



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V PRAZE

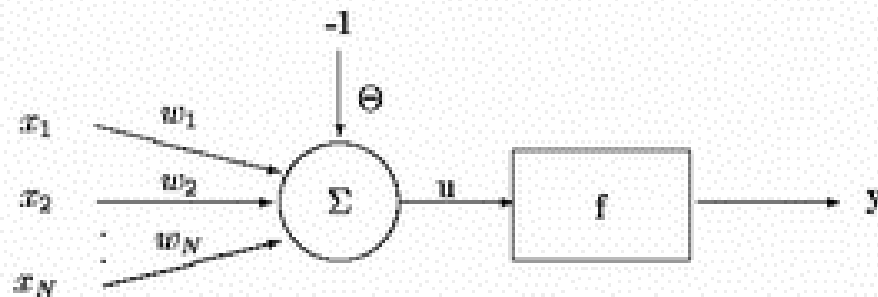
# Příklady aplikací optimalizačních algoritmů na katedře mechaniky



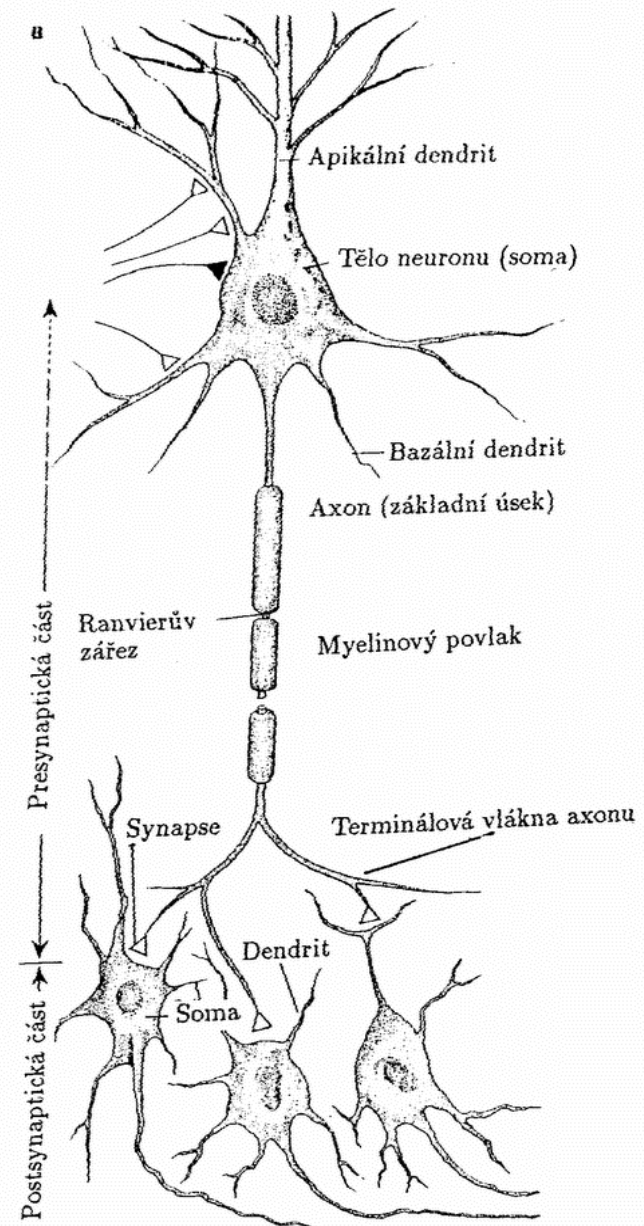
# Učení neuronových sítí

# Neuronové sítě

- Lidský neuron →
- Umělý neuron ↓

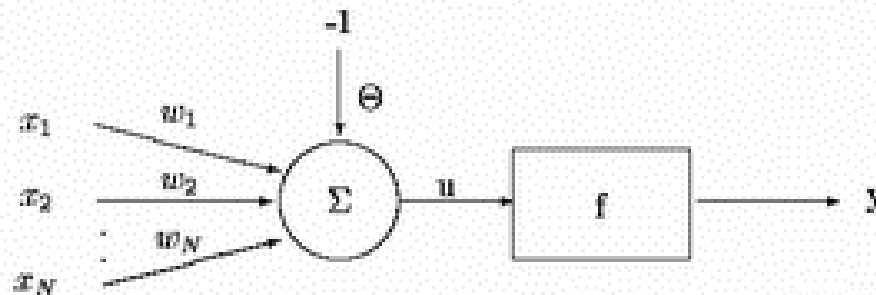


$$y = f\left(\sum_{i=1}^N w_i x_i - \Theta\right)$$



# Neuronové sítě

## ■ Jednoduchý perceptron



$$y = f\left(\sum_{i=1}^N w_i x_i - \Theta\right)$$

$y$  – výstup neuronu

$u$  – vnitřní potenciál neuronu

$w_i$  – váhy neuronu

$x_i$  – vstupy neuronu

$\Theta$  – práh neuronu

$f$  – neuronová aktivační funkce

### Neuronové aktivační funkce:

Sigmoidální funkce  $f_s(u) = \frac{1}{1+e^{-u}}$

Hyperbolický tangens  $f_h(u) = \tanh(u)$

Znaménková funkce  $f_z(u) = \text{sgn}(u)$

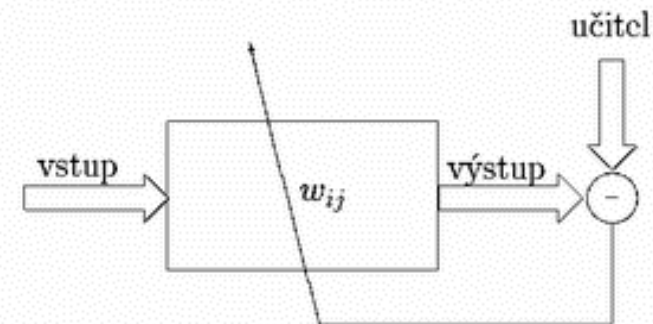
Heavisideova funkce  $f_H(u) = \begin{cases} 1 & \text{pro } u > 0 \\ 0 & \text{pro } u \leq 0 \end{cases}$

# Učení neuronových sítí

- Cíl: nastavit váhy spojení  $w_{ij}$  tak, aby síť vytvářela správnou odezvu na vstupní signál
- Základní způsoby:

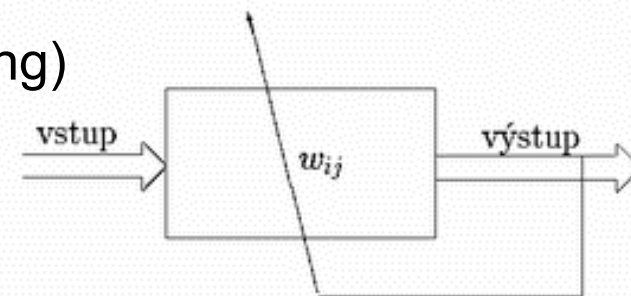
- Učení s učitelem (supervised learning)

- Srovnáváním aktuálního výstupu s výstupem požadovaným (učitel)
- Nastavováním vah synapsí pro snížení vypočteného rozdílu výstupů



- Učení bez učitele (unsupervised learning)

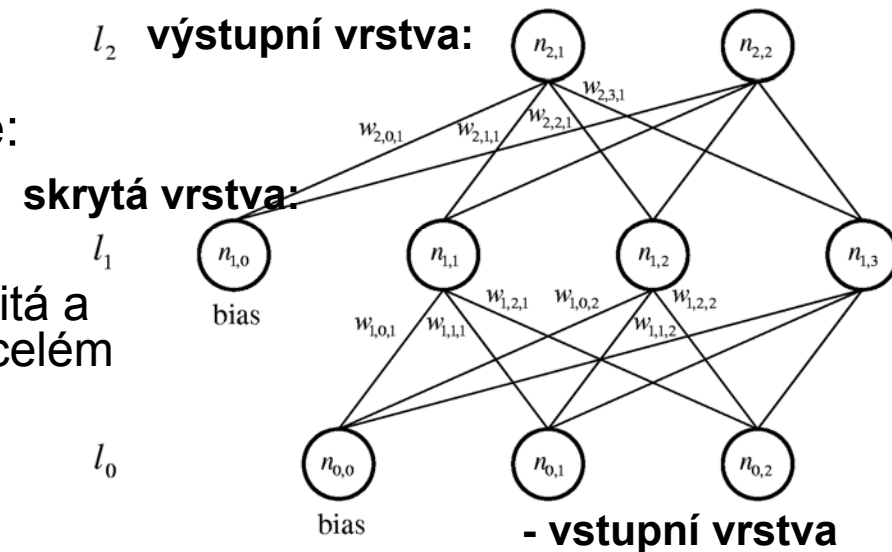
- Cíl: konzistentní výstup, tj. stejná odezva pro stejné, příp. podobné vstupní vektory



# Učení neuronových sítí

## ■ Vícevrstvý perceptron

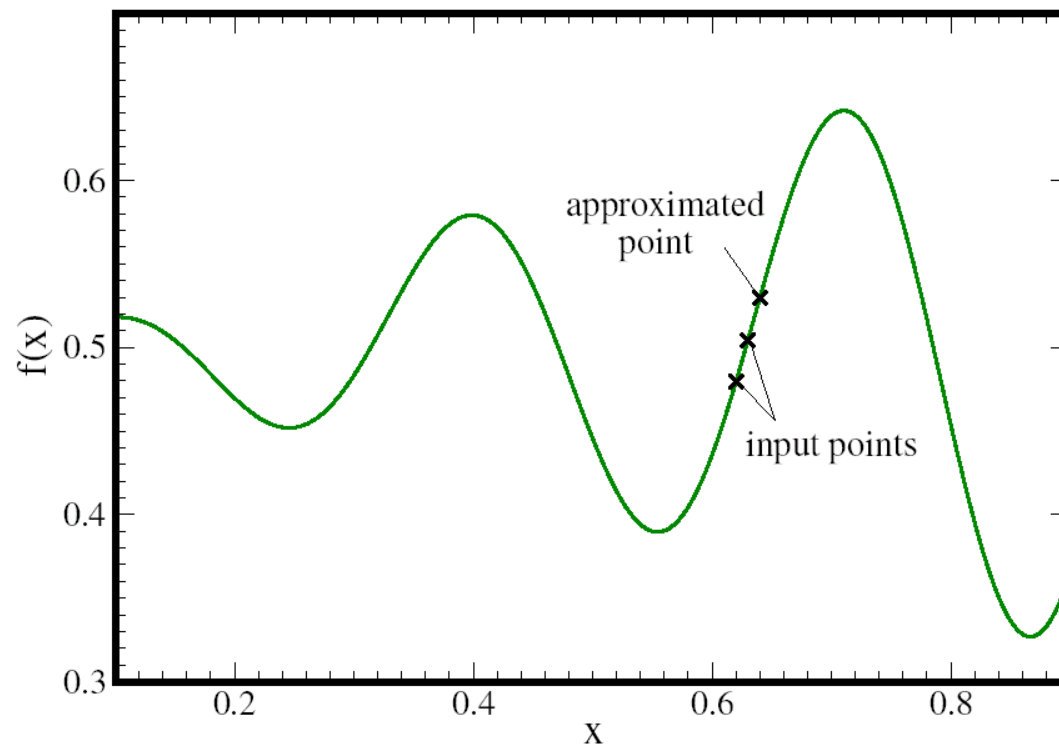
- Vícevrstvá síť s dopředným šířením
- Učení: s učitelem
- Neuronová aktivační funkce:
  - Sigmoidální funkce
  - Hyperbolický tangens
  - Jiná nelineární funkce spojitá a spojitě diferencovatelná v celém definičním oboru
- Použití:
  - Klasifikace obrazů
  - Aproximace funkcí
  - Predikce časových řad
  - Řízení



# Učení vícevrstvé neuronové sítě

- Srovnání algoritmu SADE a zpětné propagace

Řešená úloha:



Parametry  
neuronové sítě:

3 vrstvy:

vstupní: 2 neur. + bias

střední: 3 neur. + bias

výstupní: 1 neuron

# Trénování neuronové sítě

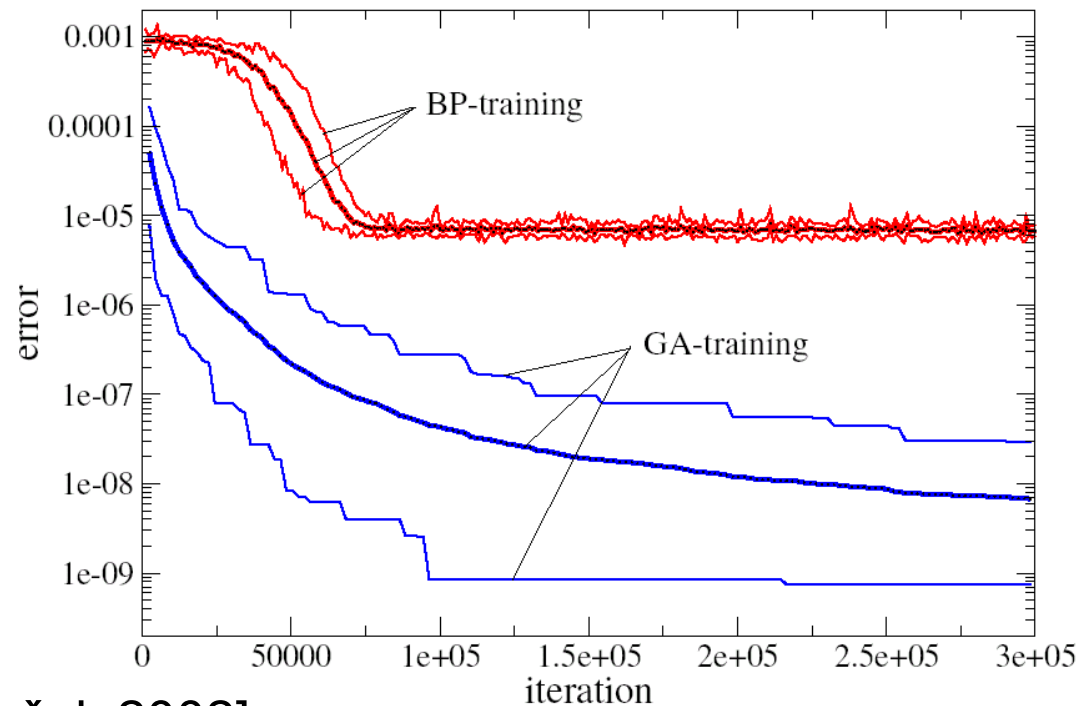
## ■ Srovnání algoritmu SADE a zpětné propagace

Porovnání chyby odezvy v průběhu učení:

**Chyba odezvy:**

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \left( f(\mathbf{x}_n) - O_{2,1} \right)^2$$

**Statistika ze 100  
výpočtů.**



[Drchal, Kučerová & Němeček, 2002]





# Fitování parametrů nelineárních materiálových modelů

- Lemaitrův model dotvarování hornin
- Lemaitrův model dotvarování hornin s porušením
- Retenční čára zemin
- Mikroploškový model betonu M4

# Lemaitrovy modely hornin

## ■ Lemaitrův model dotvarování hornin

- Vyjádření vazkoplastické deformace v závislosti na čase:

$$\varepsilon^{vp} = \left[ (1-m)A\sigma^n t \right]^{\frac{1}{1-m}}$$

... 3 materiálové  
parametry:  $m$ ,  $n$ ,  $A$

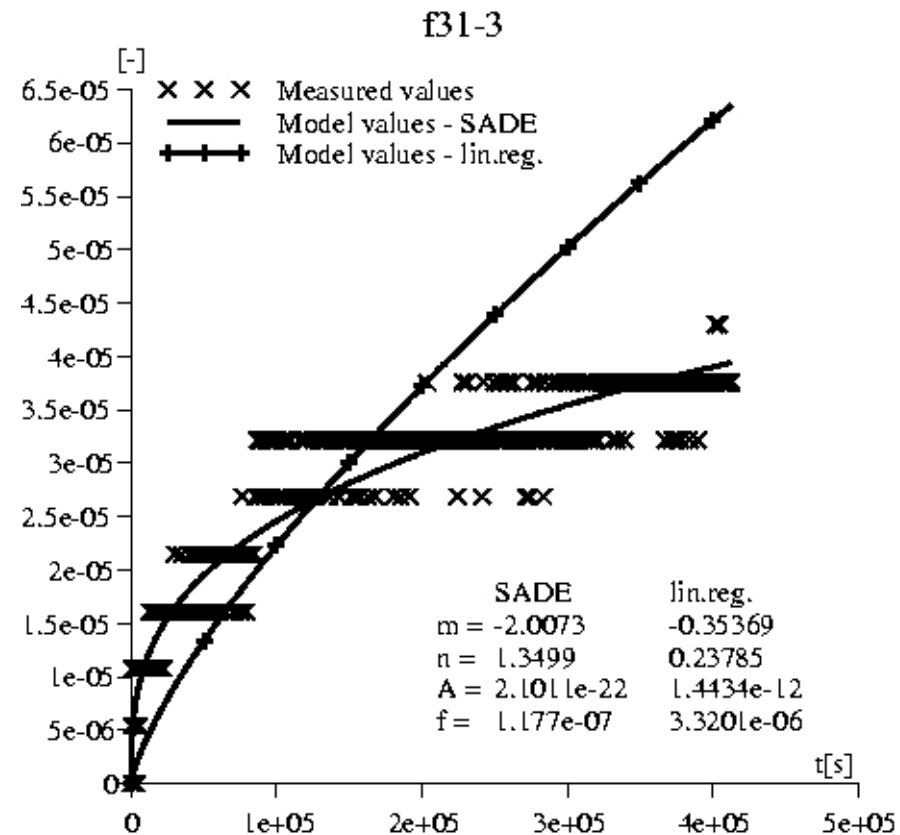
## ■ Lemaitrův model dotvarování hornin s porušením

$$\varepsilon_{ij}^{vp} = \left[ -\frac{M+N}{M(k-N)} \left( \frac{\sigma_{ij}}{A} \right)^{-r} \left( \frac{\sigma_{ij}}{K} \right)^N \left[ 1 - (k+1) \left( \frac{\sigma_{ij}}{A} \right)^r t^{\frac{k-N}{k+1}} - 1 \right] \right]^{\frac{M}{M+N}}$$

... 6 materiálových  
parametrů:  $K$ ,  $M$ ,  $N$ ,  
 $k$ ,  $r$ ,  $A$

# Lemaitrovy modely hornin

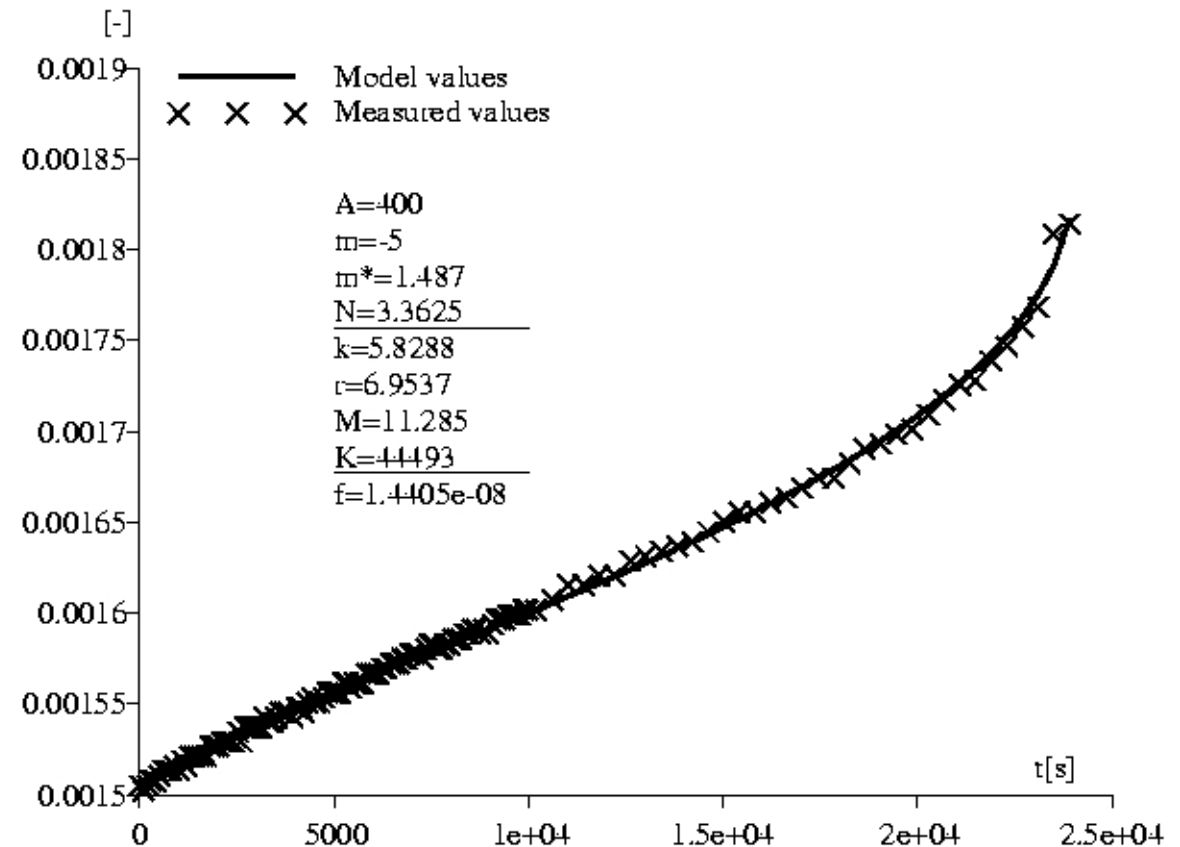
- Identifikace parametrů Lemaitrova modelu hornin
- Srovnání algoritmu SADE rozšířeného o metodu CERAF a lineární regrese



[Kučerová, Mühlbauer & Bittnar, 2003]

# Lemaitrovy modely hornin

- Identifikace parametrů Lemaitrova modelu hornin s poškozením
- Řešení algoritmem SADE rozšířeným o metodu CERAF



[Kučerová, Mühlbauer & Bittnar, 2003]



# Retenční čára zemin

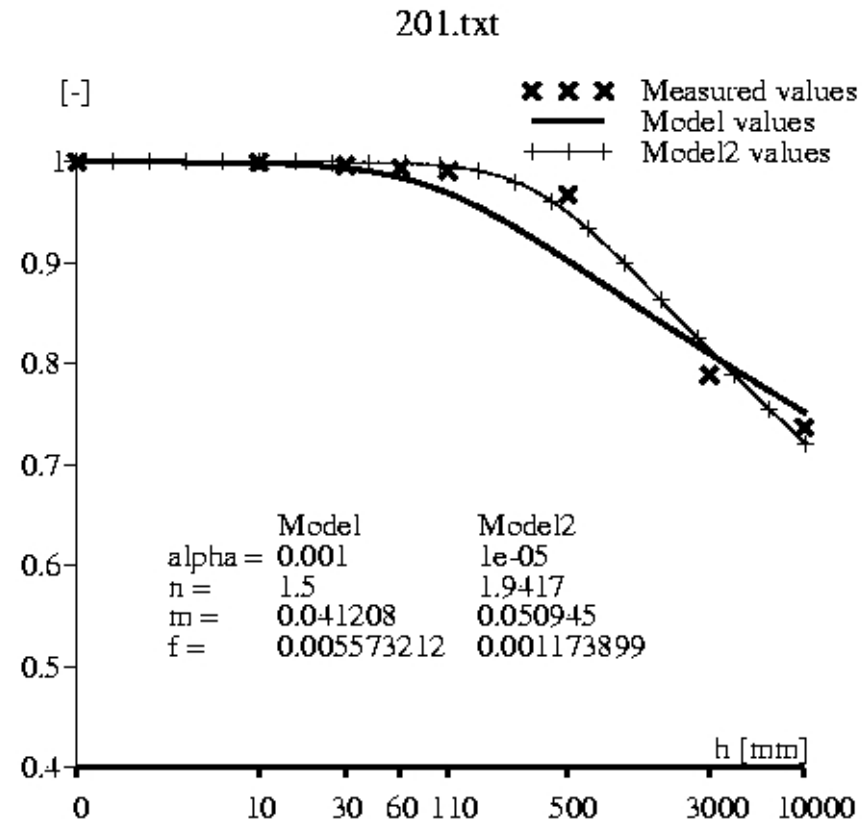
- Vyjádření funkční závislosti sacího tlaku zeminy na stupni jejího nasycení
- Model van Genuchtena:

$$\theta_E = \frac{1}{\left(1 + \alpha|h|^n\right)^m}$$

... 3 materiálové  
parametry:  $\alpha$ ,  $m$ ,  $n$

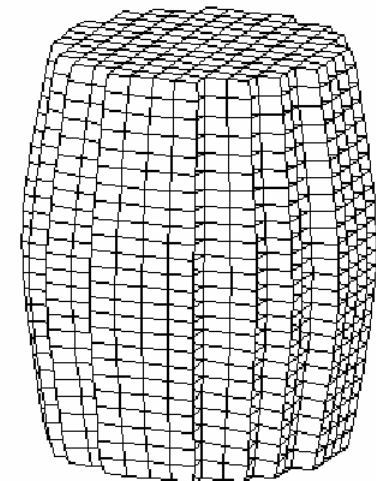
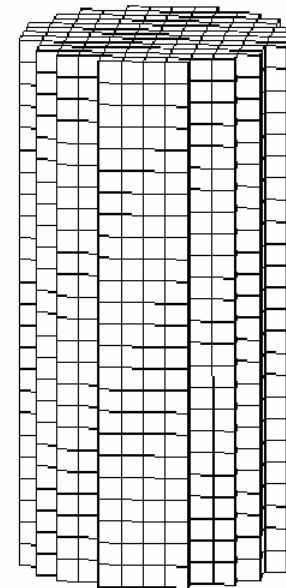
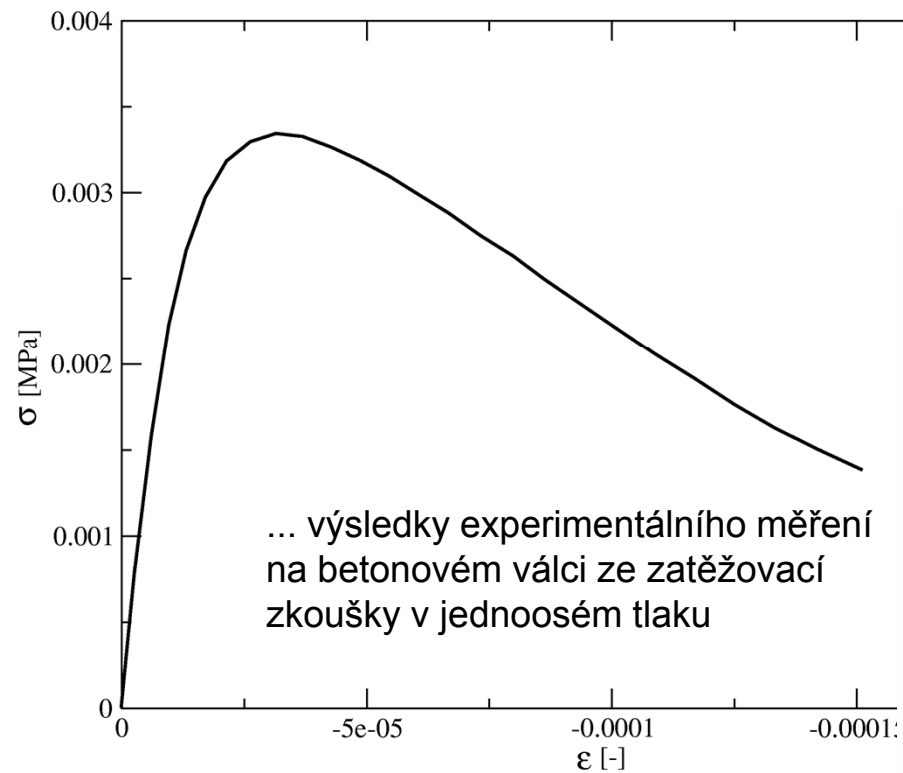
# Retenční čára zemin

- Identifikace parametrů retenční čáry zemin
- Řešení algoritmem SADE rozšířeným o metodu CERAF



[Kuráž, Kučerová & Kuráž,2003]

# Mikroploškový model betonu M4



# Mikroploškový model betonu M4

- Trojrozměrný model popisující beton včetně tahového i tlakového změkčení, poškození materiálu, různých kombinací zatížení, odtížení a cyklického zatěžování.
- Konkrétní typ betonu je charakterizován 8mi parametry:

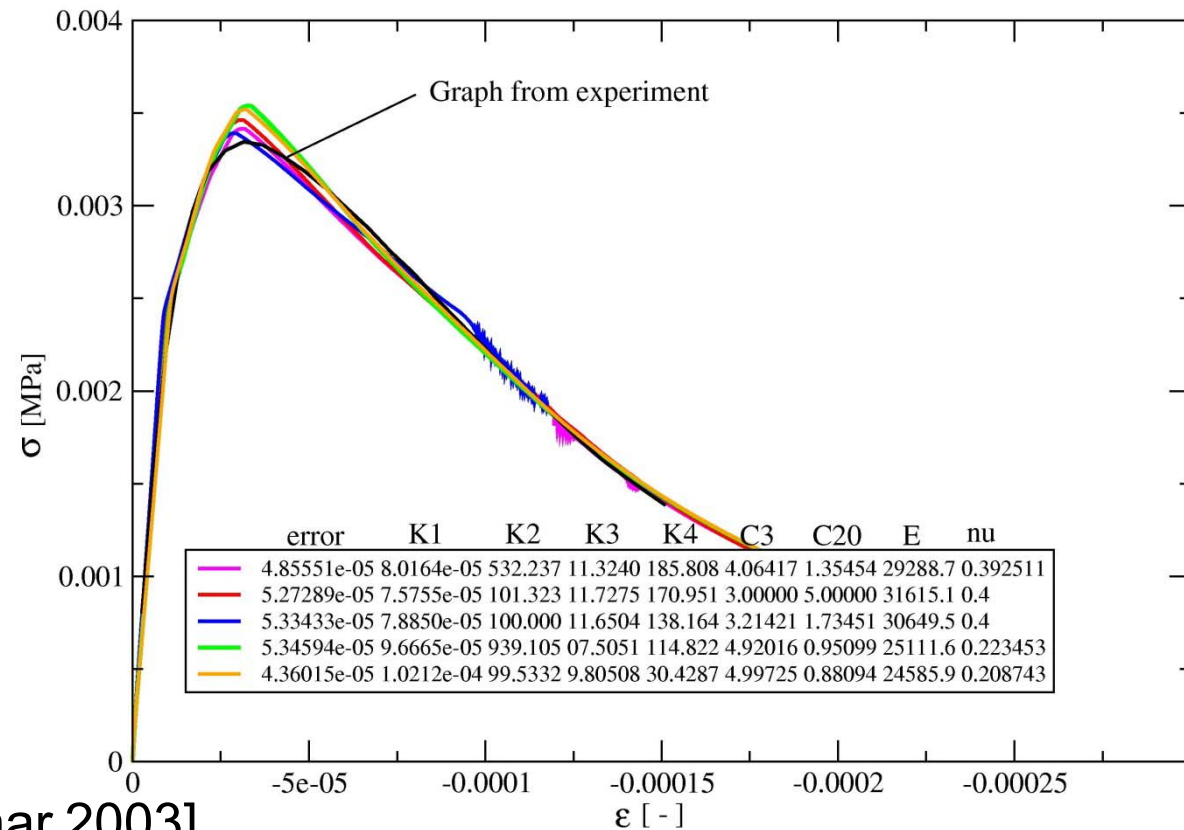
$$E, \nu, K_1, K_2, K_3, K_4, C_3, C_{20}$$

- 6 posledních parametrů nemá fyzikální interpretaci
- ➔ Obtížné stanovit jejich hodnotu na základě experimentů



# Mikroploškový model betonu M4

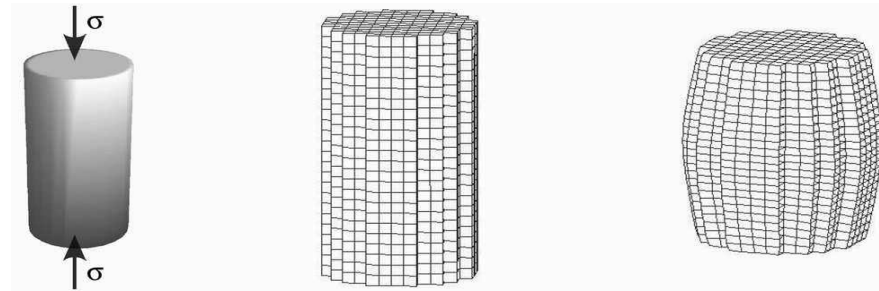
- Několik řešení nalezených algoritmem SADE rozšířeným o metodu CERAF



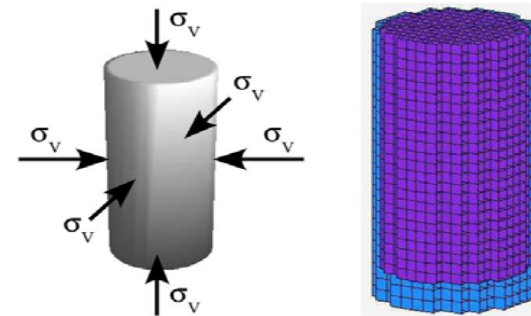
[Kučerová, Lepš & Bittnar, 2003]

# Vícekriteriální optimalizace

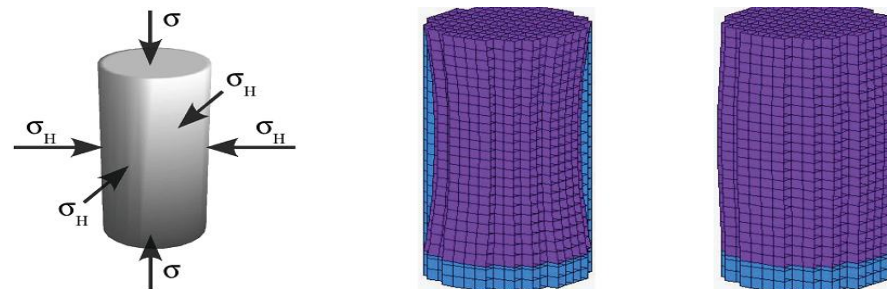
- Uniaxial compression test



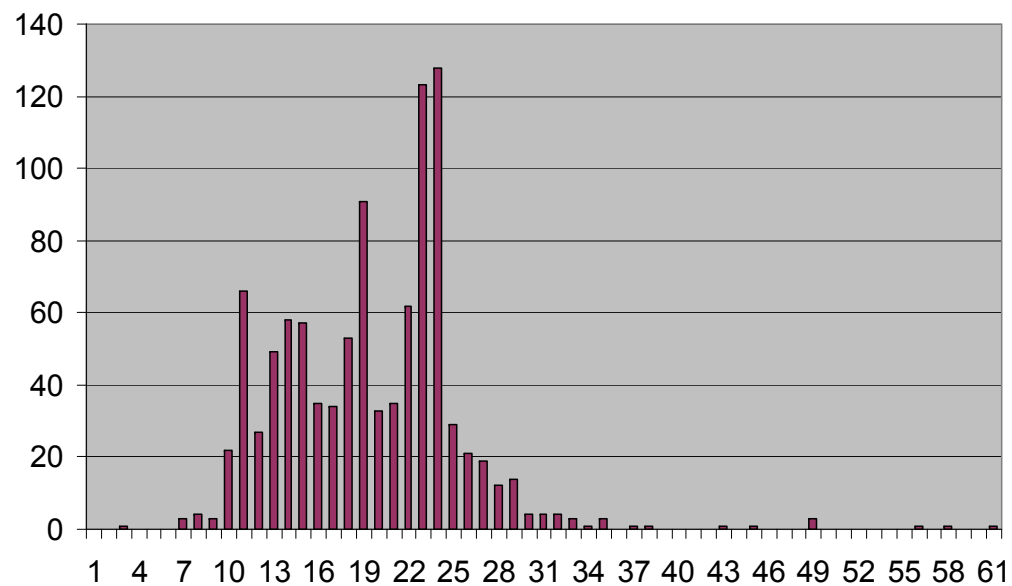
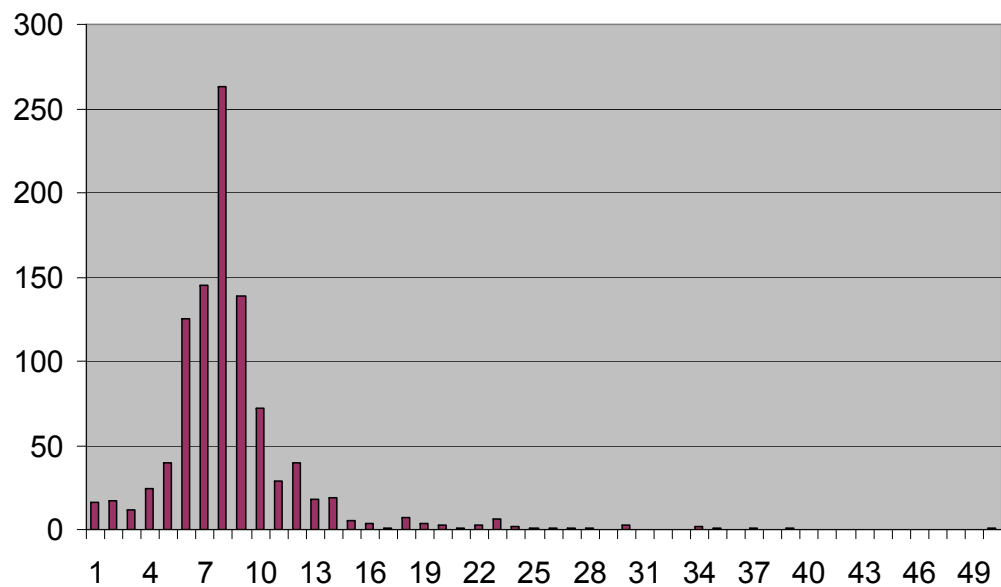
- Hydrostatic compression test



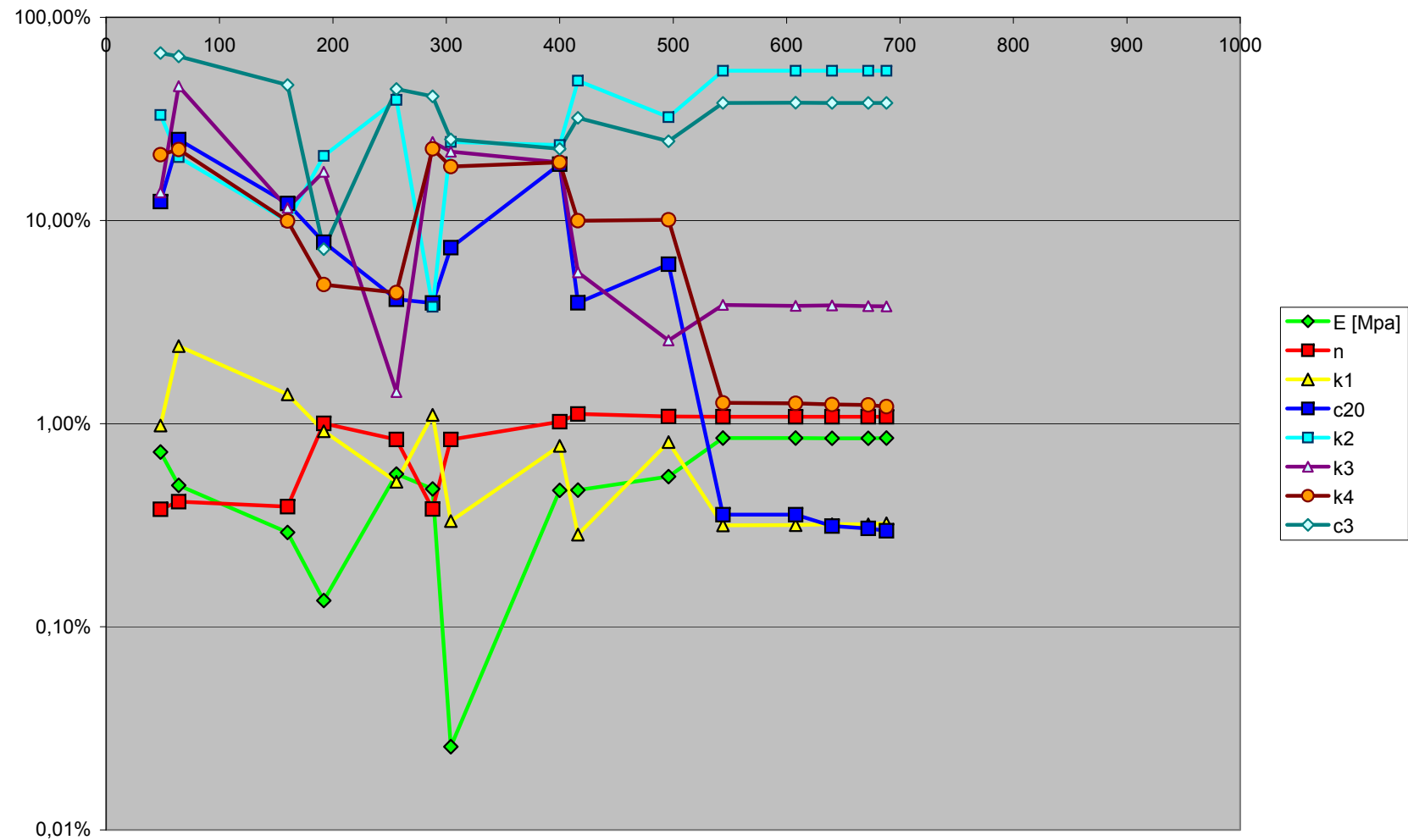
- Triaxial compression test



Časová  
náročnost  
hydrostatické a  
triaxiální zkoušky  
v minutách!



# Vícekriteriální optimalizace

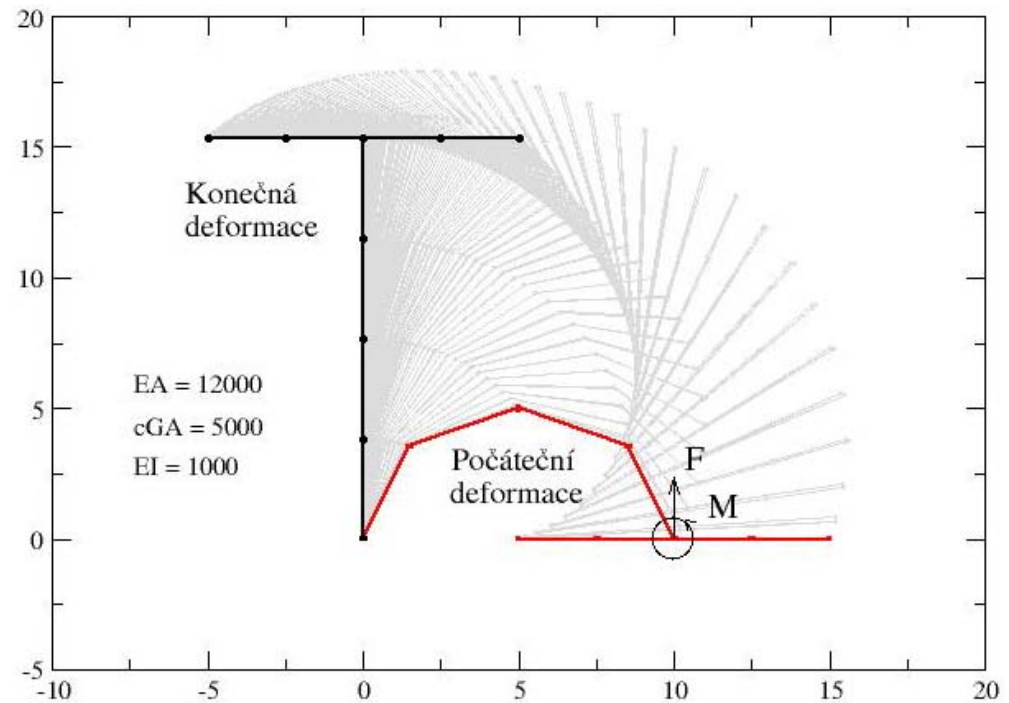
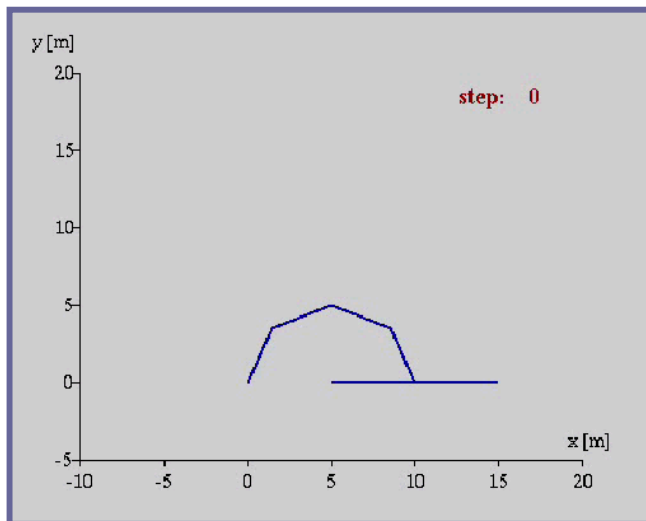




# Optimální návrh a optimální řízení konstrukcí

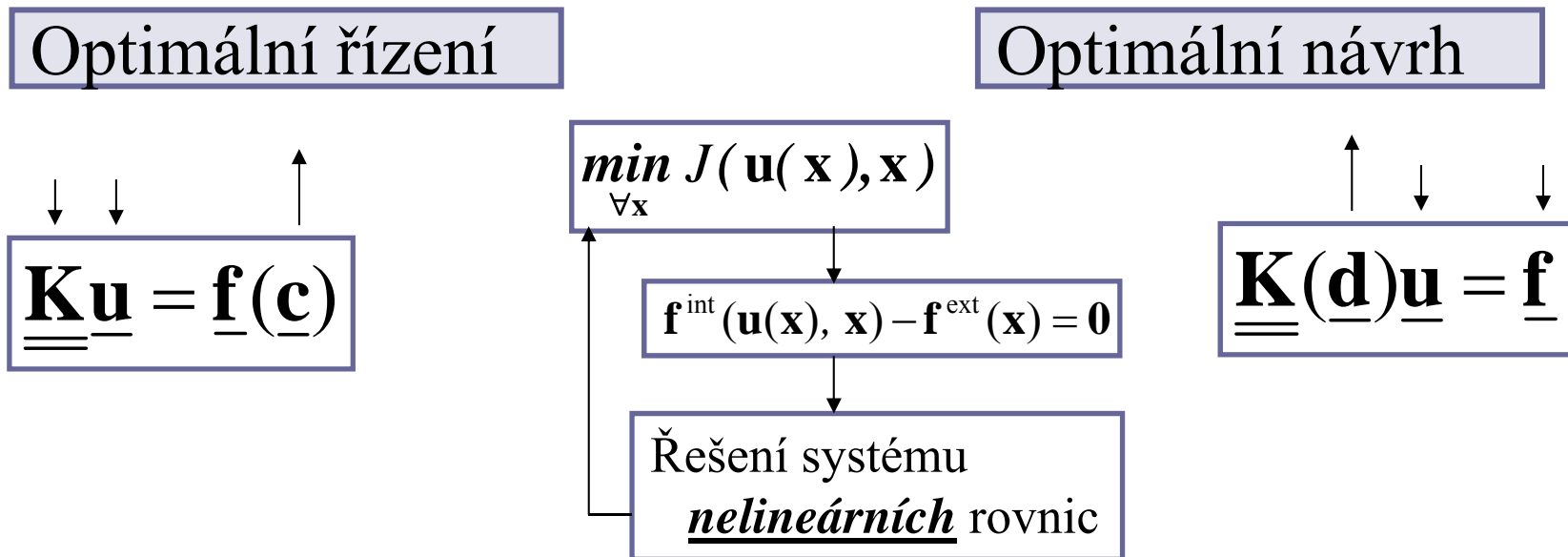
# Optimální řízení konstrukcí

- Modely konstrukcí v oboru velkých deformací = nelineární modely

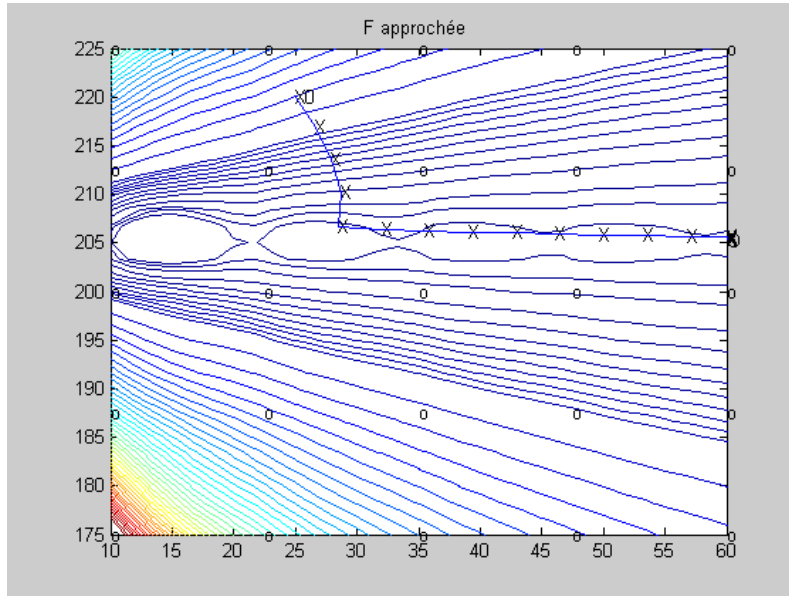


# Optimální řízení konstrukcí

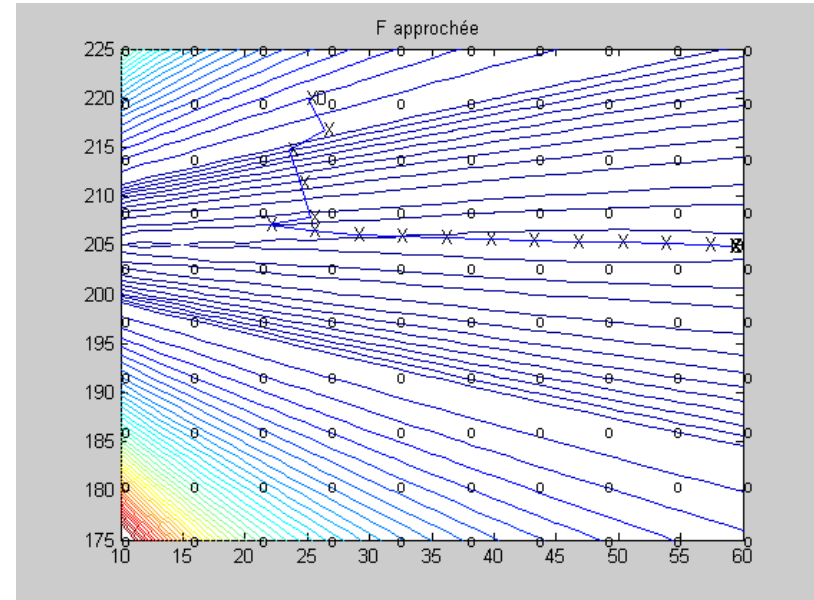
- Úlohy optimálního návrhu a optimálního řízení konstrukcí s nelineárním chováním



# Difuzní aproximace – optimální řízení



**Sít' 5x5**  
**F = 60**  
**M = 205,26**

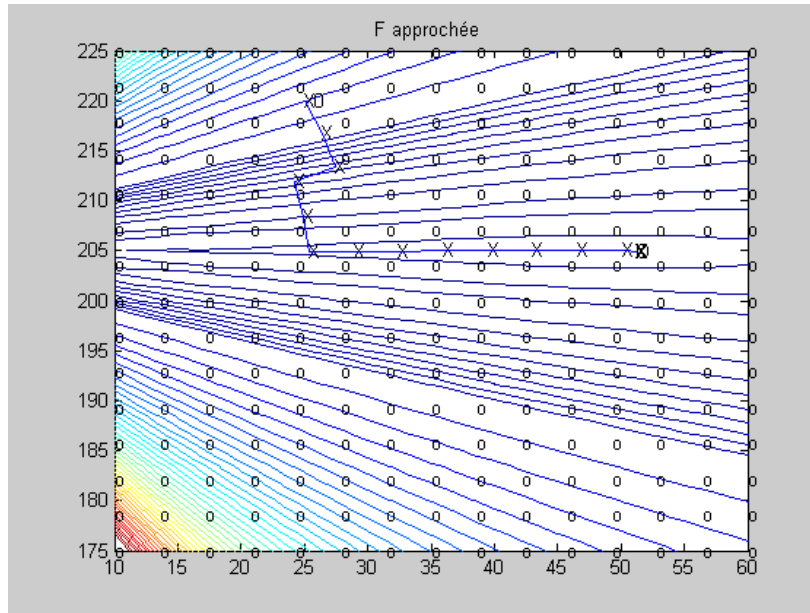


**Sít' 10x10**  
**F = 59,073**  
**M = 204,91**

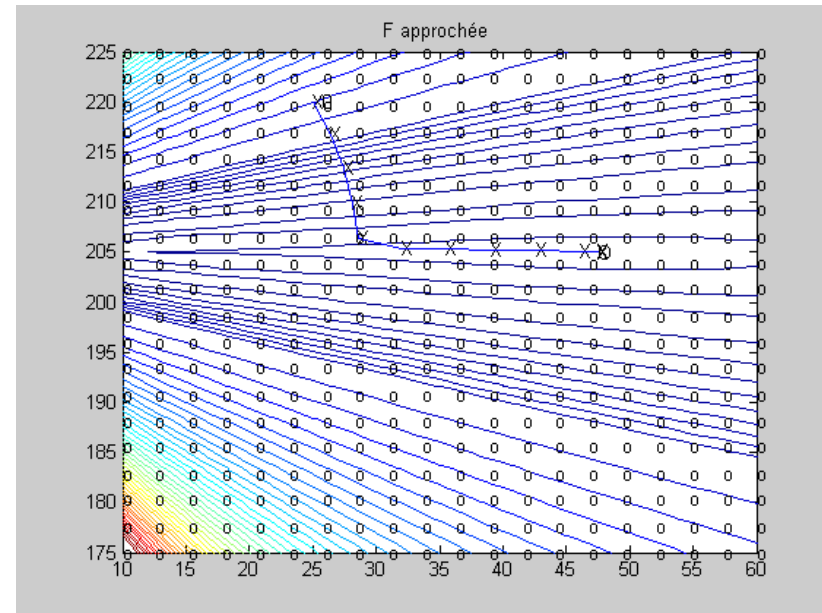
[Ibrahimbegović,Knopf-Lenoir,Kučerová & Villon,2003]



# Difuzní aproximace – optimální řízení



**Sít' 15x15**  
**F = 51,218**  
**M = 204,95**



**Sít' 20x20**  
**F = 47,44**  
**M = 204,97**

[Ibrahimbegović,Knopf-Lenoir,Kučerová & Villon,2003]

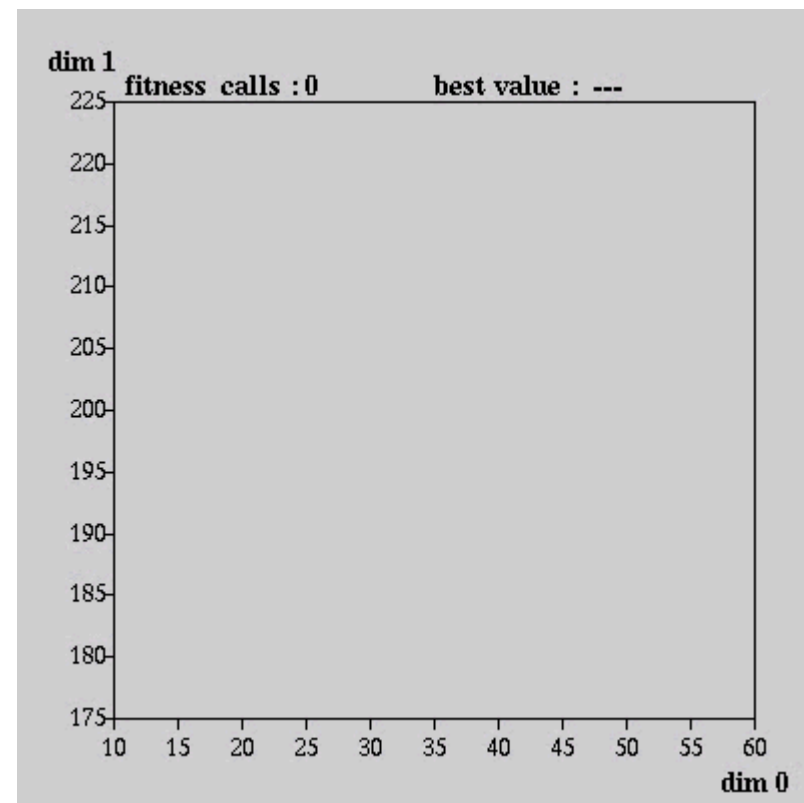
# SADE – optimální řízení

Počet vyhodnocení  $J(\cdot)$  : **648.8**

Statistika ze získaných výsledků.

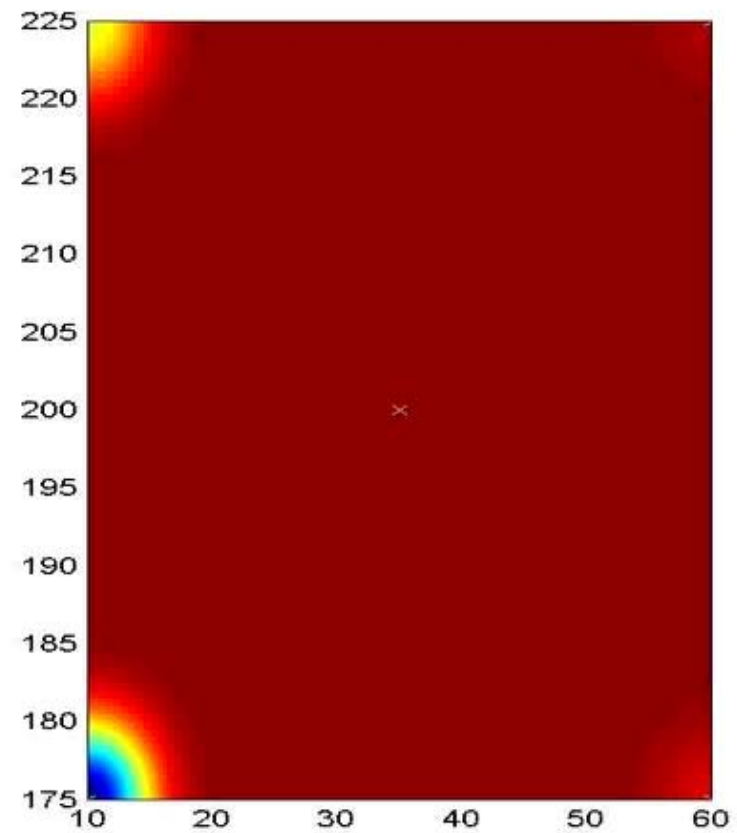
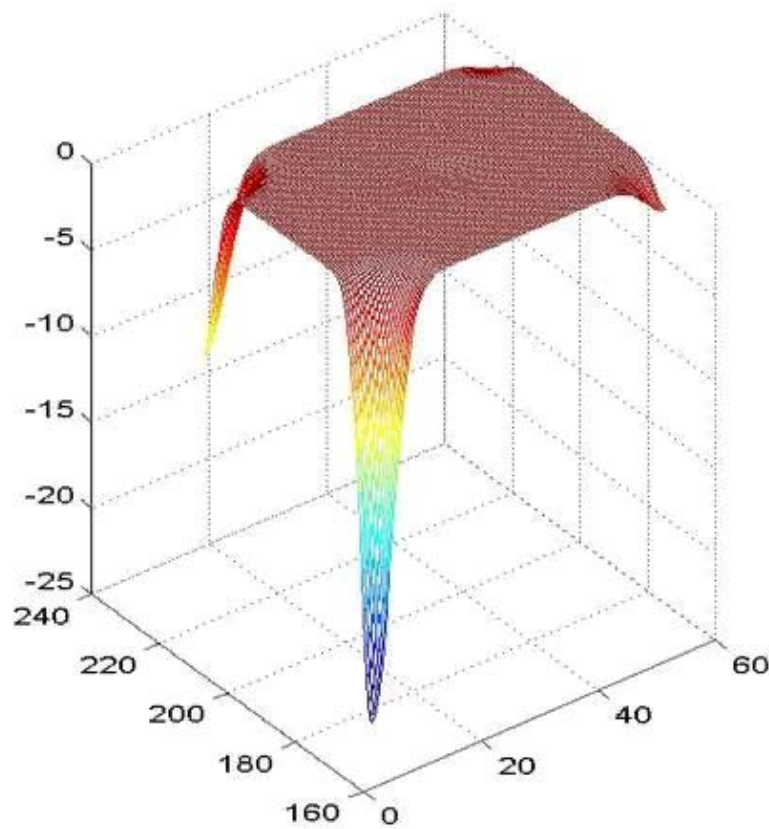
Složka	Průměr	Směrodatná odchylka
F	40.002	0.0474
M	205.00	0.001

Správné řešení:  $F = 40$   
 $M = 205$



[Ibrahimbegović,Knopf-Lenoir,Kučerová & Villon,2003]

# GRaBaFuNek – optimální řízení



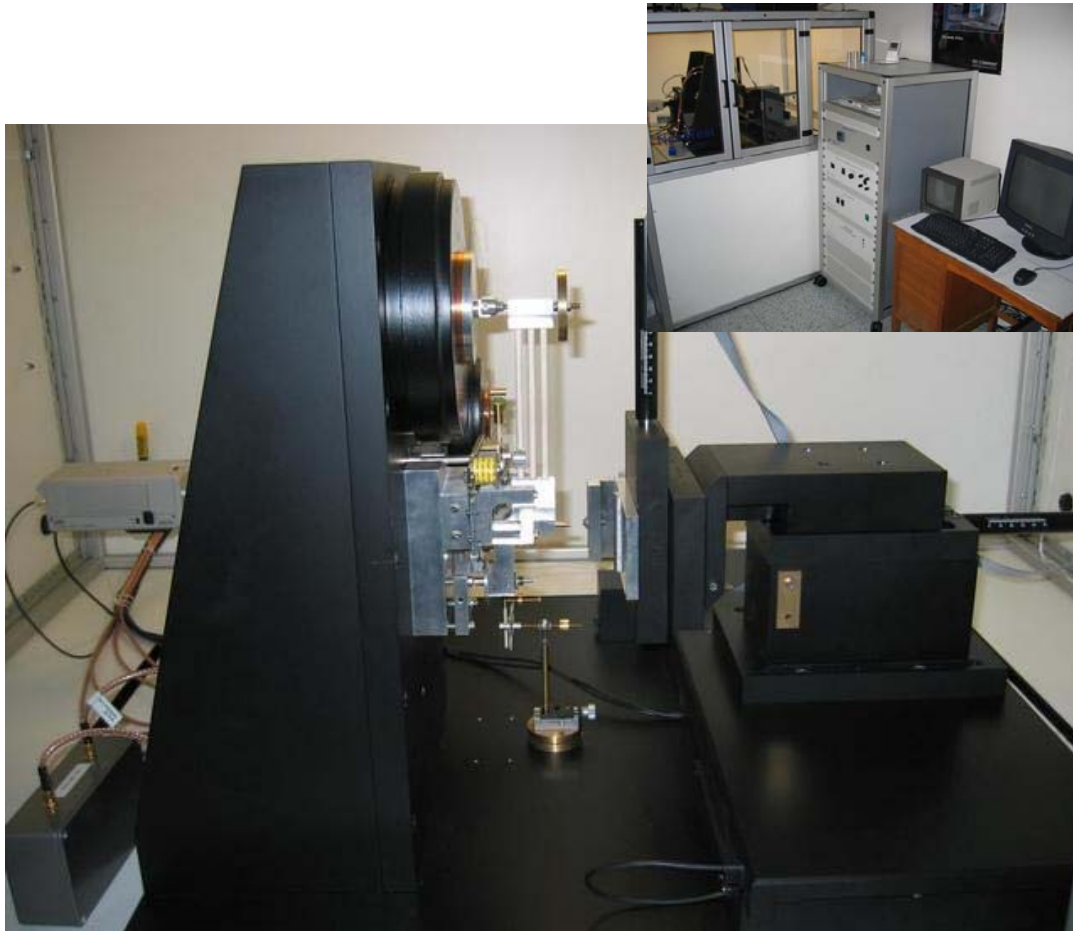
# Optimální řízení - srovnání

Algoritmus		SADE	GRBFN+SADE
Přesnost nalezených hodnot zatížení	$F$	0.0474	0.0442
	$M$	0.001	0.002
Počet vyhodnocení		512.4	104.06



# Identifikace nanoindentace

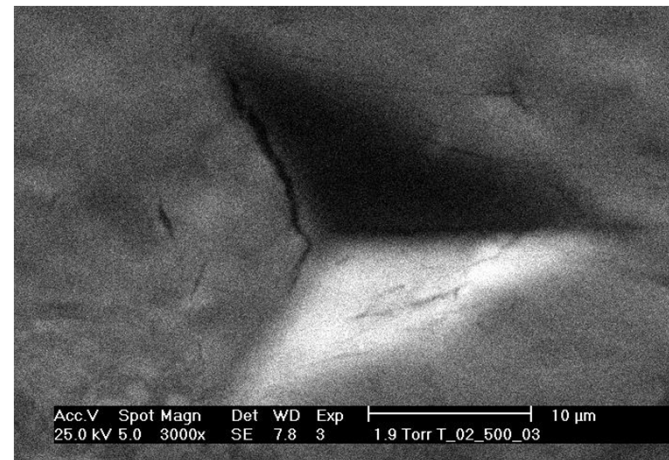
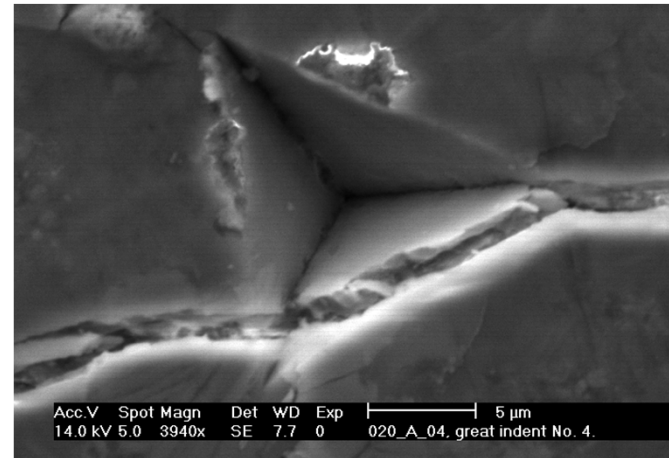
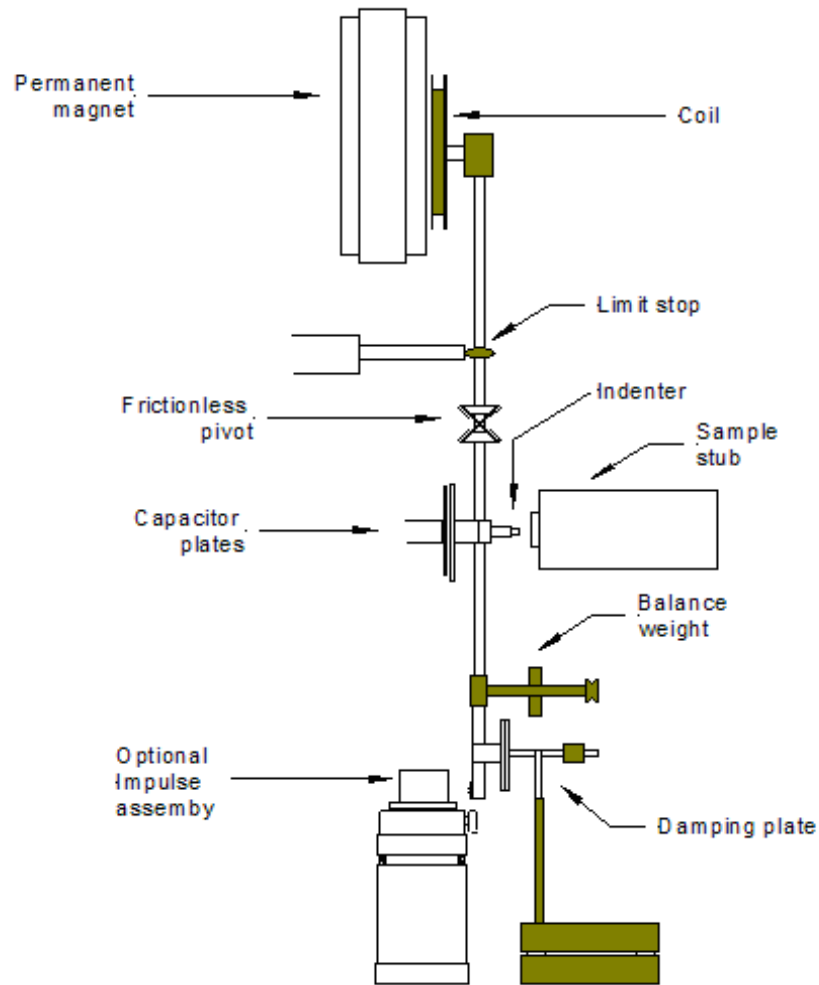
# Nanoindentance



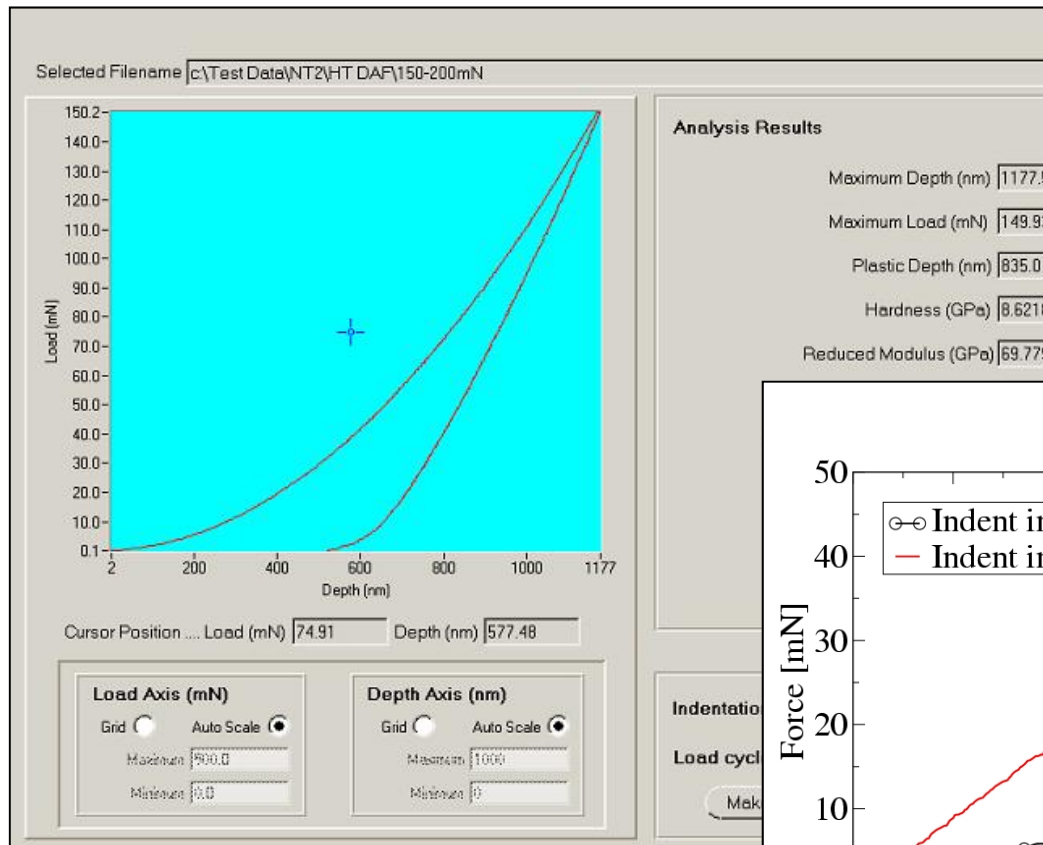
Nanoindenter:  
**Micro Materials, UK**

- Humidity control system
- Spherical indentation
- Pyramidal indentation
- Zoom microscope
- High load 0.1-20 N and low load head 0.1-500 mN
- High temperature stage (up to 500 °C)

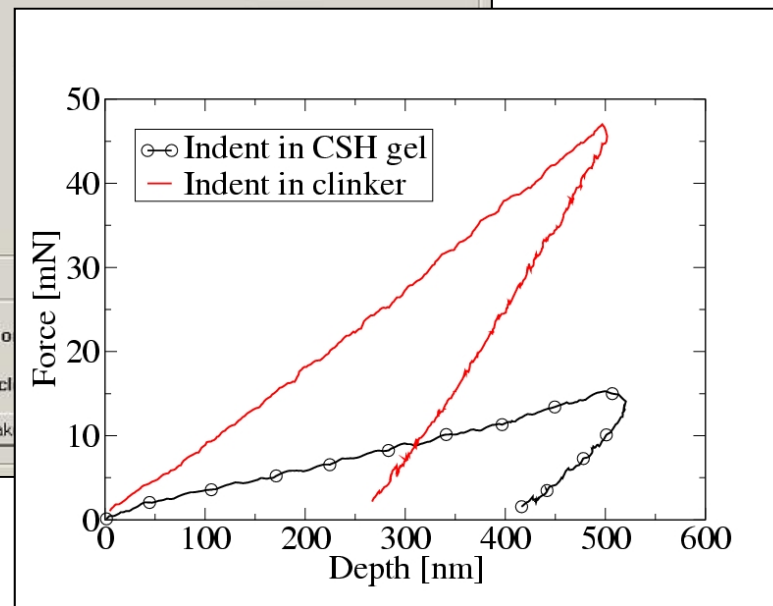
# Nanoindentance



# Nanoindentance

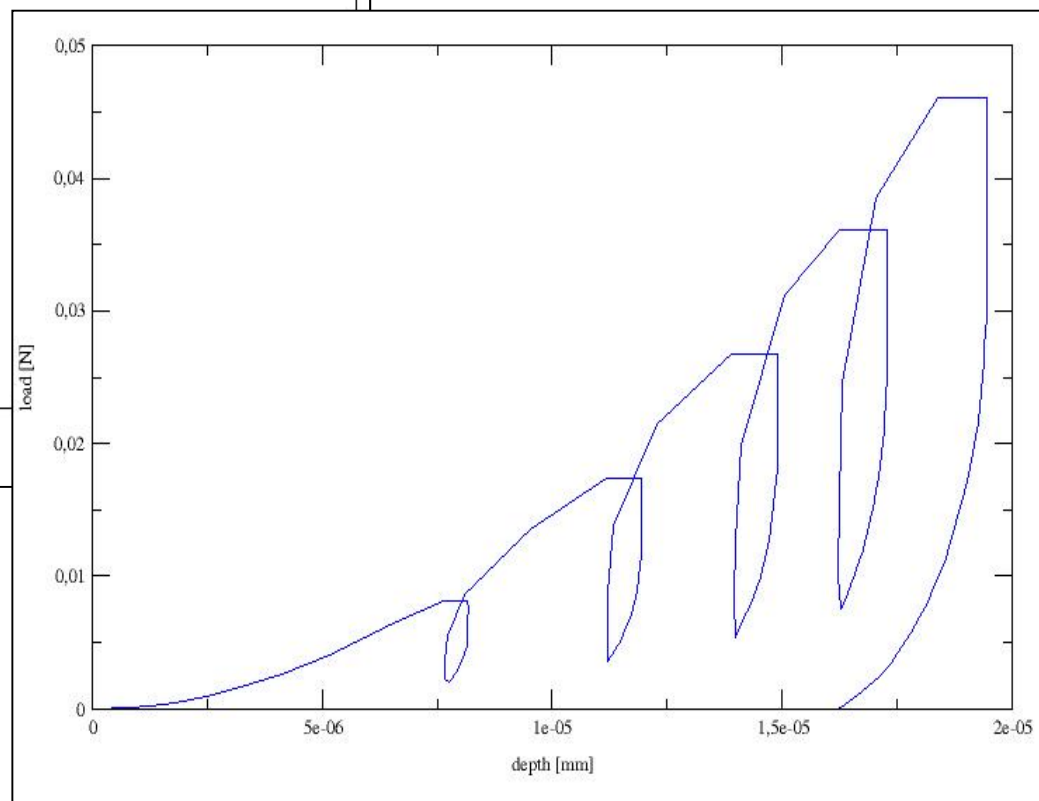
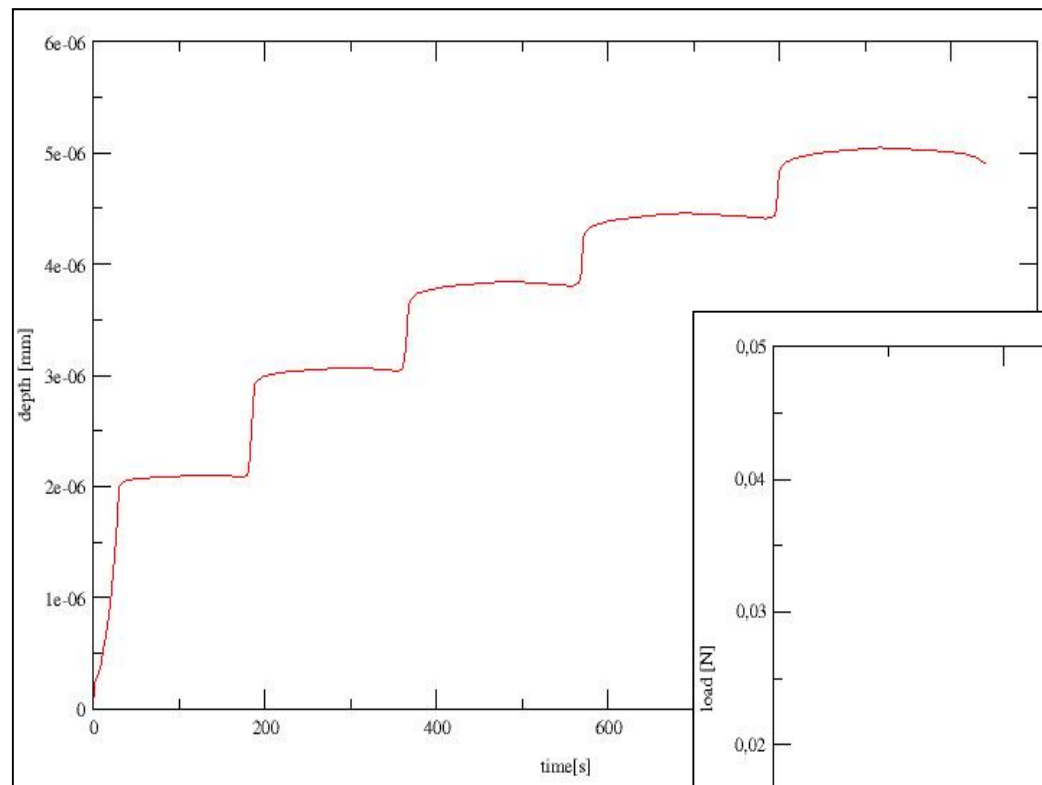


- Depth-force diagram
- Elastic properties evaluated from unloading curve
- Planned: viscoelastic/viscoplastic properties from indent shape.

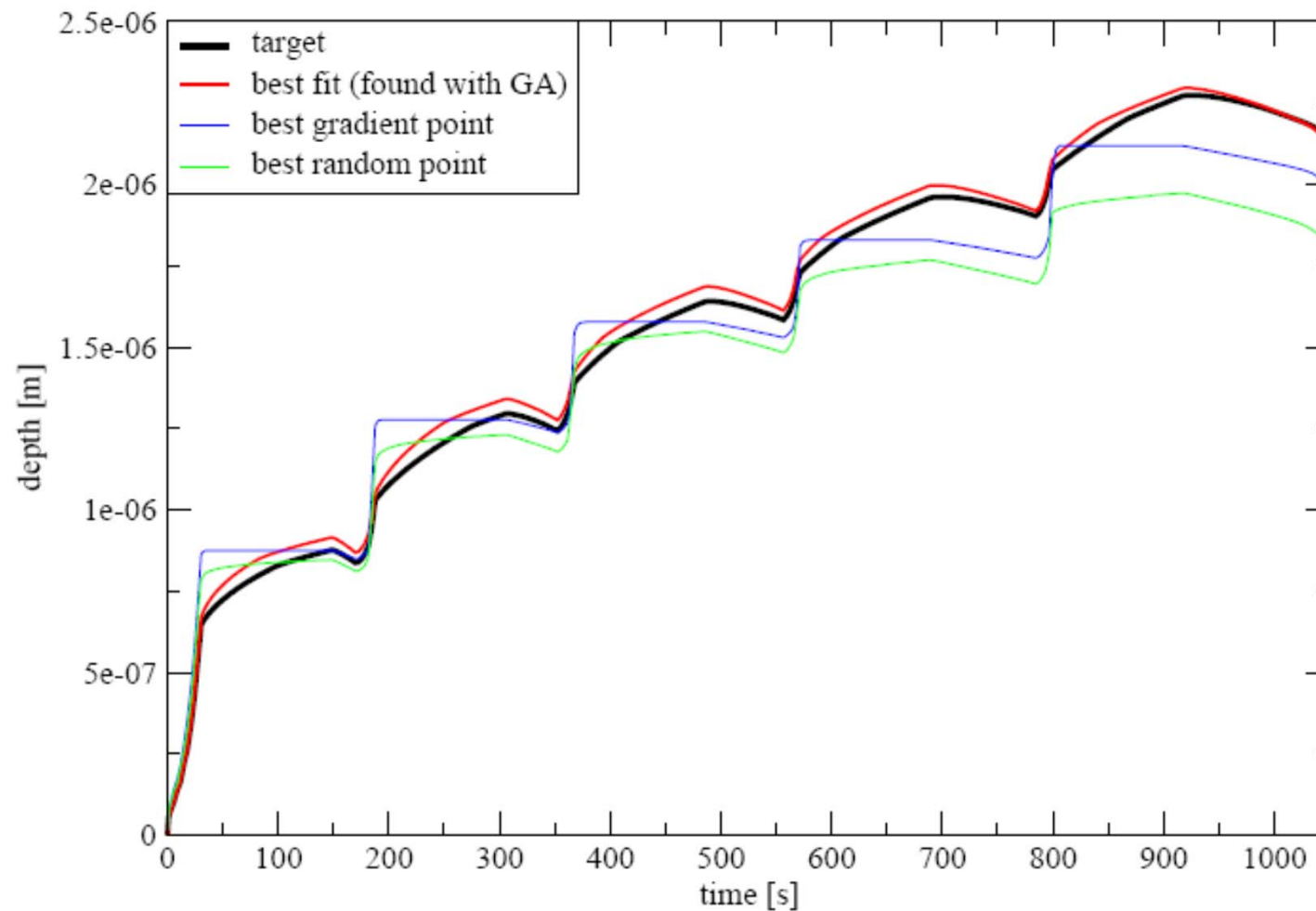




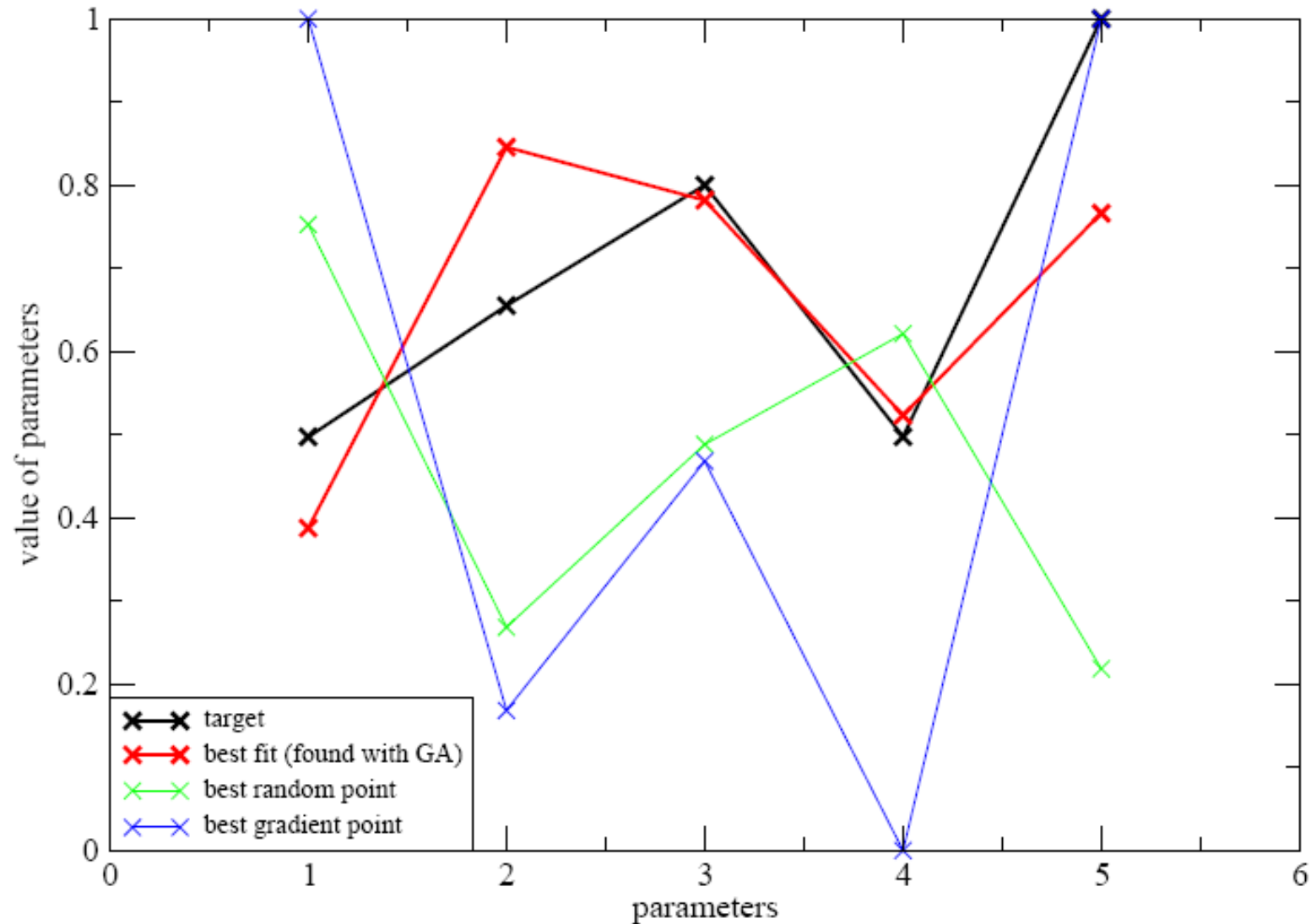
# Identifikace nanoindentace



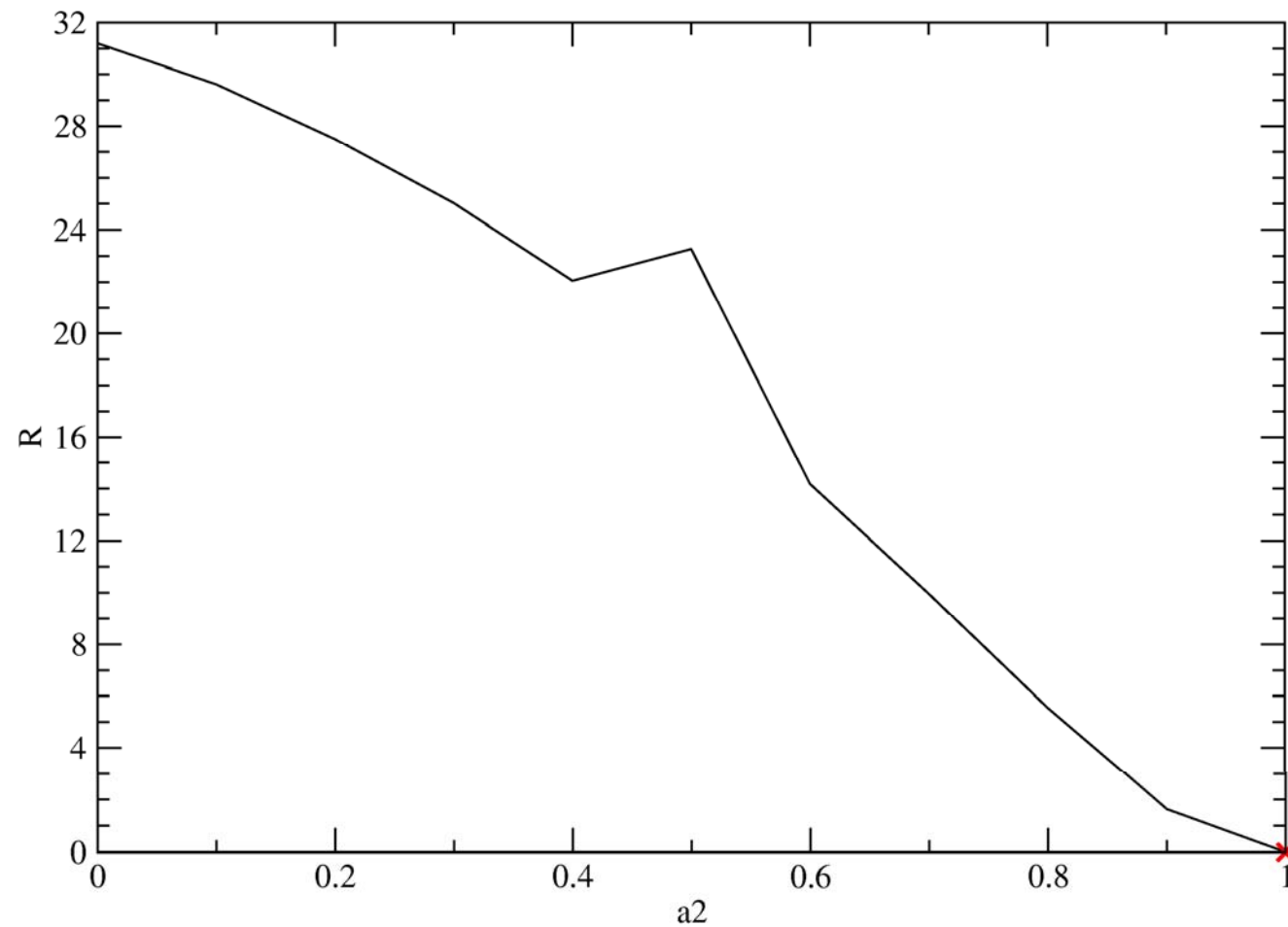
# Identifikace nanoindentace



# Identifikace nanoindentace



# Identifikace nanoindentace

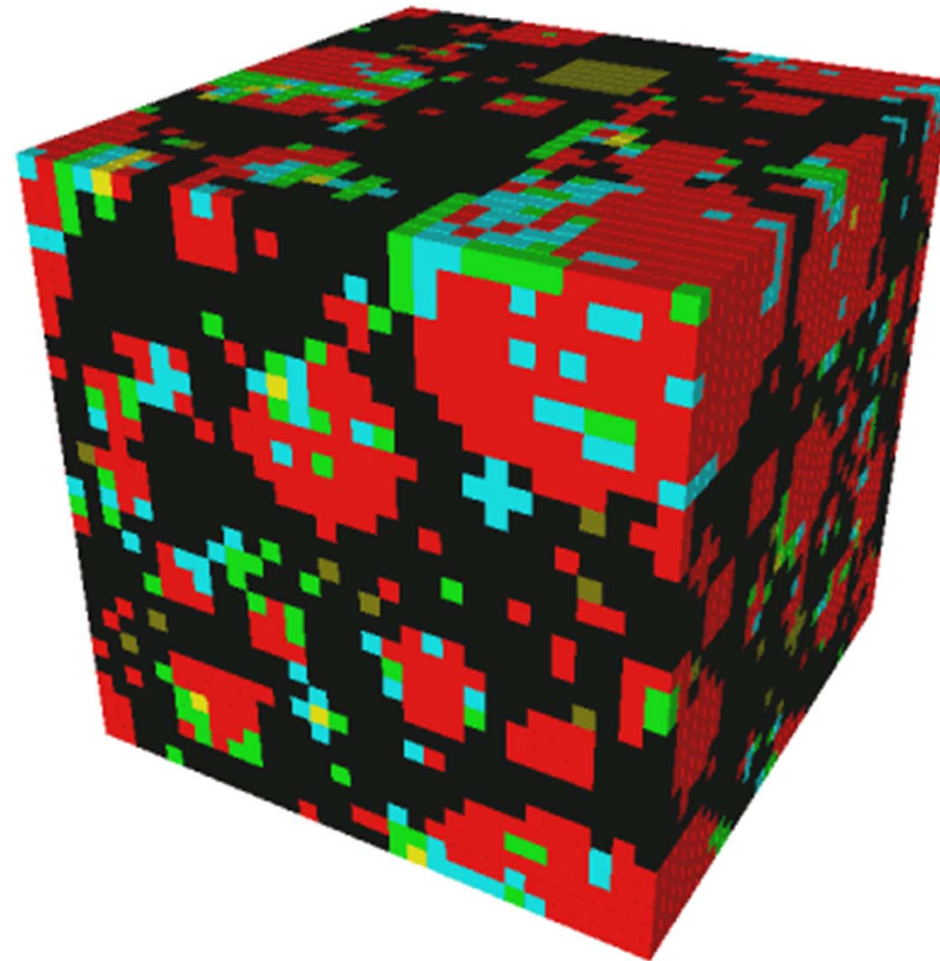




# Optimalizace složení cementové pasty

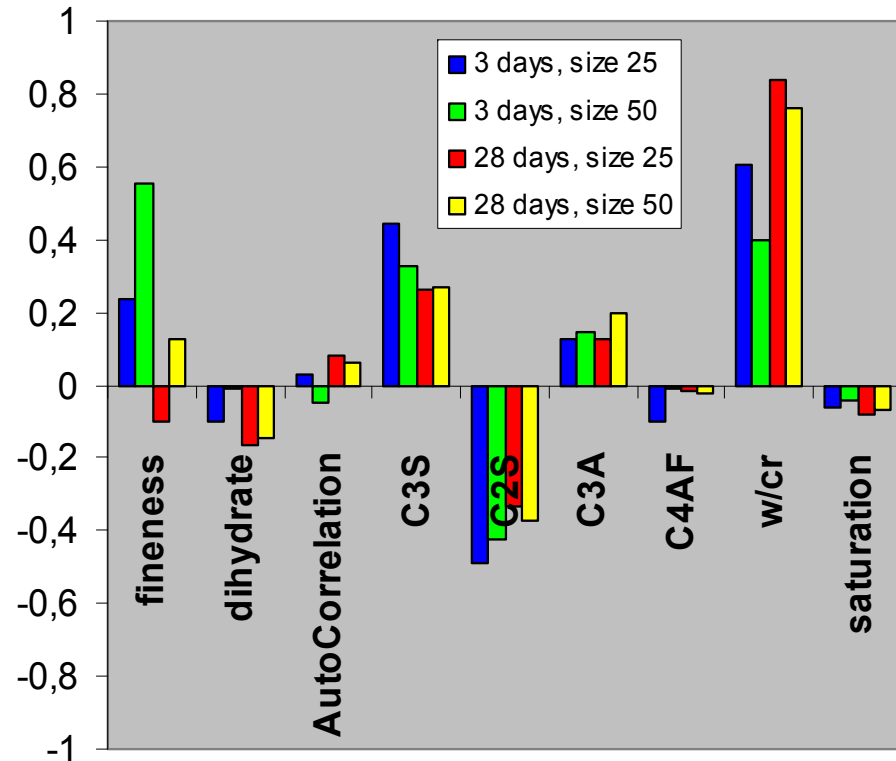
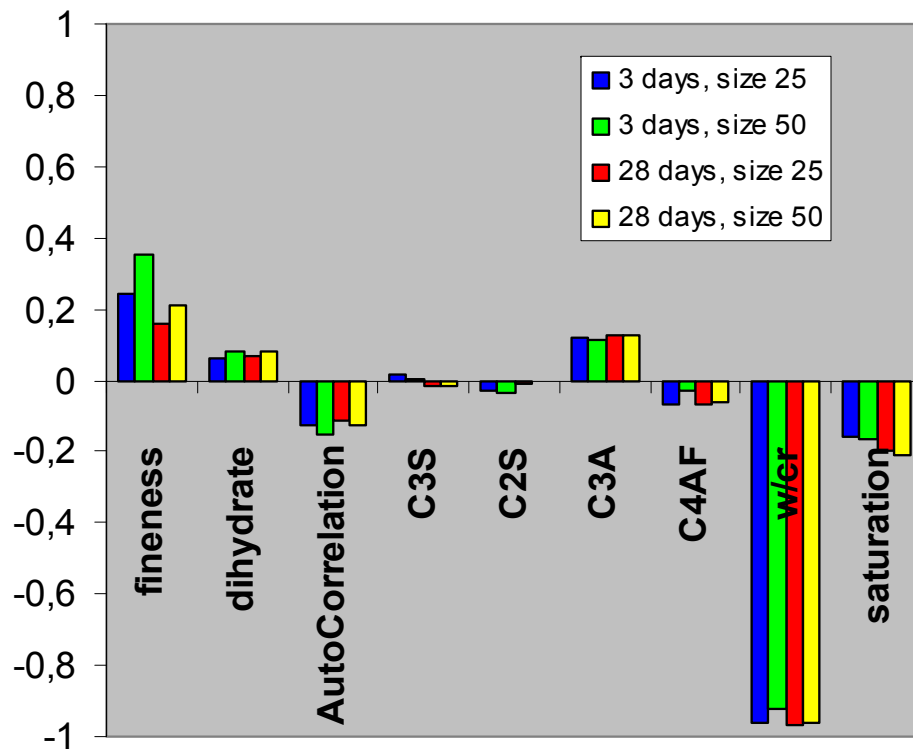
# Model CEMHYD3D

W/c = 0.4, RVE 30 x 30 x 30  $\mu$  m



■	voda	■	CH
■	plyn	■	CSH (silika)
■	C <sub>3</sub> S	■	CSH
■	C <sub>2</sub> S	■	C <sub>3</sub> AH <sub>6</sub>
■	C <sub>3</sub> A	■	ettringit
■	C <sub>4</sub> AF	■	monosulfát
■	sádrovec	■	FH <sub>3</sub>
■	silika		

# Citlivostní analýza



Influence of individual parameters on Young modulus (left) and hydration heat (right).

# Kriging

- Neznámá funkce:

Známa funkce (regrese)

Odchylka s normálním rozdělením

$$y(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}) + \mathbf{Z}(\mathbf{x})$$

$$R(\theta, w, x) = \prod_{j=1}^n R_j(\theta, w_j - w_i)$$

Name	$R(\theta; d_j),$	$d_j = w_j - w_i$
EXP	$\exp(-\theta_j  d_j )$	
GAUSS	$\exp(-\theta_j d_j^2)$	
LIN	$\max\{0, 1 - \theta_j  d_j \}$	
SPHERICAL	$1 - 1.5\xi_j + 0.5\xi_j^3,$	$\xi_j = \min\{1, \theta_j  d_j \}$
SPLINE	$1 - 15\xi_j + 30\xi_j^3,$	for $0 \leq \xi_j \leq 0.2$
	$1.25(1 - \xi_j)^3,$	for $0.2 \leq \xi_j \leq 1$
	0,	for $\xi_j > 1, \quad \xi_j = \theta_j  d_j $

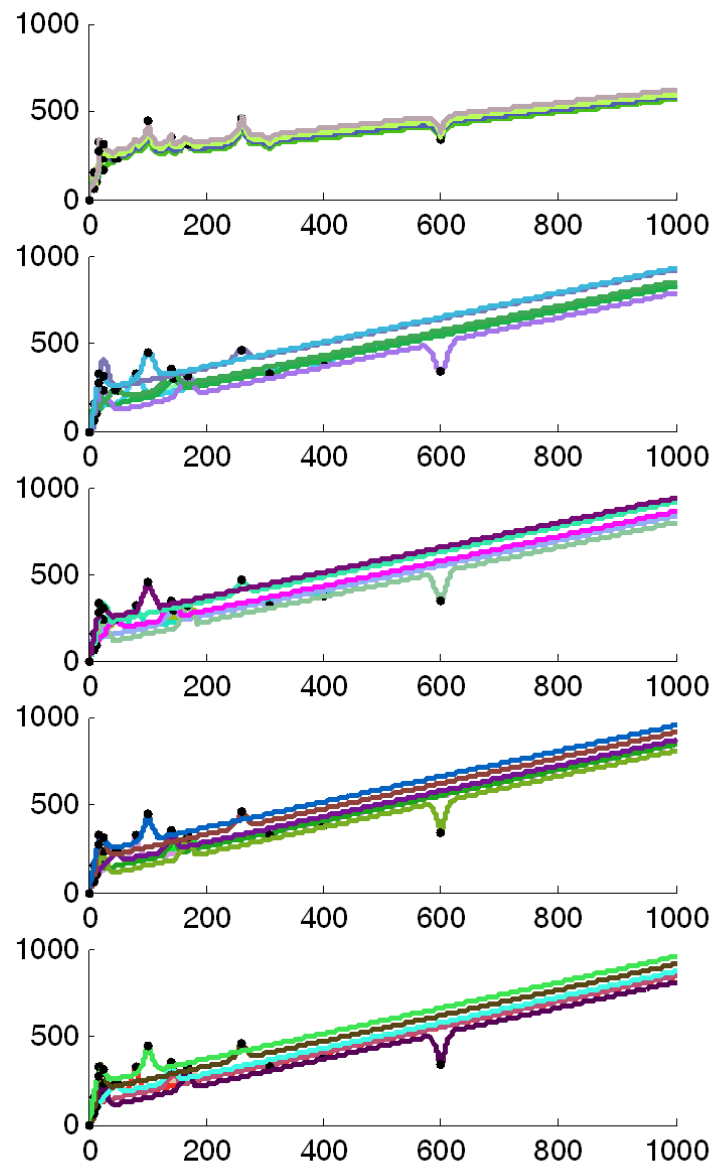
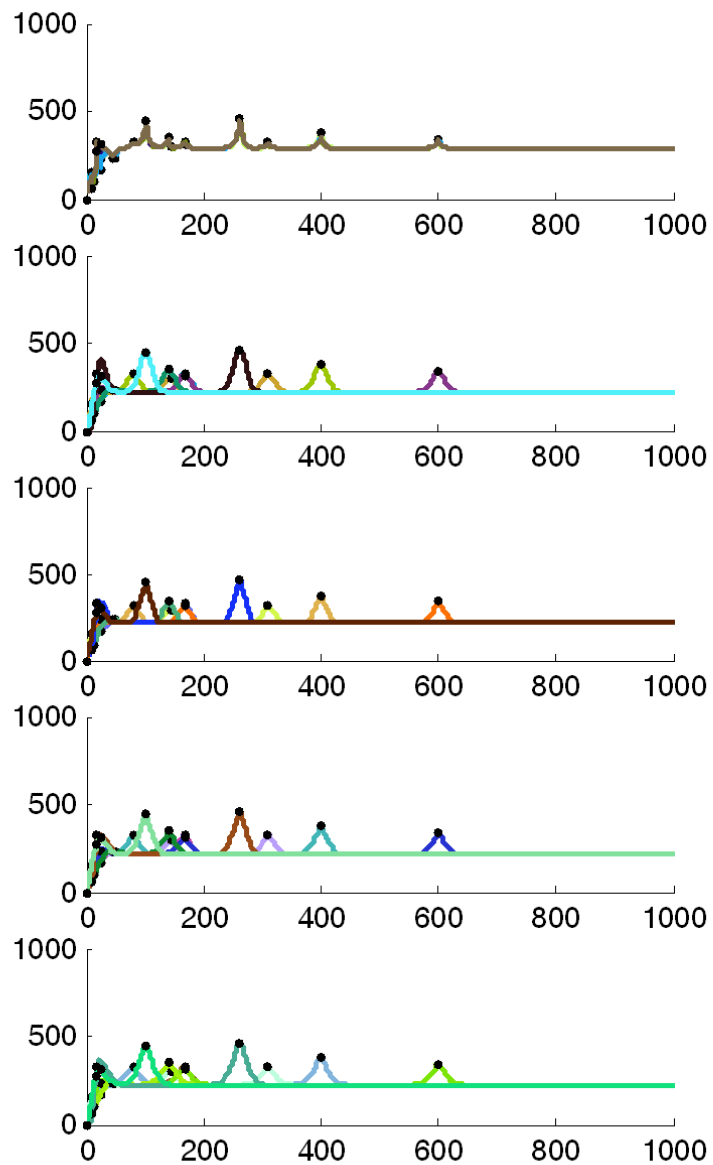
- aproximace:

$$\hat{y}(\mathbf{x}) = \beta + (\mathbf{y} - \mathbf{1}\beta)^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{r}(\mathbf{x})$$

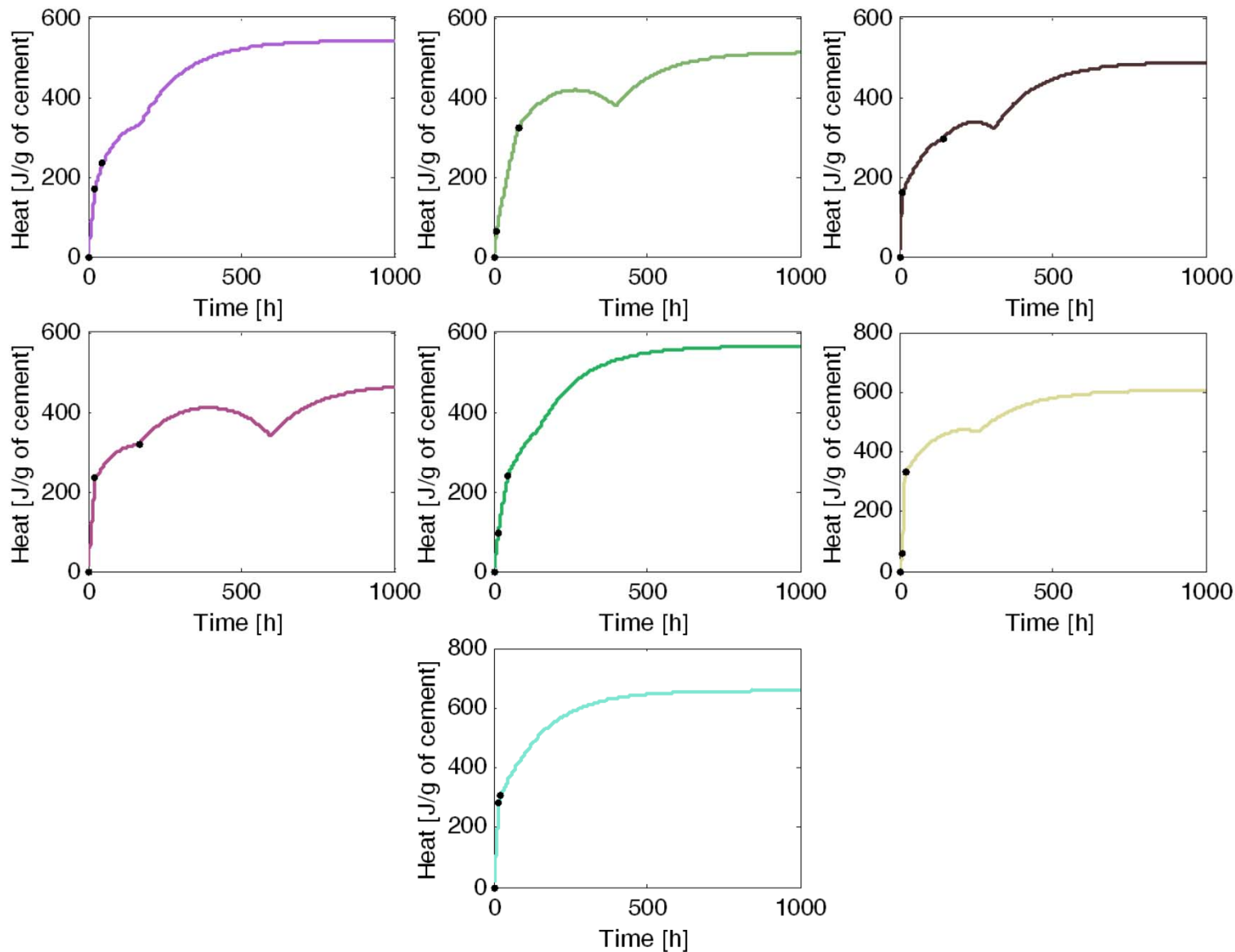
$$\hat{V}(\mathbf{x}) = \sigma^2 \cdot \left[ 1 - \mathbf{r}(\mathbf{x})^T \cdot \mathbf{R}^{-1} \cdot \mathbf{z}(\mathbf{x}) + \frac{(1 - \mathbf{1}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{r}(\mathbf{x}))^2}{\mathbf{1}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{1}} \right]$$



# Hledání regresní křivky

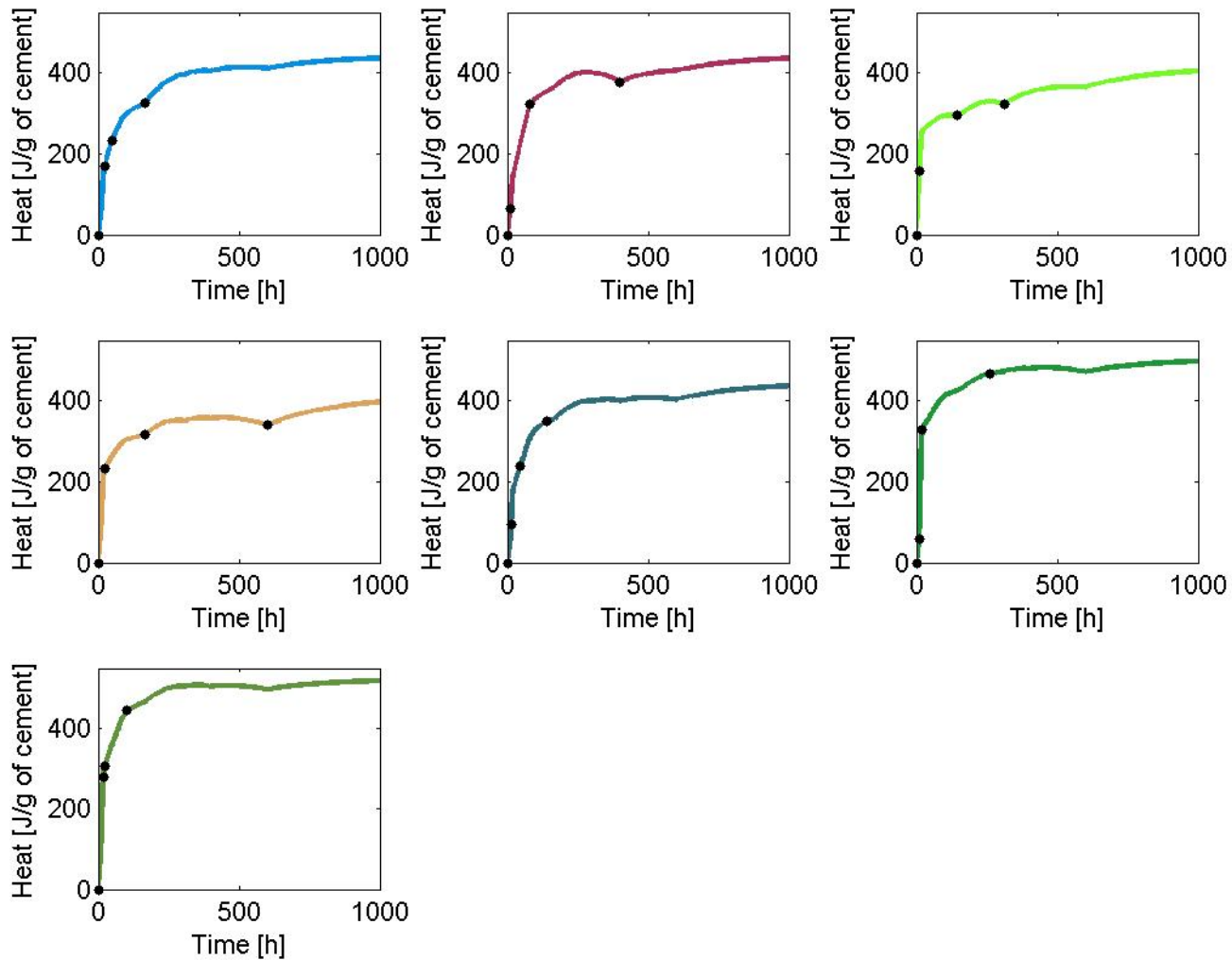


# Hledání regresní křivky





# Hledání regresní křivky Genetickým programováním

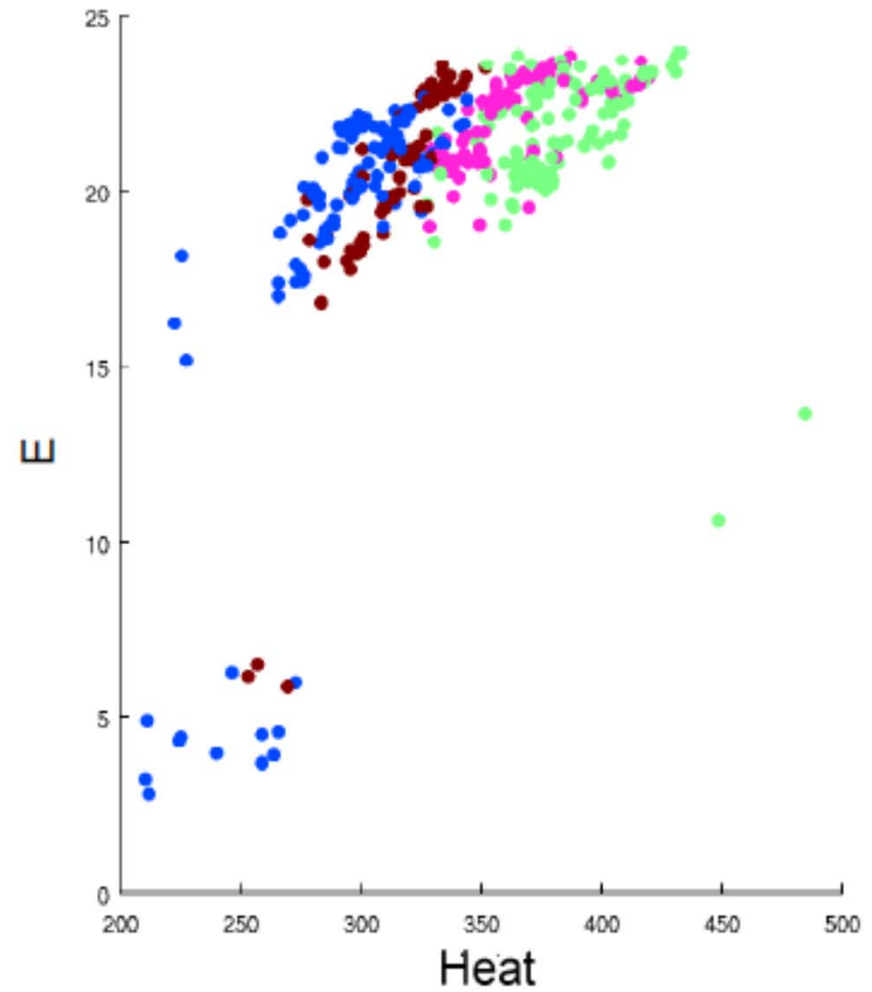
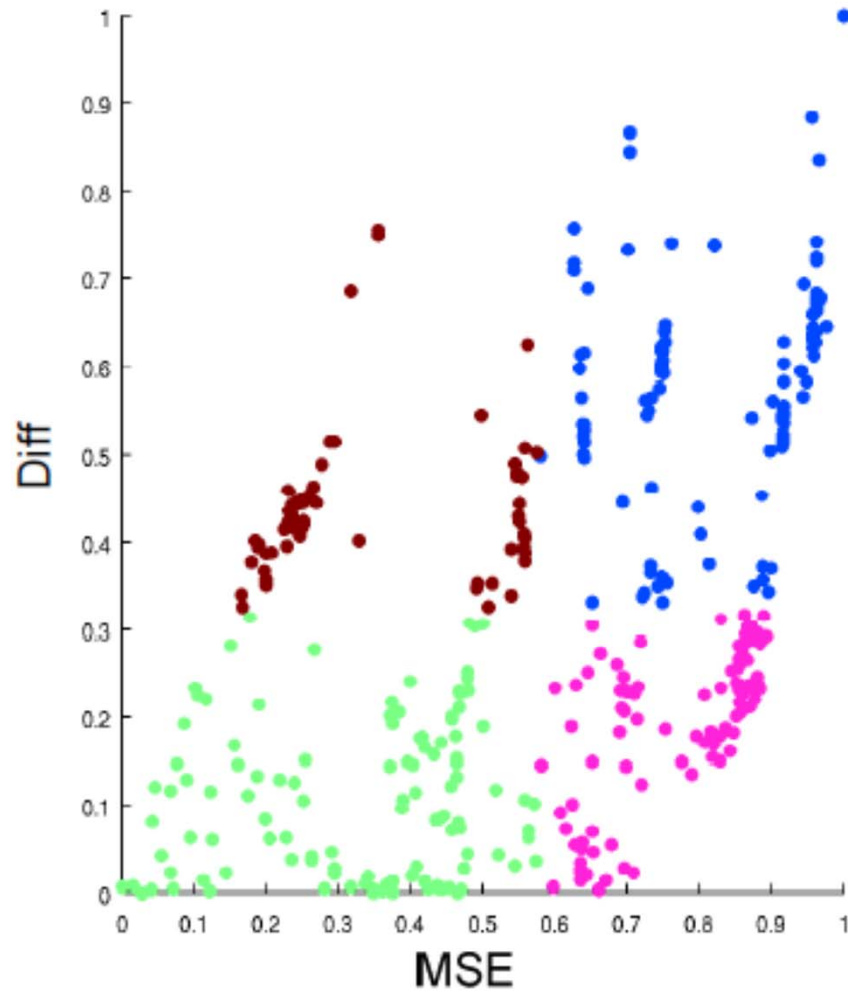


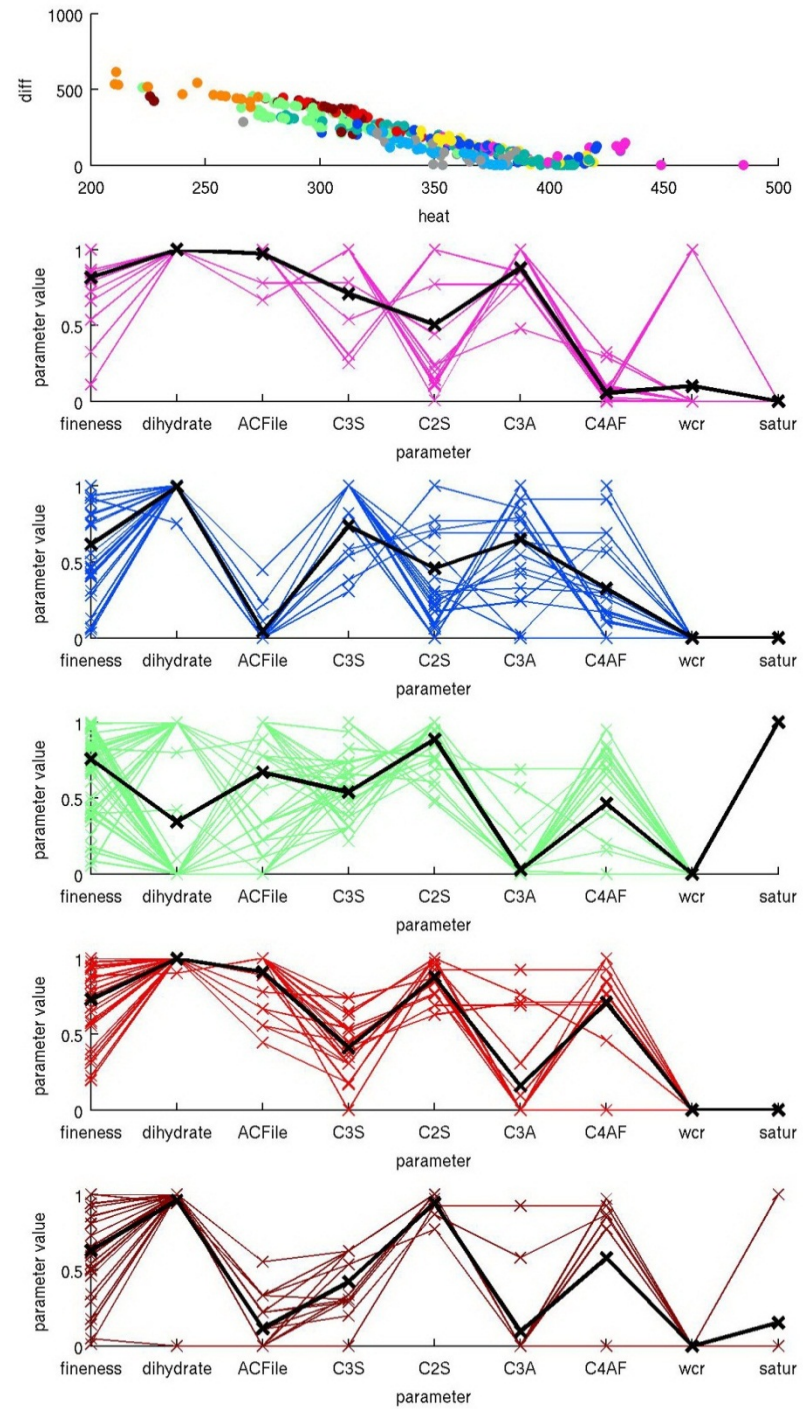
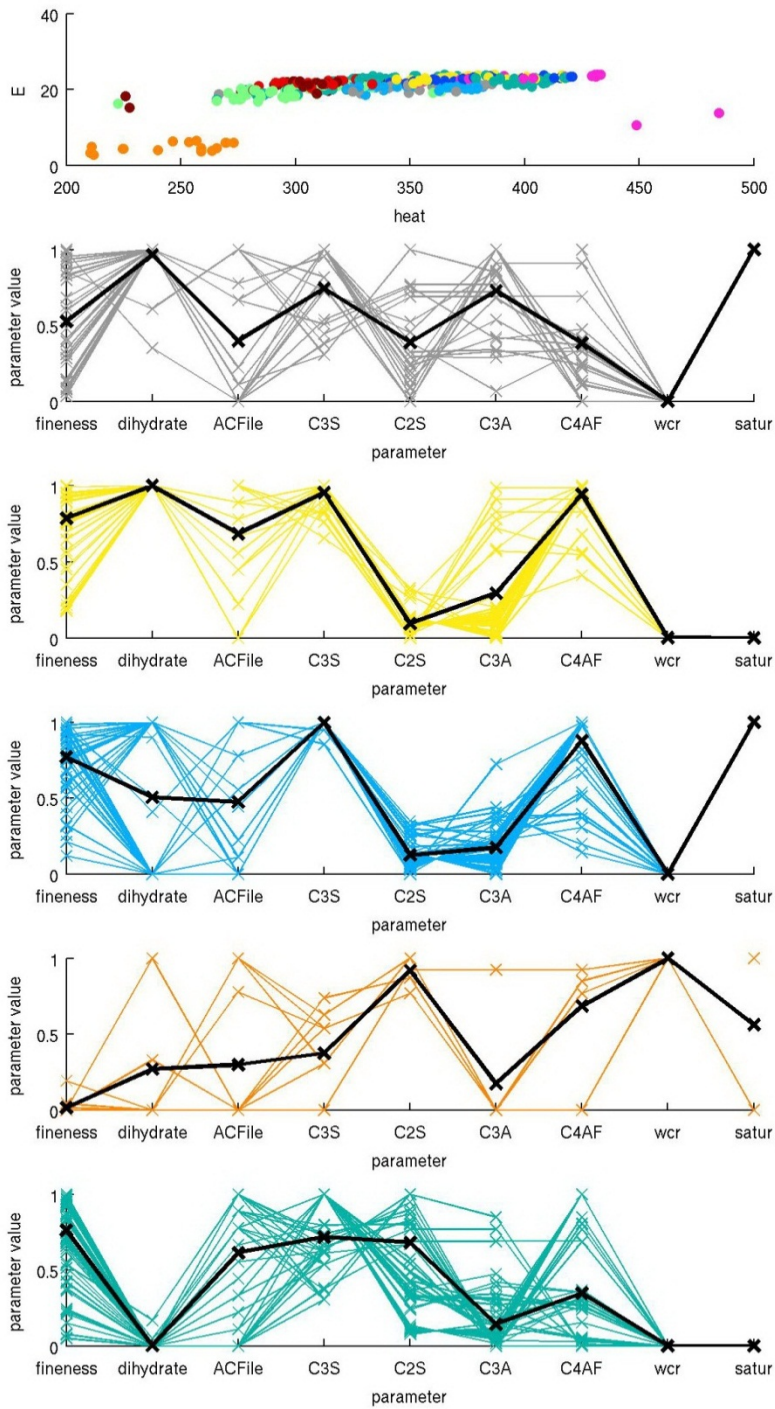


# Evoluční vícekriteriální identifikace

- Cíl je najít parametry, které ve 28 dnech:
  - Maximalizují Youngův modul pružnosti predikovaný v CEMHYD3D
  - Minimalizují hydratační teplo predikované v CEMHYD3D
  - Minimalizují rozdíl mezi plochou z Kriging a predikcí tepla z CEMHYD3D
    - Ekvivalentní shodě mezi experimenty a virtuálním modelem
  - Minimalizují MSE v metodě Kriging
    - Ekvivalentní vzdálenosti k experimentům
  
- PAES: (1+1)-Pareto Archive Evolution Strategy
  - Jednoduchý EMOO
  - Dostupný v jazyce C na: <http://dbkgroup.org/nowles/research.html>

# Pareto front







# Optimalizace konstrukcí





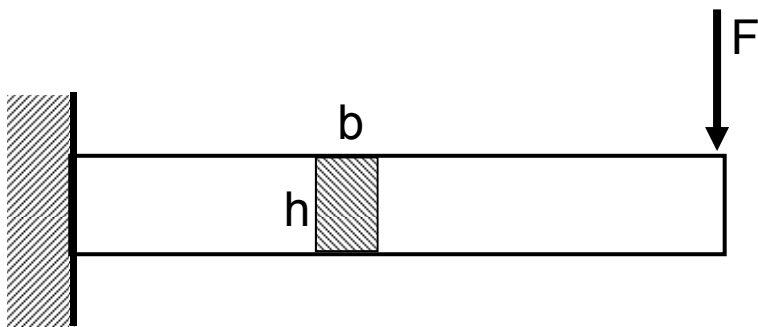
# Úvod

*„Provozní a ekonomické nároky nutně vedou k hledání optimálně navržené konstrukce“*

- Optimalizace je nejnáročnější úlohou
- Obvyklá praxe – selhávání klasických postupů při hledání optima
- Nutnost optimalizačních algoritmů
- Podmínky pro využití optimalizace v praxi
- Optimalizace a Scia Engeneer

# Základní pojmy

- Mnoho kategorií optimalizací
- V tomto příspěvku pouze **parametrická jednokriterální optimalizace s omezujícími podmínkami**
- Vysvětlení pojmů na následujícím příkladě:



Optimalizované parametry:  
b, h

Kriterium:

$$\min \{ m = \rho \cdot b \cdot h \cdot l = 7,8 \cdot 10^{-6} \cdot b \cdot h \cdot 1000 \}$$

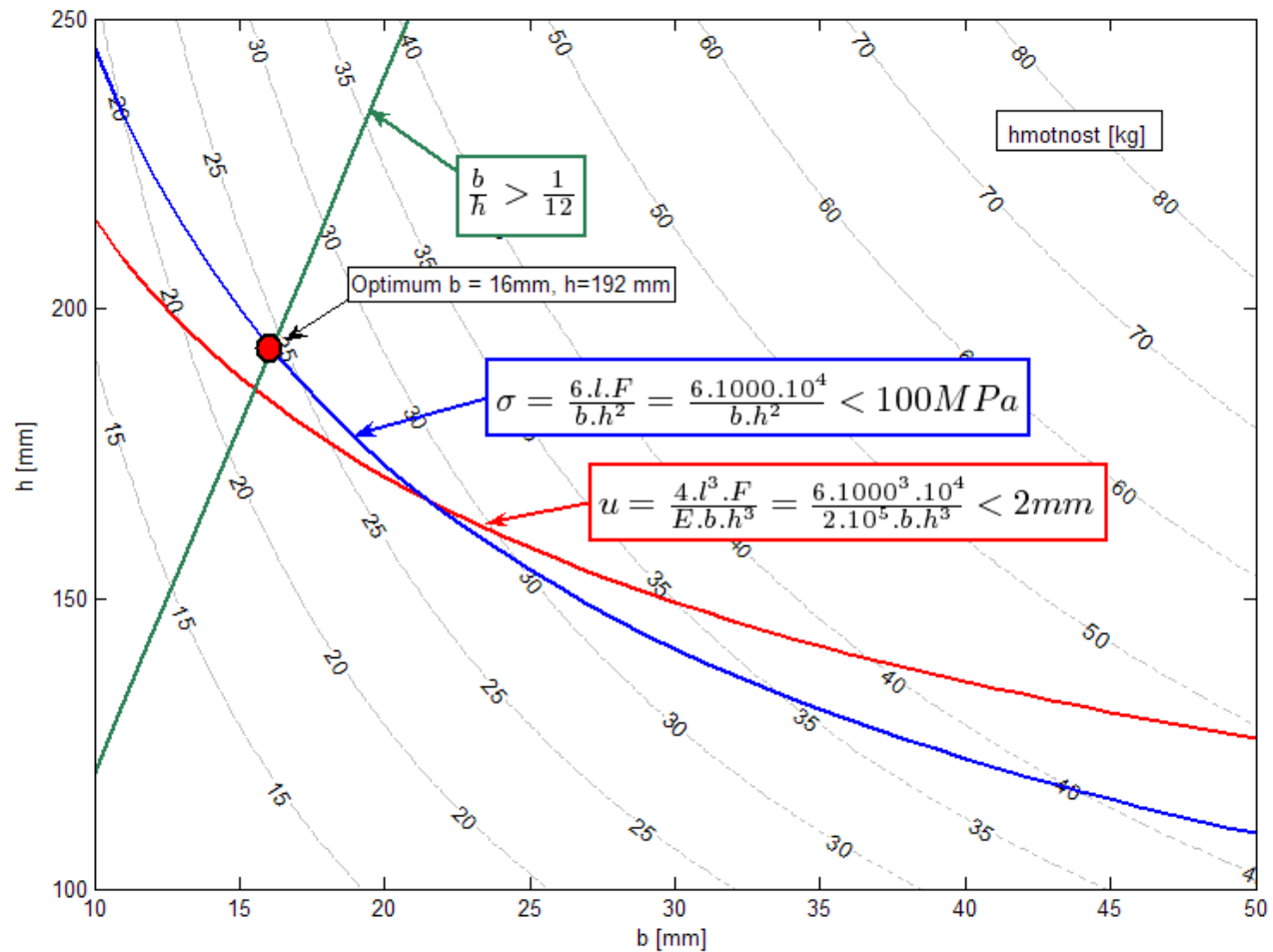
Omezující podmínky:

$$\frac{b}{h} > \frac{1}{12}$$

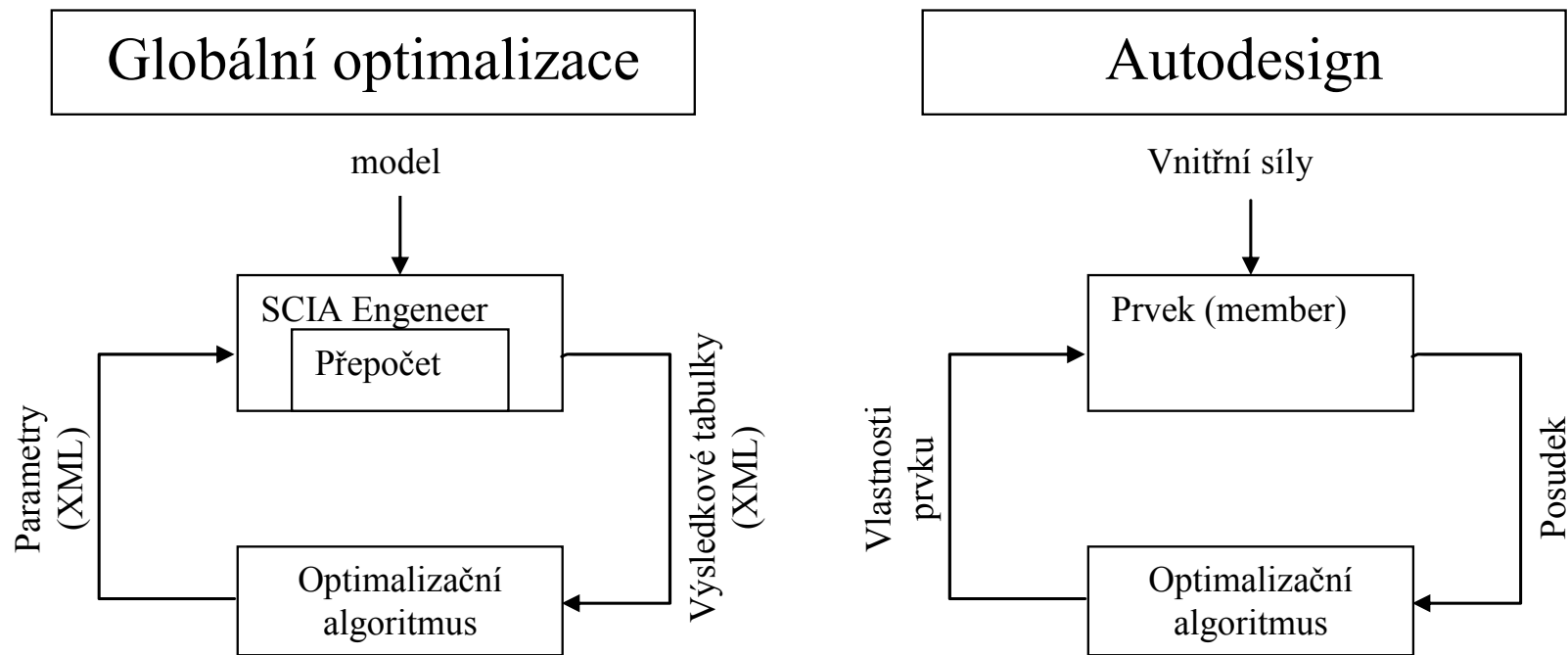
$$\sigma = \frac{6 \cdot l \cdot F}{b \cdot h^2} = \frac{6 \cdot 1000 \cdot 10^4}{b \cdot h^2} < 100 \text{ MPa}$$

$$u = \frac{4 \cdot l^3 \cdot F}{E \cdot b \cdot h^3} = \frac{6 \cdot 1000^3 \cdot 10^4}{2 \cdot 10^5 \cdot b \cdot h^3} < 2 \text{ mm}$$

# Optimalizace nosníku

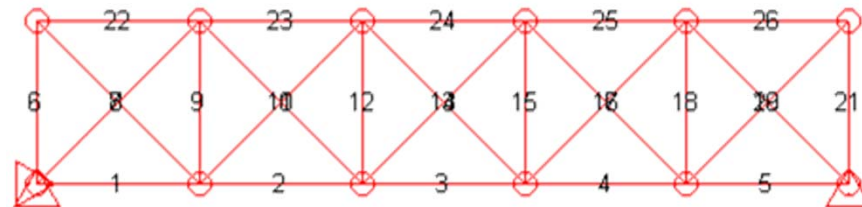


# Optimalizace ve Scia Engineer



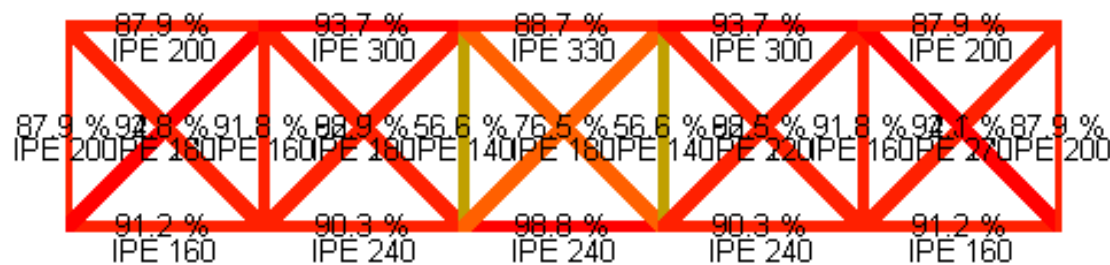
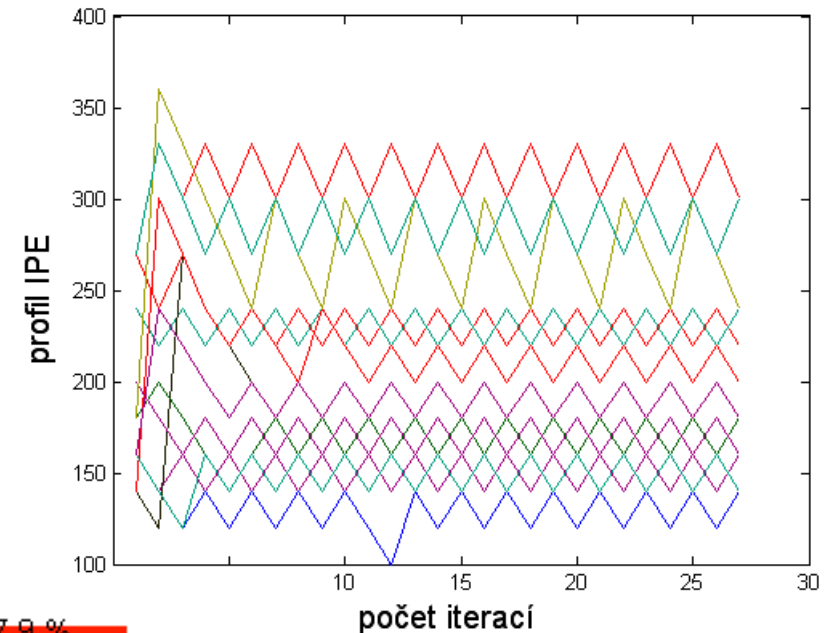
# Automatický návrh průřezů (Autodesign)

- Rozměrová optimalizace
- Příklad heuristického postupu
- Řešení:
  - Staticky určitá konstrukce:
    - vnitřní síly dány ze silových podmínek rovnováhy
    - iterace v důsledku vzpěru
  - Staticky neurčitá konstrukce:
    - iterační metody i pro výpočet vnitřních sil
  - Příklad
    - síla se pohybuje po dolním pásu
    - profily IPE

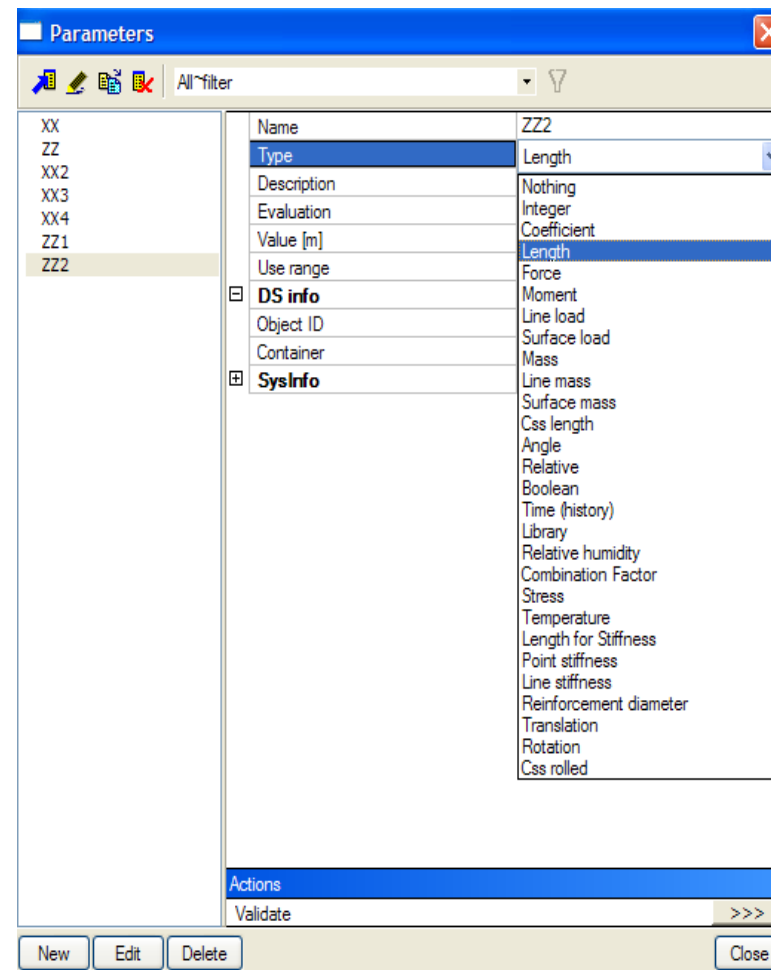


# Automatický návrh průřezů (Autodesign)

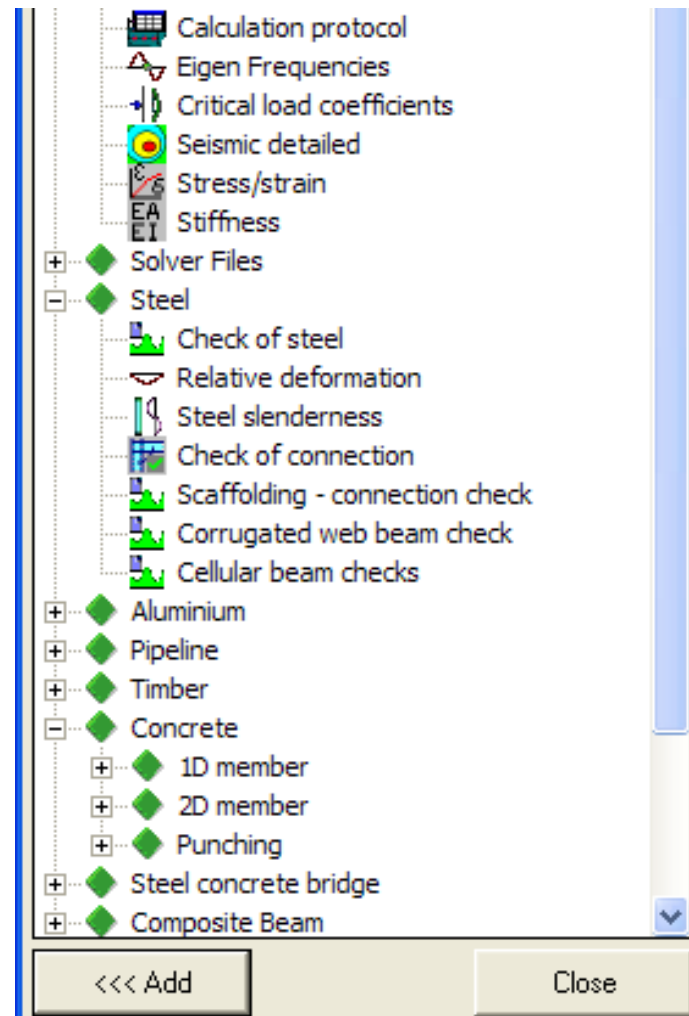
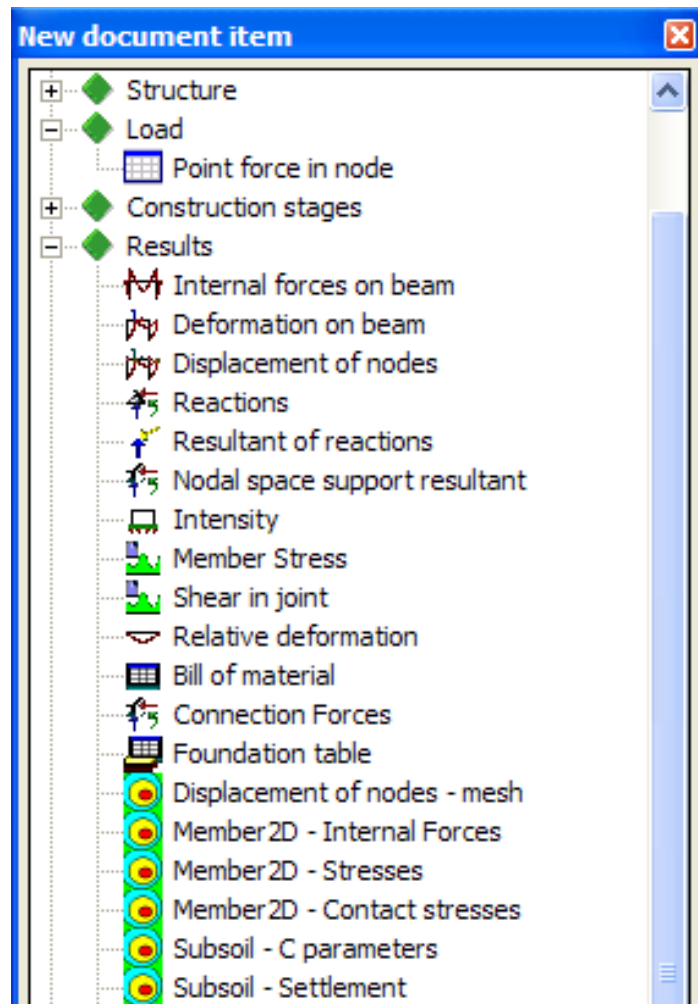
- Iterace: vnitřní síly – posudek – návrh
- Nepravidelná oscilace s cca návratem po 10 iteracích
- Minimum nesplňuje omezující podmínky, nejbližší řešení naopak není optimální



# Možnosti parametrizace



# Výsledkové tabulky





# Připravované rozhraní globální optimalizace

The screenshot shows the EOT software interface for optimization analysis. The window title is "Untitled - EOT". The menu bar includes "File", "Edit", "View", and "Help". The main workspace is titled "Optimization analysis" and contains several panels:

- Left sidebar:** Contains icons for "Esa settings", "Function environment", "Optimization analysis" (selected), and "Sensitive analysis".
- Top tabs:** "Independent Variable" and "Optimization Criteria".
- Table:** A table with columns "User Name", "Initial Value", "Minimum", "Maximum", and "Step". It contains two rows for variables x1 and x2.
- Optimization strategy:** A dropdown menu set to "Modifed Simulated Annealing" (note the typo) and a table of properties and values.
- Workspace:** A list of variables: M\_PI, M\_E, M\_SQRT2, x1, x2, and f1.
- Bottom status bar:** Displays "Objective is not defined" in a red box and "!! RUN !!" in a button.

User Name	Initial Value	Minimum	Maximum	Step
x1	1.0000000	1.0000000	1.0000000	<input type="checkbox"/> 0.00000000
x2	1.0000000	1.0000000	1.0000000	<input type="checkbox"/> 0.00000000

Property	Value
Population	20
Numb. Iter	20
succmax	30
countmax	300
Standard error	5.00e-003
pmutation	1.25e-001
coef Tmaxmin	1.00e-002
Kspecimen	4.00e-001
alfamax	1.50e-001
alfamin	1.00e-002
gamamax	1.00e-002
gamamin	1.00e-002

Objective is not defined

!! RUN !!

Ready

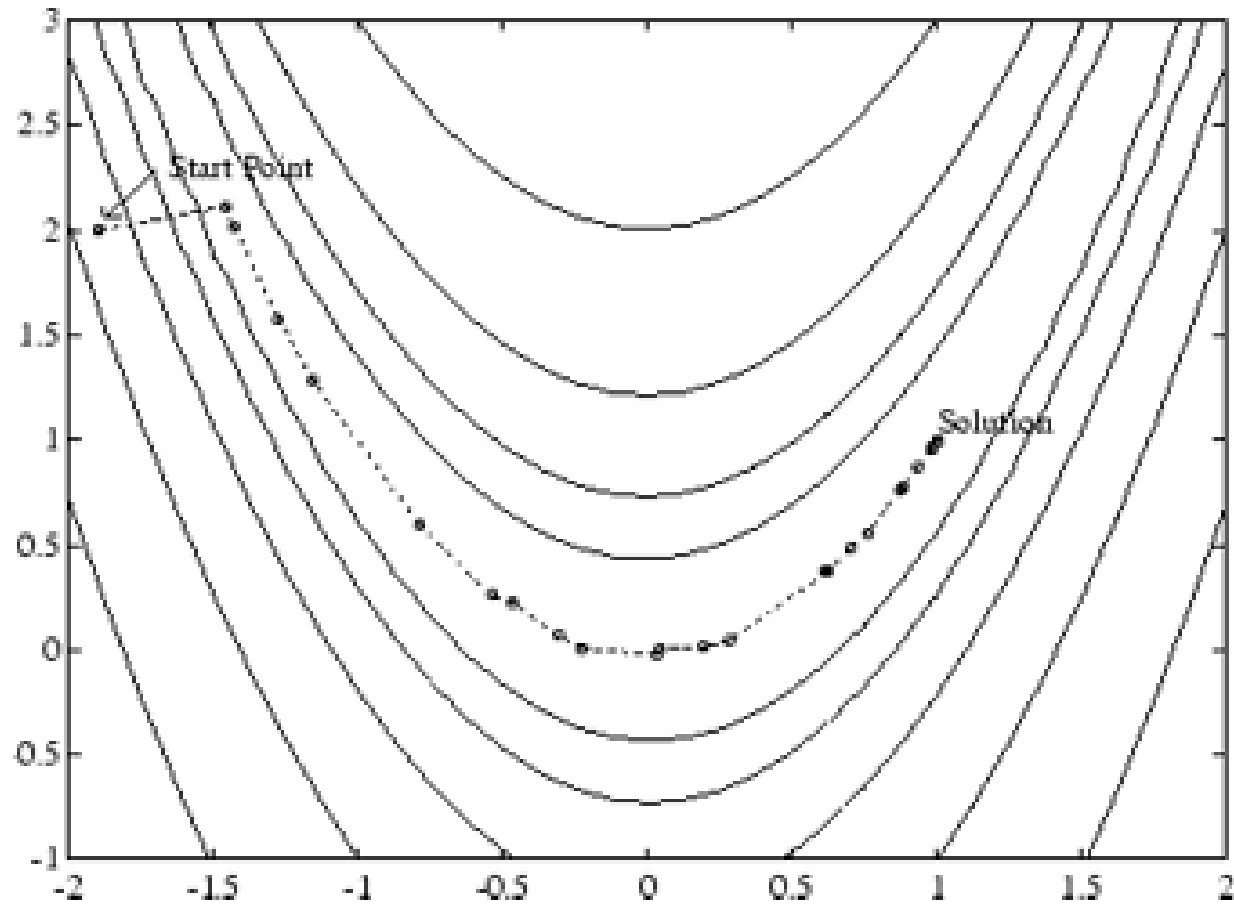
CAP| NUM| SCRL| ...



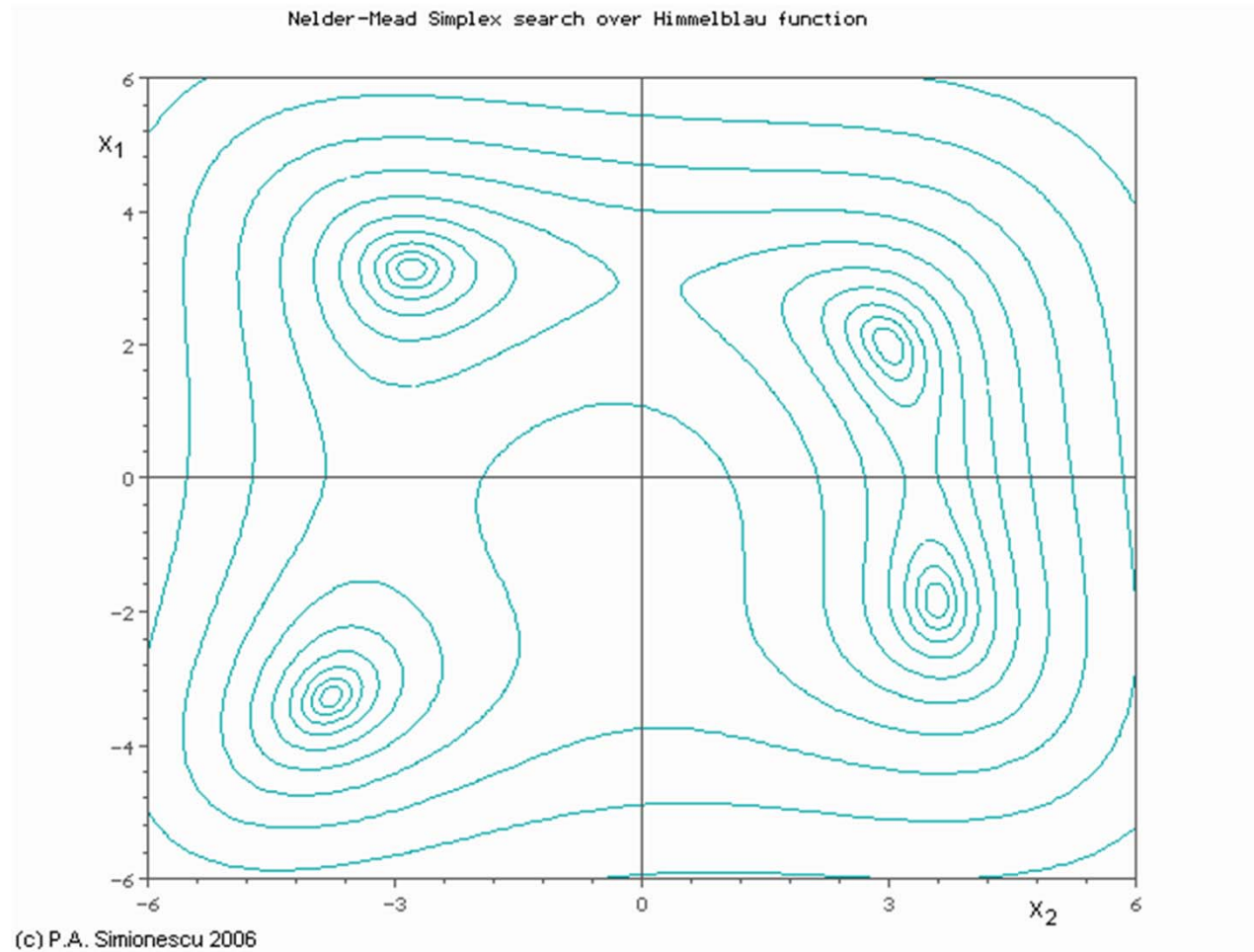
# Použité strategie

- SQP – gradientní metoda
- Nelder-Mead - heuristická metoda
- Stochastické metody
  - Diferencialní evoluce
  - MSA – Genetické metody
- (jednoperametrické metody)

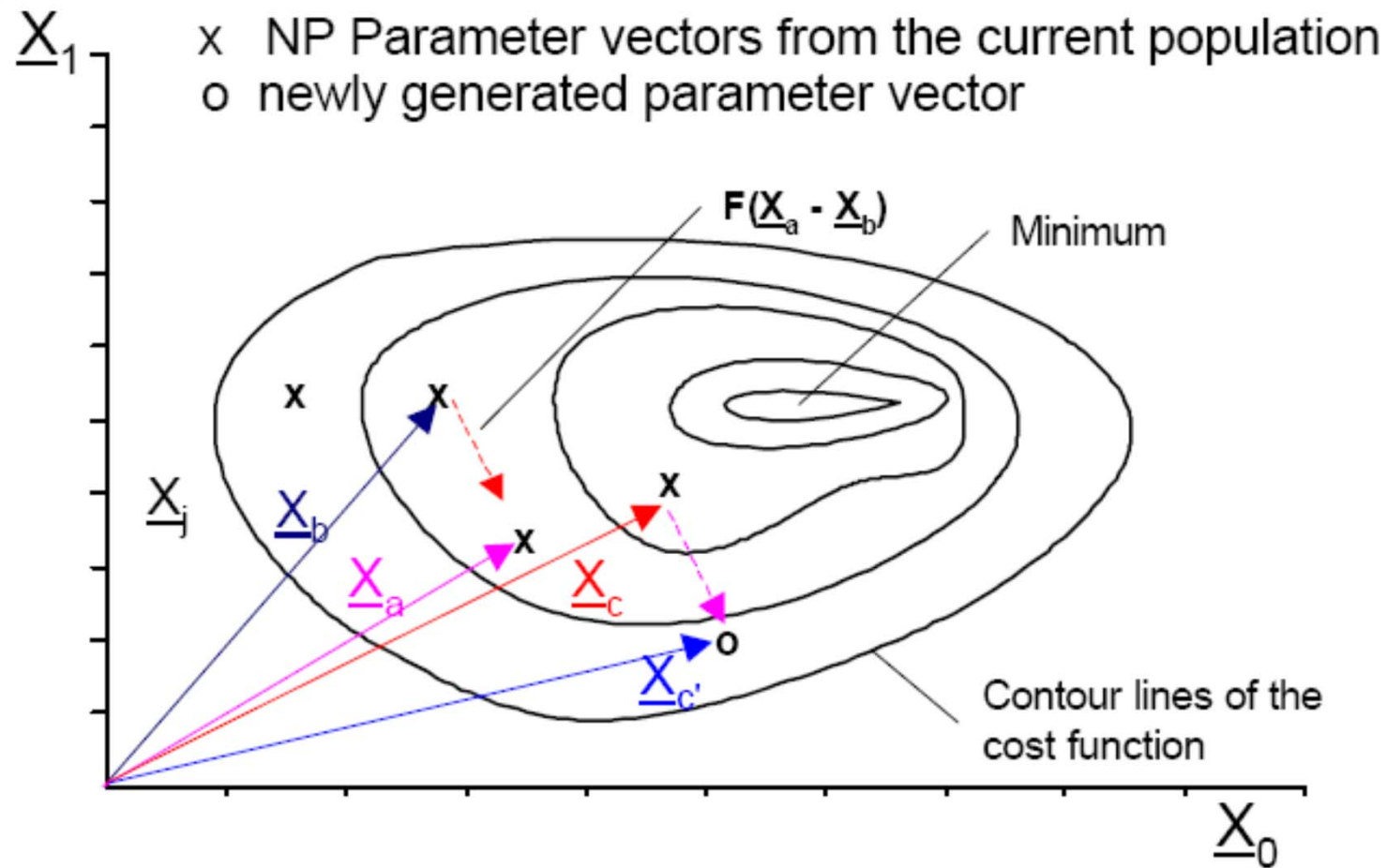
# Gradientní metoda



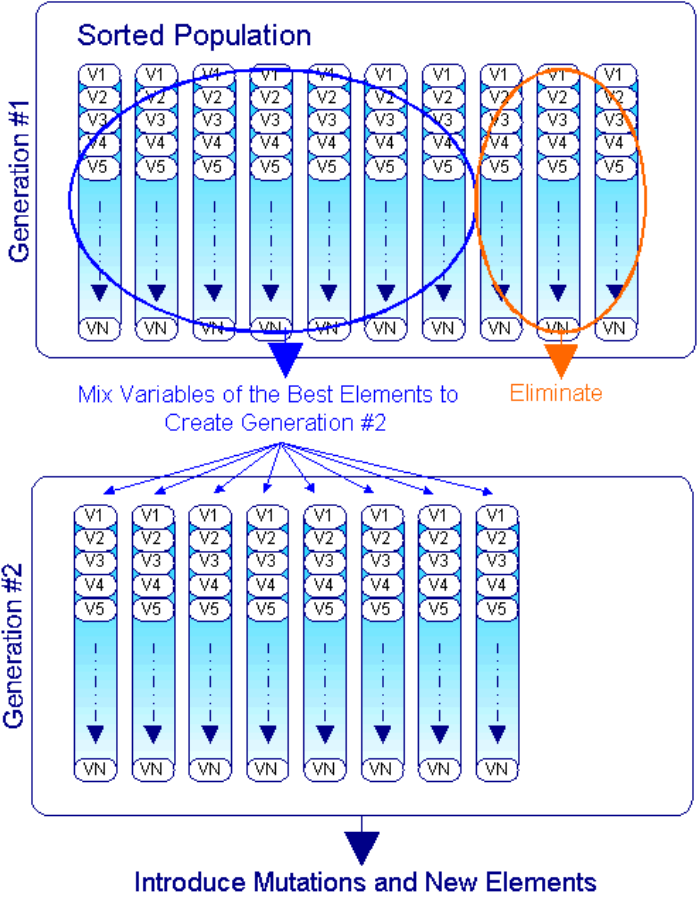
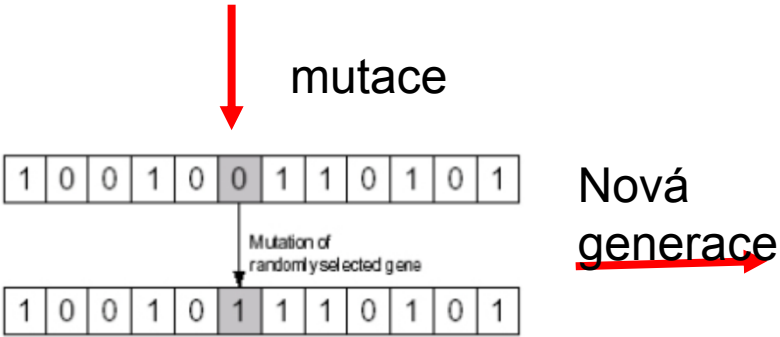
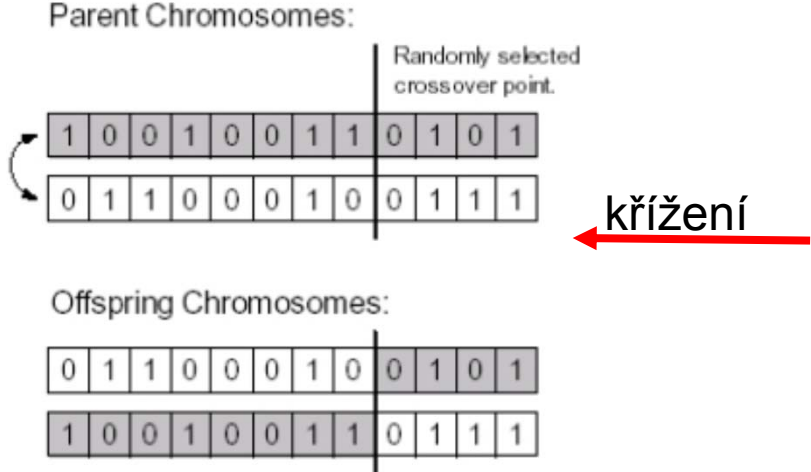
# Nelder - Mead



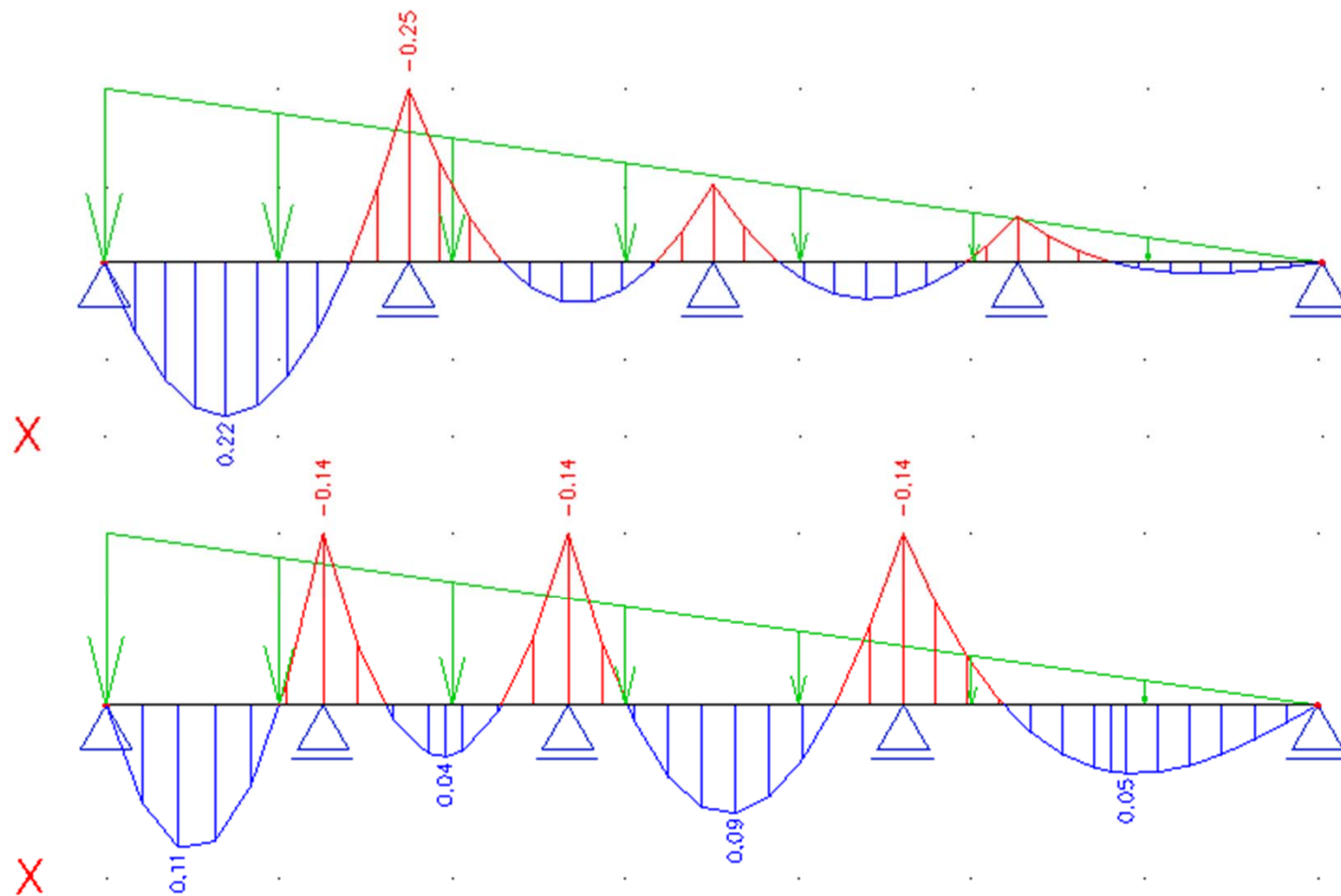
# Diferenciální evoluce

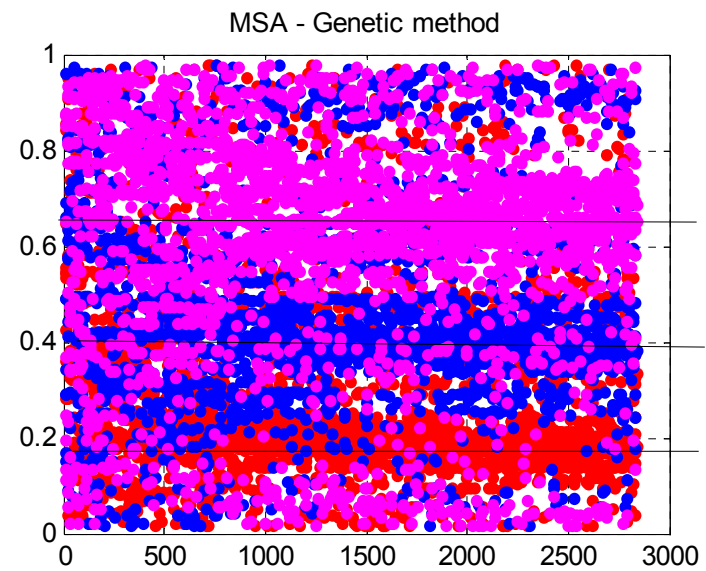
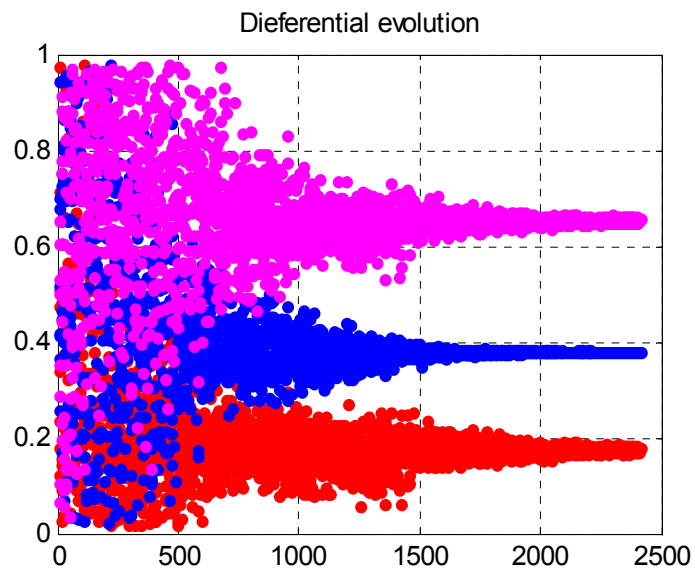
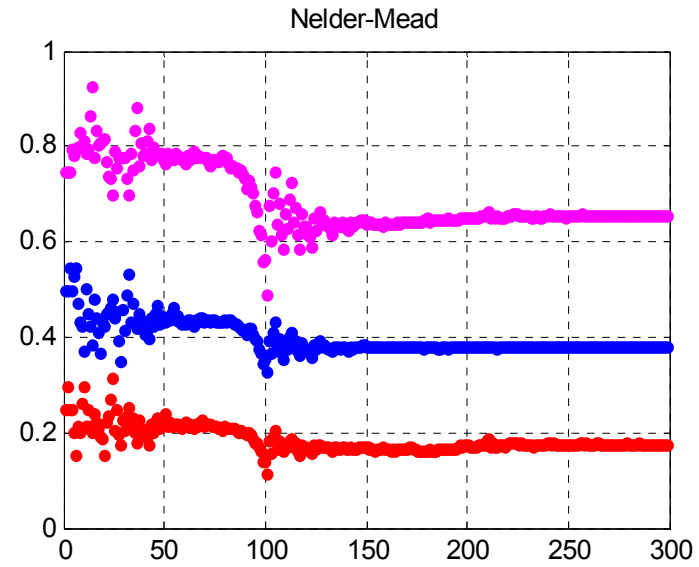
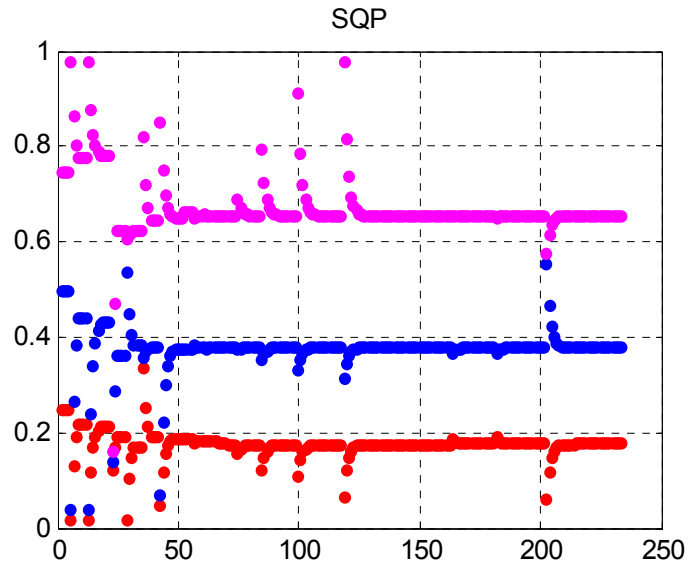
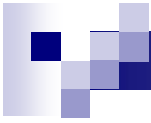


# Genetické algoritmy



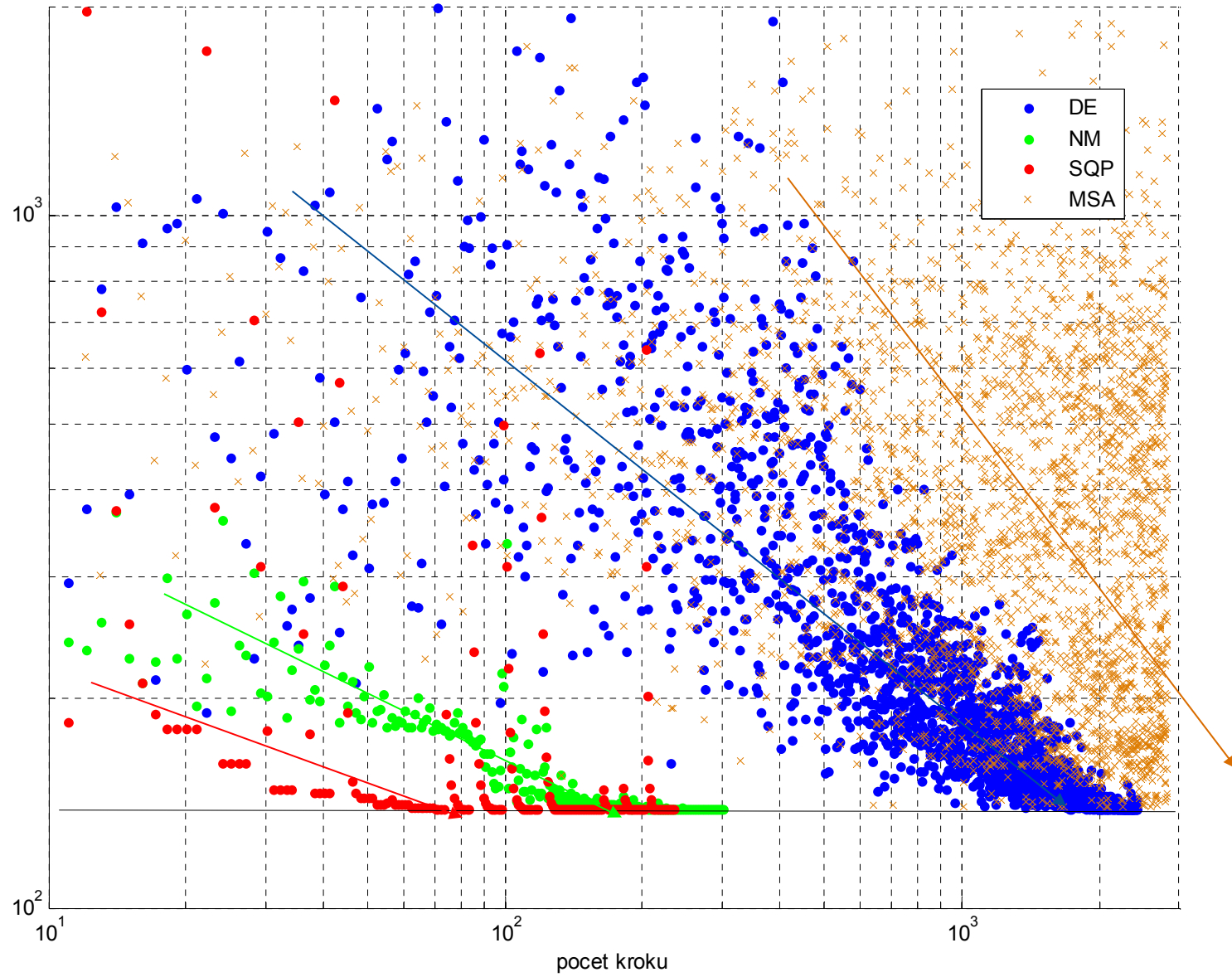
# Příklad





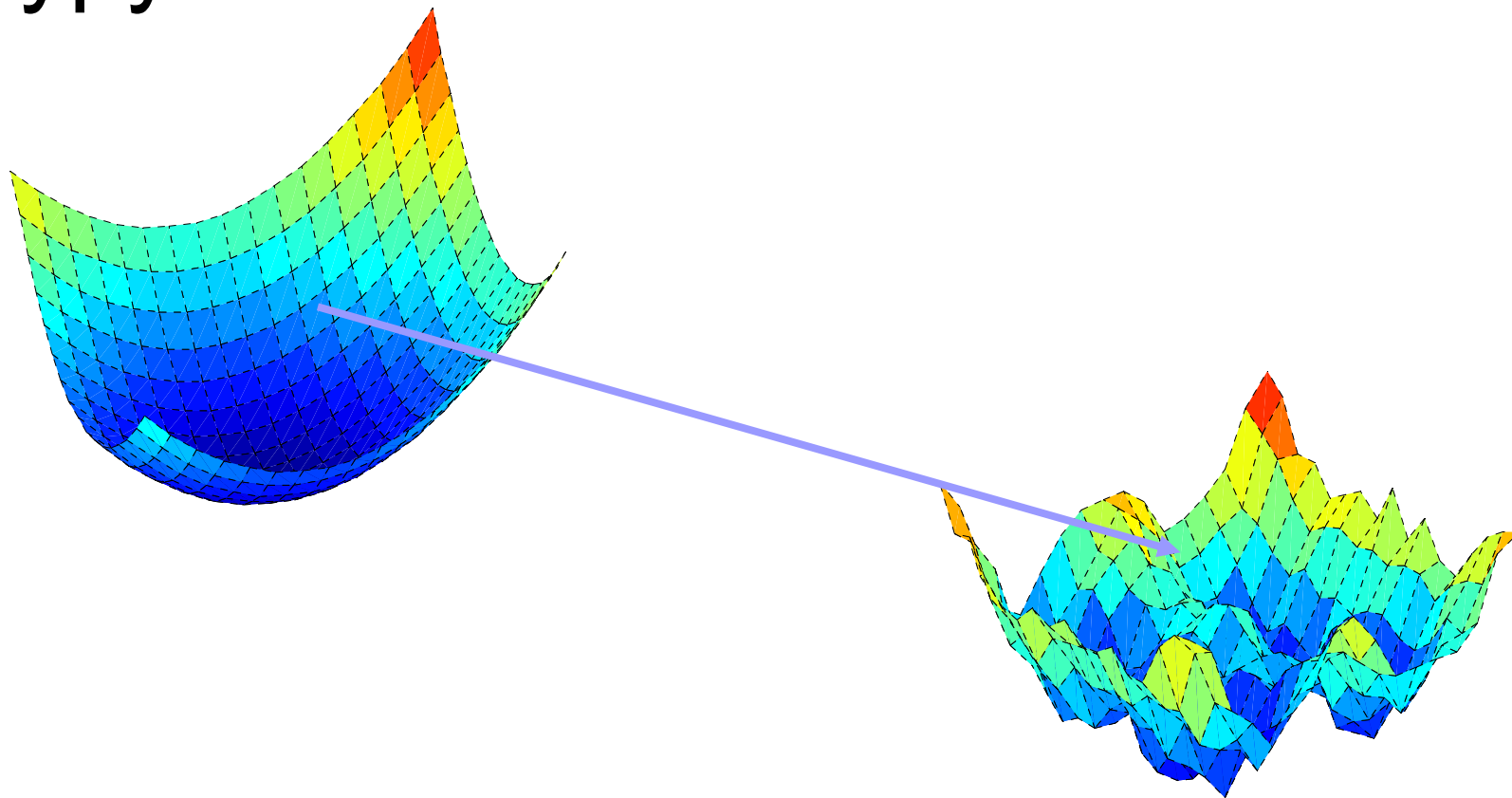


Konvergence k optimu

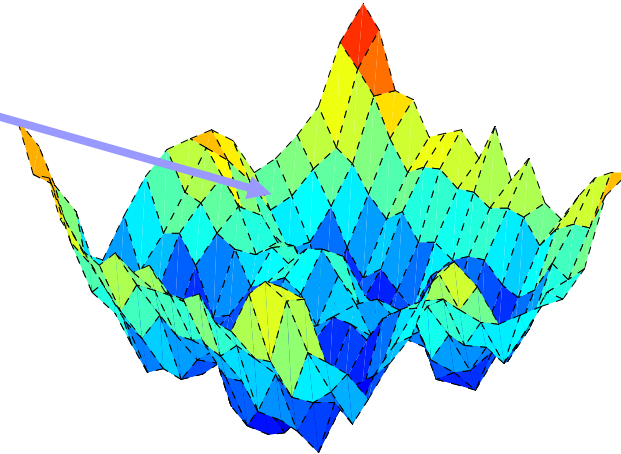
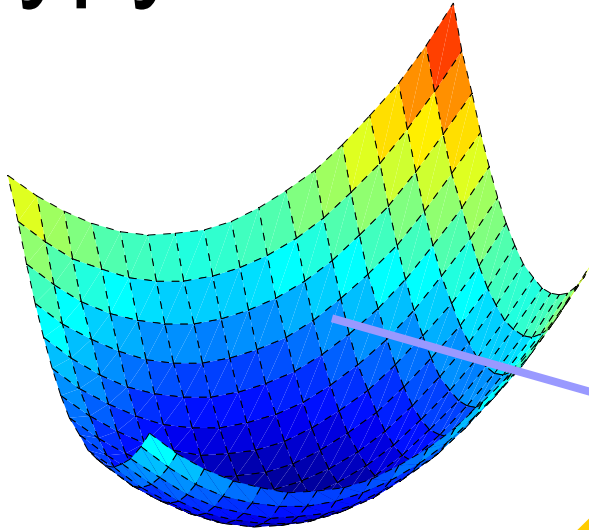




# Typy úloh

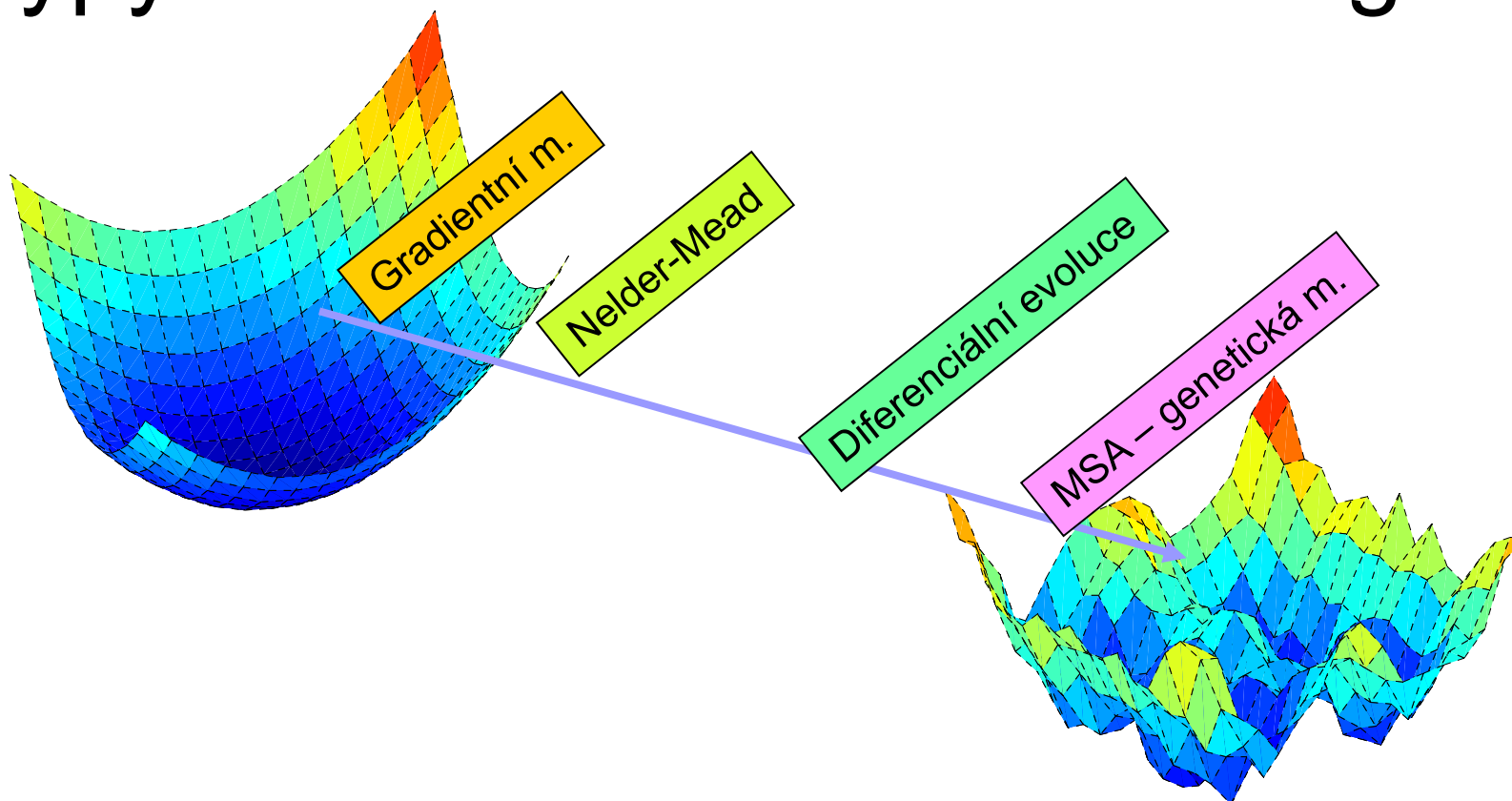


# Typy úloh

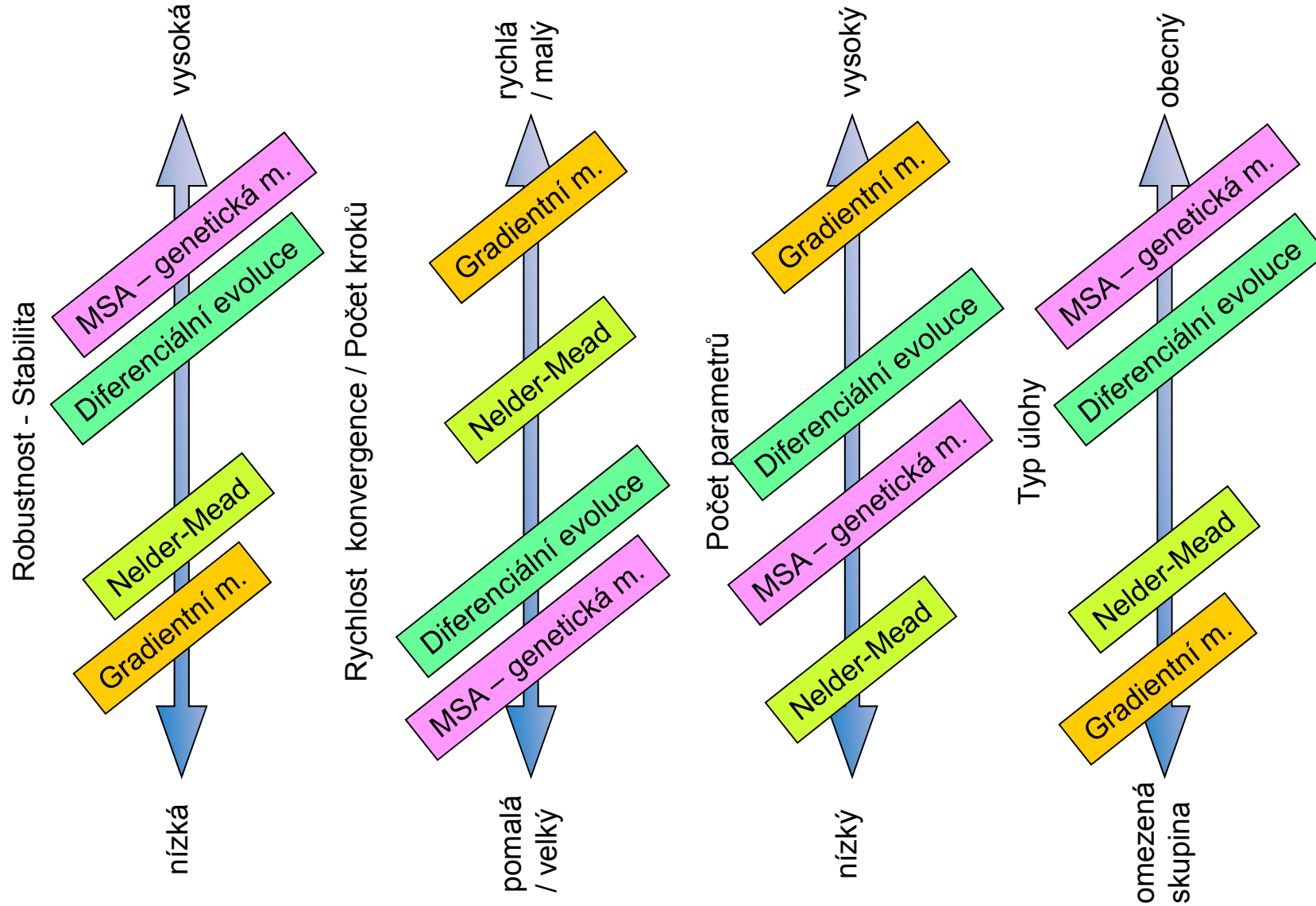


**Ideální strategie neexistuje!**

# Typy úloh – Použitelnost strategií

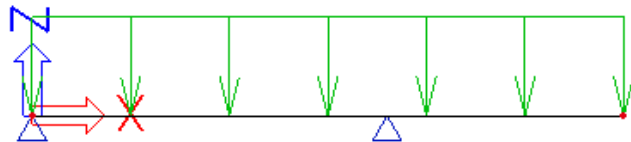


# Použitelnost strategií II



# Nosník

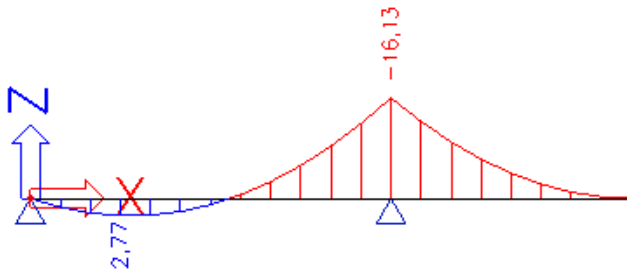
Minimalizace ohybového momentu  $M_y$



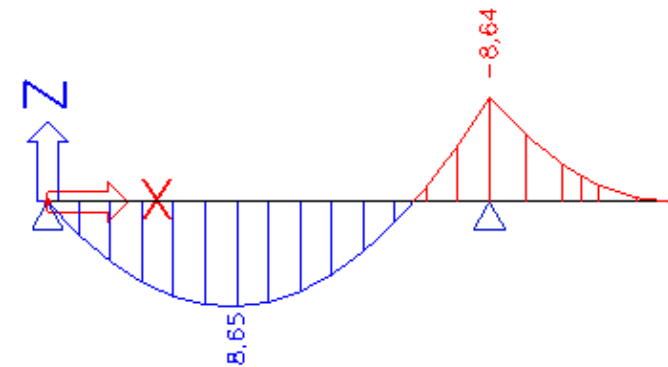
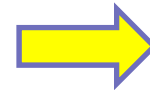
Počáteční geometrie



Optimalizovaná geometrie



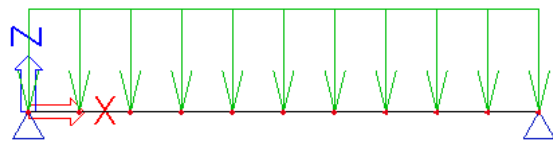
Počáteční  $M_y$



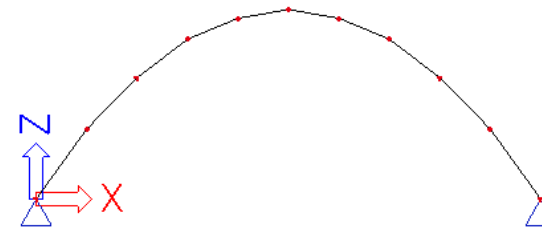
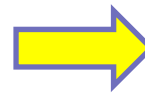
Optimalizovaný  $M_y$

# Oblouk

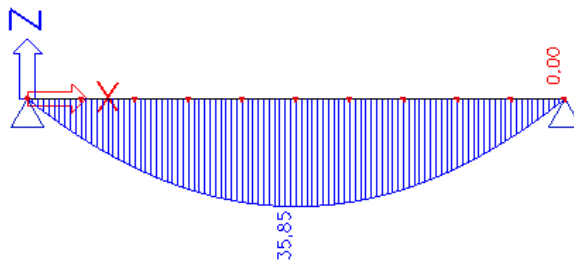
Minimalizace ohybového momentu  $M_y$



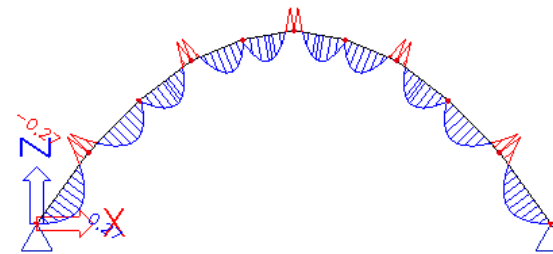
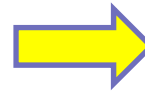
Počáteční geometrie



Optimalizovaná geometrie



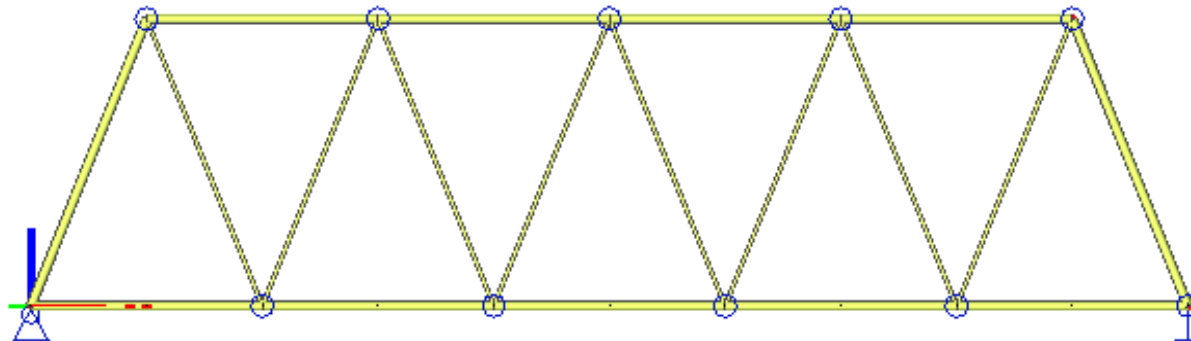
Počáteční  $M_y$



Optimalizovaný  $M_y$

# Příhradová konstrukce

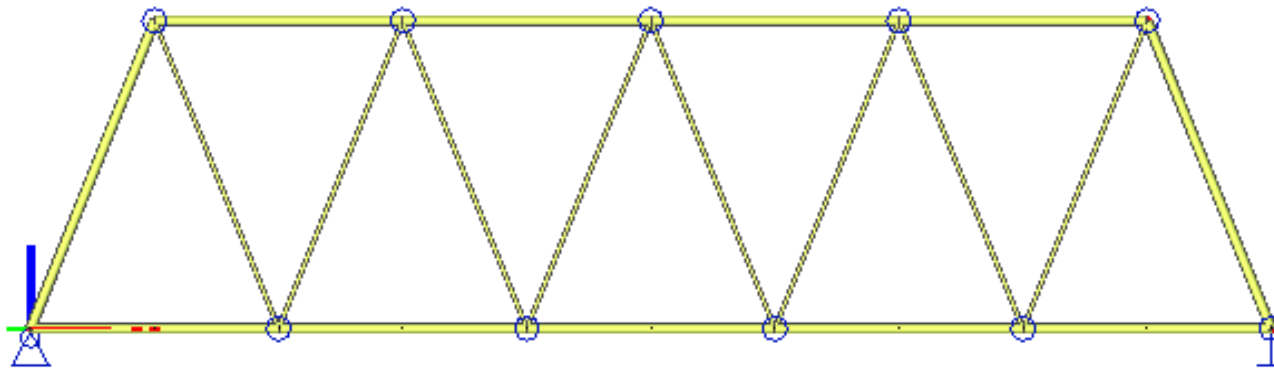
- Optimalizace tvaru horního oblouku vzhledem k hmotnosti
- Optimalizované parametry - polohy uzlů, 4 parametry
- Konstrukce staticky určitá – pro návrh průřezu použito autodesignu
- Algoritmus Nelder –Mead, 140 iterací
- Úspora hmotnosti 37 %
- Nalezení tvaru poměrně rychlé
- Vliv výpletu na optimální tvar konstrukce



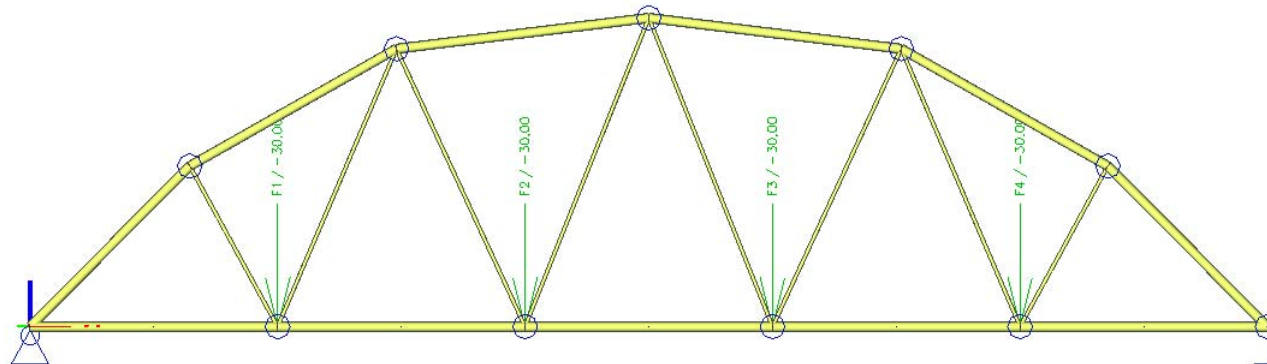


# Příhradová konstrukce

Původní tvar

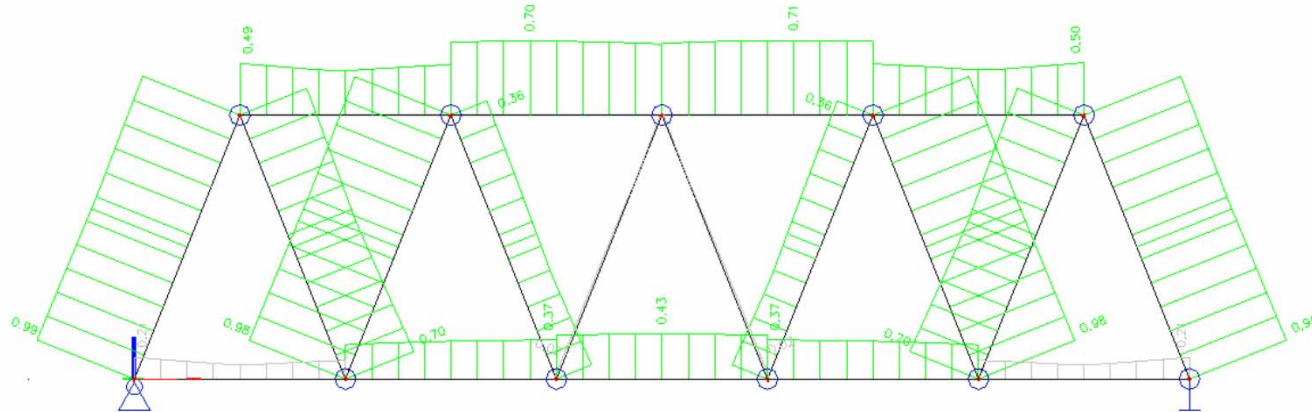


Optimalizovaný tvar

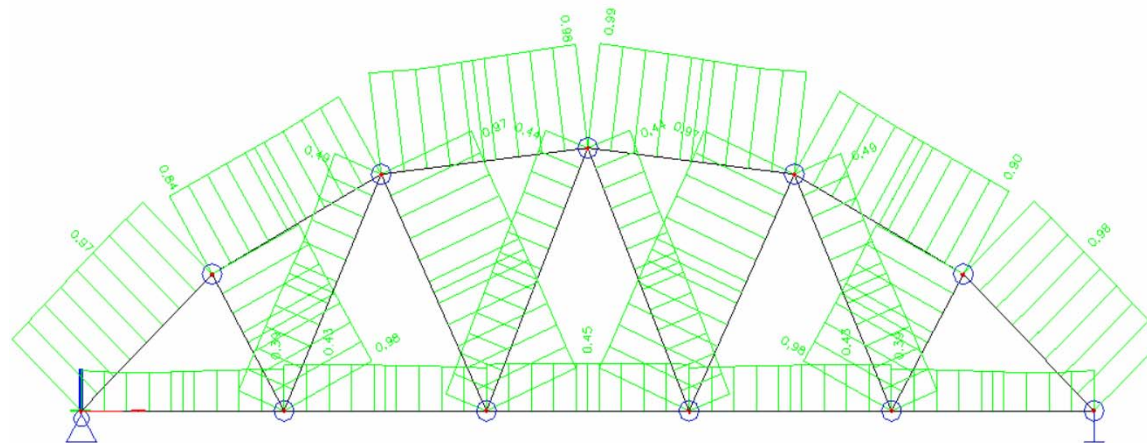


# Průběh posudků

Původní tvar

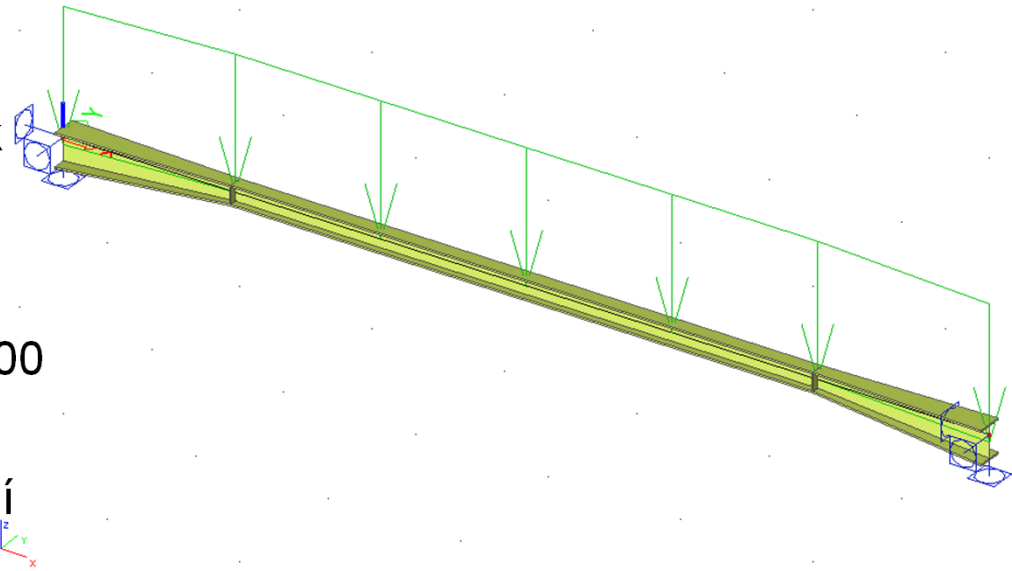


Optimalizovaný tvar



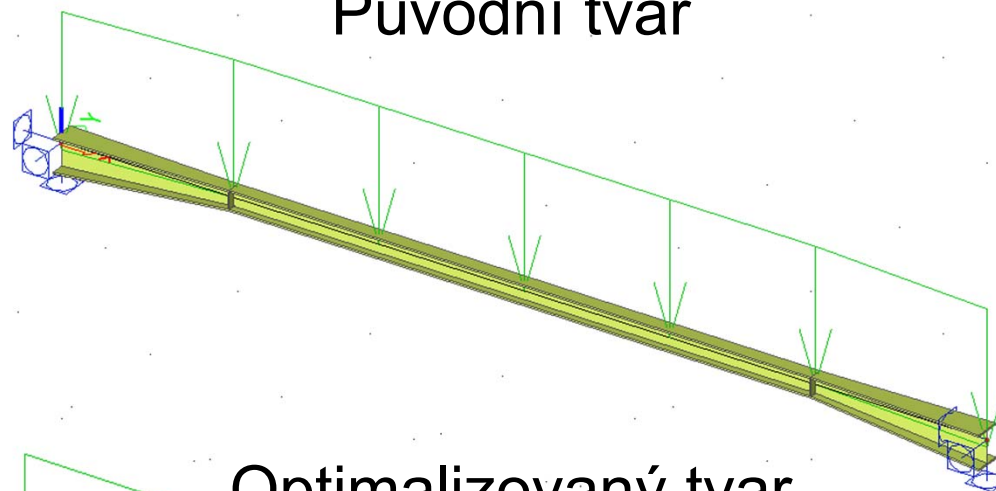
# Nosník s náběhy

- Minimalizace hmotnosti – návrh optimálního náběhu
- Omezující podmínka – posudek
- Počet parametrů 6
- Statická neurčitost
- Použitá metoda Nelder-Mead 200 iterací
- Na první pohled stejné optimální rozložení posudku
- Ruční návrh s optimálním rozložením posudku není zároveň optimální z hlediska minimální hmotnosti
- Složitost ručního návrhu
- Ruční návrh 192 kg, počítačový návrh 171 kg, úspora 11%

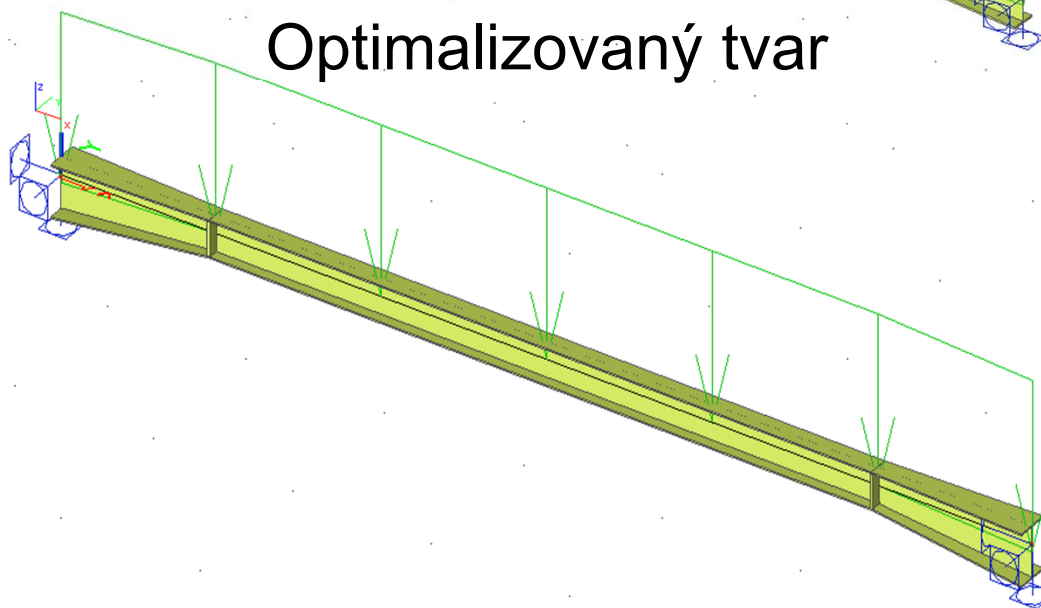


# Nosník s náběhy

Původní tvar

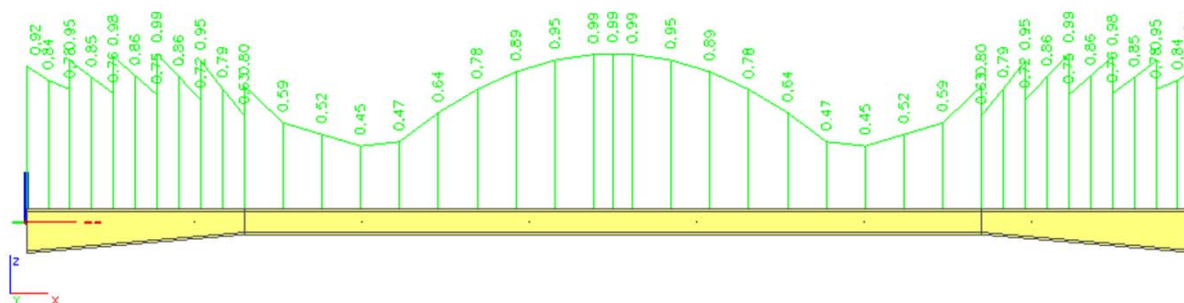


Optimalizovaný tvar

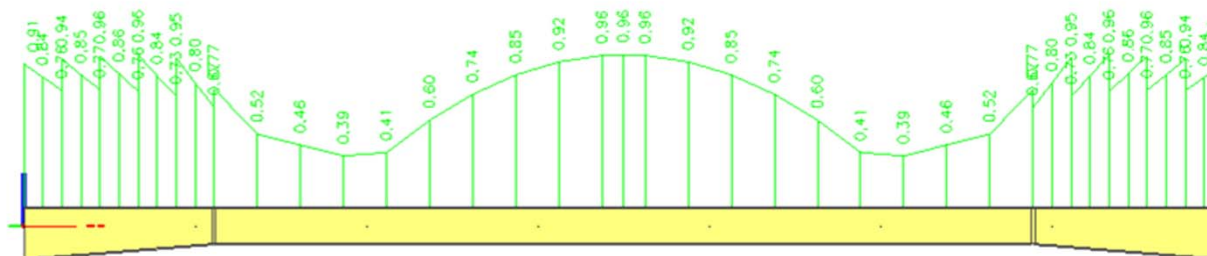


# Průběh posudků

Původní tvar

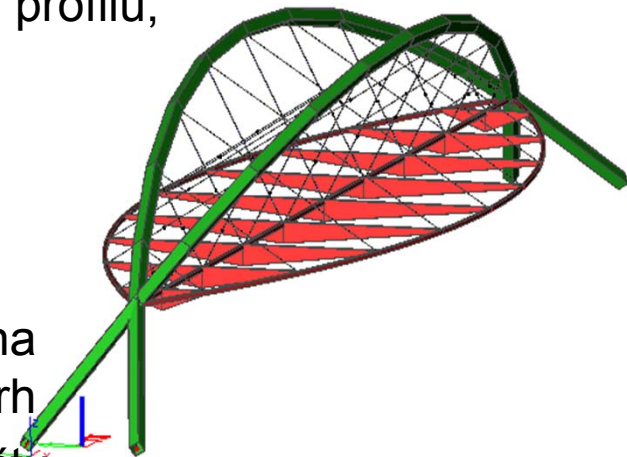


Optimalizovaný tvar

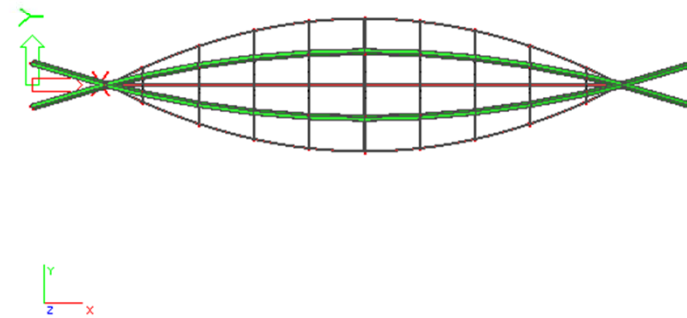
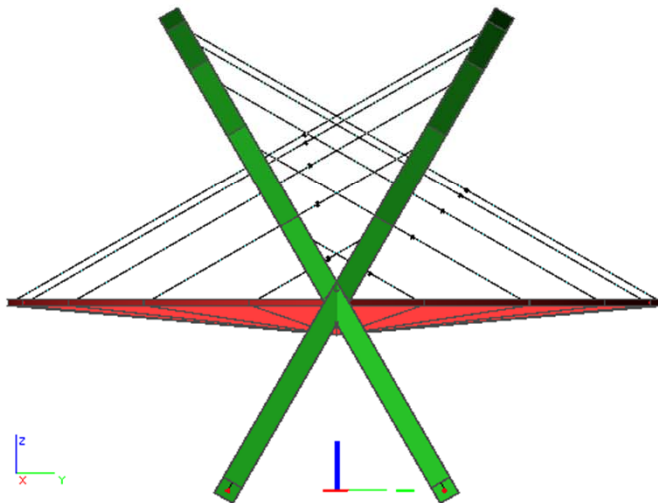
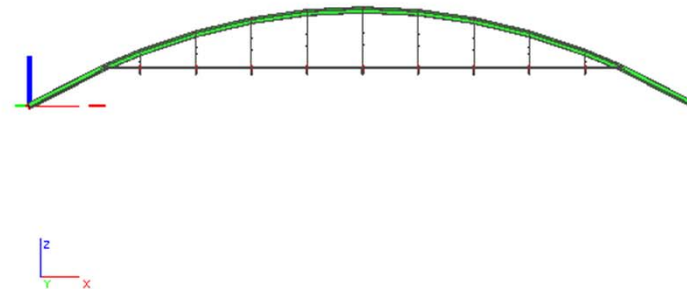
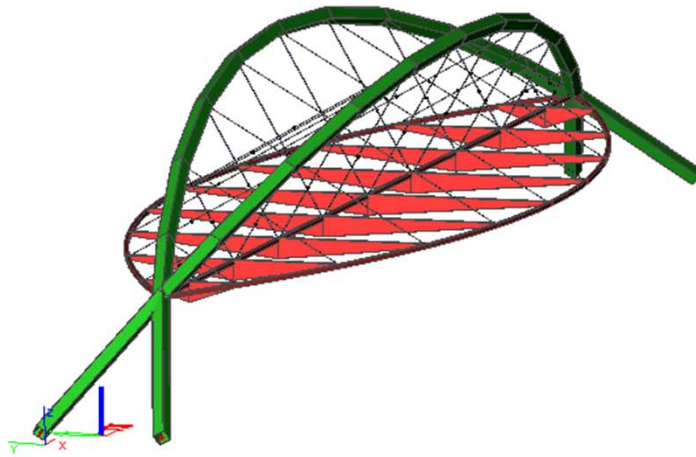


# Střešní konstrukce

- Zavěšená ocelová konstrukce ze svařovaných profilů, jedna svisla kombinace zatížení
- Minimalizace hmotnosti
- Omezující podmínka – posudek
- Počet parametrů 7
- Statická neurčitost – citlivost vnitřních účinků na průřezové charakteristiky – problematický návrh
- Náročnost reálné úlohy z hlediska velkého počtu zatěžovacích kombinací – výhoda optimalizace
- Použitá metoda Modifikovaného Simulovaného žíhání,  $10^8$  možných kombinací, cca. 1000 iterací
- Možnost využití paralelizace
- Ruční návrh 40 t, počítačem optimalizovaný návrh 33 t



# Střešní konstrukce

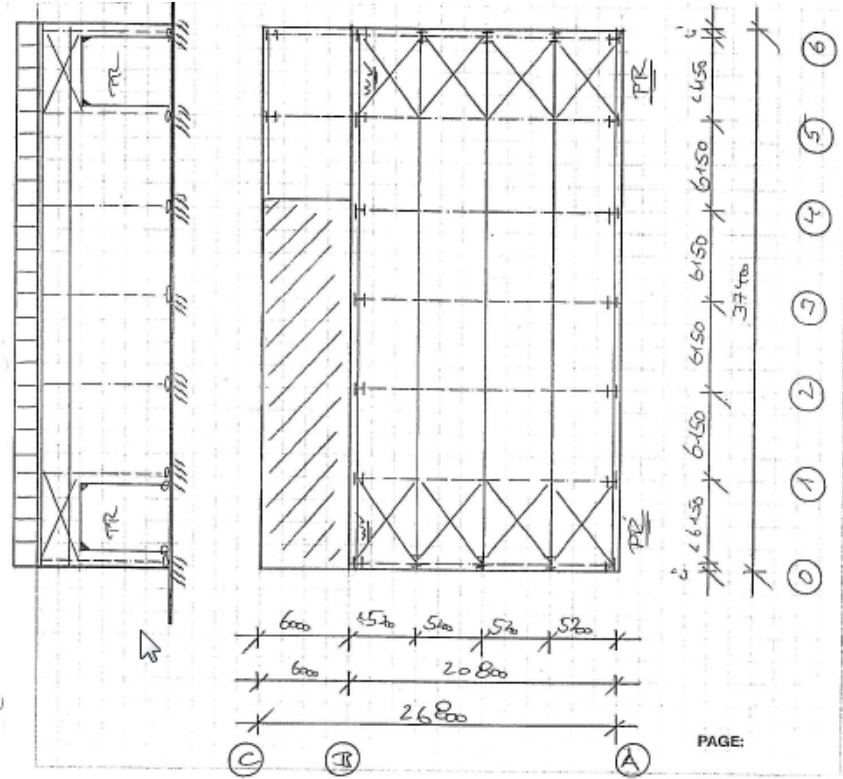
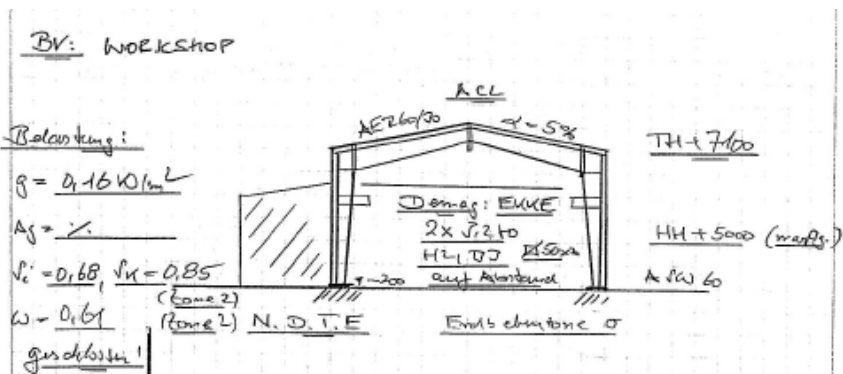






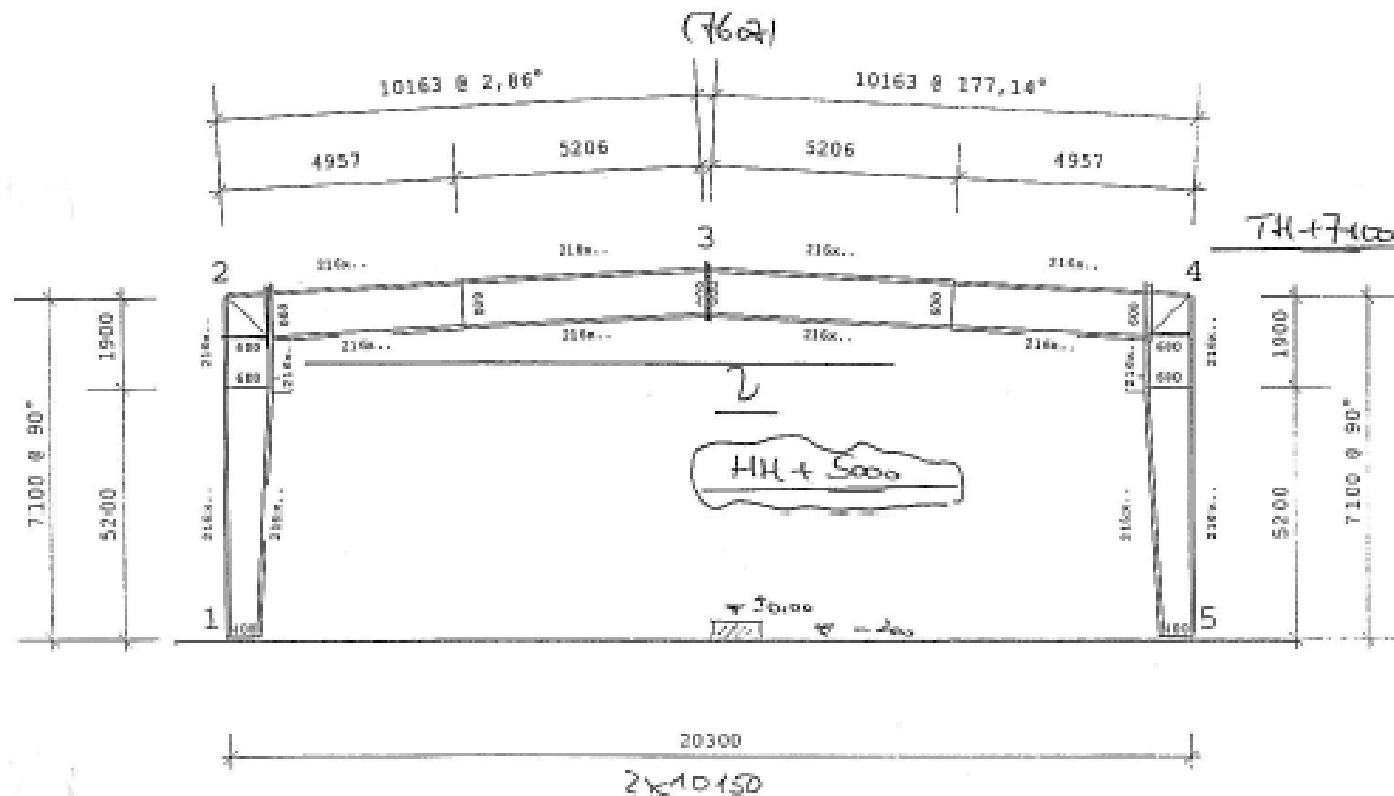
# Atlas ACL ráám

## Projekt



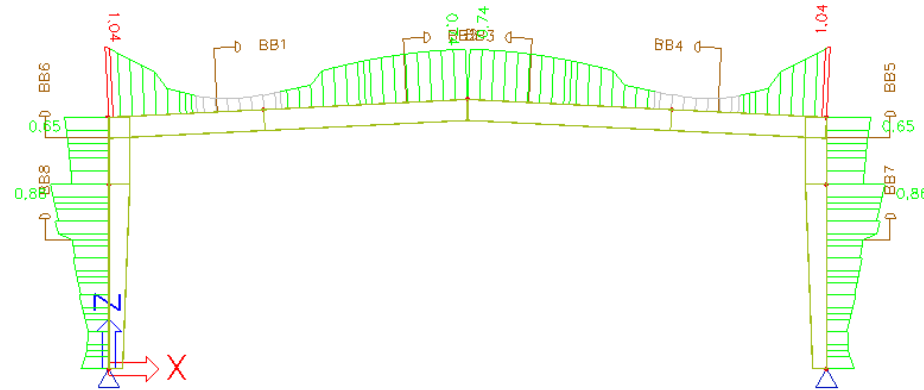
# Atlas ACL rám

## Atlas řešení

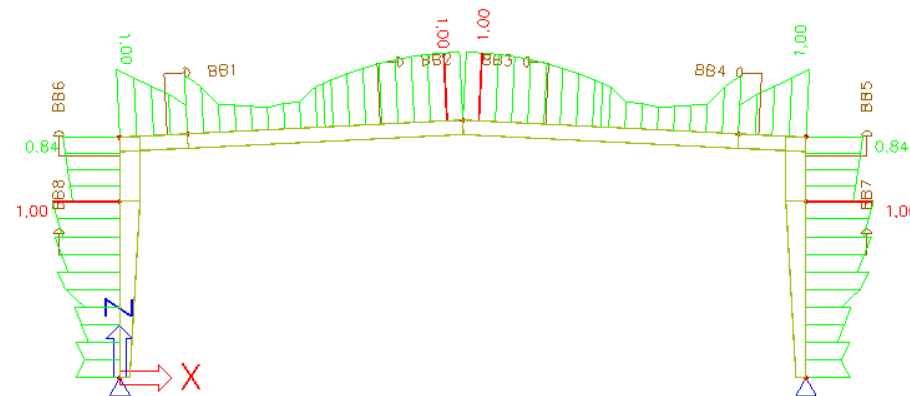


# Atlas ACL ráám

## Optimalizace



Atlas řešení (hmotnost = 1801 kg, max Uz = 54,8mm)

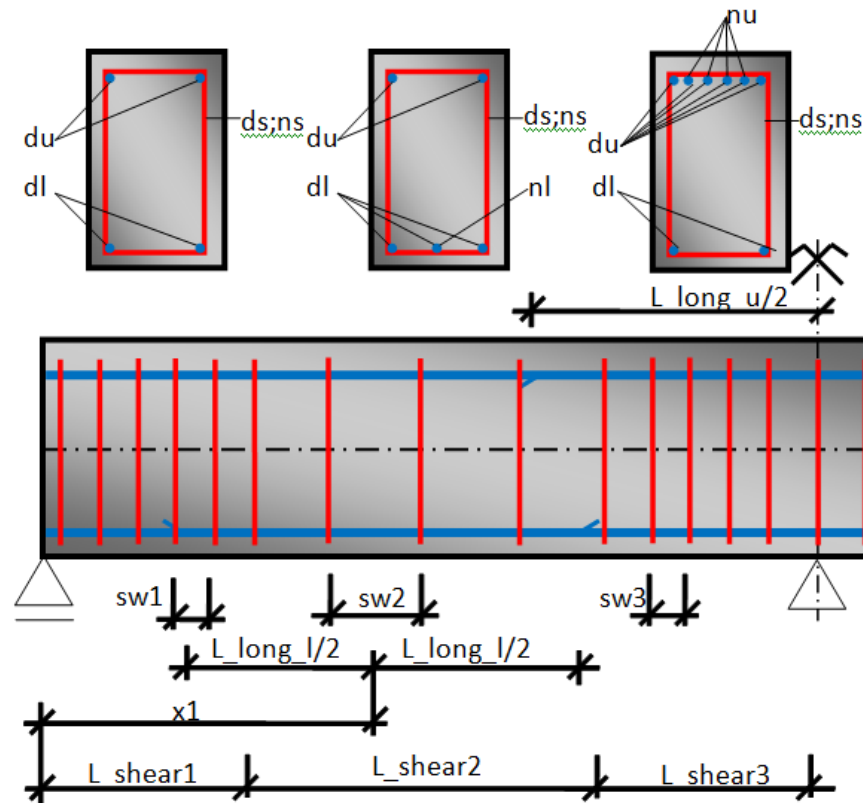


EOT řešení (hmotnost = 1445 kg, max Uz = 94,1mm)

# Optimalizace železobetonových konstrukcí

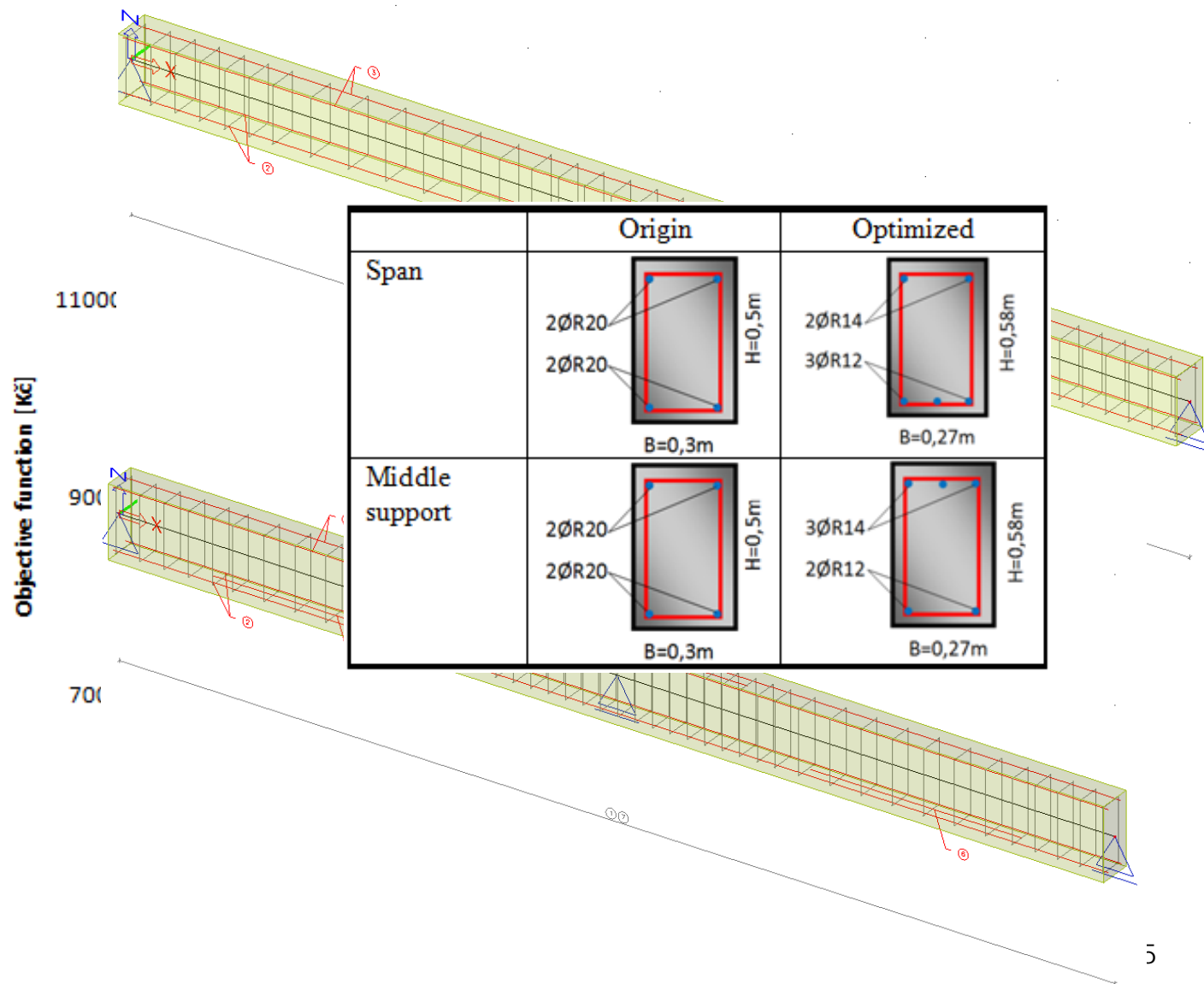
- Dvoupolový nosník (2x4,0m)
- Stálé a proměnné zatížení
- Norma EN1992-1-1
  - Ohybová a smyková únosnost
  - Deformace
  - Konstrukční zásady
- Minimalizace celkové hmotnosti

$$P = P_c * V_c + P_s * m_s$$



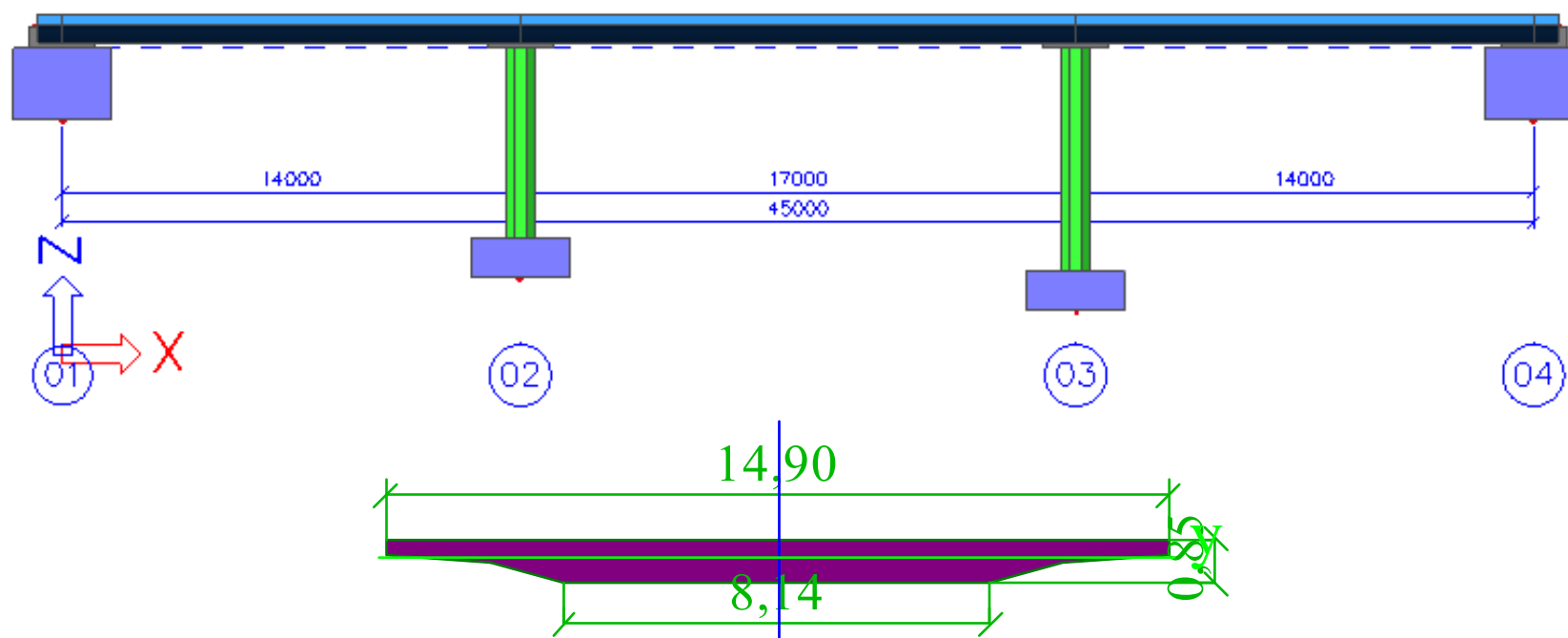
# Optimalizace železobetonových konstrukcí

- Metoda MSA
- 907 iterací;
- 40s na iteraci
- Úspora 22%



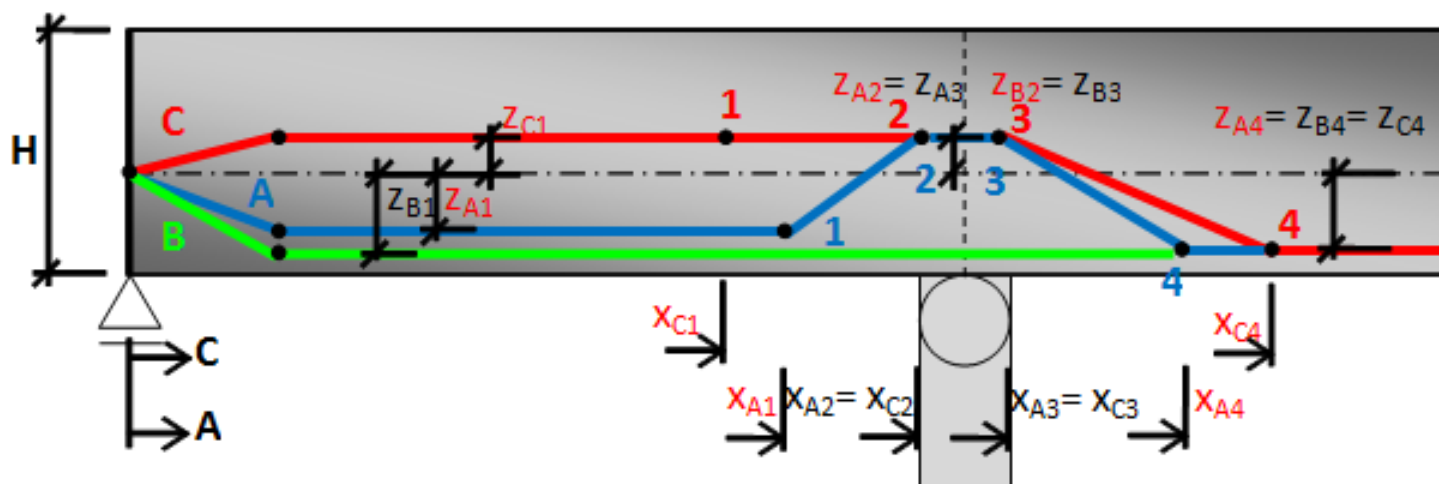
# Dodatečně předpjatá mostní konstrukce s vrubovými klouby

- Rozpětí polí 14,0+17,0+14,0m
- Lichoběžníková deska tl.0,85m; š. 14,90m
- Beton C30/37
- Návrh a posouzení podle ČSN 73 6203 a ČSN 73 6207



# Dodatečně předpjatá mostní konstrukce s vrubovými klouby

- Předpínací výztuž Ls 15,5-1860
- Původní návrh projektanta
  - 6ks 18ti-lanového kabelu geometrie A
  - 2ks 19ti-lanového kabelu geometrie B



# Dodatečně předpjatá mostní konstrukce s vrubovými klouby

- Cílová funkce – plocha předpínací výztuže

$$f(x) = \min(A_p)$$

kde

$$A_p = A_{p1} * (n_{tA} * n_{gA} + n_{tB} * n_{gB} + n_{tC} * n_{gC})$$

- $A_{p1}$  ... plocha dodatečně předpjatého lana  $A_{p1} = 150 \text{ mm}^2$   
 $n_{tA}; n_{tB}; n_{tC}$  ... počet lan v kabelu;  
 $n_{gA}; n_{gB}; n_{gC}$  ... počet stejných kabelů ve skupině.





# Dodatečně předpjatá mostní konstrukce s vrubovými klouby

- Kombinace A

- stálé a nahodilé (Podvalník+rovn. teplota +  $0,5 \cdot$ nerovn. teplota+pokles podpor)

- Kombinace B

- stálé a nahodilé bez dopravy (rovn. teplota +  $0,7 \cdot$ nerovn. teplota+pokles podpor)

- Constraint

- Posudek dovolených namáhání betonu

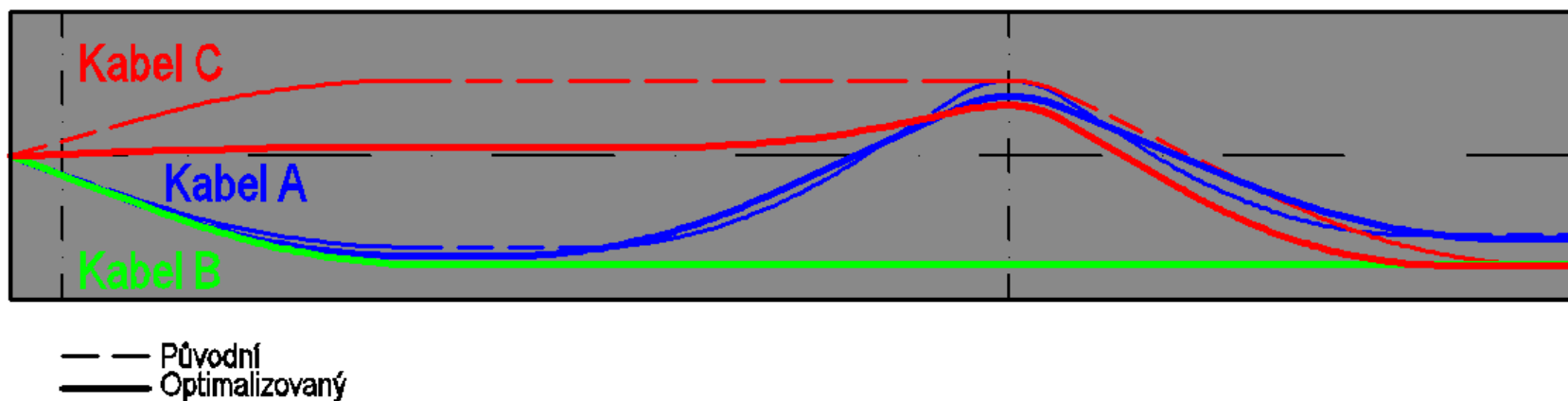
# Dodatečně předpjatá mostní konstrukce s vrubovými klouby

Parametr	$\eta_{tA}$ [-]	$\eta_{rA}$ [-]	$\eta_{tB}$ [-]	$\eta_{rB}$ [-]	$\eta_{tC}$ [-]	$\eta_{rC}$ [-]	$A_{p,req}$ [mm <sup>2</sup> ]
Počáteční hodnoty	18	6	19	2	18	2	27300
Řešení 1	18	5	15	2	16	2	22800
Řešení 2	17	6	9	2	17	2	23100
Řešení 3	18	5	16	2	16	2	23100
Řešení 4	18	5	16	2	16	2	23100
Řešení 5	15	6	18	2	16	2	23700
Řešení 6	18	6	13	2	17	2	25200
Řešení 7	18	6	15	2	18	2	27100

Parametr	$x_{A1}$ [m]	$z_{A1}$ [m]	$x_{C1}$ [m]	$z_{C1}$ [m]	$z_{A2}$ [m]	$z_{C2}$ [m]	$x_{A4}$ [m]	$z_{A4}$ [m]	$x_{C4}$ [m]
Počáteční hodnoty	10,77	-0,270	10,77	0,223	0,223	0,222	18,77	-0,233	20,77
Řešení 1	9,77	-0,298	11,27	0,177	0,175	0,2	18,77	-0,298	21,27
Řešení 2	9,27	-0,298	11,77	0,027	0,175	0,15	20,27	-0,248	19,27
Řešení 3	9,77	-0,248	10,27	0,177	0,200	0,175	18,27	-0,273	21,27
Řešení 4	9,77	-0,273	11,77	0,177	0,200	0,2	18,77	-0,298	21,27
Řešení 5	10,27	-0,223	10,77	-0,023	0,175	0,15	20,27	-0,323	19,27
Řešení 6	8,27	-0,323	10,27	0,027	0,05	0,2	18,77	-0,248	19,77
Řešení 7	10,27	-0,273	11,77	0,027	0,125	0,075	19,77	-0,323	21,27

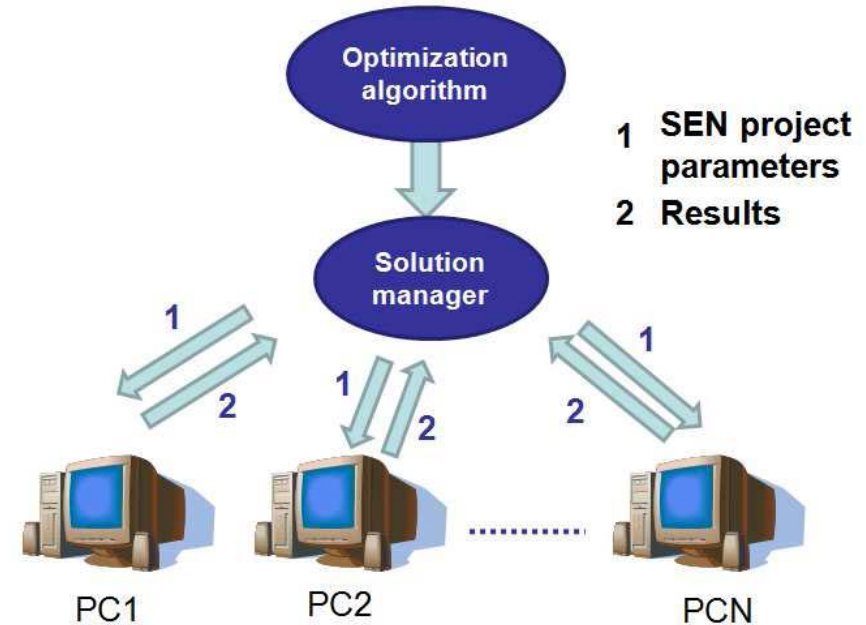
# Dodatečně předpjatá mostní konstrukce s vrubovými klouby


- Geometrie kabelu



# Závěry

- Zpětná vazba
  - Aplikace uživatelů na reálných konstrukcích
  - Rozdílné metody pro rozdílné příklady
  - **!Obecná metoda neexistuje!**
- Vize
  - Vícekriteriální optimalizace
  - Paralelní výpočty





Při přípravě této přednášky byla použita řada materiálů laskavě poskytnutých Ing. Martinou Valtrovou, Ing. Annou Kučerovou, Ph.D., doc. Ing. Vítem Šmilauerem, Ph.D. a Ing. Zuzanou Vitingerovou, Ph.D. ze Stavební fakulty ČVUT v Praze, dále od Ing. Lukáše Dlouhého, Ing. Jaroslava Kabeláče a Ing. Martina Nováka, CSc. Z firmy SCIA CZ, s.r.o. Ostatní zdroje jsou ocitovány v místě použití.

**Prosba.** V případě, že v textu objevíte nějakou chybu nebo budete mít námět na jeho vylepšení, ozvěte se prosím na **[matej.leps@fsv.cvut.cz](mailto:matej.leps@fsv.cvut.cz)**.

*Datum poslední revize: 27.9.2011*

*Verze: 002*