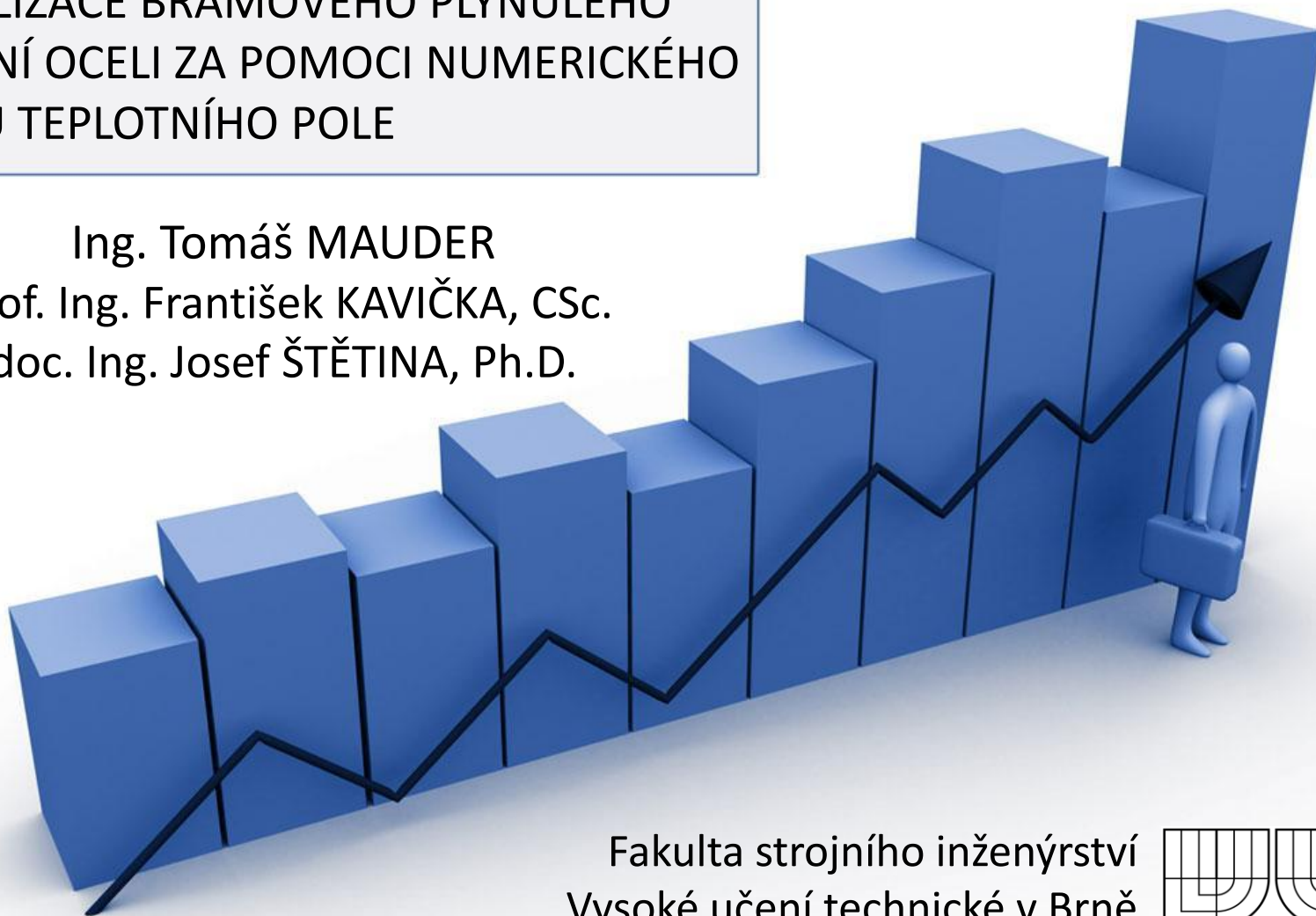


# OPTIMALIZACE BRAMOVÉHO PLYNULÉHO ODLÉVÁNÍ OCELI ZA POMOCI NUMERICKÉHO MODELU TEPLOTNÍHO POLE

Ing. Tomáš MAUDER  
prof. Ing. František KAVIČKA, CSc.  
doc. Ing. Josef ŠTĚTINA, Ph.D.



Fakulta strojního inženýrství  
Vysoké učení technické v Brně  
Energetický ústav  
Odbor termomechaniky a techniky prostředí



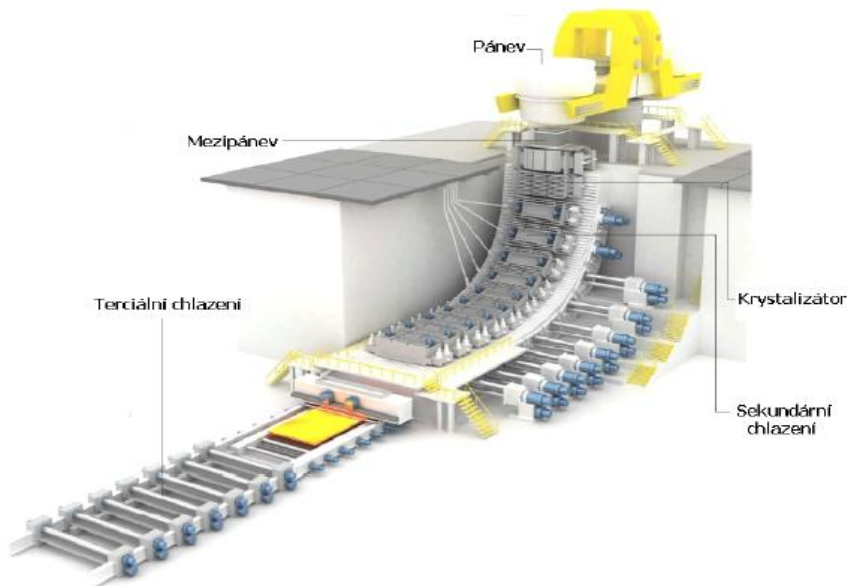
# Obsah

- Princip a popis plynulého odlévání oceli
  - Aktuálnost a cíle práce
  - Popis zařízení pro plynulé odlévání (ZPO)
  - Matematický model teplotního pole
- Optimalizační metody
  - Matematické programování
  - Heuristické metody
- Směr vývoje práce
  - Stochastická optimalizace



# Plynulé odlévání oceli

- Před rokem 1950
  - Nehospodárnost výroby
  - Neefektivnost



- Po roce 1950
  - Zvýšení kvality
  - Přes 95%



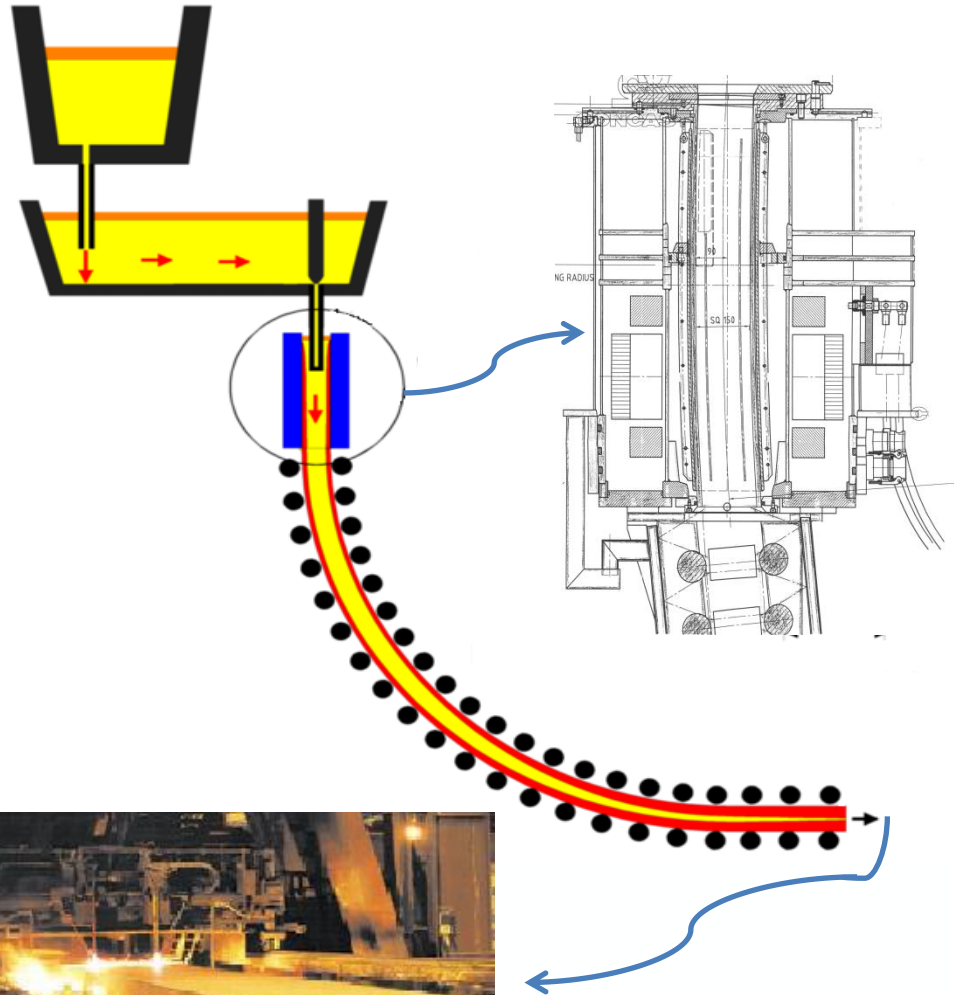
# Plynulé odlévání oceli

- Produktem je tzv. předlitek (polotovarov)
- Dělení podle profilu – Brama  
– Sochor
- Dělení podle geometrie stroje – vertikální  
– radiální  
– horizontální

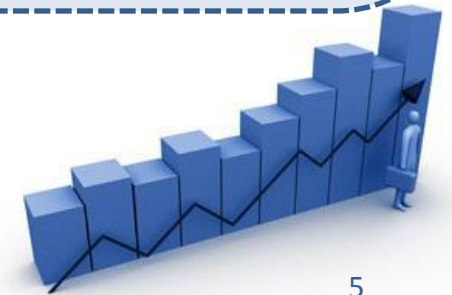
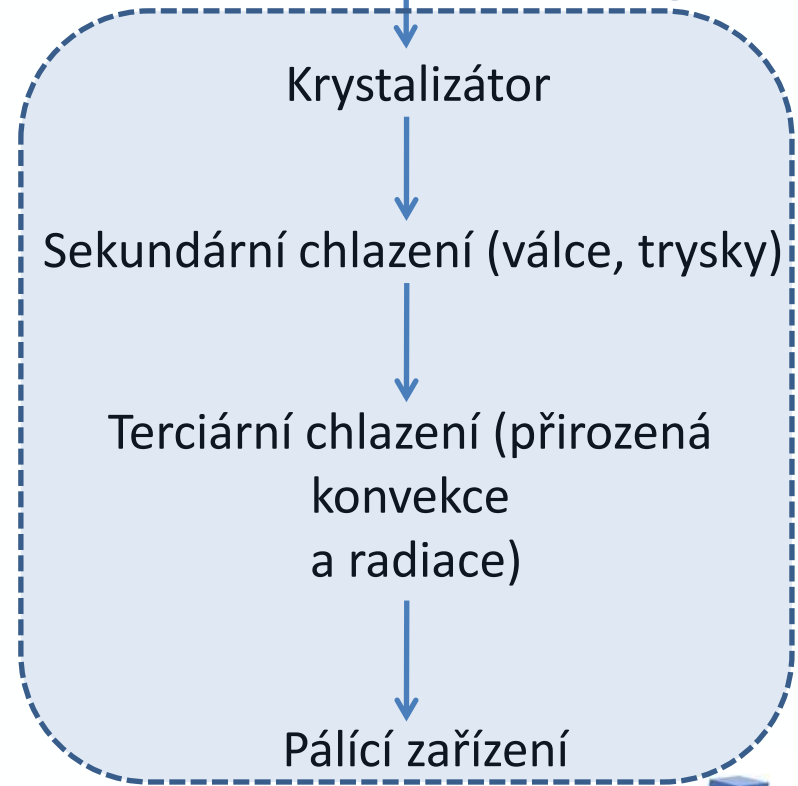


# Plynulé odlévání oceli

Tekutá ocel dopravována v pánvi →



Mezipánev ZPO



# Plynulé odlévání oceli

- Snaha
  - Zvýšení kvality předlitku
  - Eliminace výrobních vad
  - Zvýšení produktivity a hospodárnosti
- Finanční nákladnost experimentů
- Nové efektivní matematické metody
  - Numerické modely teplotních polí
  - Optimalizační modely
  - Statistické vyhodnocování výrobních dat



# Model teplotního pole

- Fourier-Kirchoffova rovnice

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \rho c \left( v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{Q}$$

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \rho c \left( v_z \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) + \dot{Q}$$

$$T = T_{\text{lici}}$$

hladina oceli (na začátku ZPO)

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = 0$$

rovina symetrie

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \dot{q}$$

v krystalizátoru

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = h_{tc} (T_{\text{povrchu}} - T_{\infty}) + \sigma \varepsilon (T_{\text{povrchu}}^4 - T_{\infty}^4)$$

v sekundární a terciární zóně

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = 0$$

v místě konce ZPO



# Model teplotního pole

- Fázová přeměna

$$\dot{Q} = \rho L \frac{\partial f_s}{\partial \tau} \quad f_s = \frac{T_L - T}{T_L - T_S}$$

$$H(T) = \int_0^T \left( \rho(T)c(T) - \rho(T)L \frac{\partial f_s}{\partial T} \right) dT$$

$$H(T) = \int_0^T \rho(T)c(T) dT + \rho(T)(1 - f_s)L$$

- Přístup entalpie

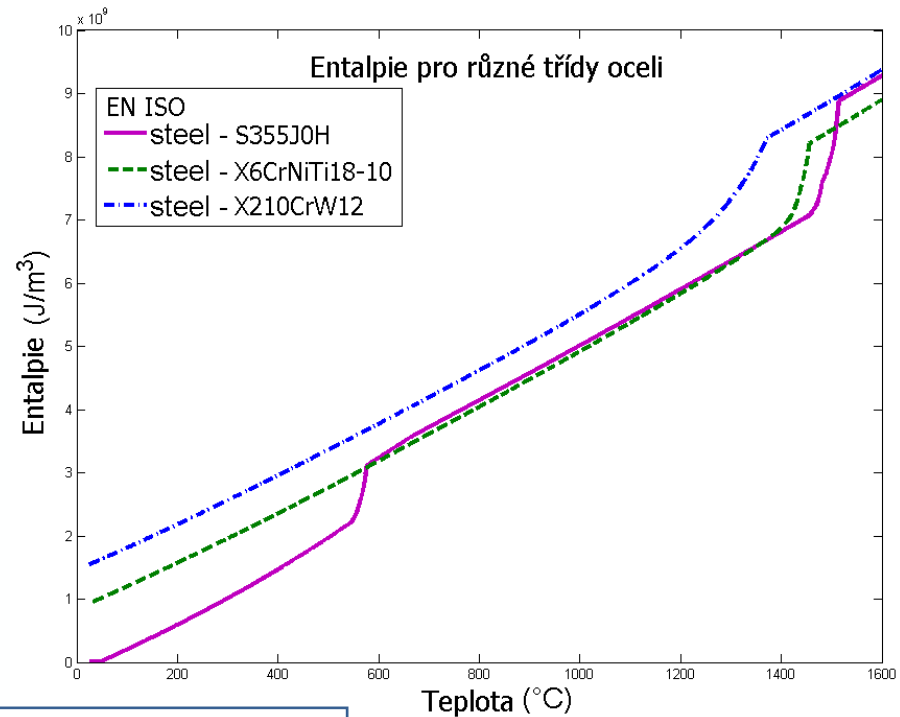
$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + v_z \frac{\partial H}{\partial z}$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + v_z \frac{1}{r} \frac{\partial H}{\partial \varphi}$$

$$H = \rho c T \quad T < T_S$$

$$H = \rho \left( c T + L \frac{T - T_S}{T_L - T_S} \right) \quad T_S < T < T_L$$

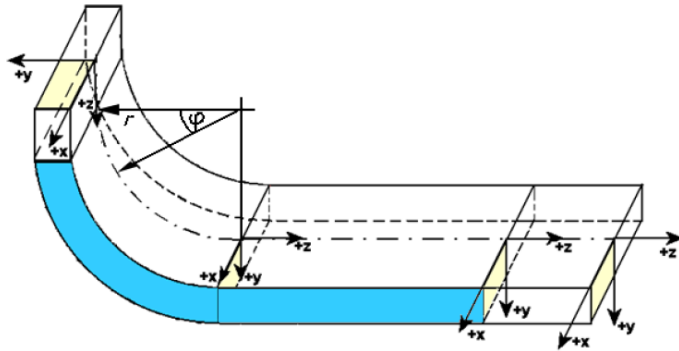
$$H = \rho (c T + L) \quad T > T_L$$





# Model teplotního pole

- Diskretizace rovnic



$$\frac{T_{i,j,k}^{n+1} - T_{i,j,k}^n}{\Delta\tau} \approx \frac{\partial T}{\partial \tau}$$

$$\frac{T_{i+1,j,k}^n - 2T_{i,j,k}^n + T_{i-1,j,k}^n}{\Delta x^2} \approx \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

$$\rho_{i,k}(T_{i,k}^{n+1})c_{i,k}(T_{i,k}^{n+1}) \approx \frac{H_{i,k}^{n+1} - H_{i,k}^n}{T_{i,k}^{n+1} - T_{i,k}^n}$$

$$H_{i,j,k}^{n+1} = H_{i,j,k}^n + \Delta\tau \lambda_{i,j,k}(T_{i,j,k}^{n+1}) [QX + QY + QZ] + v_z \Delta\tau \frac{H_{i,j,k-1}^n - H_{i,j,k}^n}{\Delta z}$$

$$H_{m,p,i}^{n+1} = T_{m,p,i}^n + \Delta\tau \lambda_{m,p,i}(T_{m,p,i}^{n+1}) [QR1 + QR2 + Q\Phi + QX] + v_z \Delta\tau \frac{H_{m,p-1,i}^n - H_{m,p,i}^n}{r \Delta\varphi}$$

NUM-MODEL

$$QX = \frac{T_{i+1,j,k}^n - 2T_{i,j,k}^n + T_{i-1,j,k}^n}{\Delta x^2}$$

$$QR1 = \frac{T_{m,p,i}^n - T_{m-1,p,i}^n}{r \Delta r}$$

$$QY = \frac{T_{i,j+1,k}^n - 2T_{i,j,k}^n + T_{i,j-1,k}^n}{\Delta y^2}$$

$$QR2 = \frac{T_{m+1,p,i}^n - 2T_{m,p,i}^n + T_{m-1,p,i}^n}{\Delta r^2}$$

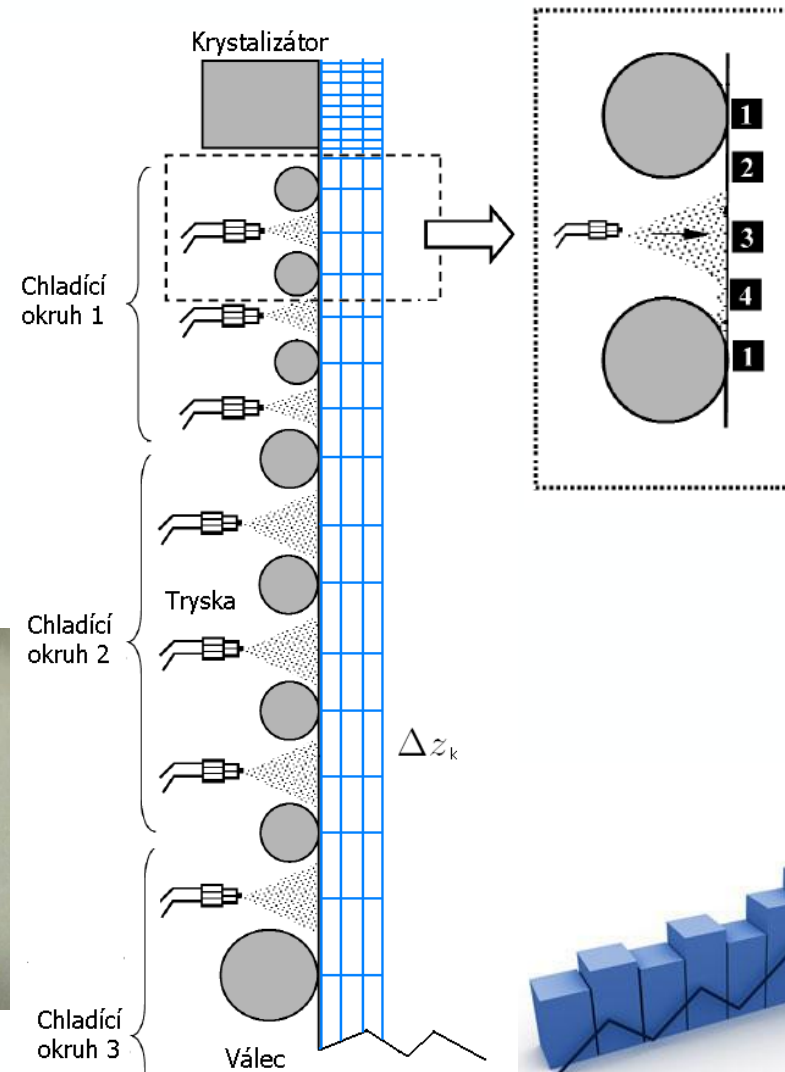
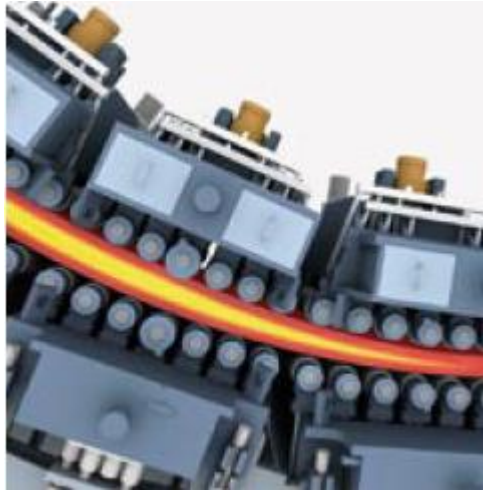
$$QZ = \frac{T_{i,j,k+1}^n - 2T_{i,j,k}^n + T_{i,j,k-1}^n}{\Delta z^2}$$

$$Q\Phi = \frac{T_{m,p+1,i}^n - 2T_{m,p,i}^n + T_{m,p-1,i}^n}{r^2 \Delta\varphi^2}$$



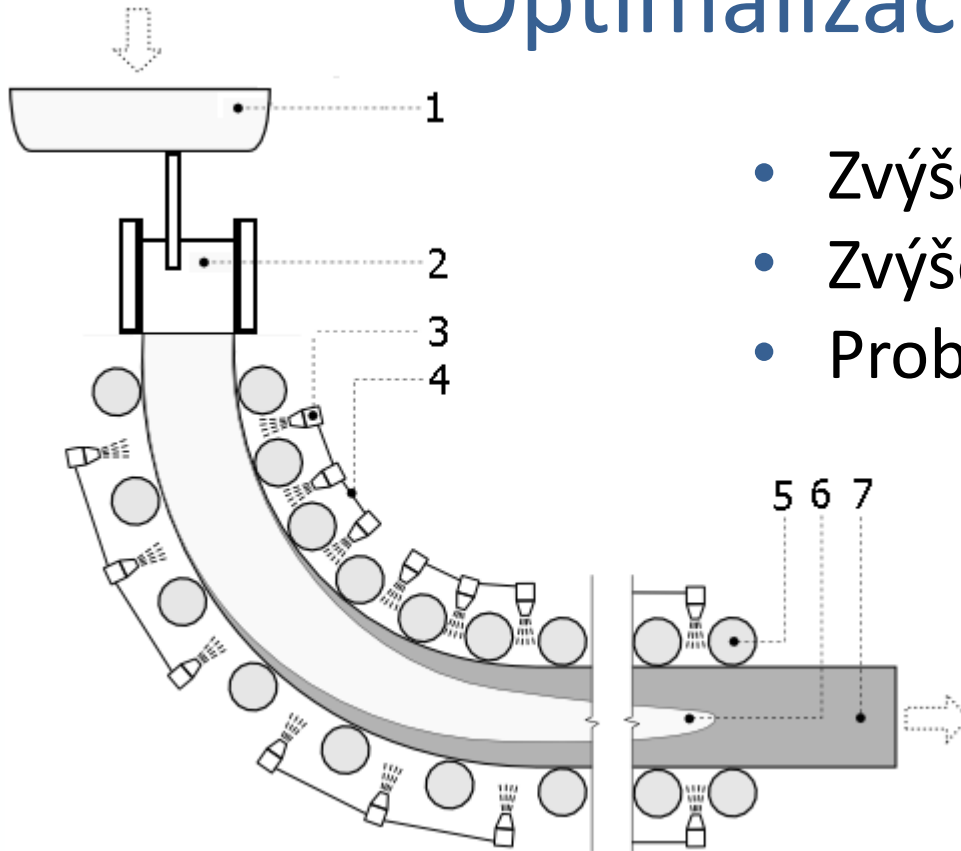
# Model teplotního pole

Pokročilý model teplotního pole podle reálného ZPO





# Optimalizace procesu



- Zvýšení kvality předlitku
- Zvýšení produktivity procesu
- Problém optimálního řízení

- **Vstupní parametry:**

- Licí rychlost  $V_z$
- Koeficient přestupu tepla  $htc1 - htc13$

- **Výstupní parametry**

- Teplotní pole (pole entalpií)  $T_{i,j,k}$   $H_{i,j,k}$
- Metalurgická délka  $M$



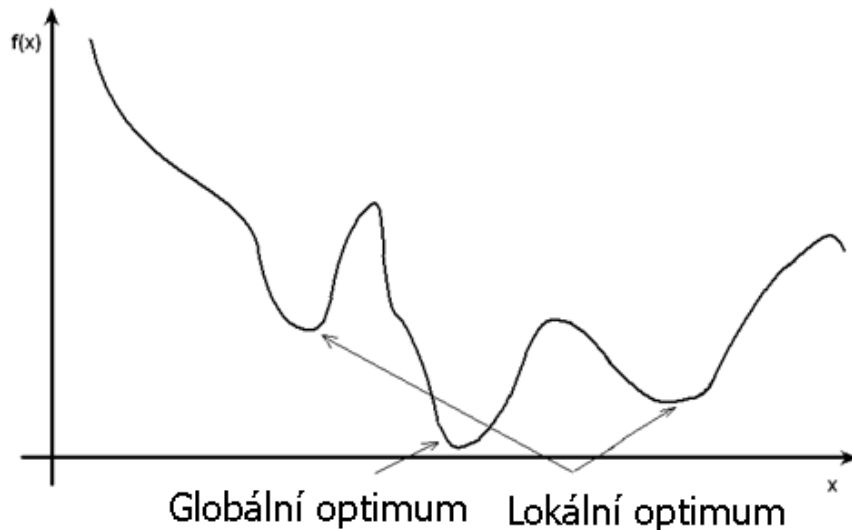
# Optimalizační metody

Optimalizace = hledání nejlepších výsledků pod vlivem určitých okolností  
Neexistuje jediný optimalizační algoritmus, který by řešil všechny úlohy efektivně

## Matematické programování

- Metody operačního výzkumu  
1909
- Hledání vázaných extrémů funkcí  
více proměnných
- Exaktní metoda

$$\min \{f(\mathbf{x}); \mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq 0, \mathbf{h}(\mathbf{x}) = 0, \mathbf{x} \in X\}$$



VS

## Heuristické metody

- Metody hledání „dobrých“ řešení
- Výpočetní náročnost exaktních metod
- Často založeny na evoluční biologii (Genetic algorithm, Ant algorithm, Firefly algorithm)



# Optimalizační metody

Účelová funkce

$$Z = \min \left\{ \max_{k=1..N} \{T_{M,k} - T_{M,k+1}\} - v_z \right\}$$

Omezení

$$v_{z,min} \leq v_z \leq v_{z,max}$$

$$h_{tc,m} \leq h_{tc,max,m} \quad m = 1, \dots, 13$$

$$T_{i,j,k}^0 = T_0 \quad \forall i, j, k$$

$$H_{i,j,k}^0 = H_0 \quad \forall i, j, k$$

$$T_{i,j,k,min}^{tf} \leq T_{i,j,k}^{tf} \leq T_{i,j,k,max}^{tf} \quad \text{pro vybrané } i, j, k$$

$$M_{min}^{tf} \leq M^{tf} \leq M_{max}^{tf}$$

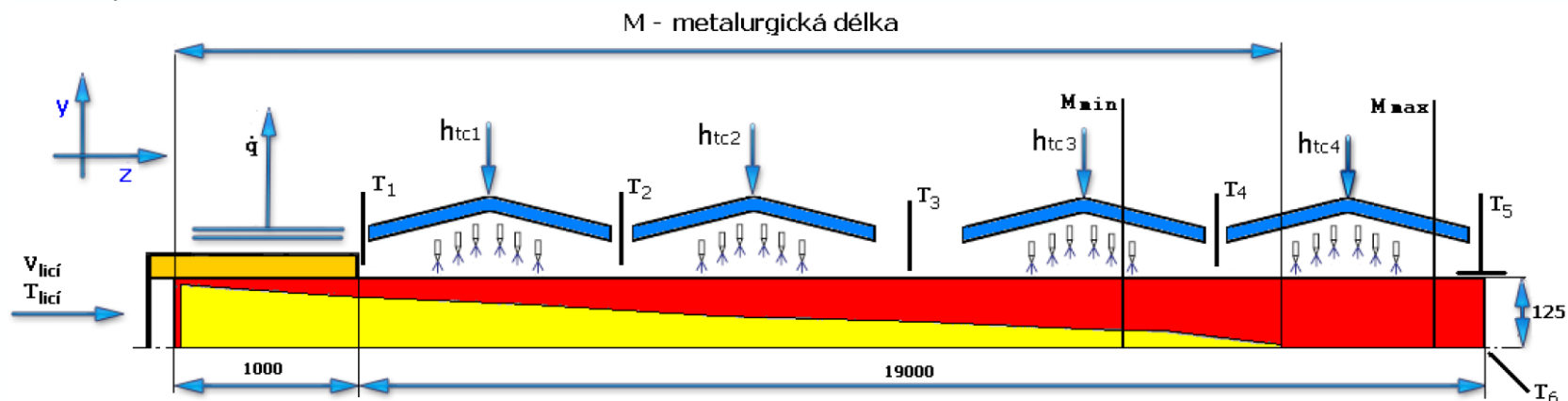
NUM-MODEL

Nelineární nekonvexní model!



# Optimalizační metody

Testováno na zjednodušeném 2D modelu (10 x 30 buněk x 1000 časových iterací)



Výpočet byl proveden na 64 bit PC 2,5GHz 8GB RAM

cca 00:30 – 24:50 minut

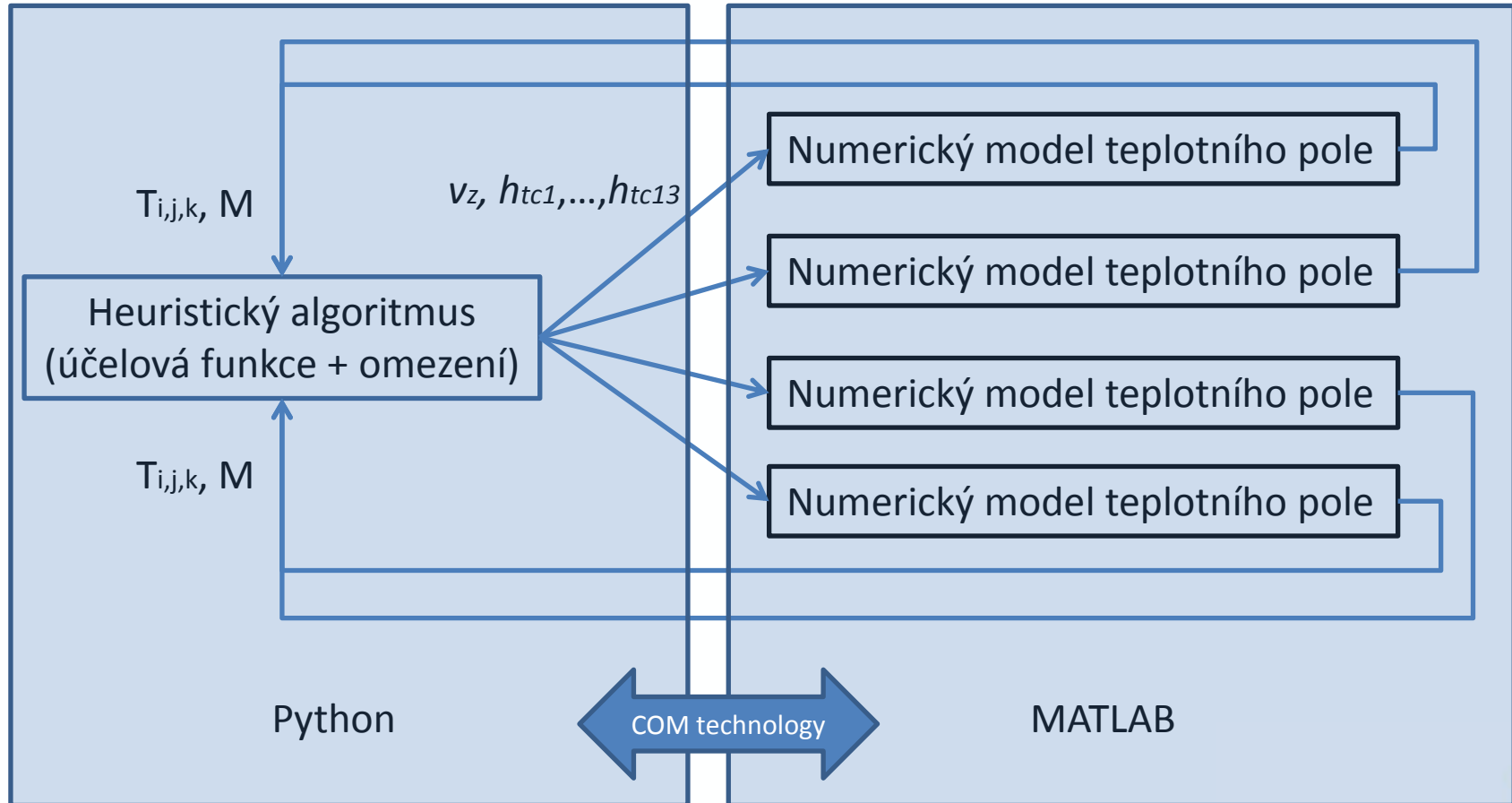
cca 160 sec (15 x 200)

MAUDER, T.; NOVOTNÝ, J. *TWO MATHEMATICAL APPROACHES FOR OPTIMAL CONTROL OF THE CONTINUOUS SLAB CASTING PROCESS*. In Mendel 2010 - 16th International Conference on Soft Computing. Brno, Brno University of Technology. 2010. p. 395 - 400. ISBN 978-80-214-4120-0.



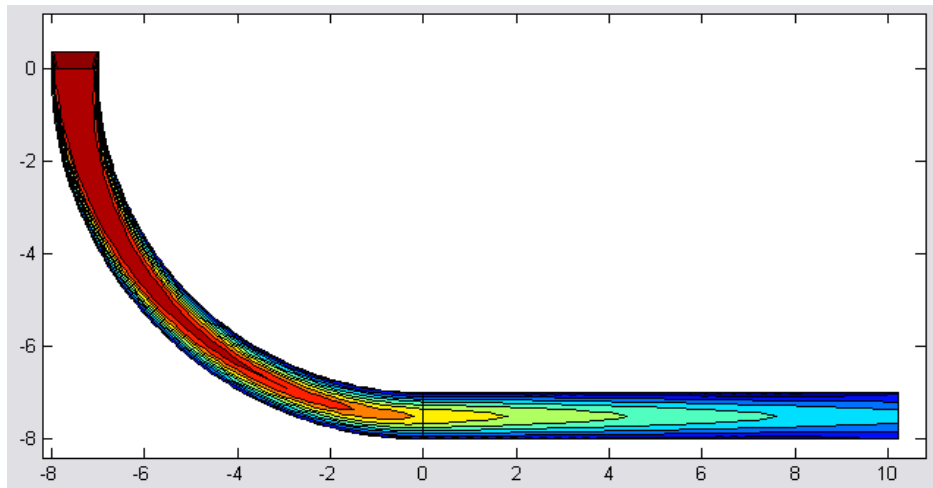
# Optimalizační metody

Black-box přístup

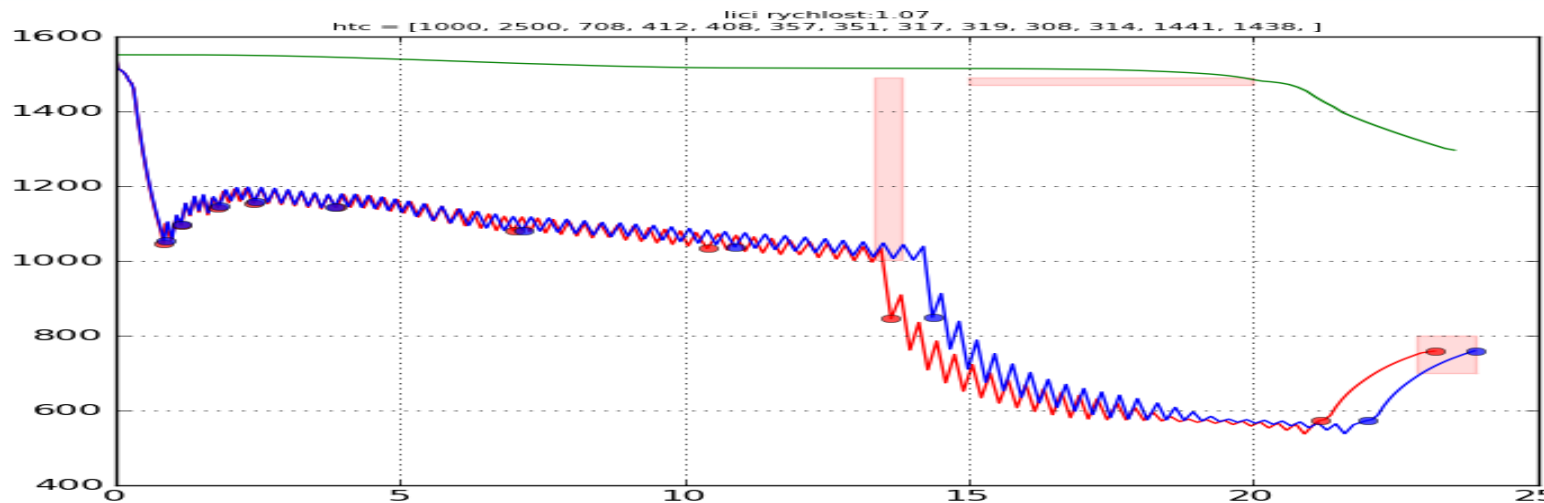




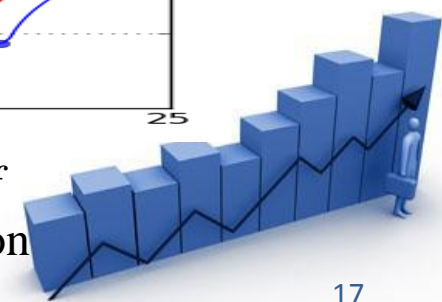
# Optimalizační metody



Firefly algorithm



Mauder, T.; Sandera, C.; Stetina, J.; Seda, M. *Optimization of Quality of Continuously Cast Steel Slabs by Using Firefly Algorithm*, Conference on Materials and Technology, Materiali in Tehnologije, Portorož, Slovenia



# Směr vývoje práce

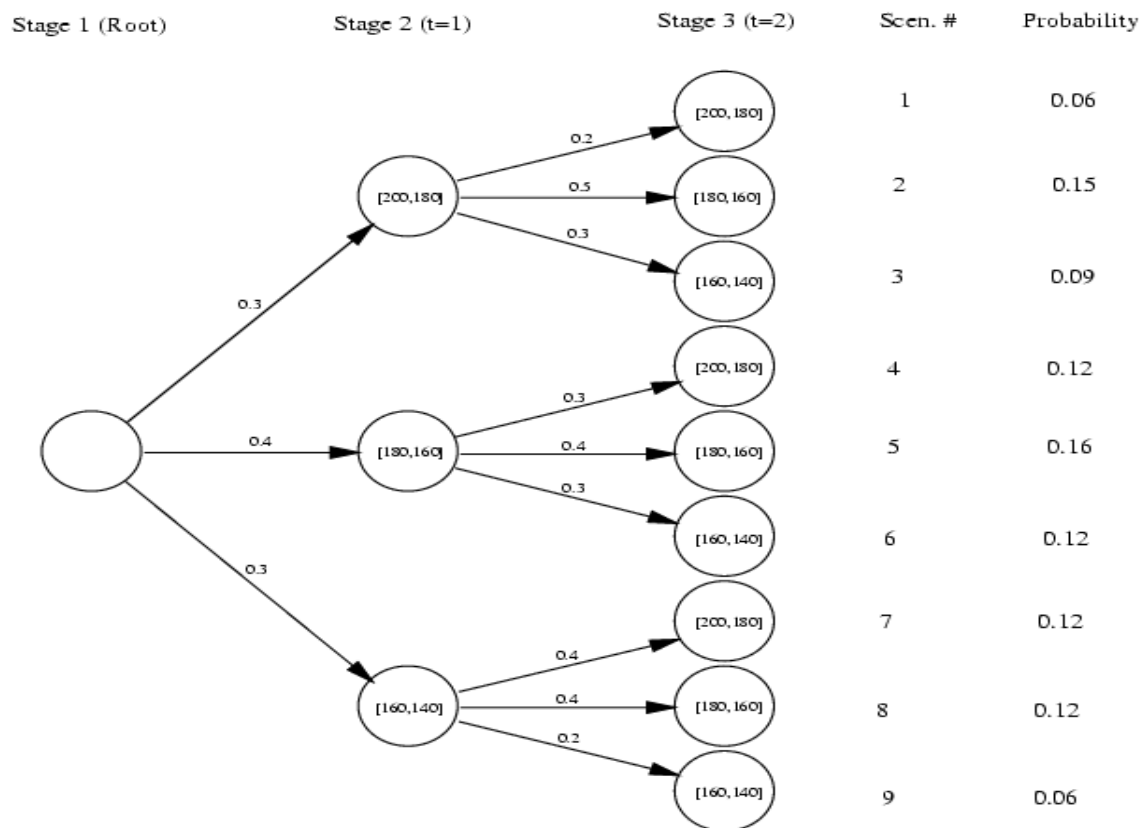
- Vývoj 3D modelu s respektem celé geometrie ZPO
- Inverzní úlohy
- Re-mesh pro urychlení numerického výpočtu
- Porovnání různých heuristik
- Stochastická optimalizace na 3D modelu



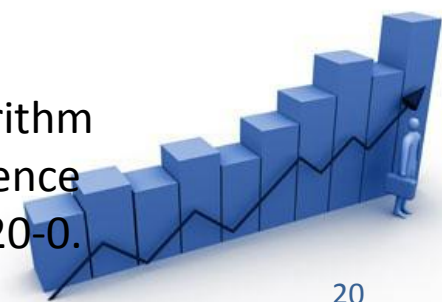


# Směr vývoje práce

Technika scénářového přístupu pro stochastickou optimalizaci (progressive hedging algorithm)



KLIMEŠ, L.; POPELA, P. An Implementation of Progressive Hedging Algorithm for Engineering Problems. In MENDEL 2010 - 16th International Conference on Soft Computing. Brno, BUT. 2010. p. 459 - 464. ISBN 978-80-214-4120-0.

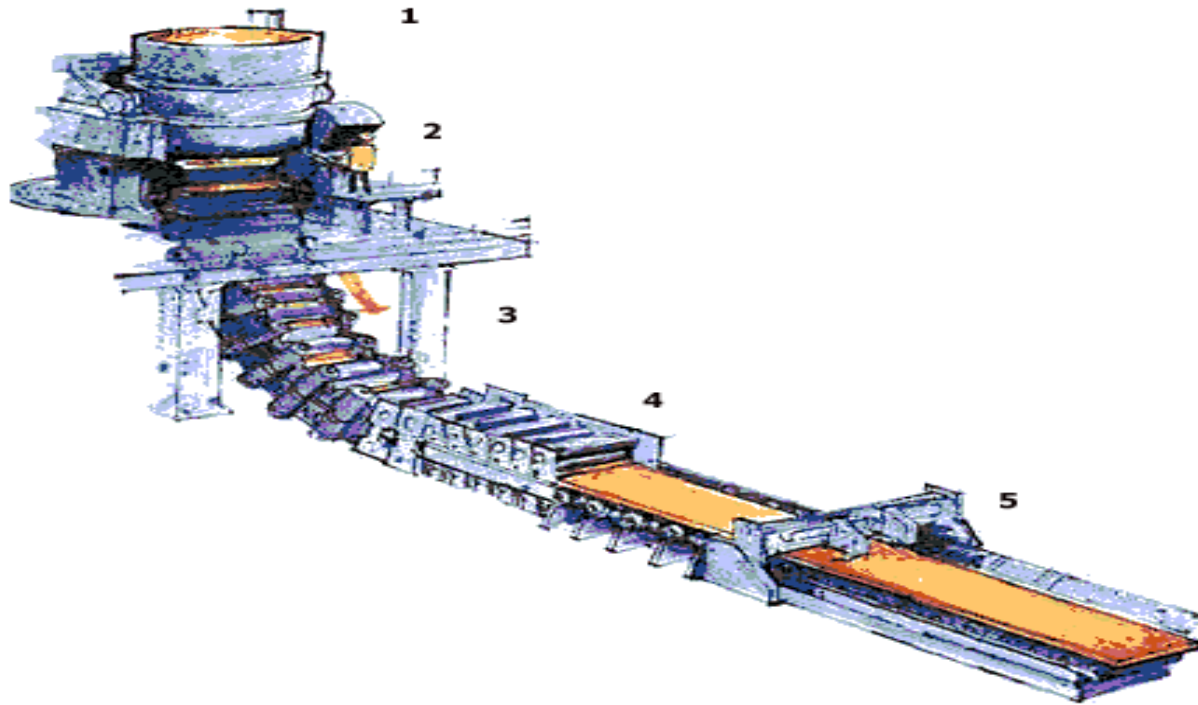


# Zhodnocení

- Porovnání optimalizačních algoritmů na zjednodušeném modelu
- Použití stochastické optimalizace na zjednodušeném modelu
- Byl vyvinut 2D model teplotního pole podle reálné geometrie ZPO
- Heuristická optimalizace na pokročilém modelu (Firefly)



# Děkuji za pozornost



GAČR106/08/0606 - Modelování přenosu tepla a hmoty při tuhnutí rozměrných systémů hmotných kovových materiálů,

GAČR106/09/0940 - Numerický a stochastický model plynule odlévaných ocelových předlitků obdélníkového profilu,

BUT BD13002 - Matematické modelování a optimalizace v průmyslových aplikacích.