Prezentace ke státní doktorské zkoušce

Optimalizace parametrů sekundárního chlazení plynulého odlévání oceli

Ing. Lubomír Klimeš

Školitel: doc. Ing. Josef Štětina, Ph.D.

Energetický ústav, Odbor termomechaniky a techniky prostředí, FSI VUT v Brně

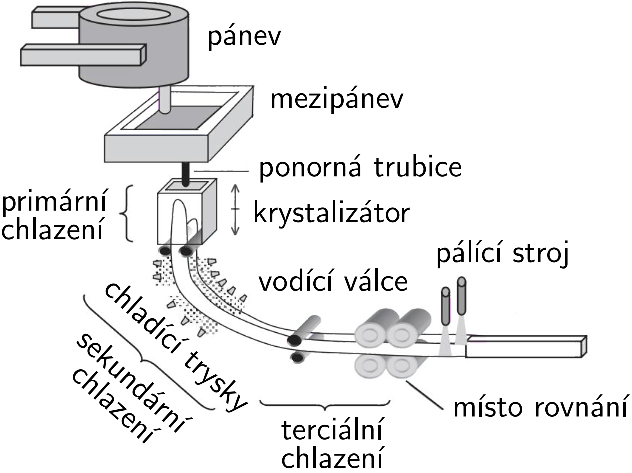
Obsah prezentace

1. **plynulé odlévání oceli**
2. **motivace** řešení dizertační práce
3. **matematický model** teplotního pole
4. **optimalizace** provozu ZPO
5. **současný stav řešení** dizertační práce
6. **cíle** dizertační práce

Plynulé odlévání oceli: přehled

1. dříve ocel odlévána do **kokil**: neproduktivní, neefektivní
2. **v současné době** více než 95 % oceli odlito **metodou plynulého odlévání**
3. **počátky** metody plynulého odlévání: polovina 19. století
4. využití při výrobě hliníku, mědi
5. **formáty** předlitků: sochor, brama, blok
6. **typy** ZPO: radiální, vertikální, horizontální

Plynulé odlévání oceli: radiální ZPO



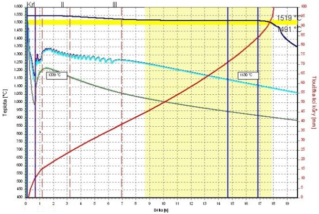
Plynulé odlévání oceli: radiální víceproudé ZPO

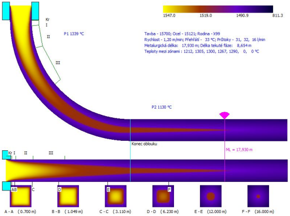
Plynulé odlévání oceli: požadavky

- **snižování** výrobních **nákladů**
- **zvyšování produktivity** a **hospodárnosti**
- **zvyšování kvality** finálních výrobků
- **snižování výskytu vad** předlitků
- **posílení konkurenceschopnosti**
- **optimální řízení provozu** ZPO
  - běžný výrobní provoz
  - havarijní a jiné nestandardní situace

Plynulé odlévání oceli: současný stav

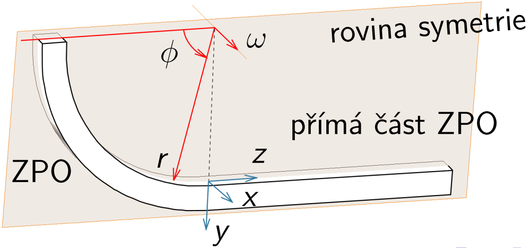
- nutnost **využití numerických modelů** teplotních polí
  - **monitoring** výroby
  - **řízení** výroby
  - **optimalizace** provozu ZPO (on-line vs off-line modely)
- ?: licí rychlost, intenzita chlazení v sekundární zóně ZPO





Matematický model teplotního pole

- **nestacionární úloha přenosu tepla a látky**: kondukce, konvekce, radiace
- **fázová přeměna**: metoda entalpie a metoda efektivní tepelné kapacity
- volba souřadného systému: kartézský a cylindrický



oblouková část ZPO

Matematický model teplotního pole

Metoda entalpie

$$H(T) = \varrho L_\mathrm{f}(1 - f_\mathrm{s}) + \int_{T_\mathrm{ref}}^{T} \varrho c \,\mathrm{d}\theta$$

Fourierova-Kirchhoffova rovnice

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

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(kr\frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial \phi}\left(k\,\frac{\partial T}{\partial \phi}\right) + \frac{\partial}{\partial \omega}\left(k\,\frac{\partial T}{\partial \omega}\right) + v_\phi\frac{1}{r}\frac{\partial H}{\partial \phi}$$

Matematický model teplotního pole

Metoda efektivní tepelné kapacity

$$c_{\mathrm{eff}}(T) = \frac{\partial H}{\partial T} = -\varrho L_{\mathrm{f}} \frac{\partial f_{\mathrm{s}}}{\partial T} + \varrho c$$

Fourierova-Kirchhoffova rovnice

$$c_{\mathrm{eff}} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(k \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k \frac{\partial T}{\partial z}\right) + v_z c_{\mathrm{eff}} \frac{\partial T}{\partial z}$$

$$c_{\mathrm{eff}} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}\left(k\ r \frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi}\left(k \frac{\partial T}{\partial \phi}\right) + \frac{\partial}{\partial \omega}\left(k \frac{\partial T}{\partial \omega}\right) + v_\phi c_{\mathrm{eff}} \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \phi}$$

Matematický model teplotního pole

- **počáteční** podmínka: $T(\mathbf{x}, t = 0) = T_0(\mathbf{x})$
- **okrajové** podmínky

$$T(\mathbf{x}, t)\big|_{\text{meniskus}} = T_\ell, \quad -k\frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = \dot{q}(\mathbf{x}, t), \quad -k\frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = 0$$

$$-k\frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = h\left(T - T_\infty\right) + \sigma\varepsilon\left(T^4 - T_\infty^4\right)$$

- **součinitel přestupu tepla** h: experimentální měření
- **diskretizace** NM: **metoda kontrolních objemů**
- **paralelizace** NM: grafické jednotky GPU a CUDA

Optimalizace a optimalizační algoritmy

- extremalizace účelové funkce vzhledem k omezením
- **deterministická** optimalizace

$$? \in \underset{\mathbf{x}}{\operatorname{argmin}} \Big\{ f(\mathbf{x}, \mathbf{p}) \,|\, \mathbf{x} \in X \cap \{ \mathbf{x} \,|\, \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{p}) \leq \mathbf{0},\ \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{p}) = \mathbf{0} \} \Big\}$$

- **stochastická** optimalizace

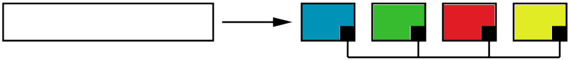
$$? \in \underset{\mathbf{x}}{\operatorname{argmin}} \Big\{ f(\mathbf{x}, \xi) \,|\, \mathbf{x} \in X \cap \{ \mathbf{x} \,|\, \mathbf{g}(\mathbf{x}, \xi) \leq \mathbf{0},\ \mathbf{h}(\mathbf{x}, \xi) = \mathbf{0} \} \Big\}$$

- **vícestupňové** stochastické optimalizační úlohy
- **scénářový** přístup

Optimalizace a optimalizační algoritmy

Algoritmus progressive hedging

- **dekompozice** původní úlohy na menší podúlohy



- **penalizace** + **agregační princip**
- algoritmus vyžaduje pouze schopnost řešit podúlohy
- možnost **paralelizace** výpočtů
- využití **heuristických** algoritmů

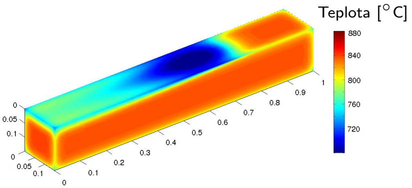
Optimalizace a optimalizační algoritmy

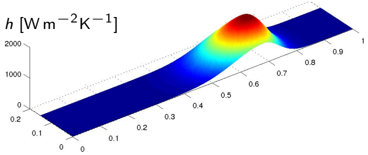
Možnosti využití optimalizace v řízení ZPO

- cíl: stanovit **optimální provozní parametry** ZPO
- obvyklý výrobní provoz ZPO
- nestandardní situace provozu ZPO
  - výpadky chladicích okruhů
  - náhlé změny licí rychlosti
  - zanesení chladicích trysek

Numerický model pro studium chladicích účinků trysek

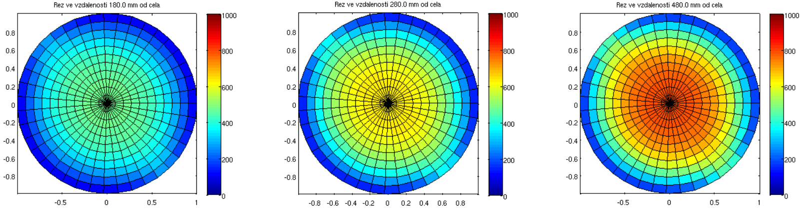
- sochorový předlitek čtvercového formátu
- srovnání: metoda entalpie a efektivní tepelné kapacity
- split-normální rozdělení pravděpodobnosti
- implementace v MATLABu





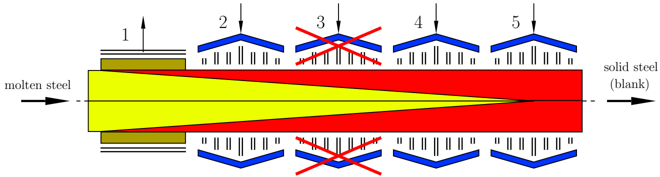
Numerický model předlitku kruhového formátu

- sochorový předlitek kruhového formátu
- implementován v MATLABu
- **záměr**: implementace v C++ s využitím paralelizace na grafických jednotkách GPU a architektury CUDA



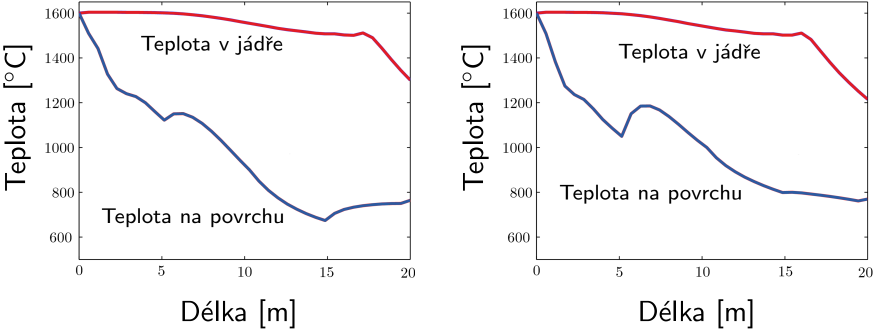
Stochastická optimalizace provozu ZPO

- možnost **havarijního** stavu: výpadek chladícího okruhu
- implementace progressive hedging algoritmu
- zjednodušený 2D model + optimalizace v GAMSu
- **dvojstupňová úloha**: maximalizace licí rychlosti a stanovení *h* chladicích trysek

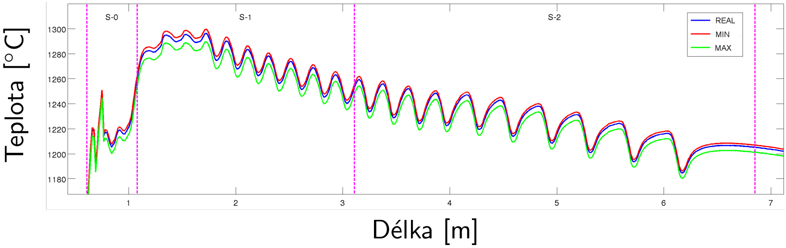


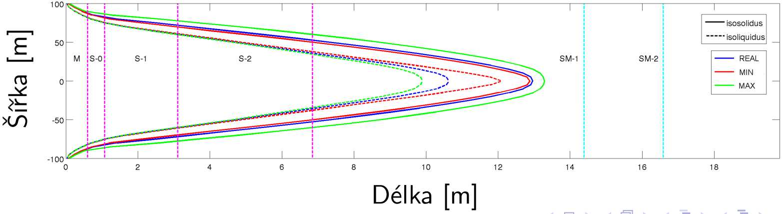
Stochastická optimalizace provozu ZPO

- **2 scénáře**: bezporuchový a poruchový stav
- **dvě** scénářová **řešení** ve **dvou stupních** úlohy



Vliv chemického složení na teplotní pole





Cíle dizertační práce

1. **vývoj a implementace numerických modelů** sochorového ZPO
2. **validace** numerických modelů
3. **zpracování dat z experimentů trysek** na teplých modelech
4. **optimalizace** provozu ZPO: nestandardní situace

Publikace, software, projekty

- přes **20 publikací**: 2 IF, 6 WoS
- 2 software dle metodiky RIV
- účast na řešení projektů GAČR a COST
- řešitel a spoluřešitel juniorských projektů specifického výzkumu VUT (2010, 2011, 2012)
- držitel stipendia Brno PhD Talent

Děkuji za pozornost.

Brno Ph.D. talent

Holder of Brno PhD Talent Financial Aid – Sponsored by Brno City Municipality

Otázky oponenta

1. Vysvětlete, proč je nutné do výpočtu ve Fourierově-Kirchhoffově rovnici zahrnout člen vztažený k licí rychlosti v_z a kdy je možné řešit úlohu jen pomocí rovnice Fouriera.

Otázky oponenta

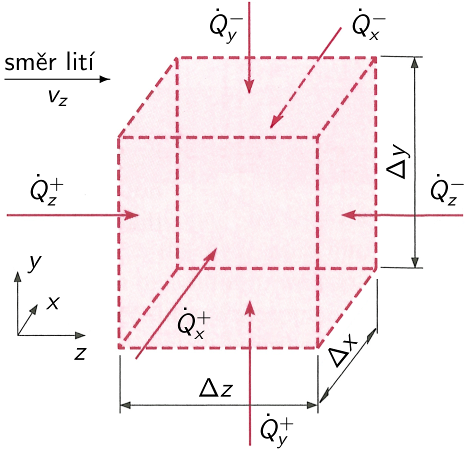
1. Vysvětlete, proč je nutné do výpočtu ve Fourierově-Kirchhoffově rovnici zahrnout člen vztažený k licí rychlosti v_z a kdy je možné řešit úlohu jen pomocí rovnice Fouriera.

Fourierova-Kirchhoffova vs **Fourierova rovnice**

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

$$c_{\mathrm{eff}}\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(k\,\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k\,\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k\,\frac{\partial T}{\partial z}\right) + v_z\,c_{\mathrm{eff}}\frac{\partial T}{\partial z}$$

Otázky oponenta

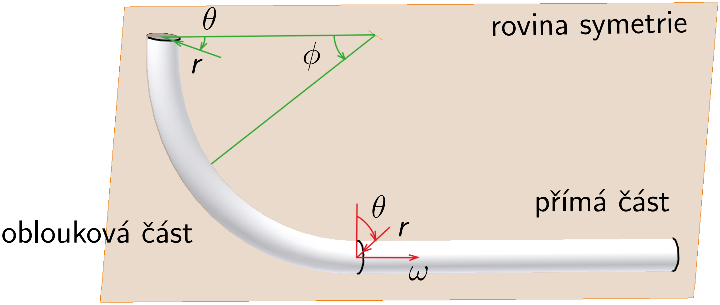


Otázky oponenta

2. Použití kartézského a cylindrického souřadného systému. Jaký souřadný systém je použit pro zakřivený sochor kruhového formátu?

Otázky oponenta

2. Použití kartézského a cylindrického souřadného systému. Jaký souřadný systém je použit pro zakřivený sochor kruhového formátu?



Otázky oponenta

3. Vysvětlete kritéria stability explicitní časové diskretizace.

Otázky oponenta

3. Vysvětlete kritéria stability explicitní časové diskretizace.

$$T_{i,j,k}^{t+\Delta t} = \Psi_{i,j,k} T_{i,j,k}^{t} +$$

$$+ \Psi_{i-1,j,k} T_{i-1,j,k}^{t} + \Psi_{i+1,j,k} T_{i+1,j,k}^{t} + \Psi_{i,j-1,k} T_{i,j-1,k}^{t} + \cdots$$

Otázky oponenta

3. Vysvětlete kritéria stability explicitní časové diskretizace.

$$T_{i,j,k}^{t+\Delta t} = \Psi_{i,j,k} T_{i,j,k}^{t} +$$

$$+ \Psi_{i-1,j,k} T_{i-1,j,k}^{t} + \Psi_{i+1,j,k} T_{i+1,j,k}^{t} + \Psi_{i,j-1,k} T_{i,j-1,k}^{t} + \cdots$$

$$\Psi_{i,j,k} \geq 0$$

Otázky oponenta

3. Vysvětlete kritéria stability explicitní časové diskretizace.

Vnitřní kontrolní objem

$$T_{i,j,k}^{n+1} = \underbrace{\left(1 - \frac{2k\Delta t}{\varrho c \Delta^2 x} - \frac{2k\Delta t}{\varrho c \Delta^2 y} - \frac{2k\Delta t}{\varrho c \Delta^2 z} - \frac{v_z \Delta t}{\Delta z}\right)}_{\geq 0} T_{i,j,k}^{n} + \cdots$$

Otázky oponenta

3. Vysvětlete kritéria stability explicitní časové diskretizace.

Vnitřní kontrolní objem

$$T_{i,j,k}^{n+1} = \underbrace{\left(1 - \frac{2k\Delta t}{\varrho c \Delta^2 x} - \frac{2k\Delta t}{\varrho c \Delta^2 y} - \frac{2k\Delta t}{\varrho c \Delta^2 z} - \frac{v_z \Delta t}{\Delta z}\right)}_{\geq 0} T_{i,j,k}^{n} + \cdots$$

$$\Delta t \leq \frac{1}{\frac{2k}{\varrho c}\left(\frac{1}{\Delta^2 x} + \frac{1}{\Delta^2 y} + \frac{1}{\Delta^2 z}\right) + \frac{v_z}{\Delta z}}$$

Otázky oponenta

3. Vysvětlete kritéria stability explicitní časové diskretizace.

Povrchový kontrolní objem s konvekcí

$$T_{i,j,k}^{n+1} =$$

$$= \underbrace{\left(1 - \frac{k\Delta t}{\varrho c \Delta^2 x} - \frac{2k\Delta t}{\varrho c \Delta^2 y} - \frac{2k\Delta t}{\varrho c \Delta^2 z} - \frac{h\Delta t}{\varrho c \Delta x} - \frac{v_z \Delta t}{\Delta z}\right)}_{\geq 0} T_{i,j,k}^{n} + \cdots$$

Otázky oponenta

3. Vysvětlete kritéria stability explicitní časové diskretizace.

Povrchový kontrolní objem s konvekcí

$$T_{i,j,k}^{n+1} = \\ = \underbrace{\left(1 - \frac{k\Delta t}{\varrho c \Delta^2 x} - \frac{2k\Delta t}{\varrho c \Delta^2 y} - \frac{2k\Delta t}{\varrho c \Delta^2 z} - \frac{h\Delta t}{\varrho c \Delta x} - \frac{v_z \Delta t}{\Delta z}\right)}_{\geq 0} T_{i,j,k}^{n} + \cdots$$

$$\Delta t \leq \frac{1}{\frac{k}{\varrho c}\left(\frac{1}{\Delta^2 x} + \frac{2}{\Delta^2 y} + \frac{2}{\Delta^2 z}\right) + \frac{h}{\varrho c \Delta x} + \frac{v_z}{\Delta z}}$$

Otázky oponenta

4. Úvodní věta kapitoly 3.3.1 by zasloužila vysvětlení, přinejmenším pěkný výraz *tlusté řešení*.

Existuje několik způsobů, pomocí kterých je možné definovat deterministické ekvivalenty stochastické optimalizační úlohy. Mezi nejznámnější ekvivalenty patří *wait-and-see*, *individuálního scénáře*, *tlustého řešení*, *střední hodnoty EV* a *očekávaného cíle EO*.

Otázky oponenta

4. Úvodní věta kapitoly 3.3.1 by zasloužila vysvětlení, přinejmenším pěkný výraz *tlusté řešení*.

Existuje několik způsobů, pomocí kterých je možné definovat deterministické ekvivalenty stochastické optimalizační úlohy. Mezi nejznámnější ekvivalenty patří *wait-and-see*, *individuálního scénáře*, *tlustého řešení*, *střední hodnoty EV* a *očekávaného cíle EO*.

$$? \in \operatorname*{argmin}_{\mathbf{x}} \Big\{ f(\mathbf{x}, \xi) \,\Big|\, \mathbf{x} \in X \cap \{\mathbf{x} \,|\, \mathbf{g}(\mathbf{x}, \xi) \leq \mathbf{0},\ \mathbf{h}(\mathbf{x}, \xi) = \mathbf{0}\} \Big\}$$

Otázky oponenta

5. V kapitole 3.3.2 by bylo vhodné vysvětlit, jak asi budou při optimalizaci sekundárního chlazení vypadat vektorové funkce g^1, h^1 ve srovnání s funkcemi g^2, h^2.

Otázky oponenta

5. V kapitole 3.3.2 by bylo vhodné vysvětlit, jak asi budou při optimalizaci sekundárního chlazení vypadat vektorové funkce g^1, h^1 ve srovnání s funkcemi g^2, h^2.

- omezení prvního stupně

$$h_1^x \leq h_{1,\max} \qquad \dots \qquad h_n^x \leq h_{n,\max}$$

Otázky oponenta

5. V kapitole 3.3.2 by bylo vhodné vysvětlit, jak asi budou při optimalizaci sekundárního chlazení vypadat vektorové funkce g^1, h^1 ve srovnání s funkcemi g^2, h^2.

- omezení prvního stupně

$$h_1^x \leq h_{1,\max} \qquad \dots \qquad h_n^x \leq h_{n,\max}$$

- omezení druhého stupně

$$h_1^x + h_1^y \leq h_{1,\max} \qquad \dots \qquad h_n^x + h_n^y \leq h_{n,\max}$$

  - scénář s_1: $h_1^y = h_2^y = \cdots = h_n^y = 0$
  - scénář s_2: $h_m^x + h_m^y = 0$

Otázky oponenta

6. Na straně 37 by bylo vhodné vysvětlit úvodní část kapitoly 3.4, kde se říká, že algoritmy v oddílech 3.2 a 3.3 patří do třídy deterministických algoritmů, přičemž název oddílu 3.3 je Stochastická optimalizace.

Otázky oponenta

6. Na straně 37 by bylo vhodné vysvětlit úvodní část kapitoly 3.4, kde se říká, že algoritmy v oddílech 3.2 a 3.3 patří do třídy deterministických algoritmů, přičemž název oddílu 3.3 je Stochastická optimalizace.

- **algoritmus pro řešení** deterministické vs stochastické optimalizační úlohy
- **princip fungování** optimalizačního algoritmu deterministický vs stochastický

Děkuji za pozornost.

Brno Ph.D. talent

Holder of Brno PhD Talent Financial Aid – Sponsored by Brno City Municipality

Děkuji za pozornost.

Brno Ph.D. talent

Holder of Brno PhD Talent Financial Aid – Sponsored by Brno City Municipality