

# MODELOVÁNÍ POROELASTICITY V HORNINOVÉM PROSTŘEDÍ

*Ilona Hančilová, Jakub Říha*

*8.6.2018, Bořetice | Konference COMSOL Multiphysics*



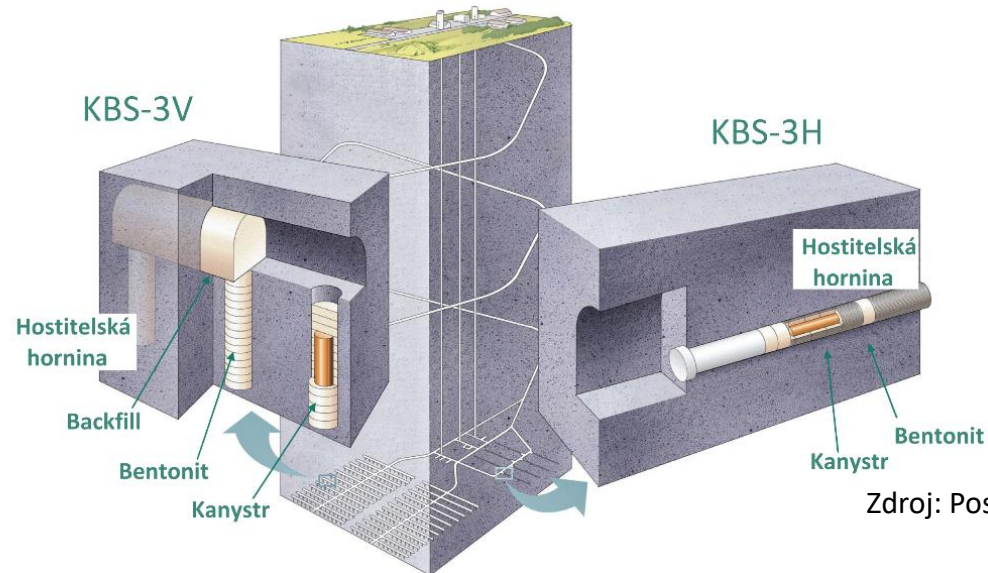
# OBSAH PREZENTACE

- Úvod, motivace
- Řešený problém
- Použité nástroje
- Tvorba geometrie
- Modelování injektážních testů, výsledky
- Závěr



# MOTIVACE

- Analýza procesů v bariérách plánovaného hlubinného úložiště vyhořelého jaderného paliva
  - cílem: simulace procesů v bariérách úložiště
  - komplexnost: sdružený THM proces → nelineární vlastnosti, vliv zbytkového tepla, interakce přírodních a inženýrských bariér
  - hornina: přírodní bariéra
  - vytvoření EDZ (Excavated Damage Zone) v okolí podzemních staveb

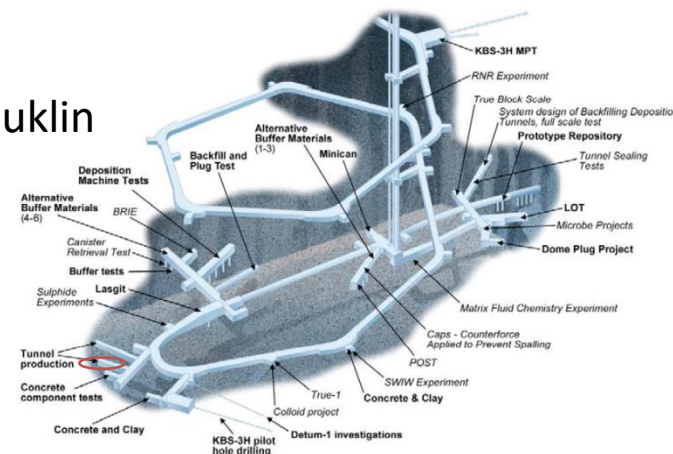
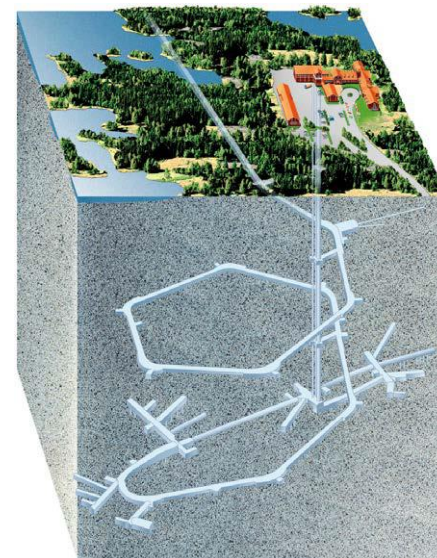


Zdroj: Posiva (2015)

# ÚVOD

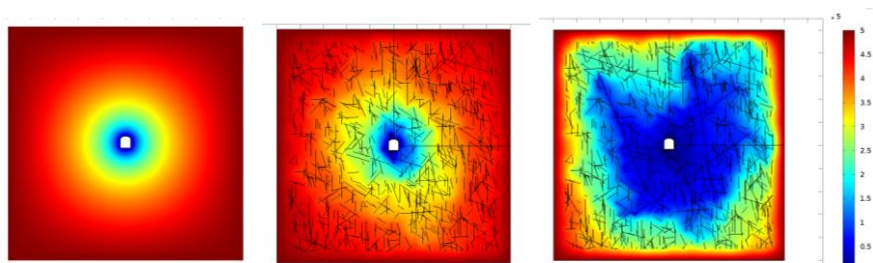
## Projekt DECOVALEX (**DE**velopment of **CO**upled models and their **VAL**idation against **EX**periments) – Task G

- Experimentální tunel v podzemní laboratoři ve švédském Äspö
- Porozumění změnám propustnosti prostředí při formaci EDZ (Excavation Damage Zone) v souvislosti se vznikem cest pro radionuklidy do biosféry
  - model poroelastického chování
  - simulace hydraulických injektážních testů
  - odhady propustnosti horniny a transmisivity puklin
  - porozumění měřeným datům



# ŘEŠENÝ PROBLÉM

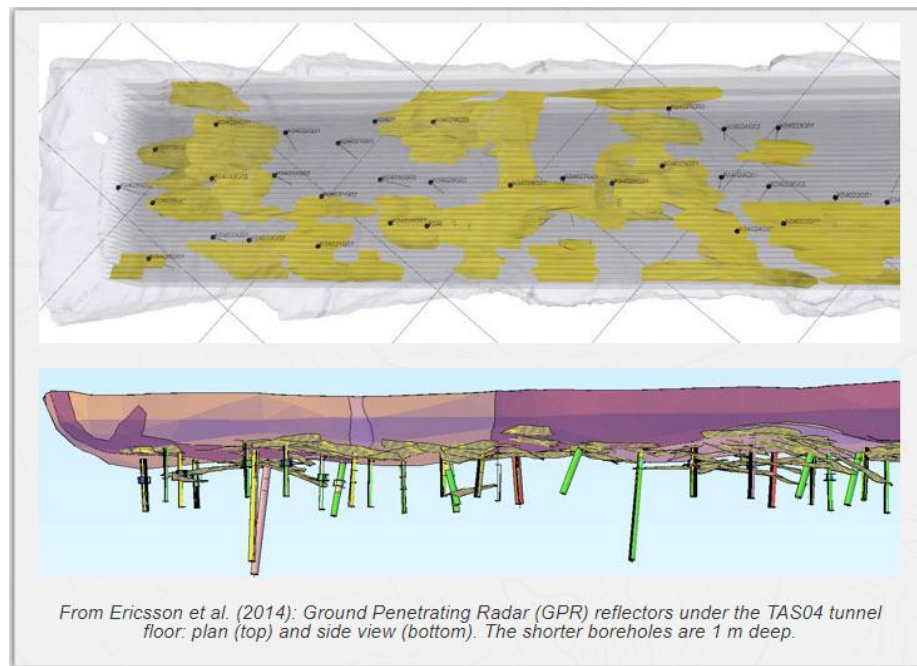
- Testovací 2D modely, využití puklin při řešení poroelastivity
- Hydro-mechanický model okolí tunelu v hornině s puklinami
- Simulace tří injektážních testů



Rozložení tlaku (bez puklin, DFN, DFN + deterministické pukliny)

Table 5. Interference tests.

Injection hole	Depth	Injection pressure	Observation hole	Pressure change in observation hole
	m	kPa		kPa
K04017G02	0.4-0.6	442	K04016G01	1.4
K04017G02	0.4-0.6	442	K04017G01	0.3
K04017G02	0.4-0.6	442	K04017G03	3
K04017G02	0.4-0.6	442	K04018G01	0.4
K04018G01	0.1-0.2	92	K04017G01	88
K04018G01	0.1-0.2	92	K04017G02	4
K04020G01	0.2-0.4	80	K04019G03	4
K04020G01	0.2-0.4	80	K04021G02	21



# COMSOL MULTIPHYSICS

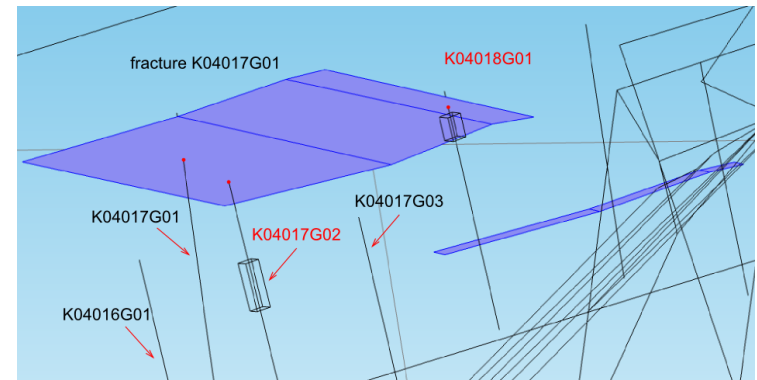
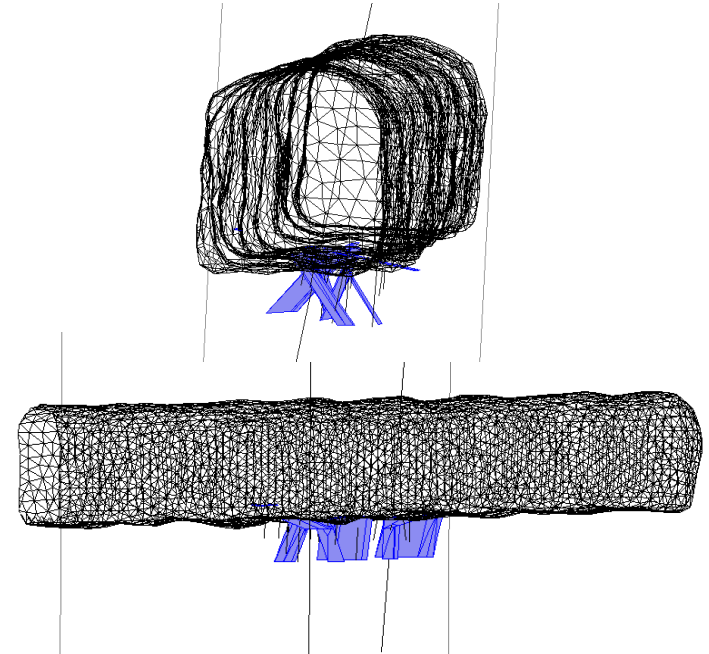
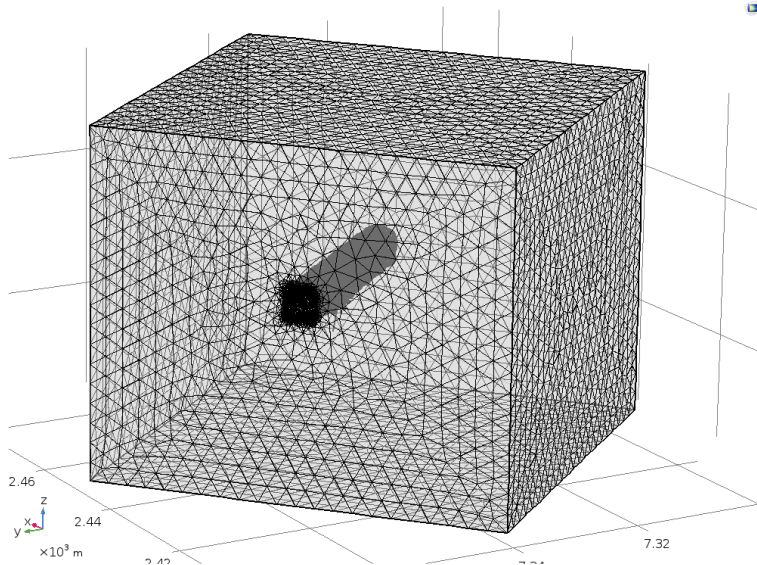
- COMSOL Multiphysics v.5.2 + 5.3
- Rozhraní pro výpočet Biotovy poroelasticity
  - Darcyho proudění v porézním prostředí
  - lineární elasticita
  - proudění puklinami (nástroj „Fracture Flow“)
- Obousměrné sdružení procesů  $H \leftrightarrow M$ 
  - vliv proudění na změnu napětí v hornině ( $H \rightarrow M$ )
  - napěťový stav v hornině  $\rightarrow$  změna ve struktuře pórů  $\rightarrow$  vliv na pole proudění ( $M \rightarrow H$ )
  - pukliny

} „Poroelasticity Interface“



# TVORBA GEOMETRIE

- Homogenní hornina
- Tunel: nepravidelný povrch (formát .stl)
- Pukliny: v blízkosti podlahy tunelu (formát .stl)
- Vrty:
  - injektážní vrty: dutiny ve tvaru kvádrů
  - pozorovací vrty: linie



# NASTAVENÍ MODELU

- Materiálové parametry (hornina, voda, pukliny)
- Hydraulické okrajové podmínky:
  - vnější hranice modelu: tlak 5 MPa
  - vnitřní hranice tunelu: tlak 0 MPa
  - injektážní vrty: podle injektážního testu
- Mechanické okrajové podmínky:
  - horní hranice modelu: vertikální napětí: 12 MPa
  - pravá hranice modelu: horizontální napětí: 12 MPa
  - přední hranice modelu: horizontální napětí: 24 MPa
  - levá, spodní a zadní hranice tunelu: nulové normálové posunutí
  - vnitřní hranice tunelu: napětí: 0 MPa

*Table 2. Petrophysical and geomechanical properties of the granite (isotropic and homogeneous parameters).*

Rock Properties	Value	Unit
Young's modulus	76	GPa
Poisson's ratio	0.25	1
Density	2.750	kg m <sup>-3</sup>
Porosity	0.01	%
Permeability	5E-18	m <sup>2</sup>
Biot Coefficient	1	1

*Table 3. Input parameters of the fluid.*

Water Properties	Value	Unit
Dynamic viscosity	1E-03	Pa s
Compressibility	4.4e-10	Pa <sup>-1</sup>
Density	1000	kg m <sup>-3</sup>

*Table 4. Data of the interpreted fractures.*

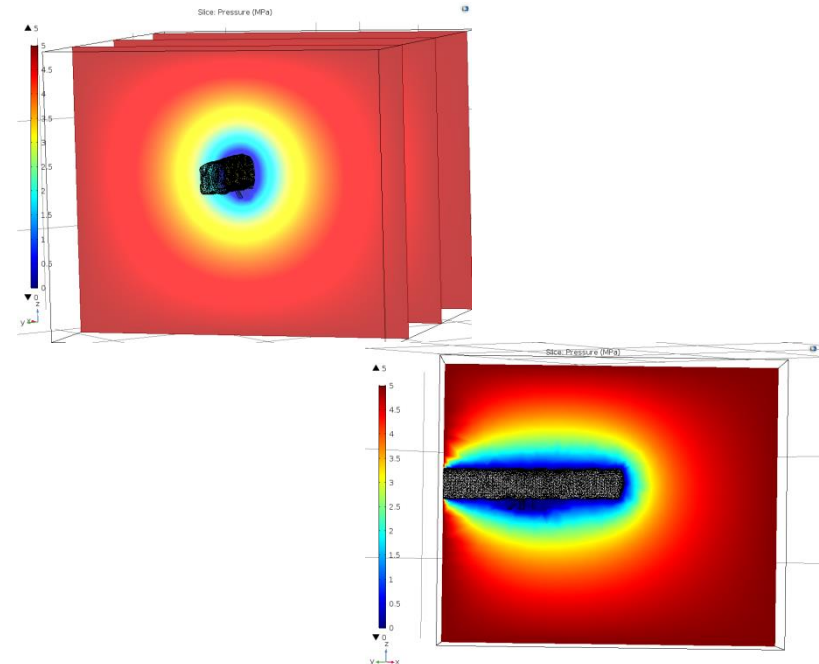
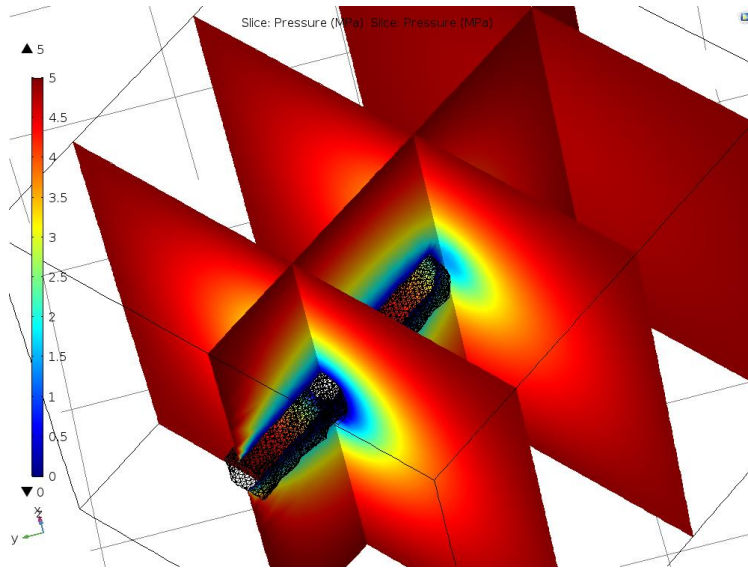
	Fracture #	Strike °	Dip °	Aperture mm
K04023G03	99	135	66	0.5
K04023G03	94	315	50	0-1
K04021G02	137	300	70	0-0.5
K04019G02	144-c	120	55	0-0.2
K04017G01	143	120	10	0.3
K04017G02	150	170	40	0.2





# ŘEŠENÍ

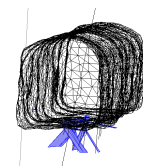
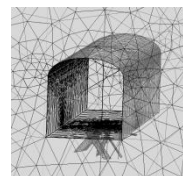
- Ustálený model: počáteční rozložení veličin
- Časově závislý model: simulace injektážního testu
  - 3 modely (3 injektážní vrty, každý řešen jako samostatná simulace)
- Porovnání odezvy na injektovaný tlak v pozorovacích vrtech



# ŘEŠENÍ

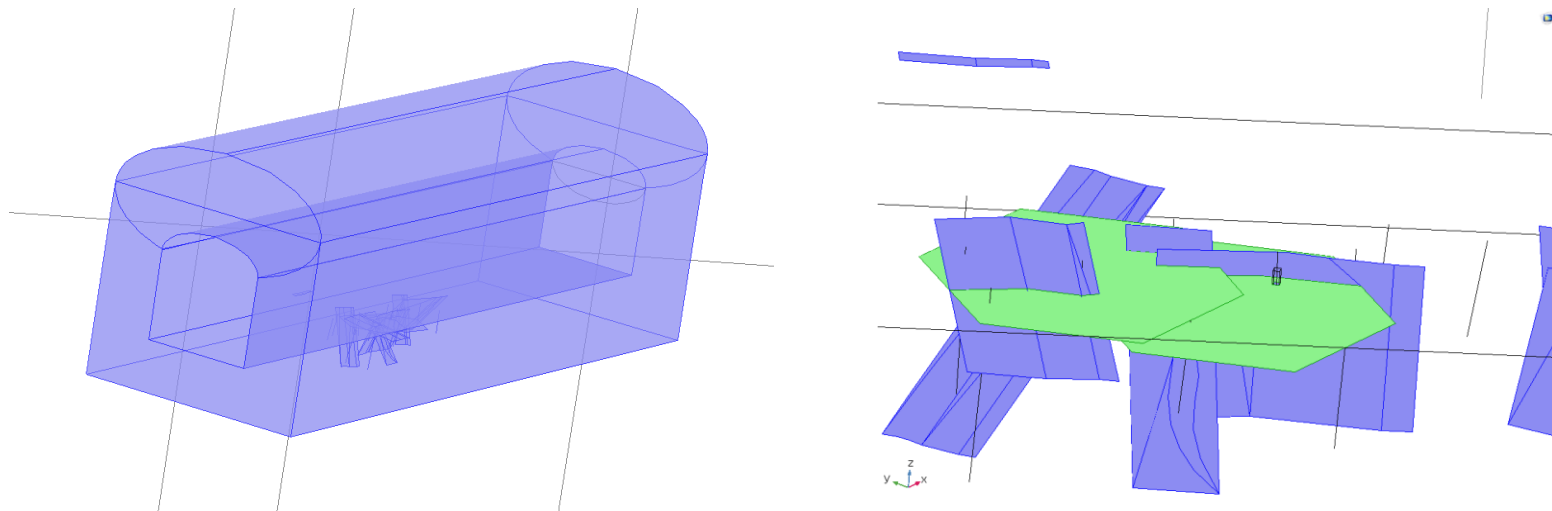
- Vyhodnocení změny tlaku oproti ustálenému stavu v pozorovacích vrtech
- Výsledky modelu se základním nastavením
  - malá odezva při injektáži do vrtů č. 18 a 20
  - rozdíly v tlacích pro pravidelný a nepravidelný tunel ve většině případů do 10 %

Injektážní vrt	Injektovaný tlak	Pozorovací vrt	odezva (kPa)			Rozdíl (%)
			Měřená data	Pravid. geo	Neprav. geo	
K04017G02	442 kPa	K04016G01	1.4	3.91	4.29	9.00
K04017G02	442 kPa	K04017G01	0.3	6.95	8.44	17.62
K04017G02	442 kPa	K04017G03	3	3.51	3.77	6.69
K04017G02	442 kPa	K04018G01	0.4	3.78	4.17	9.38
K04018G01	92 kPa	K04017G01	88	0.13	0.11	-9.49
K04018G01	92 kPa	K04017G02	4	0.14	0.14	3.24
K04020G01	80 kPa	K04019G03	4	0.17	0.17	-1.69
K04020G01	80 kPa	K04021G02	21	0.13	0.15	10.62



# ŘEŠENÍ

- Doplnění geometrie, odhad materiálových parametrů – co nejlepší vystižení provedených injektážních experimentů
  - 1. krok – co nejmenší zásahy do geometrie
  - přidání EDZ do geometrie, doplnění 2 sub-horizontálních puklin podle zadání (propojení stávajících puklin a vrtů)



# VÝSTUPY

- Citlivostní testy (variované hydraulické vodivosti puklin, případně „vypnuté“ pukliny)
  - odezva na injektáž do vrtu č. 17 se změní pouze při změně propustnosti EDZ (ale neovlivní výsledky při injektáži do vrtů č. 18 a č. 20)
  - 10násobné zvýšení hydr. vodivostí puklin č. 1702 a 2301 se neprojeví na tlaku v žádných pozorovacích vrtech
  - přidané sub-horizontální pukliny pozitivně ovlivňují pozorované výsledky – odezvy na injektáž do vrtů č. 18 a č.20 lze ovlivňovat změnami parametrů puklin
  - uvedené testovací modely nedokáží vystihnout rozdílnou odezvu v rámci pozorovacích vrtů – při injektáži do jednoho vrtu (korelace hodnot)
  - např. injektáž do vrtu č. 18 a rozdílná odezva v pozorovacích vrtech 1701 a 1702, podobně i u vrtů č. 17 a 20



# VÝSLEDKY

## 3 výsledné varianty

- změna hydr. vodivosti pukliny 2101 a jedné sub-horizontální pukliny
- případně změna propustnosti horniny v EDZ, nebo ve zbývající části domény
- odpovídají hodnoty tlaků pouze v několika málo pozorovacích vrtech, ostatní se změnou uvažovaných parametrů nepodařilo vystihnout

hydr.vod/prop.	var_1	var_2	var_3
1701	7.4E-02	7.4E-02	7.4E-02
1702	3.3E-02	3.3E-02	3.3E-02
1902	8.2E-03	8.2E-03	8.2E-03
2101	3.1E-01	3.1E-01	3.1E-01
2301	2.0E-01	2.0E-01	2.0E-01
hor_1	1.0E+01	1.0E+01	1.0E+01
hor_2	2.0E-01	2.0E-01	2.0E-01
k_rock [m <sup>2</sup> ]	5.0E-19	5.0E-19	5.0E-18
k_edz [m <sup>2</sup> ]	5.0E-18	2.5E-18	5.0E-17

Injektážní vrt	Injektovaný tlak	Pozorovací vrt	Měřená odezva [kPa]	var_1	var_2	var_3
K04017G02	442 kPa	K04016G01	1.4	1.3	0.2	5.2
	442 kPa	K04017G01	0.3	3.4	1.0	8.5
	442 kPa	K04017G03	3	1.2	0.2	3.3
	442 kPa	K04018G01	0.4	1.4	0.2	4.0
K04018G01	92 kPa	K04017G01	88	89.4	89.4	89.4
	92 kPa	K04017G02	4	89.4	89.4	89.4
K04020G01	80 kPa	K04019G03	4	26.0	26.0	26.0
	80 kPa	K04021G02	21	21.1	21.1	21.1



# ZÁVĚR A DALŠÍ POSTUP

- Simulace injektážních testů pomocí rozhraní pro výpočet poroelasticity
  - import nepravidelného povrchu tunelu a základních puklin
  - doplnění dvou horizontálních puklin do modelu a EDZ v okolí tunelu
  - testovací modely odhadující vlivy parametrů jednotlivých puklin a horniny na pozorovanou odezvu v určených vrtech
  - pouze částečně odpovídající výsledné varianty
  
- Další postup
  - přidání případně zanedbání dalších puklin (zadaná DFN data)
  - rozdělení EDZ na domény s různou vodivostí
  - uvažování anisotropie horniny
  - mechanika puklin



Děkuji za pozornost

