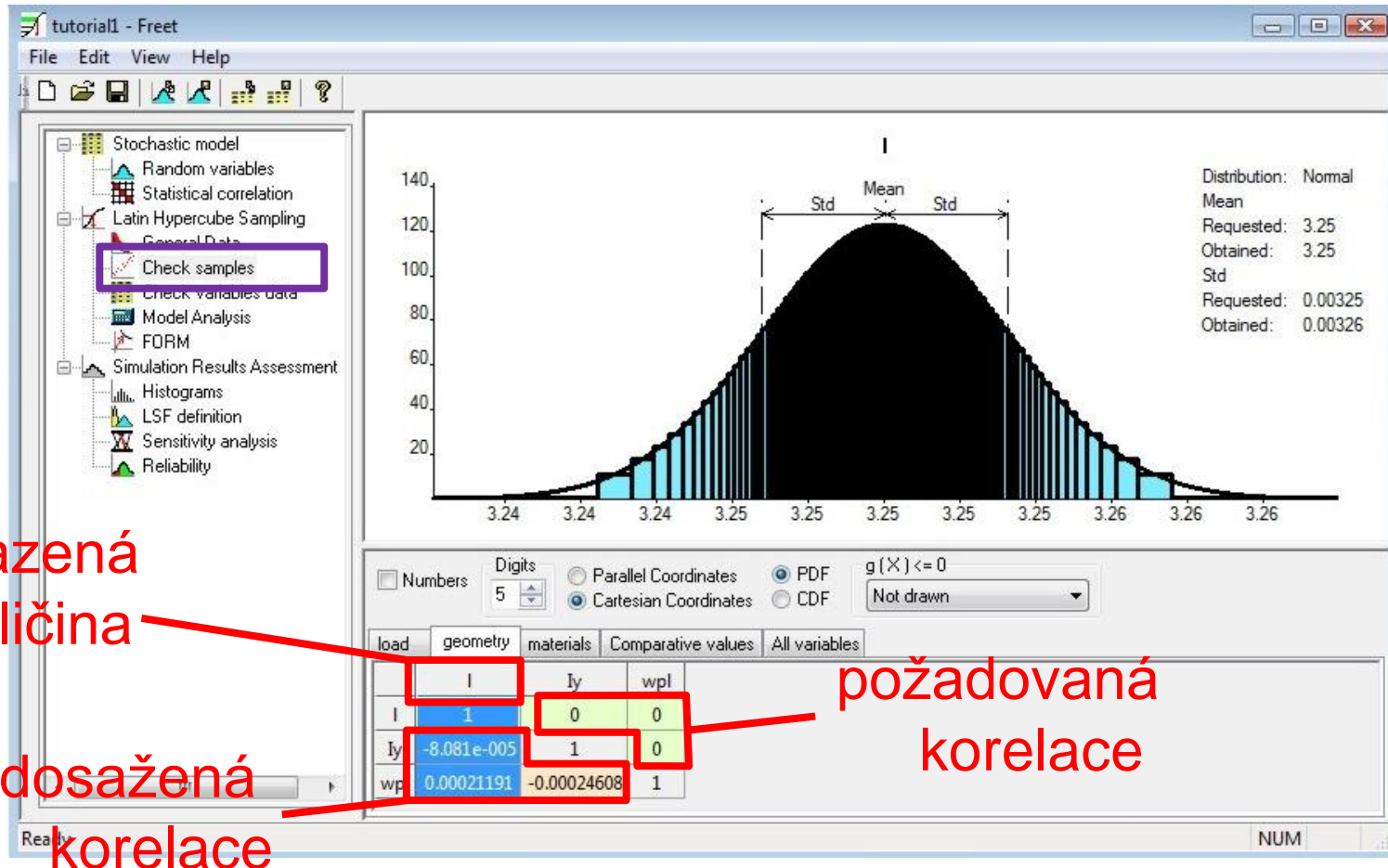
Below the dialog box, the 'Simulated annealing' section is visible, with 'Default parameters' and 'Random sampling first' checked. The 'Automatic stop' section shows '||C - C' || < 4.2e-006' and '|C_i - C_i'| < 0.001' checked. A red arrow points from the dialog box to the text 'rozdíl mezi požadovanou a dosaženou korelací'.

rozdíl mezi požadovanou a dosaženou korelací



FReET tutorial – prohlížení histogramů

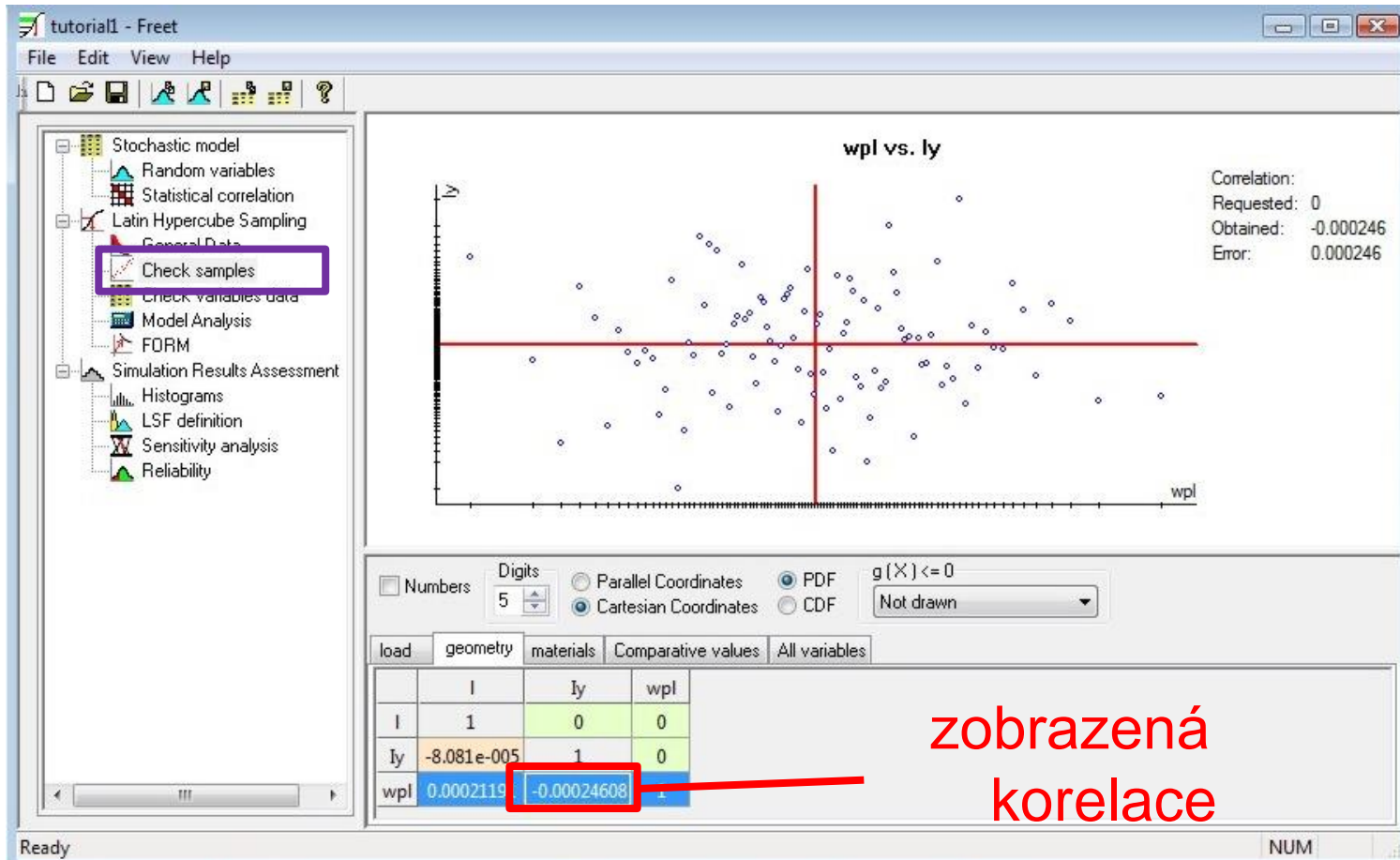
- kliknutí na veličinu zobrazí histogram





FReET tutorial – kontrola korelací

- kliknutí do korelační matice zobrazí vygenerované body



FReET tutorial – paralelní souřadnice

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

The screenshot shows the FReET software interface. The main window displays a parallel coordinates plot titled "wpl vs. ly". The plot shows a dense network of lines connecting three variables: l, ly, and wpl. A red vertical line is drawn through the plot. The interface includes a menu bar (File, Edit, View, Help), a toolbar, and a left-hand navigation tree. The control panel at the bottom shows the "Parallel Coordinates" option selected, and a table of correlation coefficients.

	l	ly	wpl
l	1	0	0
ly	-8.081e-005	1	0
wpl	0.00021191	-0.00024608	1

Ready NUM

přepínač

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

výpočet funkcí

vstup přes přímé zadání rovnic

nová funkce

vstup přes DLL

název funkce

#	Name of the DLL	Exported functions	Result name
1	Expression Evaluator	$5 \cdot x^7 \cdot 1000 - 1/8 \cdot (x_1 + x_2) \cdot x^3 \cdot 2$	ULS
2	Expression Evaluator	$3/200 - 5/384 \cdot (x_1 + x_2) \cdot x^3 \cdot 4/x_6/x_4/1e3$	SLS

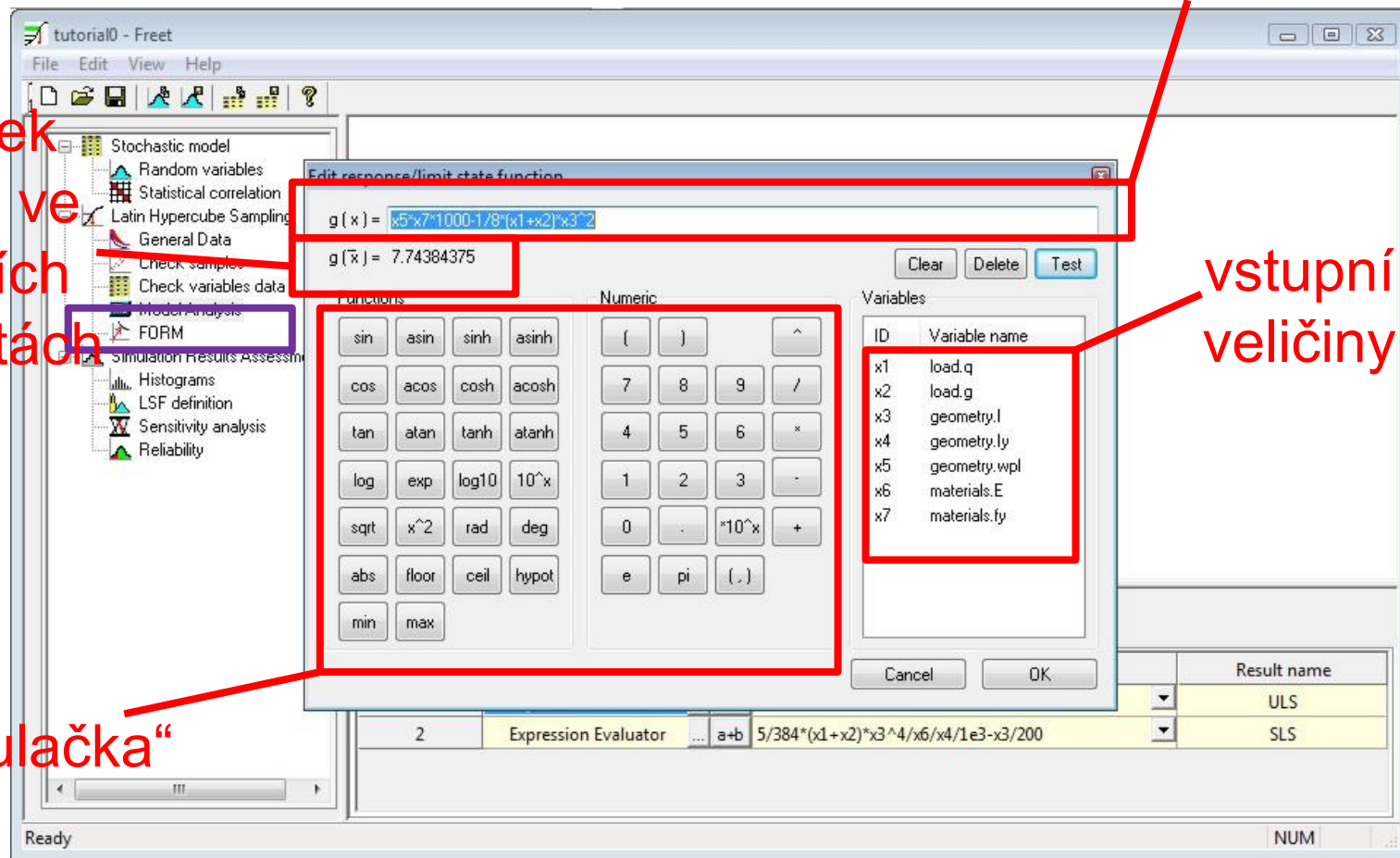


FReET tutorial – zadání rovnic

– jednoduchý editor explicitních funkcí

funkce

výsledek
funkce ve
středních
hodnotách
veličin



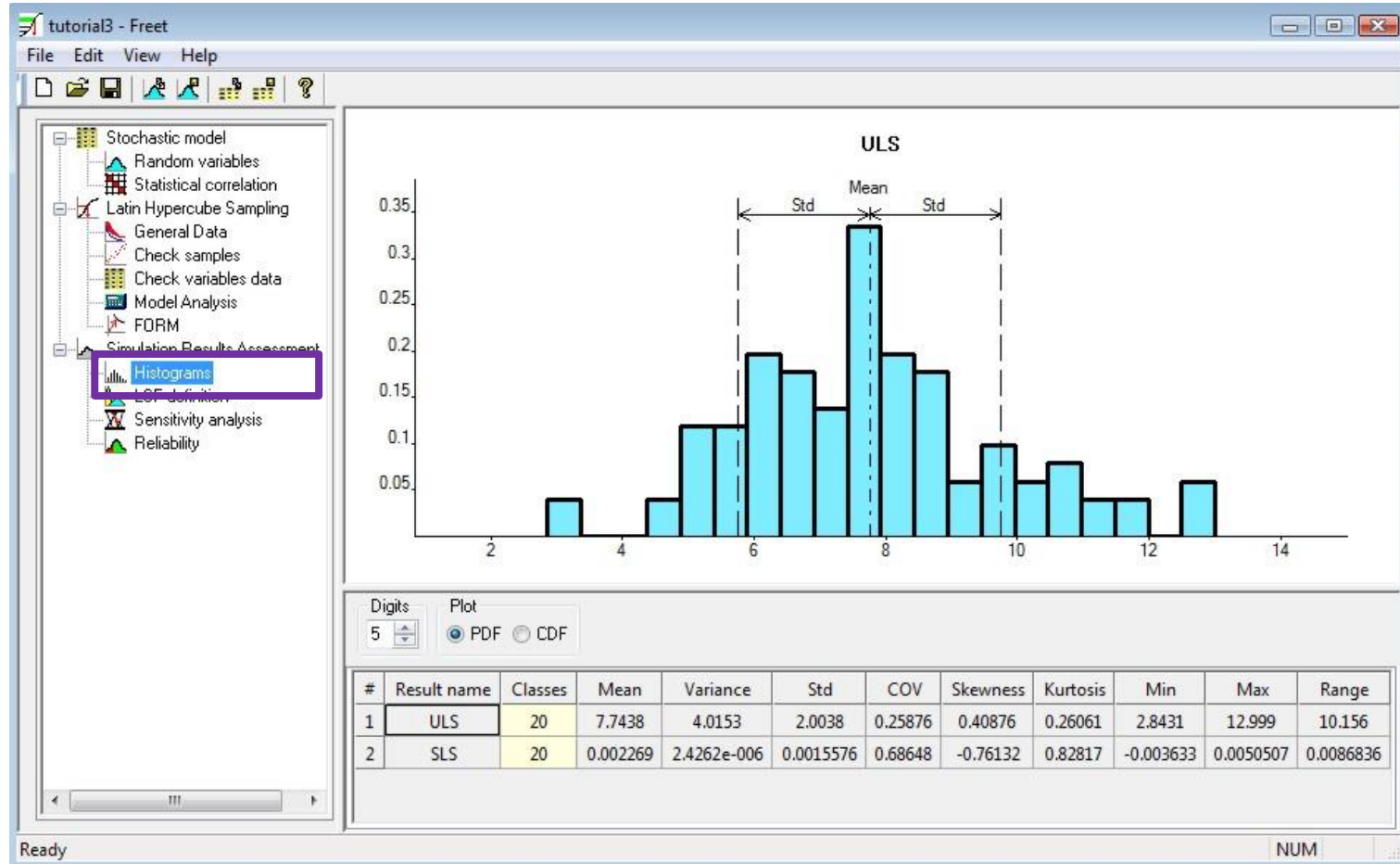
vstupní
veličiny

“kalkulačka”



FReET tutorial – histogramy funkcí

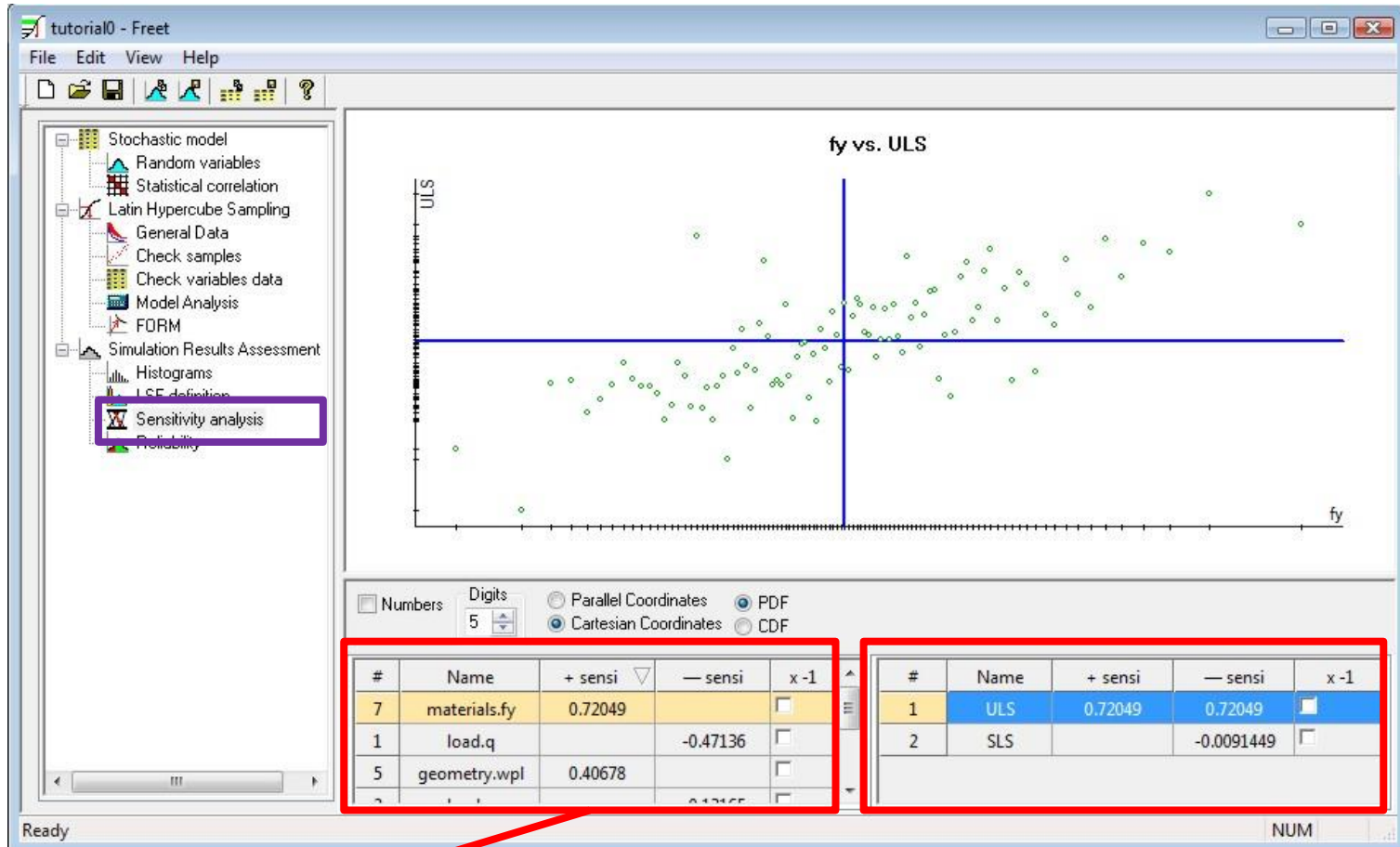
- výpočet charakteristik funkcí modelu + zobrazení histogramů





FReET tutorial – citlivostní analýza

- vizualizace v paralelních & kartézských souřadnicích, seřazení



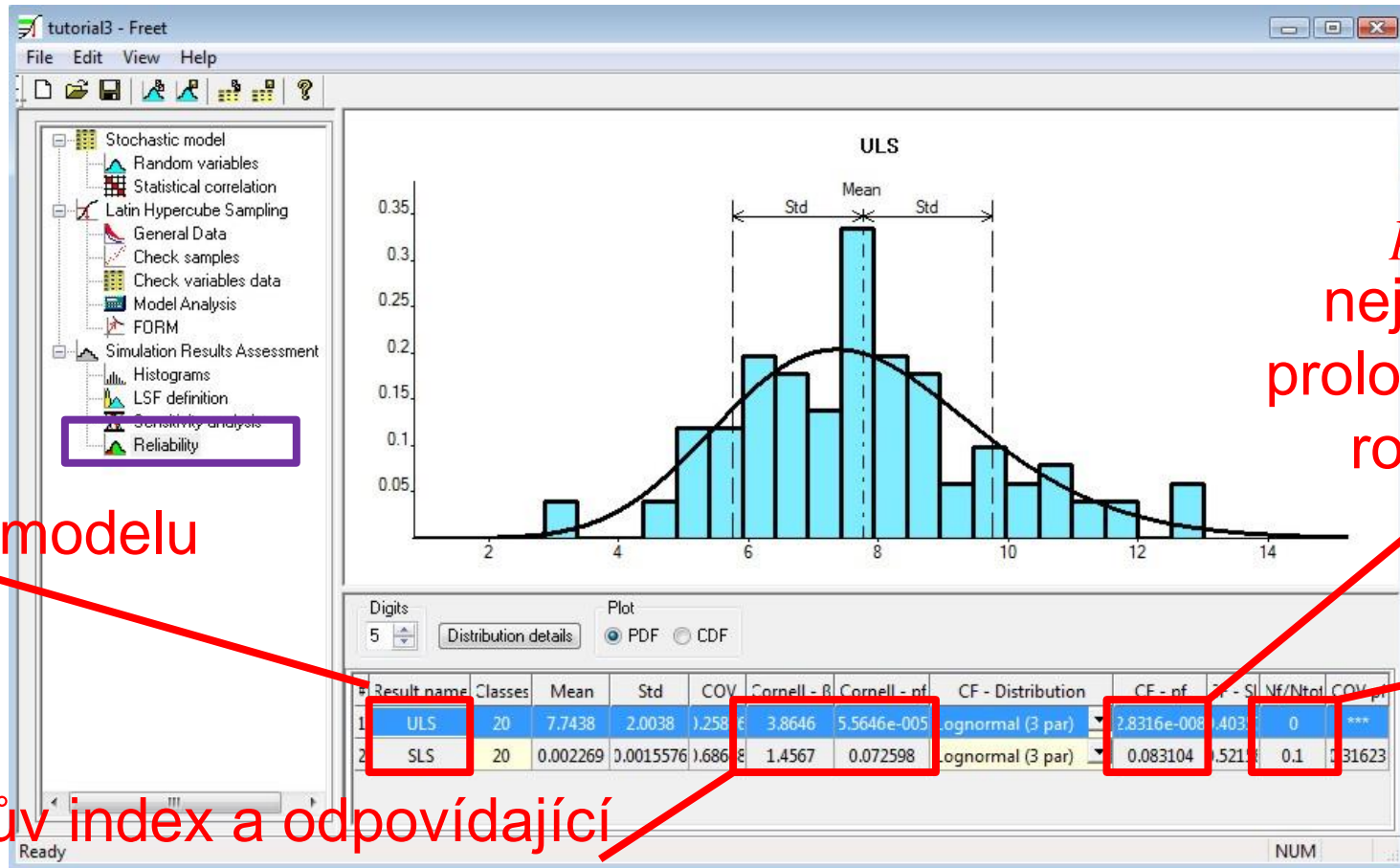
vstupní veličiny

výstupní veličiny



FReET tutorial – spolehlivost

- 3 druhy odhadu spolehlivost (pravděpodobnosti poruchy)



p_f podle nejlepšího proloženého rozdělení

N_f/N

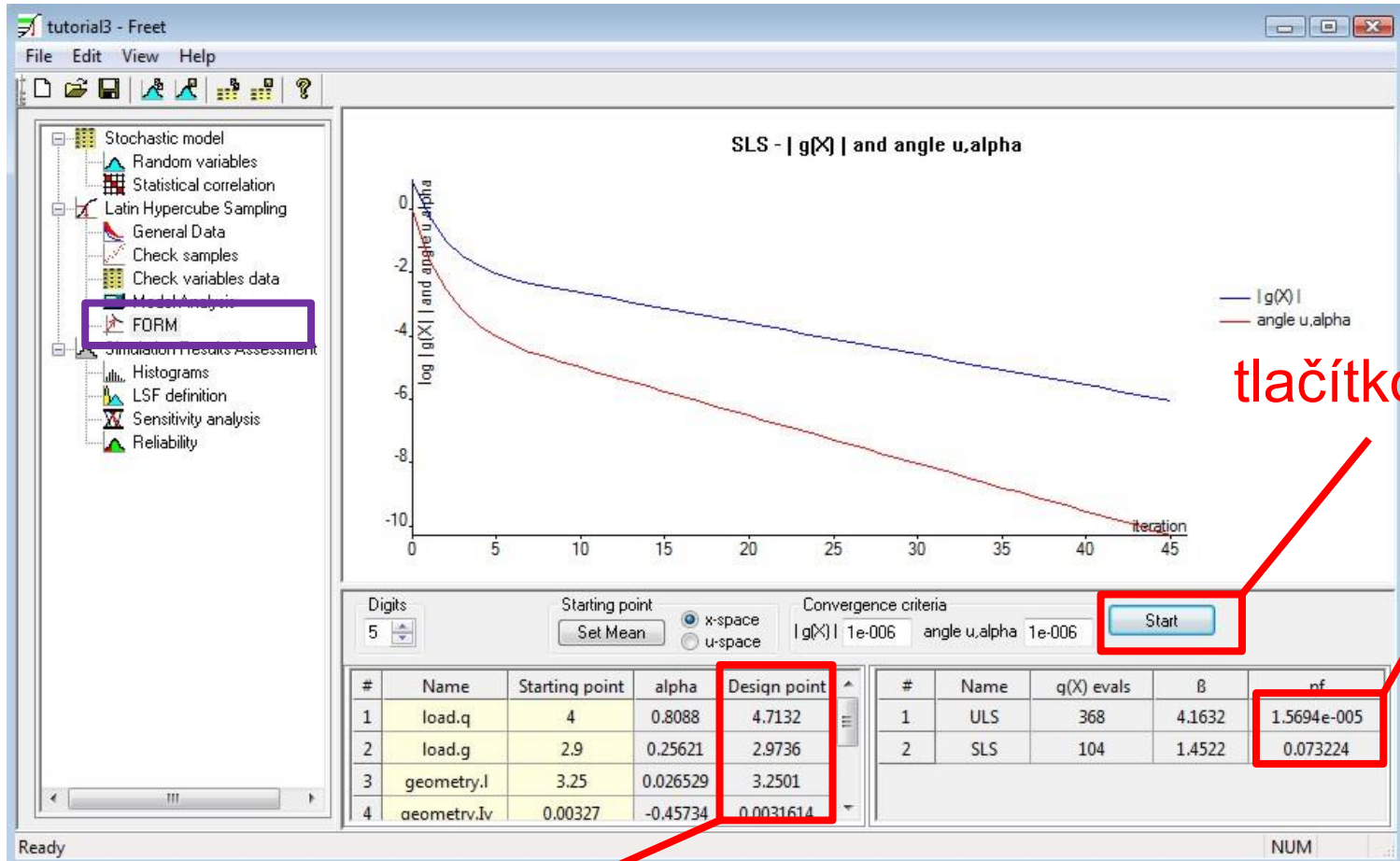
LSF + funkce modelu

Cornellův index a odpovídající pravděpodobnost poruchy



FReET tutorial – FORM

– First Order Reliability Method



tlačítko start

P_f

souřadnice návrhového bodu



FReET tutorial – Výsledky

Tabulka 1. ULS pravděpodobnost poruchy

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

Tabulka 2. SLS pravděpodobnost poruchy

metoda	p_f	N_f / N_{tot}	CoV of p_f
FORM	0.073		
LHS mean ($N_{tot}=100$)	0.083 LogNormal(3 par)	0.010	0.31
LHS mean ($N_{tot}=1000$)	0.076 LogNormal(3 par)	0.069	0.12
LHS mean ($N_{tot}=10000$)	0.077 LogNormal(3 par)	0.079	0.04
LHS mean ($N_{tot}=100000$)	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 is a project tree with the following structure:

- Stochastic model
 - Random variables
 - Statistical correlation
- Latin Hypercube Sampling
- General Data
- Check samples
- Check variables data
- Model Analysis
- FORM
- Simulation Results Assessment
 - Histograms
 - LSF definition
 - Sensitivity analysis
 - Reliability

At the bottom of the interface, there are three buttons: "New Model Function", "Delete Model Function", and "Run Model Analysis". Below these buttons is a table with the following data:

#	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



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 'LSF definition' highlighted. The main area displays three histograms: MR (blue), ME (yellow), and ULS (blue). Below the histograms are 'New LSF' and 'Delete LSF' buttons. At the bottom is a table with the following data:

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

funkce modelu a
veličiny z kategorie
“comparative
values”

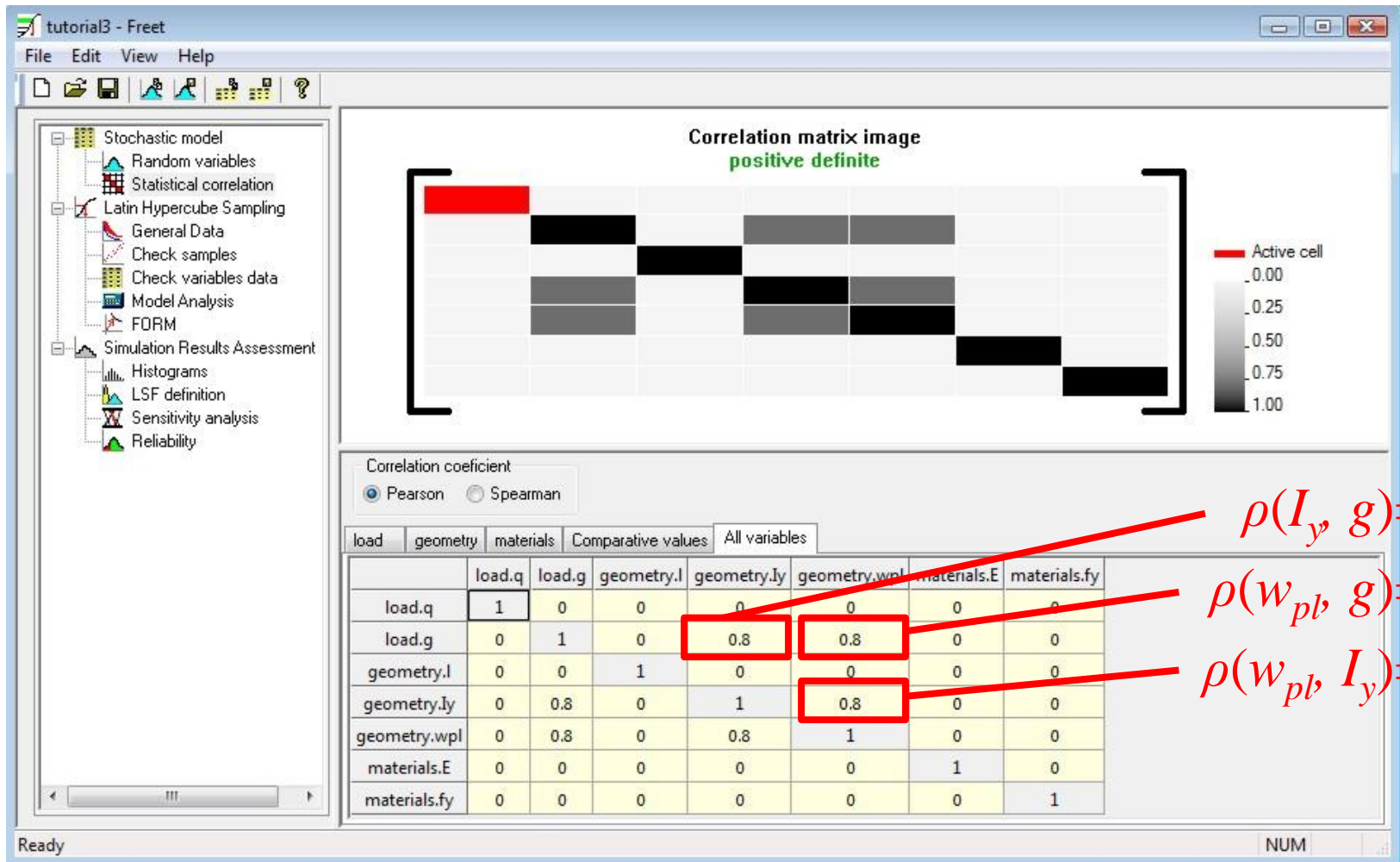
nová rezerva
spolehlivosti

+, -, X, :



FReET tutorial – korelace

- uvažujme nenulovou korelaci mezi některými veličinami





FReET tutorial – korelace

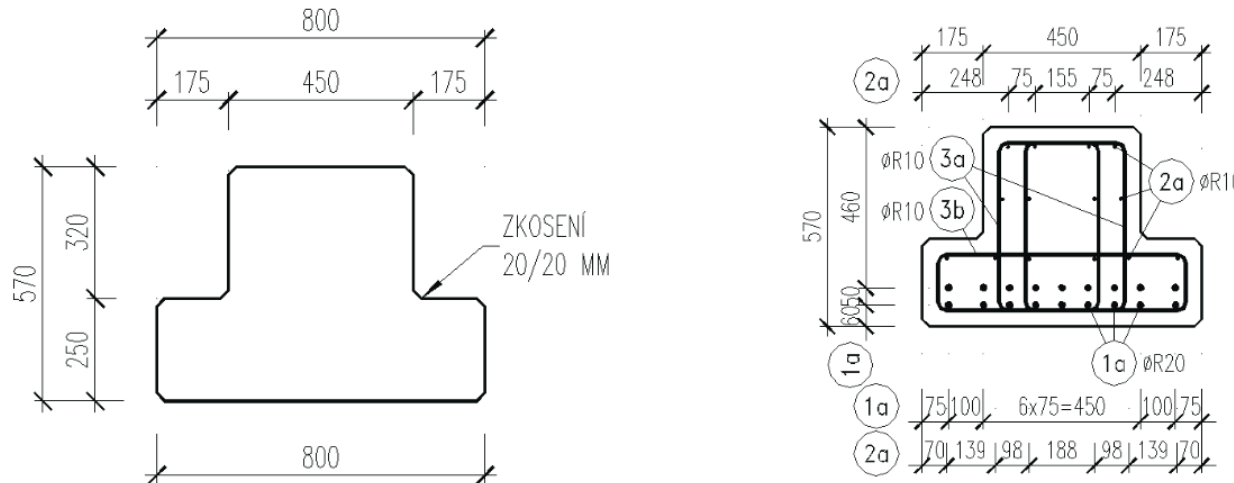
- efekt korelace na spolehlivost nosníku

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

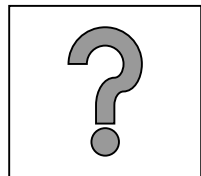
$$M_r = A_s f_y \left(h - d - \frac{A_s f_y}{b f_c} \right)$$

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

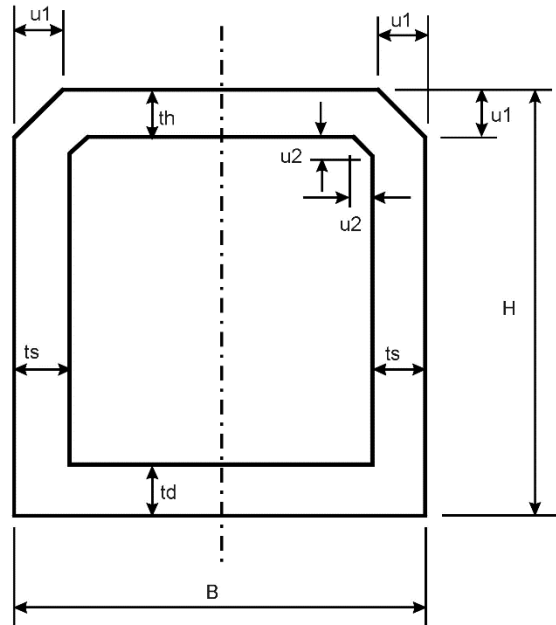
Aplikace: tunel metra

- 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

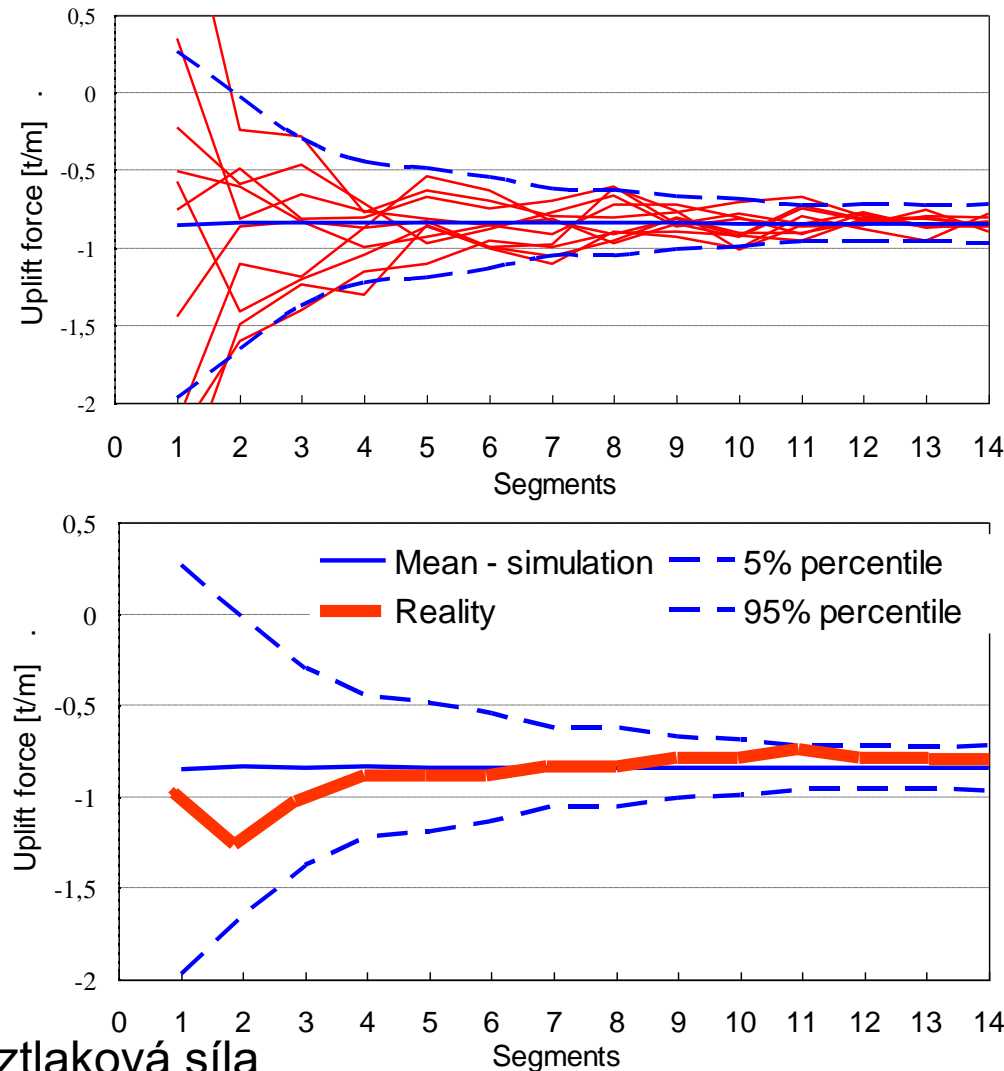


Obrázek 7. Tunel metra



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

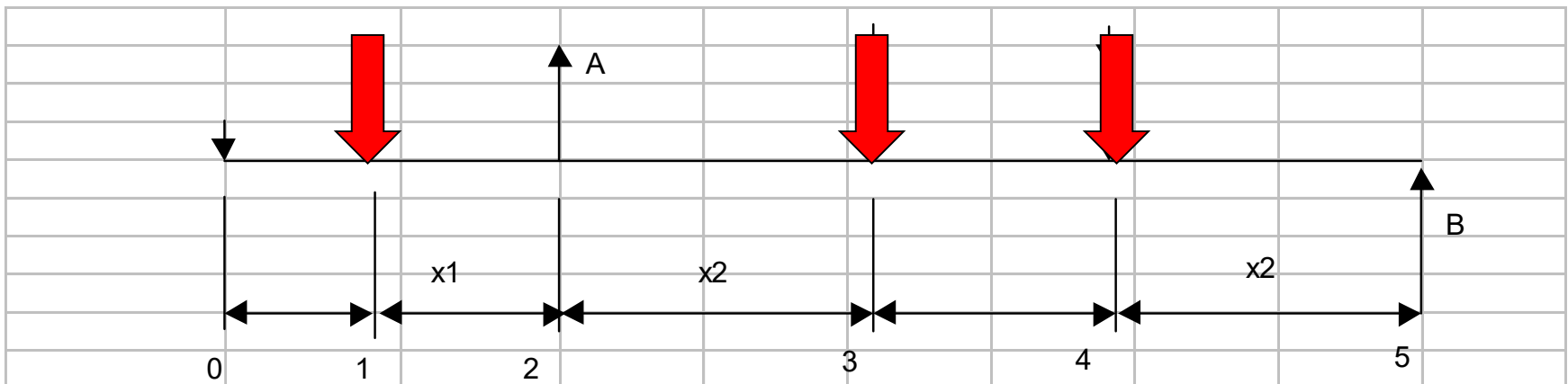
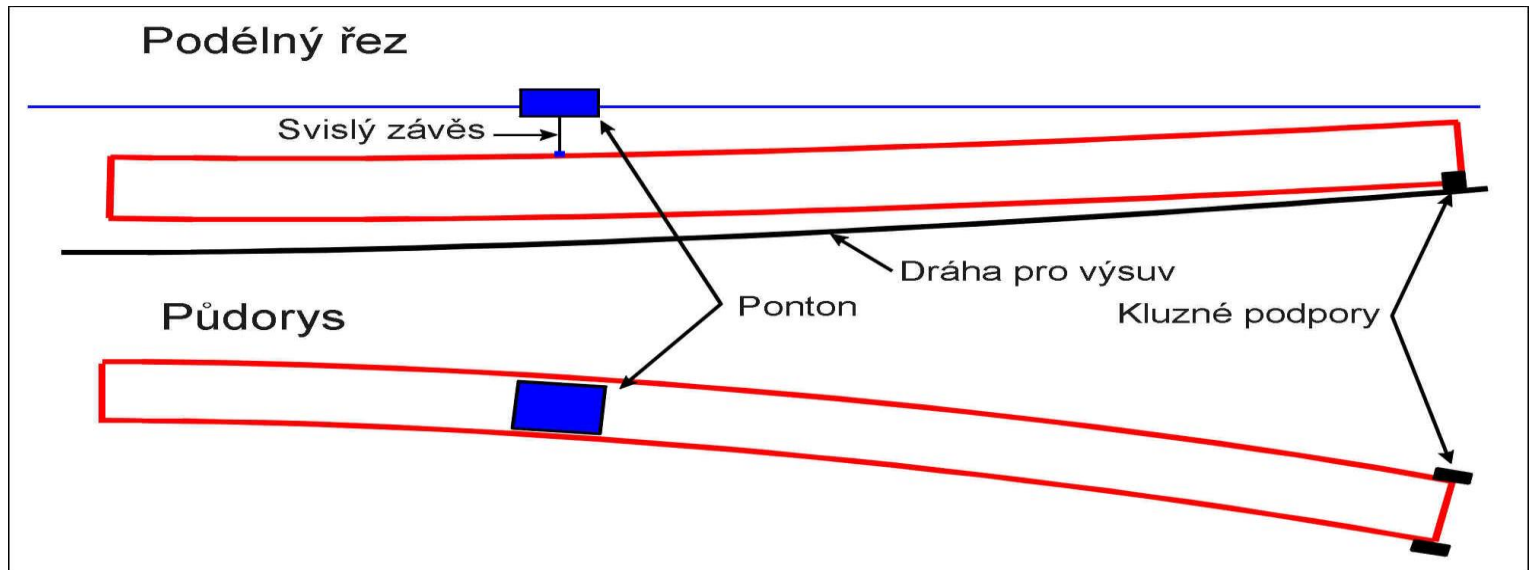


Obrázek 8. Měřená a simulovaná vztlaková síla



Aplikace: tunel metra

Obrázek 9. Poloha barelů s vodou





Aplikace : tunel metra

Obrázek 10. Hmotnost barelů s vodou

