



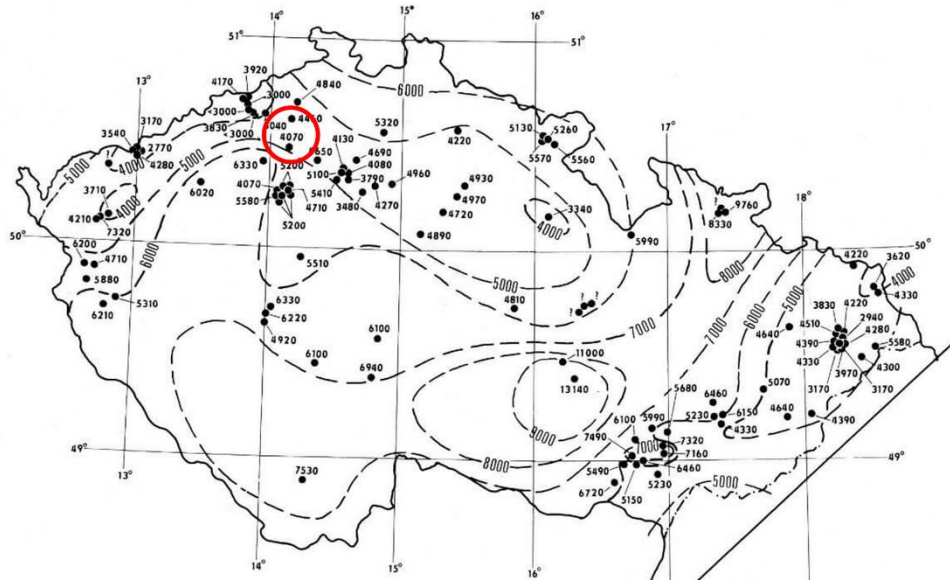
TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Mechatronics, Informatics
and Interdisciplinary Studies ■

Numerický model hlubinného geotermálního výměníku - případová studie Litoměřice

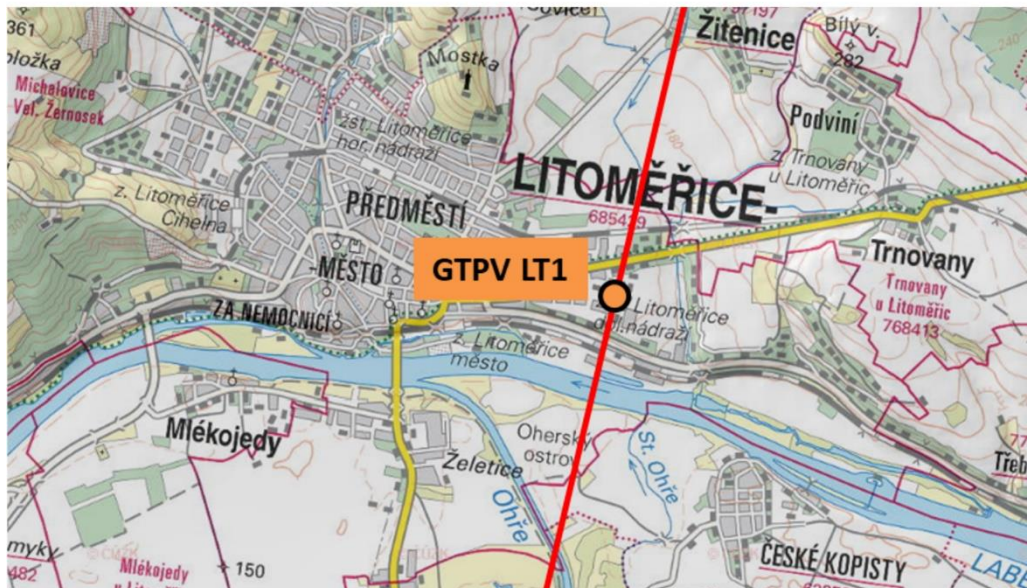
P. Rálek



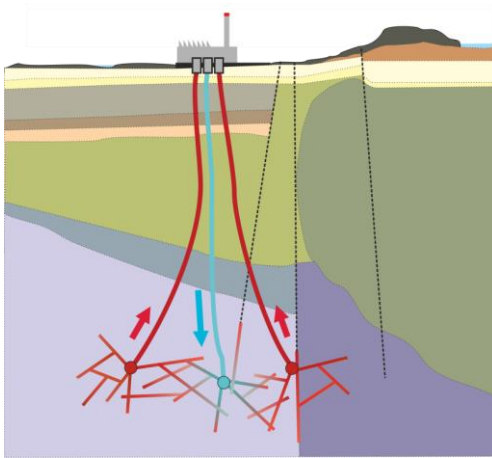
Geotermální energie v ČR



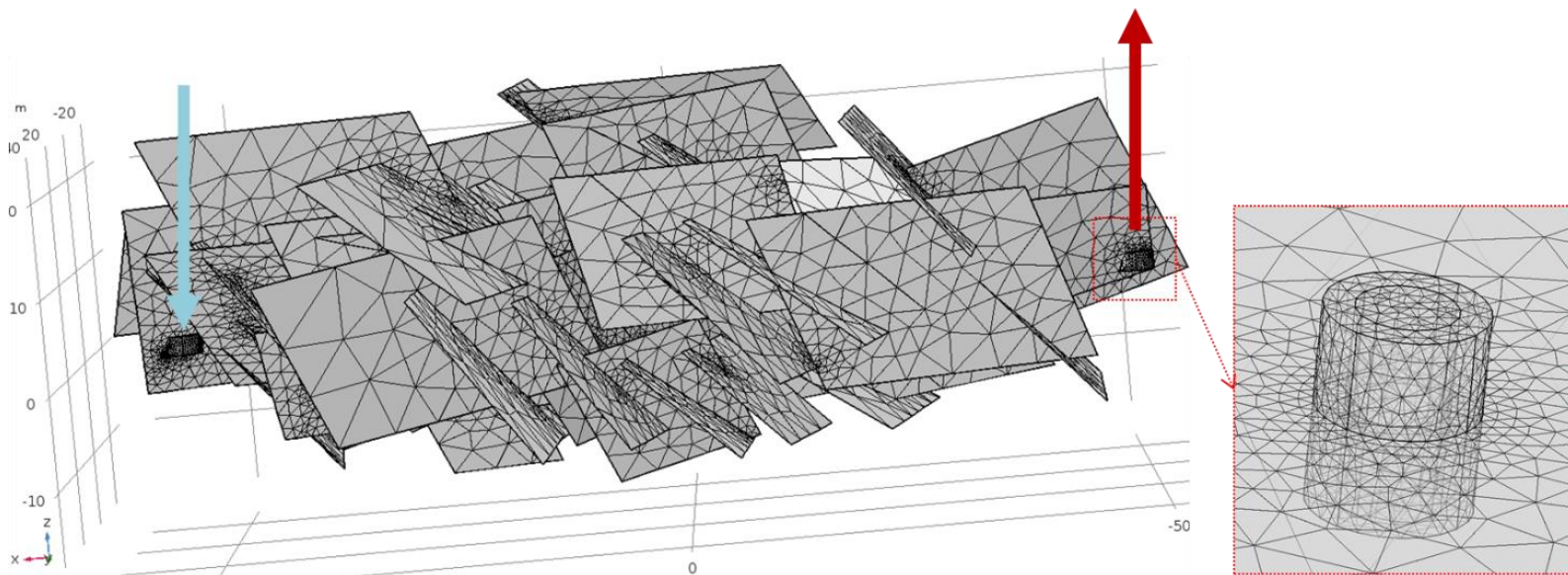
- podmínky nikterak skvělé (srv. Island)
- projekt RINGEN – 7 organizací
- TUL - modelování
- testovací vrt
- pilotní projekt v ČR



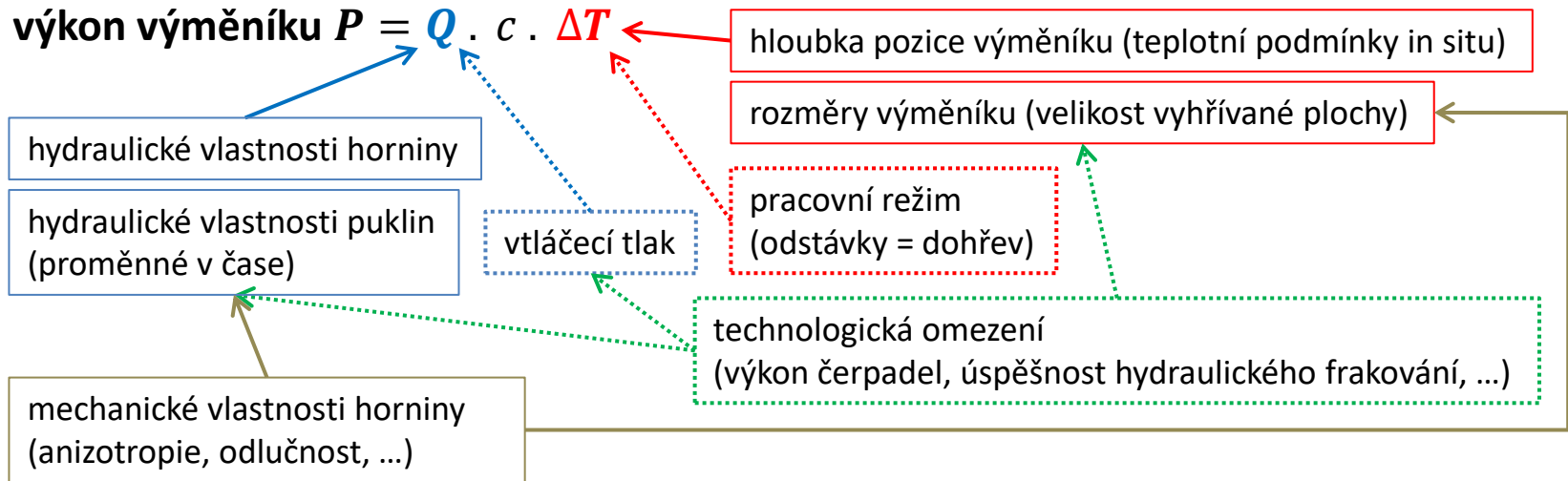
Geotermální výměník



- ❑ Island – stačí vrazit potrubí do země
- ❑ EHS (Enhanced Geothermal System)
- ❑ vtláčecí vrt, jeden či více čerpacích vrtů
- ❑ výměník = puklinová síť – uměle vytvořená či zvětšená
- ❑ ekologické otázky – hydraulické frakování (možné vyvolání otřesů), ovlivnění podzemních vod apod.



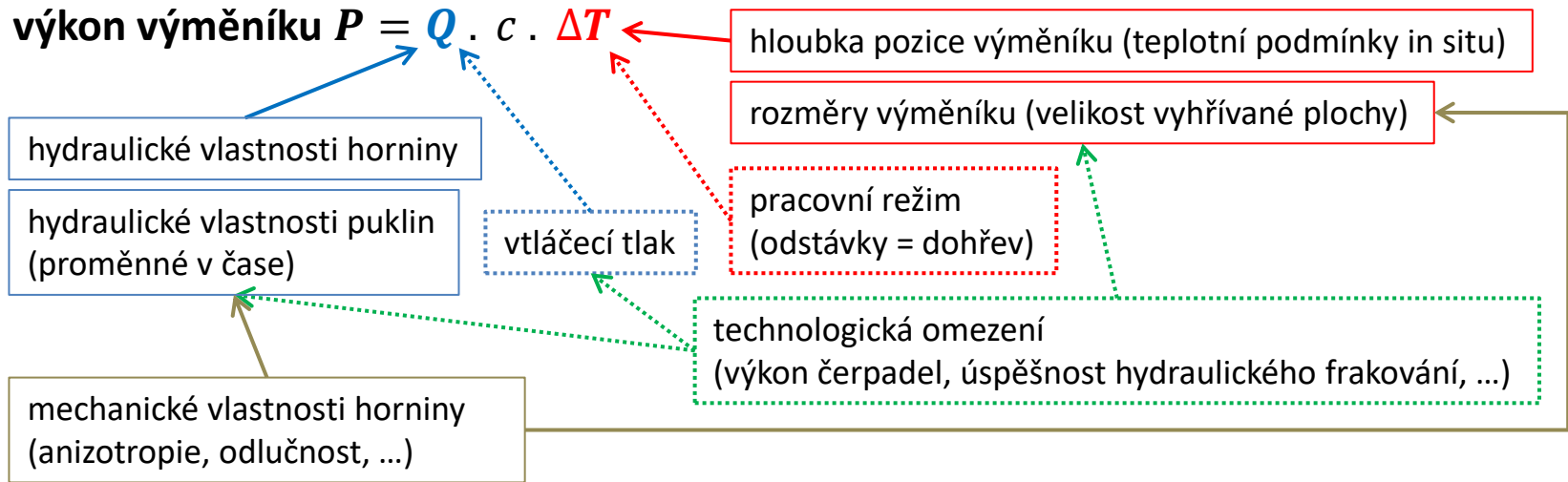
Geotermální výměník



- Závislosti označené plnou šipkou označují pevně dané podmínky a parametry, přerušované šipky pak označují závislost na parametrech, které můžeme (alespoň do určité míry) ovlivnit.

Geotermální výměník

výkon výměníku $P = Q \cdot c \cdot \Delta T$



$$P \geq P_{rent} \xleftrightarrow{\text{horninové vlastnosti, hloubka výměníku, rozměry výměníku}} Q \geq Q_{min} \xleftrightarrow{\text{hydraulické vlastnosti puklin}} p \geq p_{min}$$

$$P(Q, T) \rightarrow P(Q) \rightarrow P(p)$$

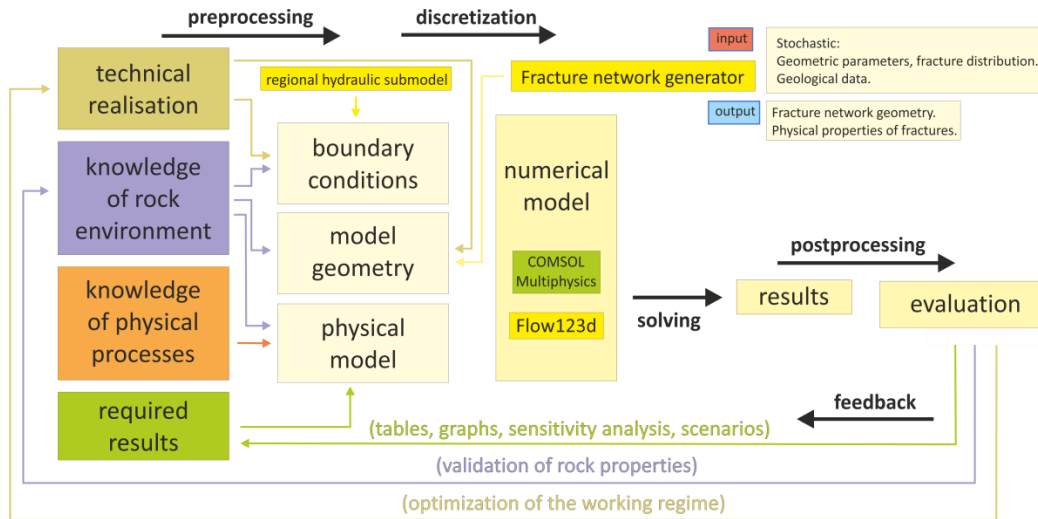


Geotermální výměník

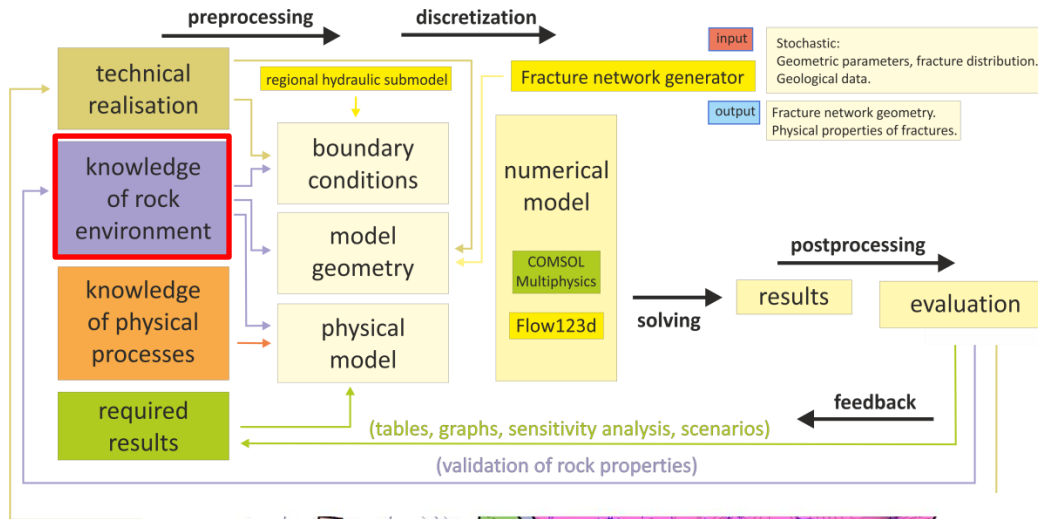
1 teplotní podmínky in situ hydraulické vlastnosti horniny mechanické vlastnosti horniny	2 rozměry výměníku puklinová síť	3 hydraulické vlastnosti puklinové sítě pracovní režim časový průběh
---	--	---

- ❑ numerický model – při všech možných nejistotách vstupních dat umožňuje propočítávání scénářů
- ❑ citlivostní analýza, rozsahy hodnot výsledků, ...

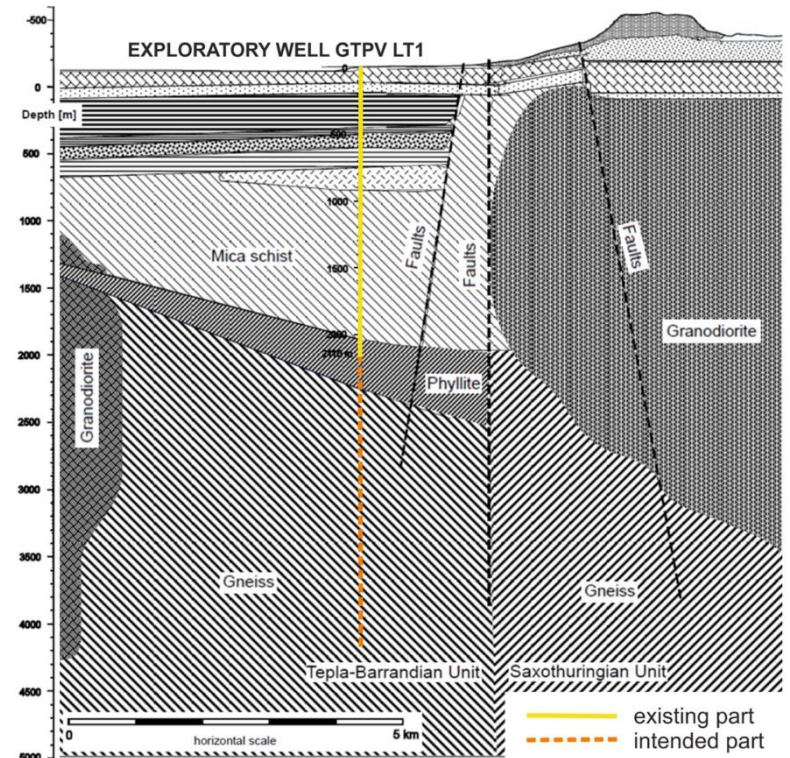
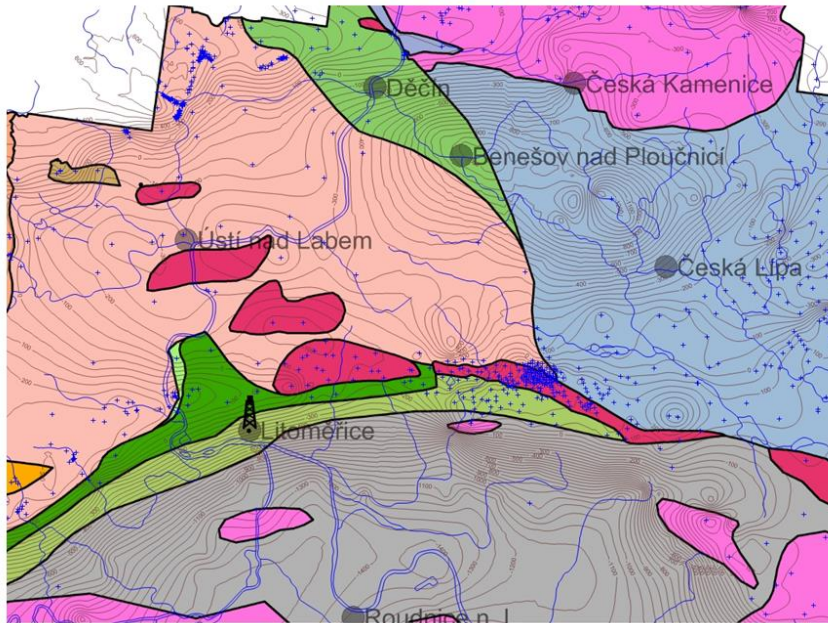
Numerický model



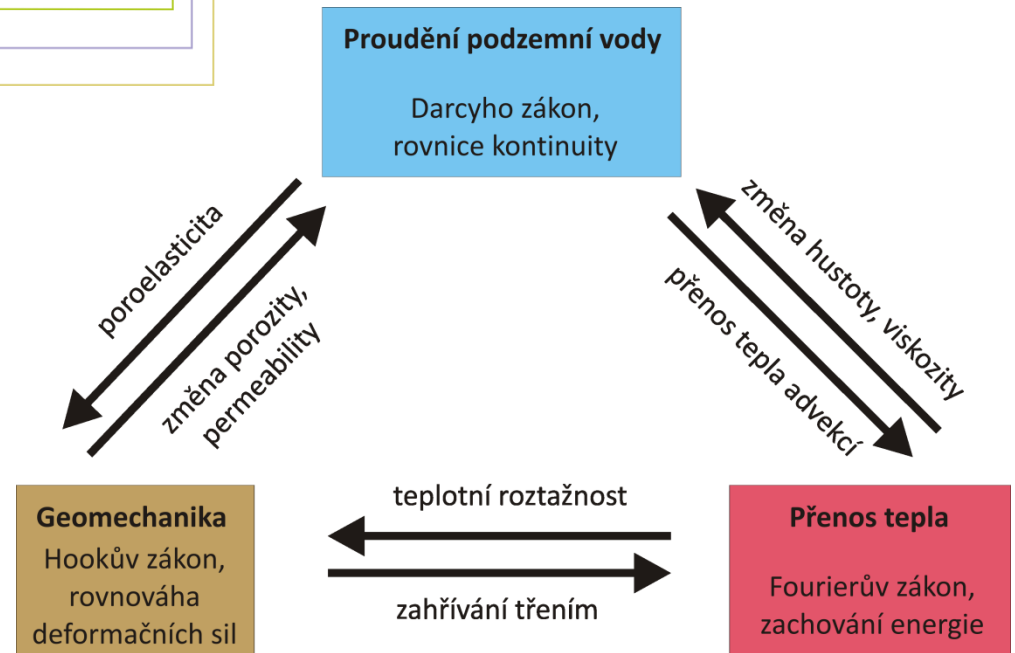
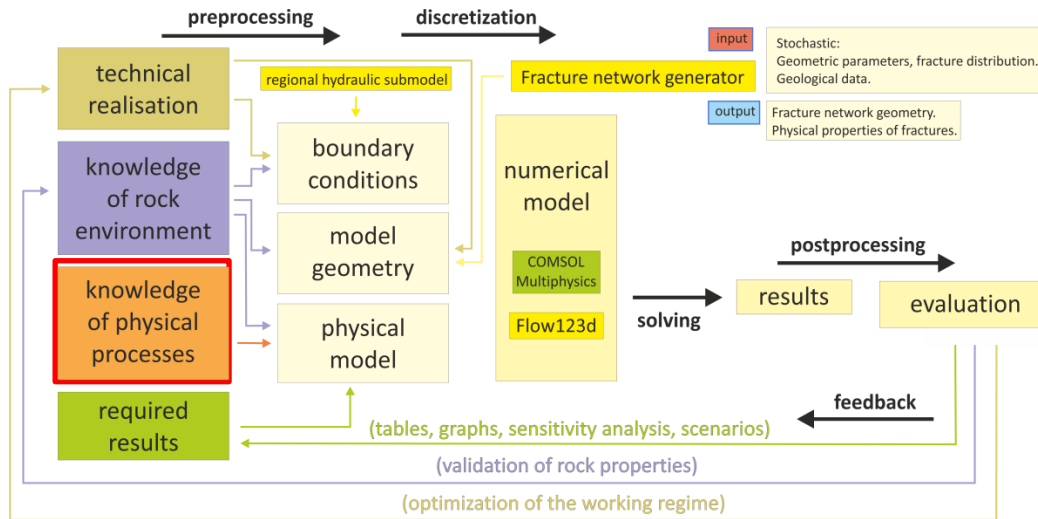
Numerický model

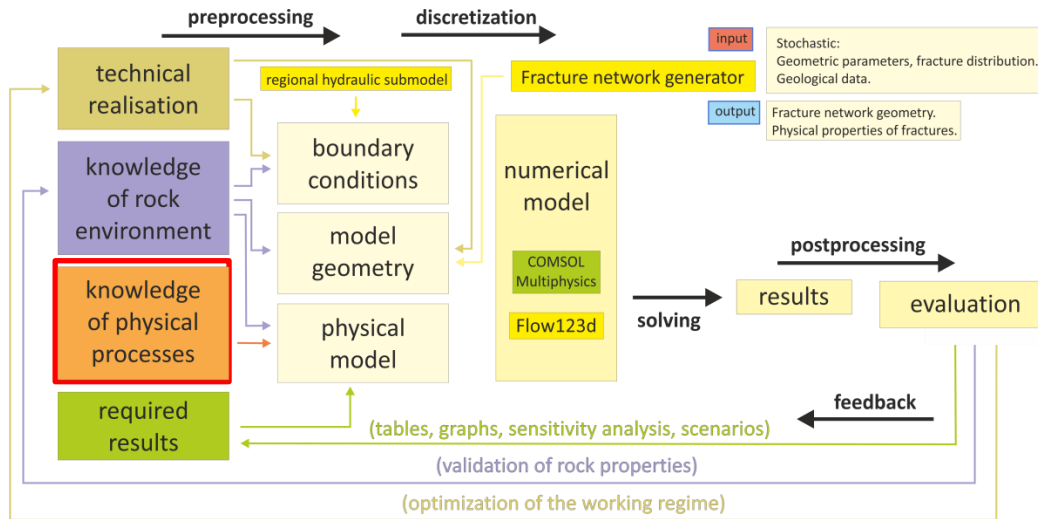


- omezené znalosti
- vrtné jádro, geologické mapy, neinvazivní metody



Numerický model





Numerický model

□ sdružený TH model

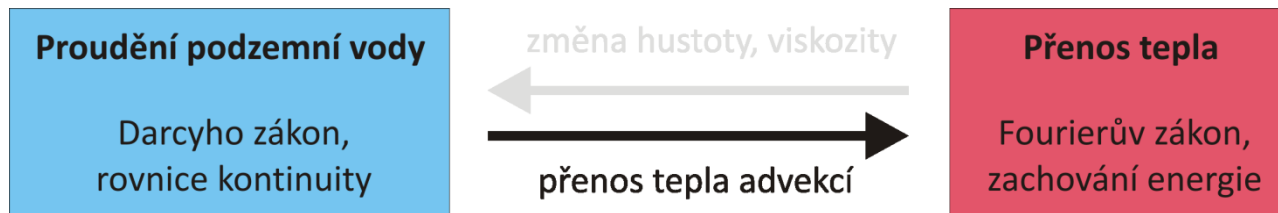
□ vedení tepla:

$$\begin{aligned}
 (\rho C_p)_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} &= Q + Q_{\text{vd}}, \\
 \mathbf{q} &= -k_{\text{eff}} \nabla T, \\
 (\rho C_p)_{\text{eff}} &= \theta_p \rho_p C_{p,p} + (1 - \theta_p) \rho C_p, \\
 k_{\text{eff}} &= \theta_p k_p + (1 - \theta_p) k + k_{\text{disp}}.
 \end{aligned}$$

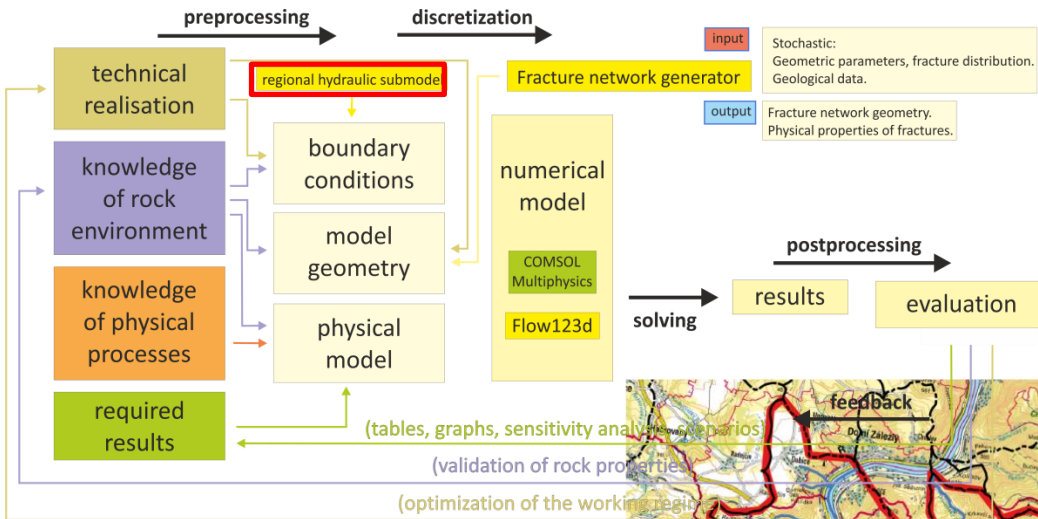
□ proudění

$$\begin{aligned}
 \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) &= Q_m, \\
 \mathbf{u} &= -\frac{\kappa}{\mu} \nabla p.
 \end{aligned}$$

□ + pukl. proudění



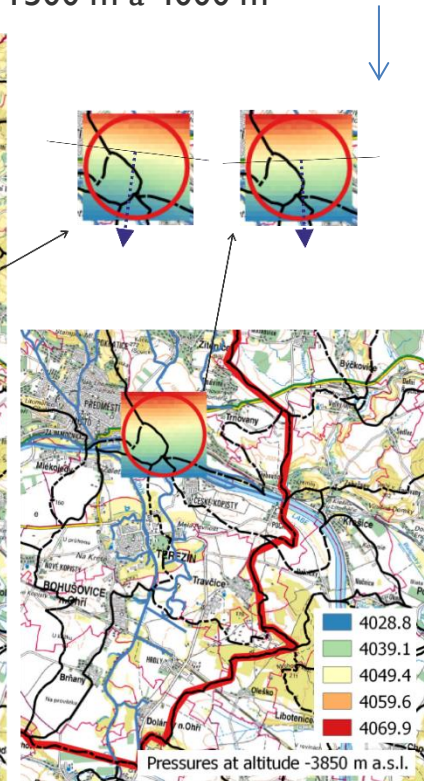
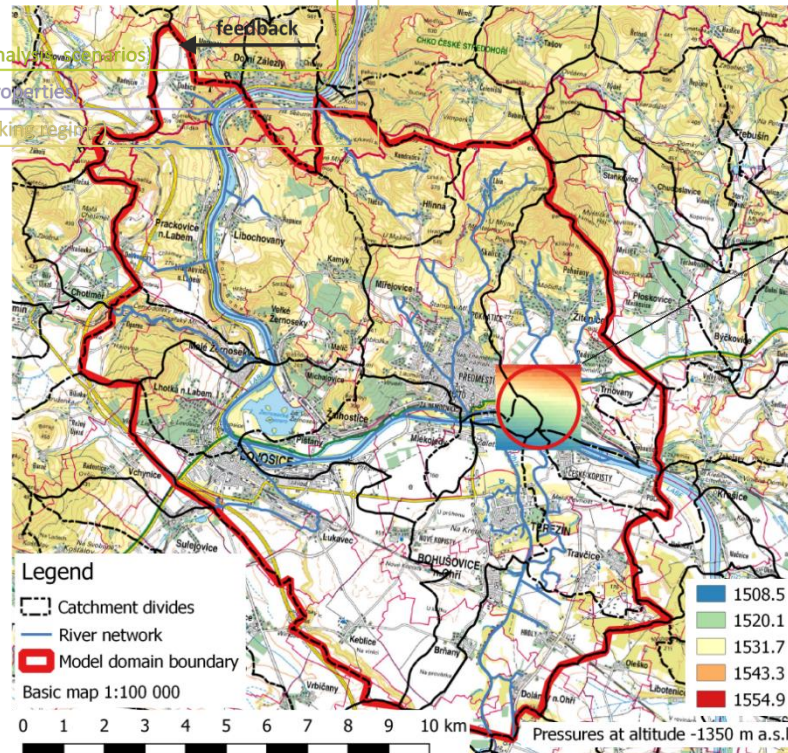
Numerický model

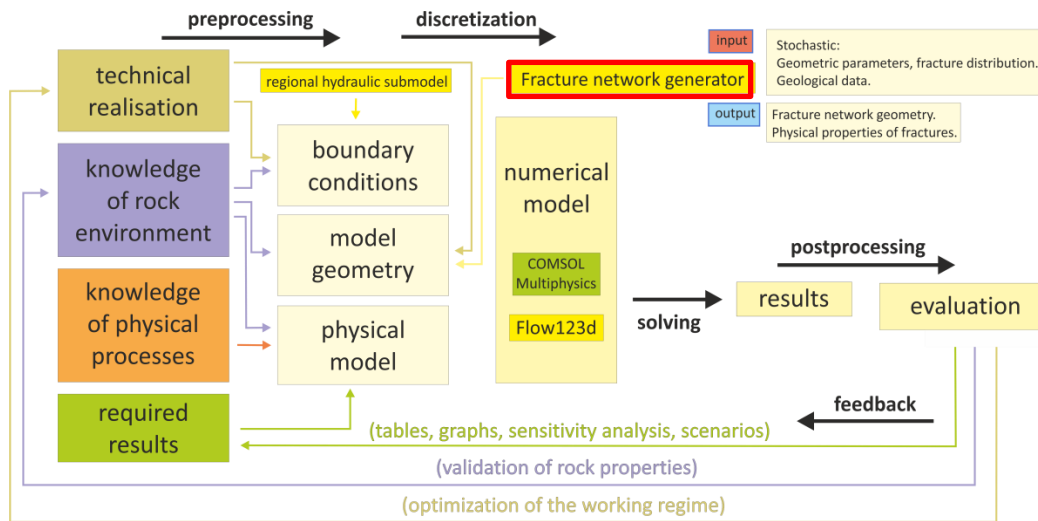


- pomocný regionální hydraulický model
- výsledky jako OP pro model výměníku

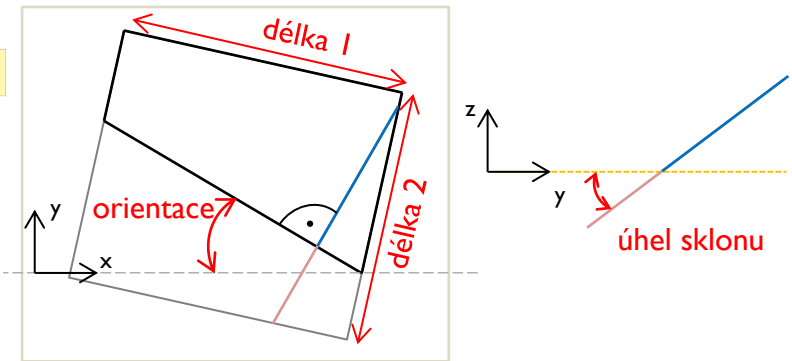
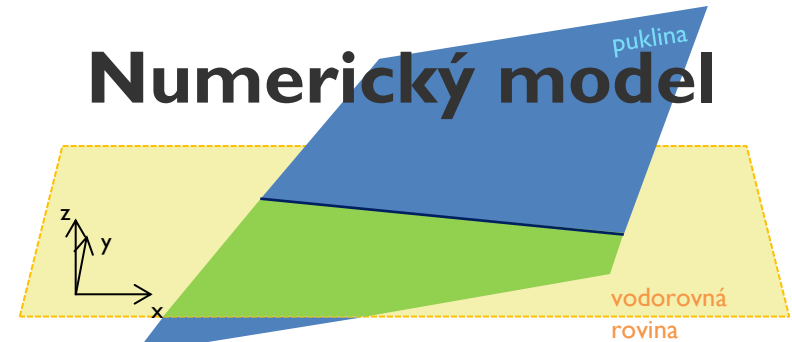
- tlakový gradient v hloubkách 1500 m a 4000 m

J. Říha

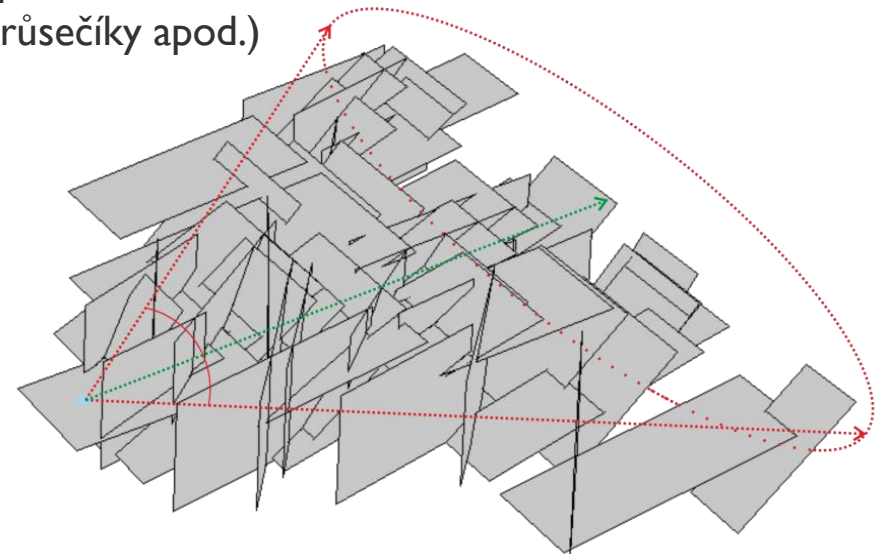
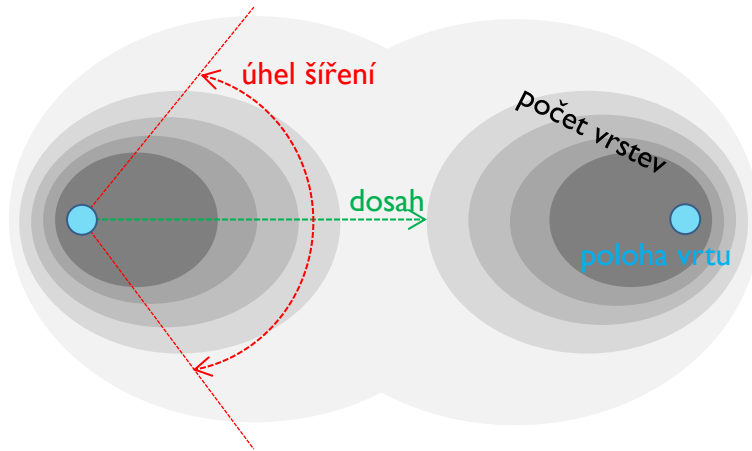




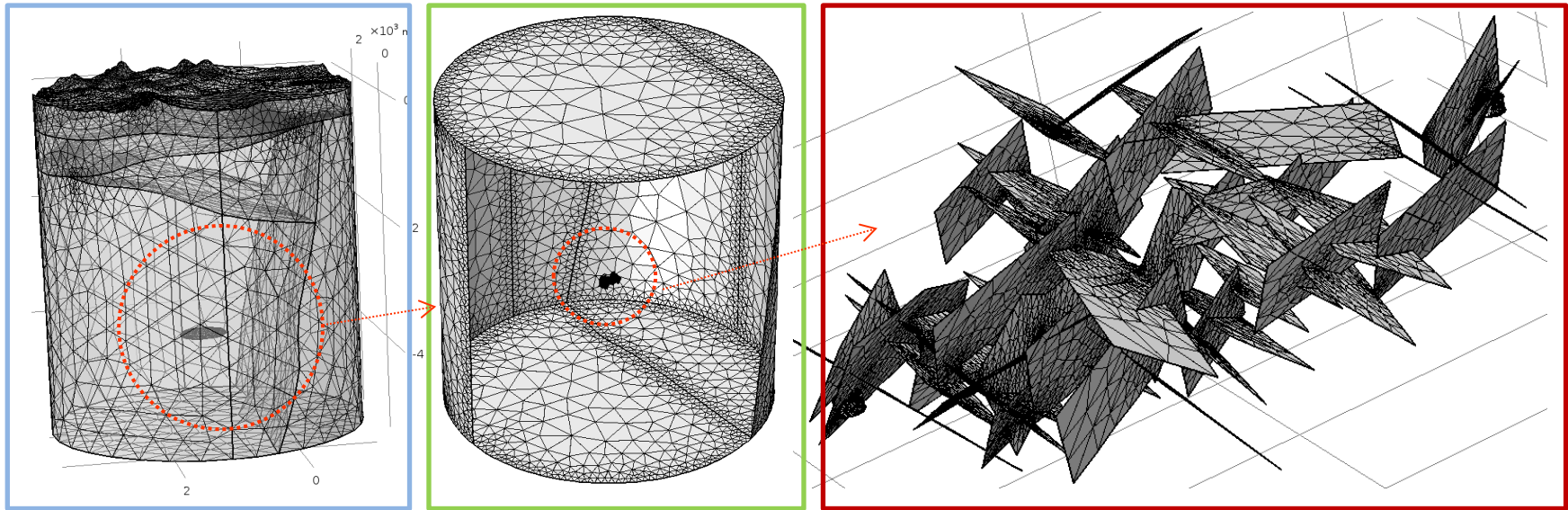
Numerický model



- stochasticky generovaná puklinová síť; Python script
- úprava „defektních“ situací (souběžné pukl., blbé průřezíky apod.)
- *.stl, import do Comsolu



Varianty modelu



- ❑ různá měřítka modelu (od km po stovky m)
- ❑ pro menší měřítka **stochastická pukl. síť**
- ❑ pseudo-reálné vstupní parametry:

Table 1. Estimated rock properties in Litoměřice area

	density [g.cm ⁻³]	porosity [%]	permeability [m ²]	thermal conductivity [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	heat capacity [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
gneiss	2.66	2.6	10 ⁻¹⁷	3.1	900
permocarbon	2.5	6	10 ⁻¹⁵	2.4	800

Table 2. Estimated thermal conditions in Litoměřice area

temperature gradient [K.m ⁻¹]	extrapolated heat flux [mW.m ⁻²]	temperature [°C]	
		in 600 m	in 5000 m
0.026	72	26	145

Table 3. Model variants

model	dimensions width [m] x height [m]	working depth [m]	number of elements
1 – deep regional	6000x6000	5000	280 000
2 – deep local	2000x2000		400 000
3 – shallow local	1200x1200	600	180 000

- geometrie: COMSOL Multiphysics 5.3a + **Fracture network generator** (TUL)
- při troše snahy krásně robustní meshování
- processing: COMSOL Multiphysics 5.3a, srv. **FlowI23D** (TUL)
- Heat transfer in Porous Media + Darcy's law
- cca. 100 000 – 1 000 000 dof (dle měřítka)
- výpočetní čas: několik hodin pro simulaci 50 let (200 000 dof)
- varianty režimu vtláčecího vrtu:

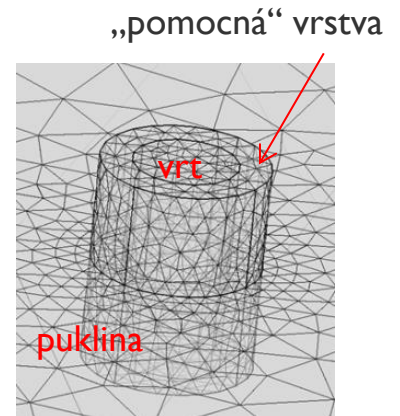
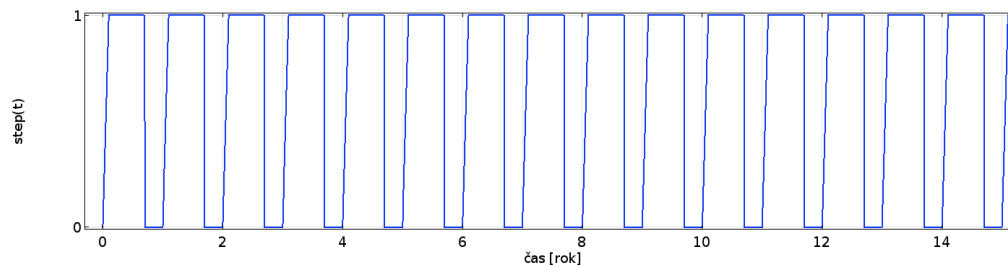


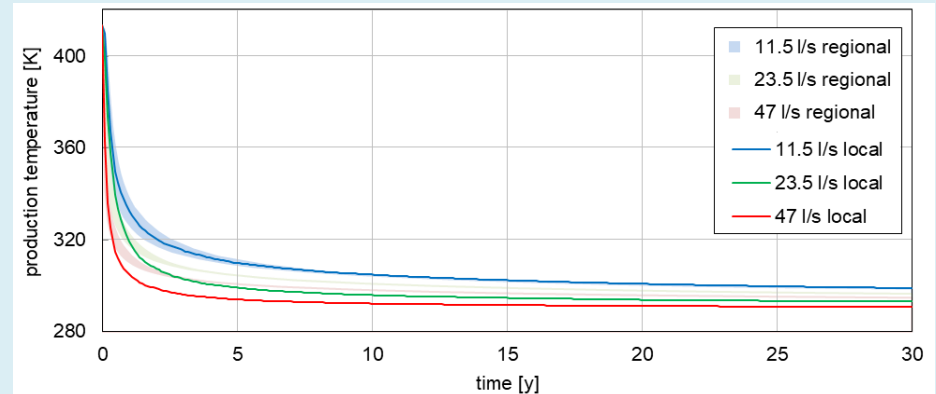
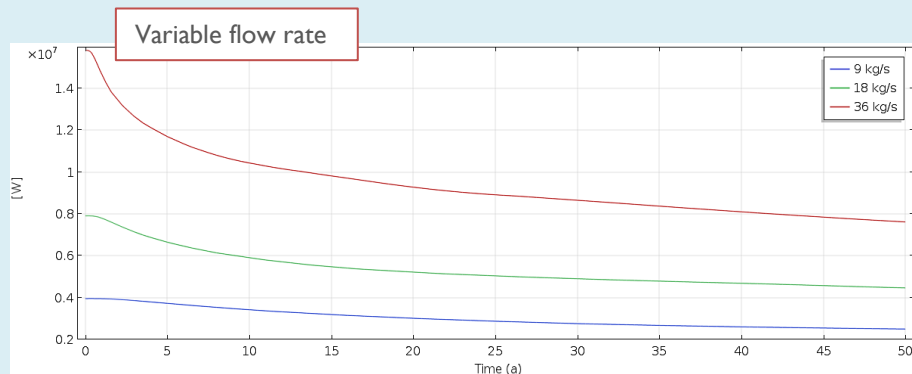
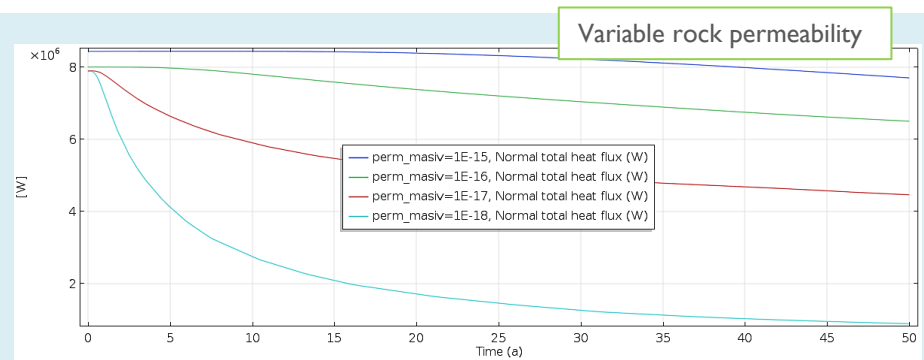
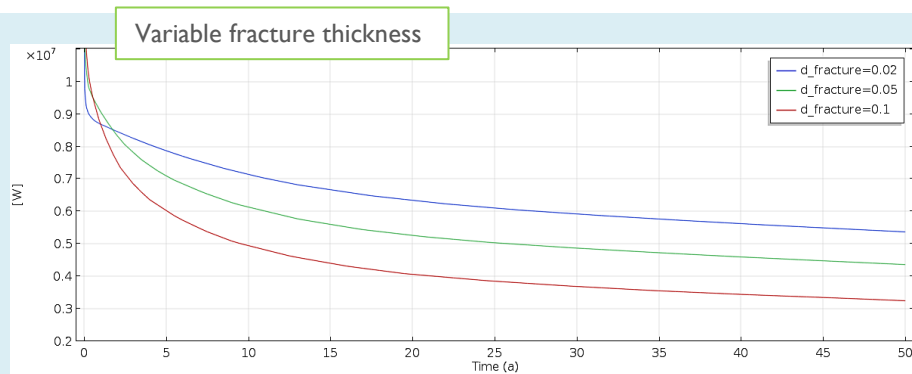
Table 4. Case studies

model	flow rate [$\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$]	regime	
1 – deep regional	23.5	continuous	---
2 – deep local	11.5, 23.5, 47		cyclic with intervals
3 – shallow local	1.8		cyclic with recharging and intervals



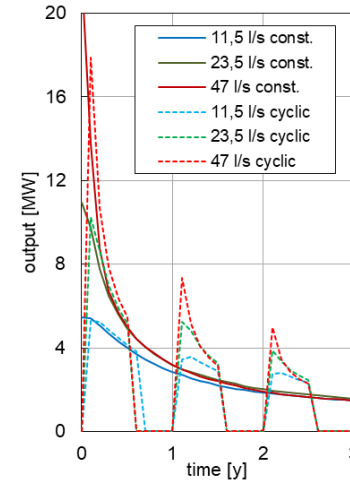
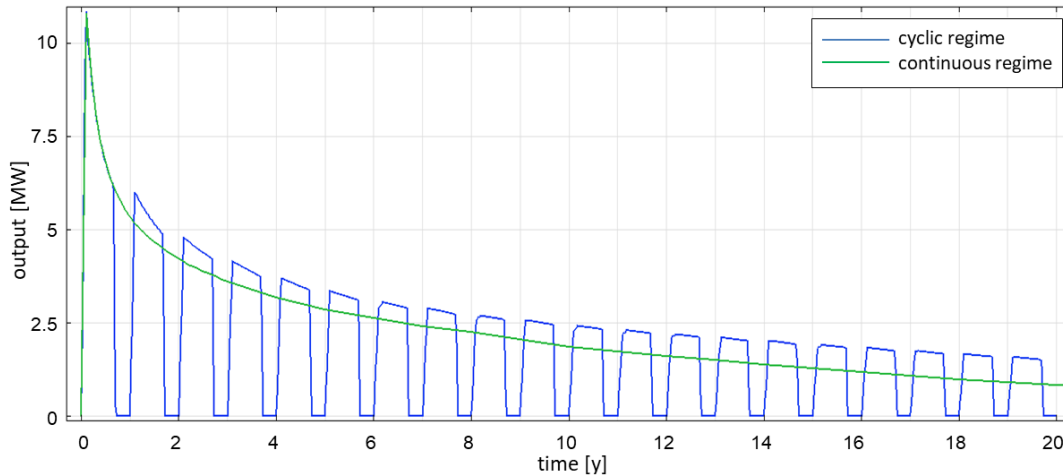
* např. GMSH vyžadoval v oblasti meshování hodně snahy (jiný projekt úložiště jad. odp.)

□ lokální 2 km model

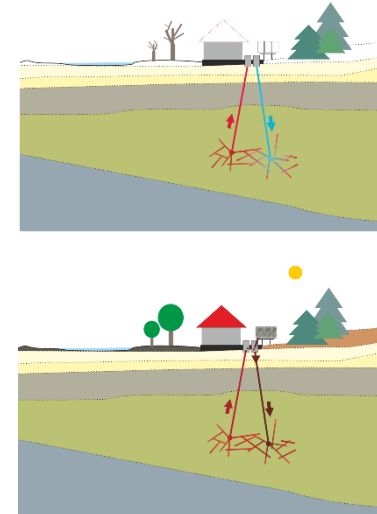
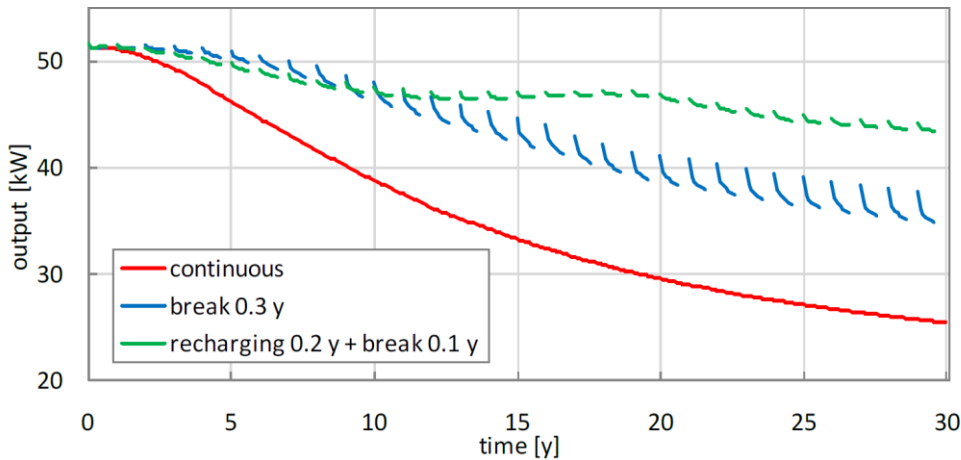


- Time progress of the production temperature – a range of results (colour stripes) for the regional models in comparison with the local model (lines).

Ukázky výsledků

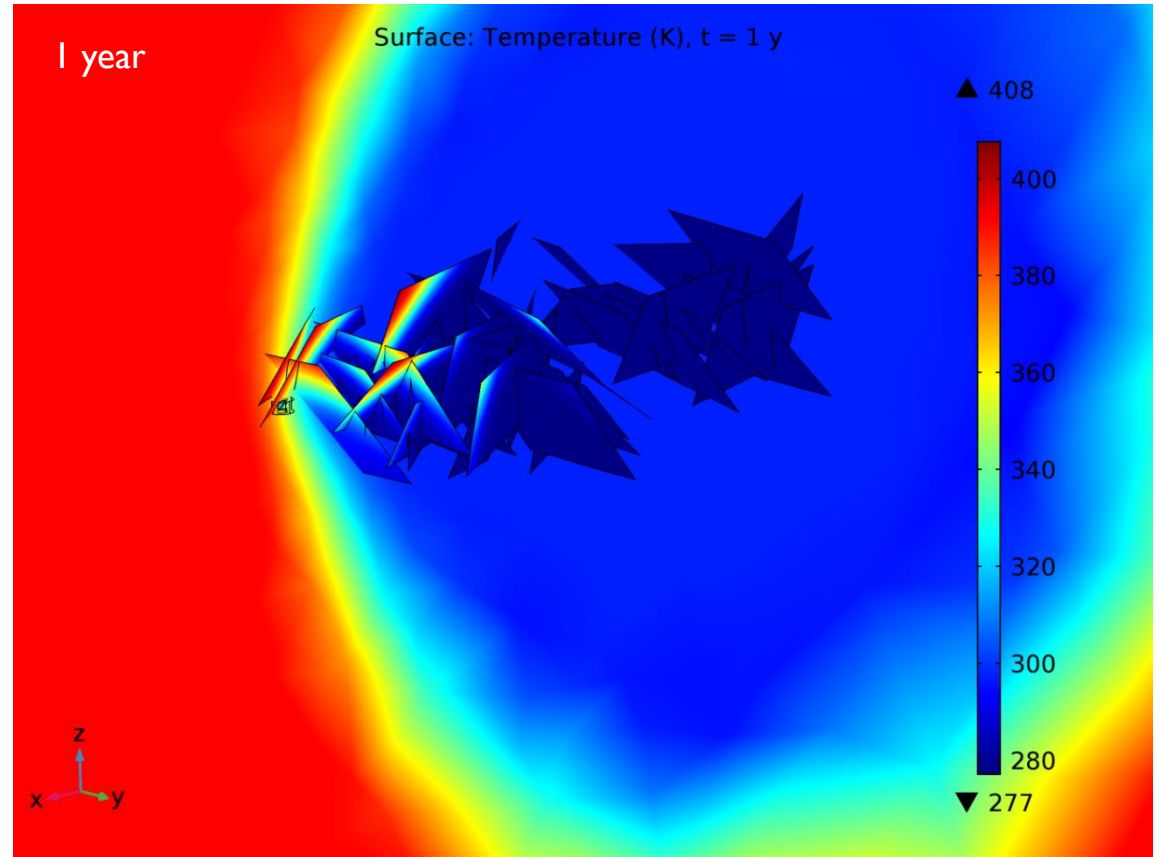
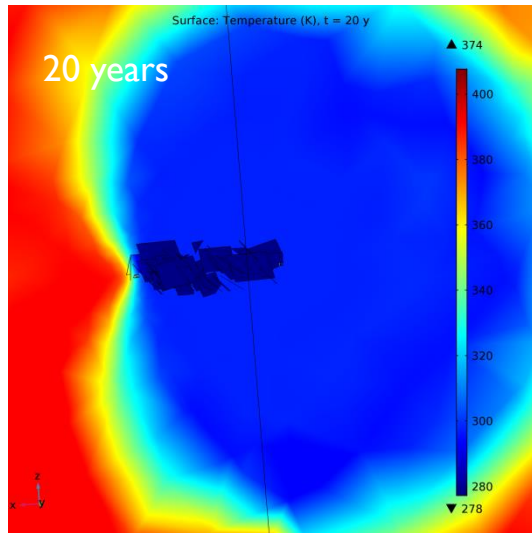
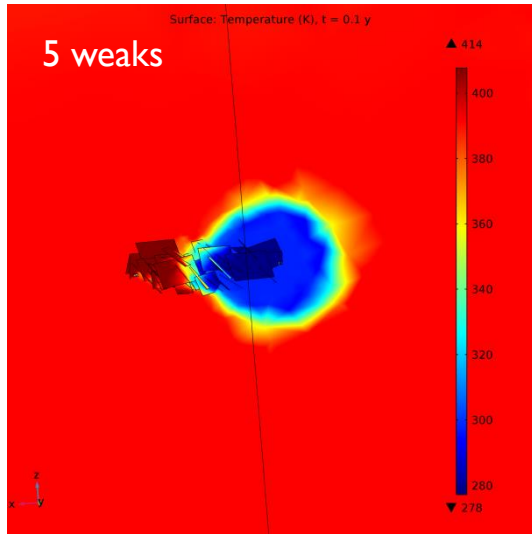


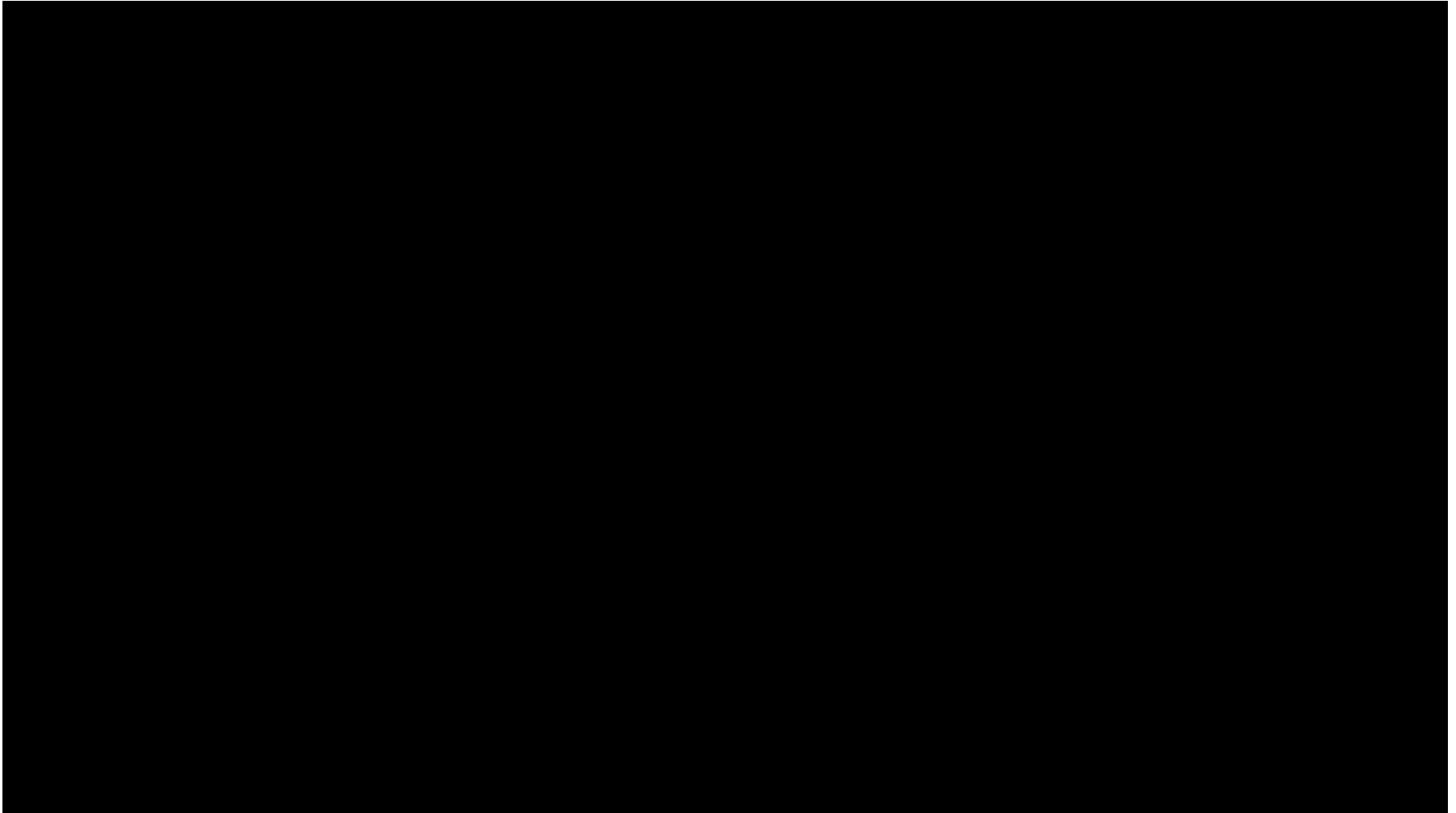
- Time progress of the exchanger output – comparison between the continuous and the cyclic regime. Left – 20 year simulation for inject flow rate 23.5 l/s⁻¹. Right – first three years for various inject rates.



- Time progress of the exchanger output – comparison between the continuous and the cyclic regime (with or without recharging).

Ukázky výsledků





Děkuji za pozornost.

