

Sít' výzkumných institucí a podniků pro infrastrukturu

Forschungs- und Unternehmensnetz für Infrastrukturen

RENI-100686680



Sít'ovací setkání

Matematické modelování odběrů tepla

Network building meeting

Mathematische Modellierung der Wärmeentnahme

20. května 2025

20. Mai 2025

Interreg



Kofinanciert von
der Europäischen Union
Spolufinancováno
Evropskou unií

Matematické modelování odběrů tepla

Hydrogeologické aspekty a rizika vrtných prací,
Litoměřice, 20.5.2025

Ing. Matěj Černý, Ph.D.,
RNDr. Martin Milický,
Ing. Jan Uhlík, Ph.D.

PROGEO, s.r.o.



Obsah

- Představení firmy
- Představení výzkumných úkolů zaměřených na ukládání nebo jímání tepla
- Projekt „Vychlazování“
 - problematika měření teplot
 - experimentální data
 - matematické modely
 - extrapolace experimentů



- S. r. o. založeno 1993 v Roztokách
- Zaměřeno na matematické modelování proudění podzemní vody, transportu kontaminantů a tepla
- Zpracování a syntéza vstupních dat z oborů klimatologie, hydrologie, geologie, hydrogeologie, hydrogeochemie a kartografie v modelovém řešení
- Výstupy matematických modelů využíváme pro hodnocení, bilance a prognózy.
- Účastni několika výzkumných úkolů se zaměřením na teplo

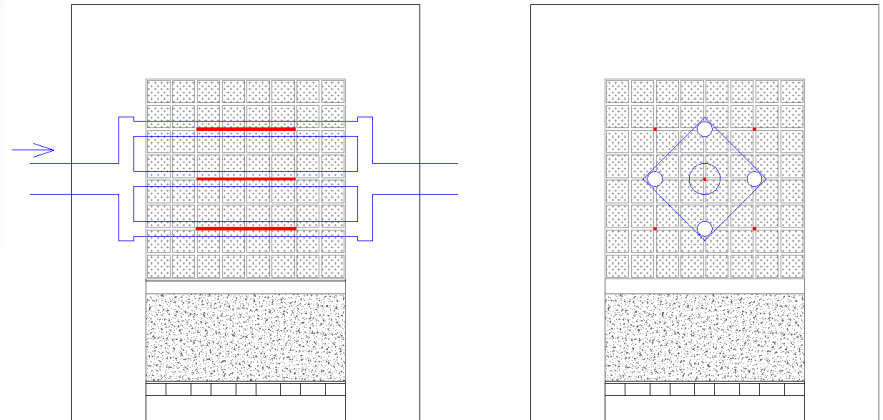
Reversibilní skladování energie v horninovém masivu (2010–2014)

Koncept vysokoteplotního úložiště zjevného tepla (HT SHES)

- Využití kombinace granitu a tepelně vodivého geopolymery
- Provozní teploty do 400 °C
- Ohřev el. odporovými tyčemi
- Odběr proudícím vzduchem

Vývoj tepelně vodivého geopolymery (TVG, $\lambda = 21,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

Sestaven funkční vzorek 0,8×0,8×0,8 m (cca 0,5 m³)



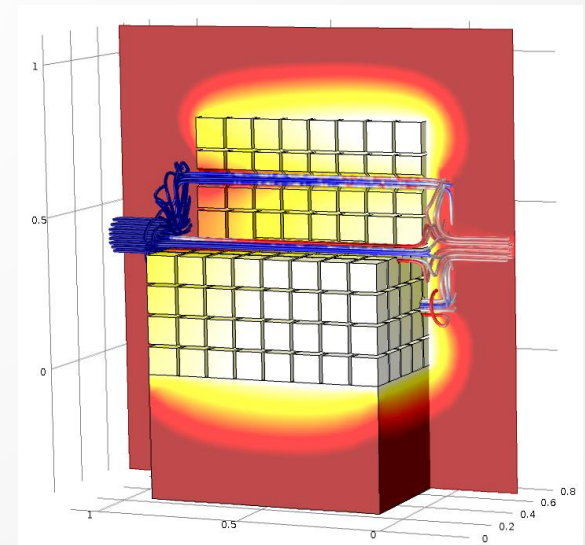
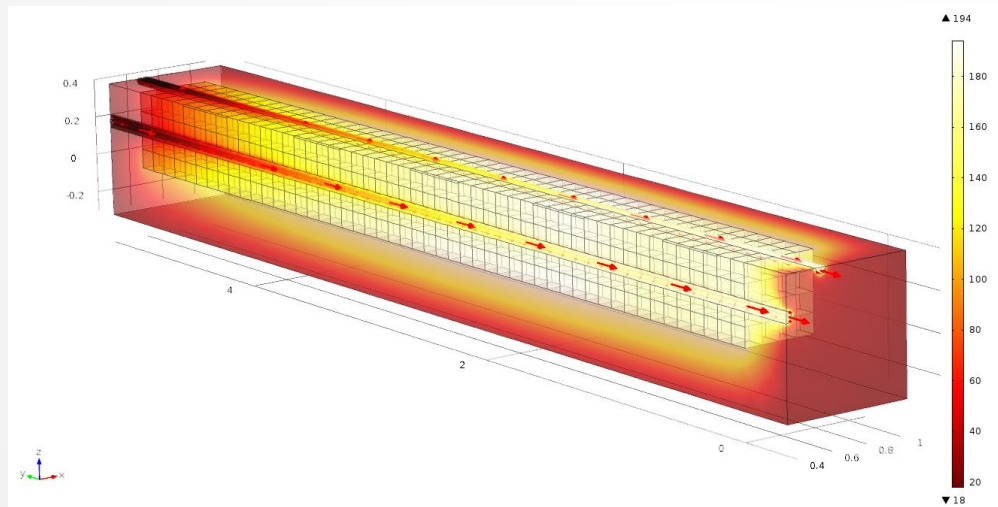
Reversibilní skladování energie v horninovém masivu (2010–2014)

Provoz:

- 6 dní ohřev a 6 dní odběr
dodáno 180 kWh, odběr 86 kWh > 47 %
- 24 h ohřev a 24 h odběr
dodáno 54 kWh, odebráno 39 kWh > 72 %

Matematické modelování využito pro

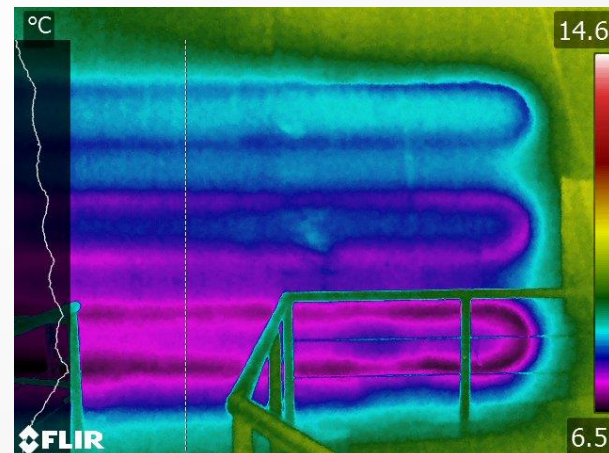
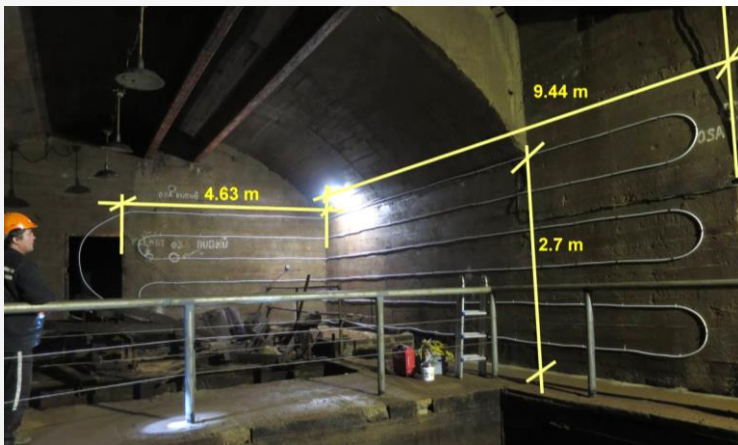
* návrh * analýzu výsledků * extrapolaci *



(projekt č. TA0102034)

Výzkum získávání tepelné energie z horninového prostředí tunelových staveb (2011–2016)

Koncept sendviče hydroizolace a tepelně vodivé hmoty pro liniové stavby
Experiment na třech lokalitách v dole Skalka u Mníšku pod Brdy



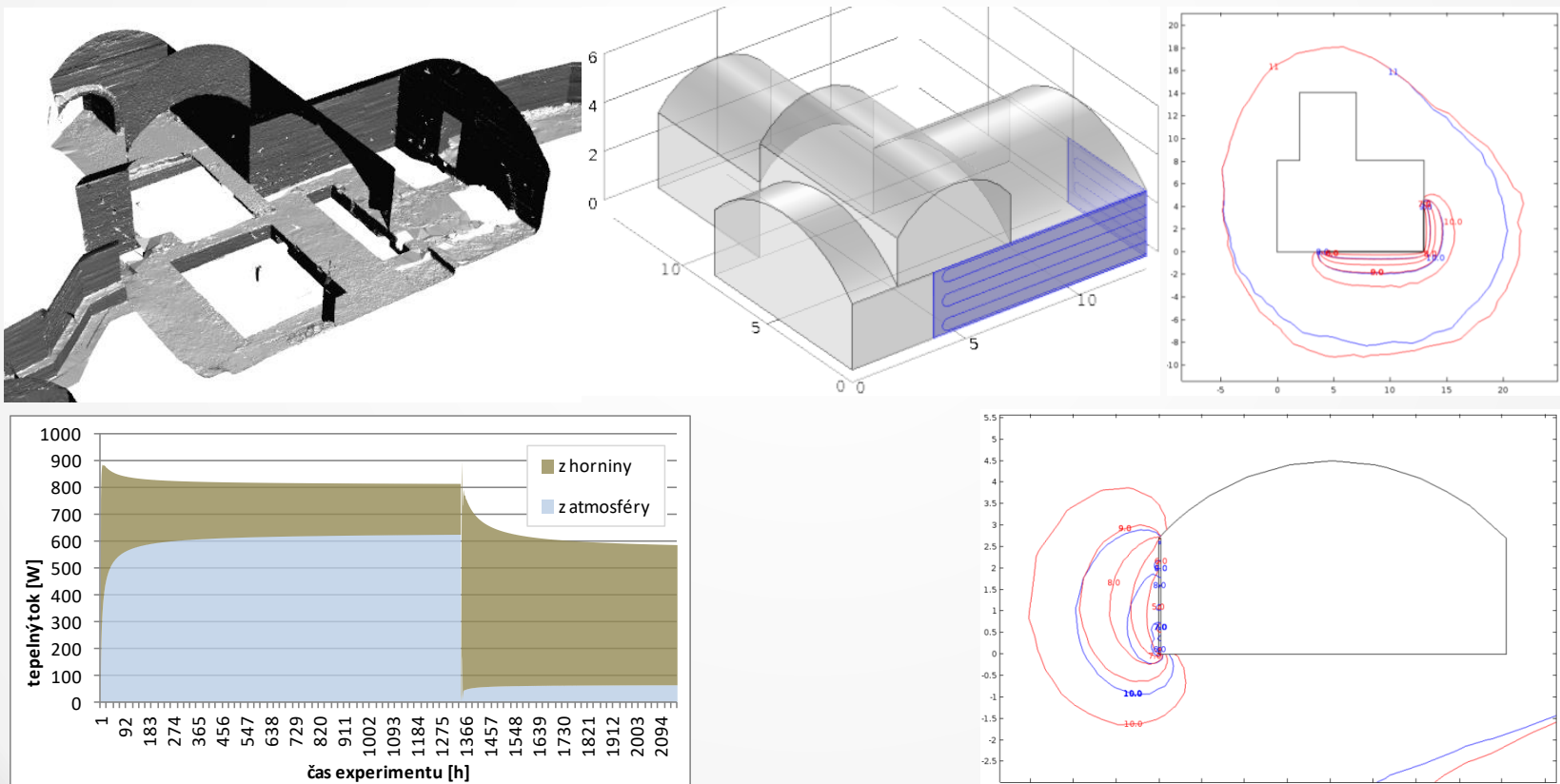
(FR-TI4/269)

Výzkum získávání tepelné energie z horninového prostředí tunelových staveb (2011–2016)

Z plochy $15 \times 2,5$ m bylo v maximu jímáno přes 800 W tepla (20 W/m^2).

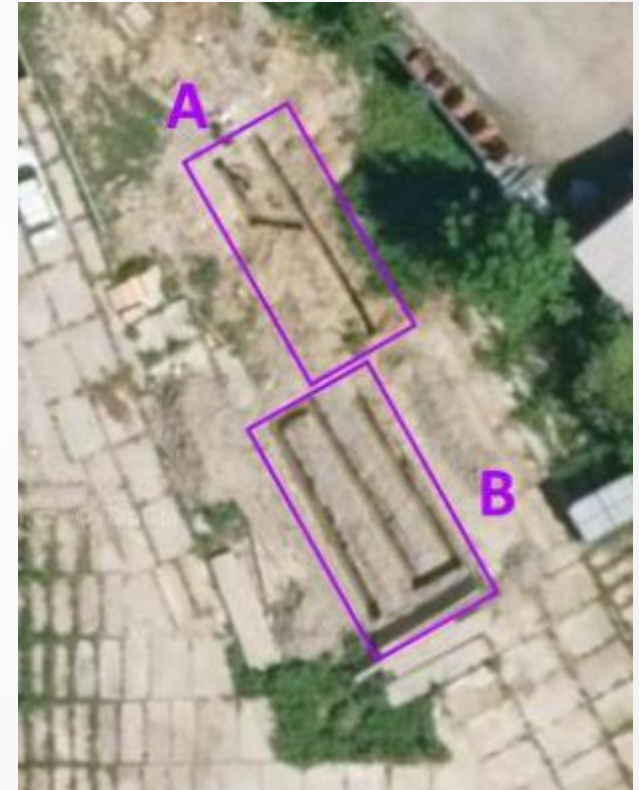
Bez tepelné izolace bylo jímáno téměř 80 % tepla z okolní atmosféry.

Po izolaci zisk klesl na 600 W (16 W/m^2), ale až 90 % tepla pochází z masivu.



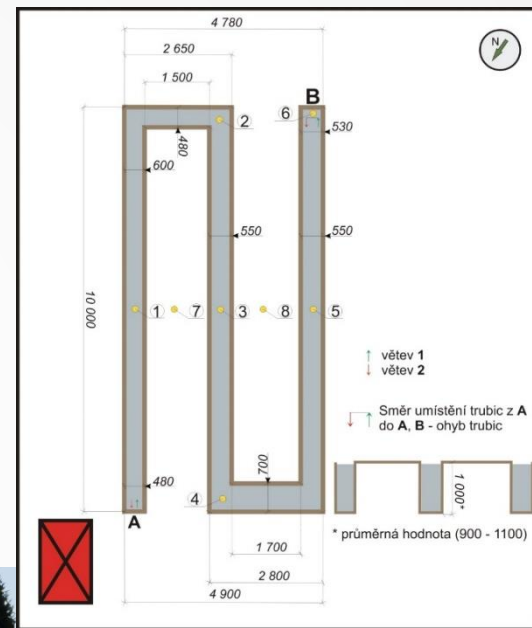
Vliv dlouhodobého provozu tepelných čerpadel na udržitelnost energetického potenciálu horninového prostředí (2016–2019)

- Teze projektu
 - zlepšení vodivosti injektážní směsi vrtů pro TČ
 - „vychlazení“ či „vymražení“ pozemku
 - regenerace tepla v horninovém prostředí
- V Jihlavě zřízen experimentální polygon s vertikálním (A) a horizontálním (B) tepelným výměníkem
 - Dva jímací vrtý
 - Horizontální výměník v hloubce 1 m
- Meteostanice + 60 monitorovacích teploměrů + 8 tenzometrů
- Stanovení tep. vodivosti
 - půdního horizont $1,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ s kapacitou $750 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.
 - hornina $2,9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ s kapacitou $957 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.



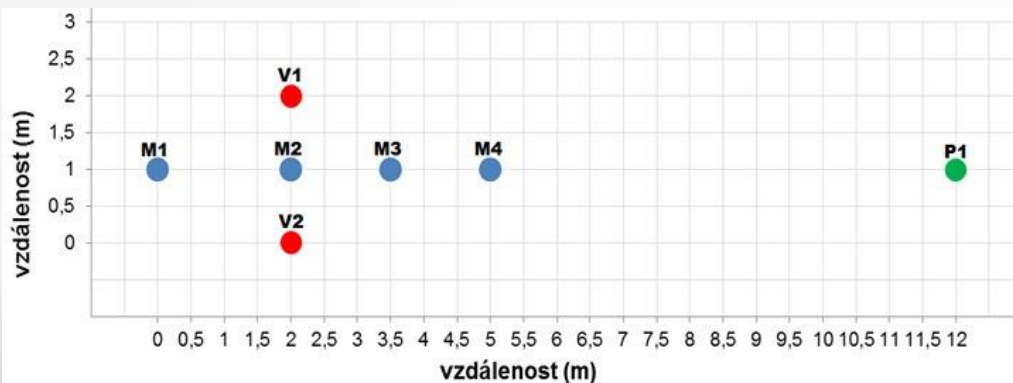
Horizontální výměník

- Horizontální výměník na ploše 5×10 m
- Výkop široký 0,5 m a hluboký 1 m.
- 24 monitorovacích teploměrů v hloubkách 10, 50, 100, 110 a 150 cm
- cca 70 m potrubí



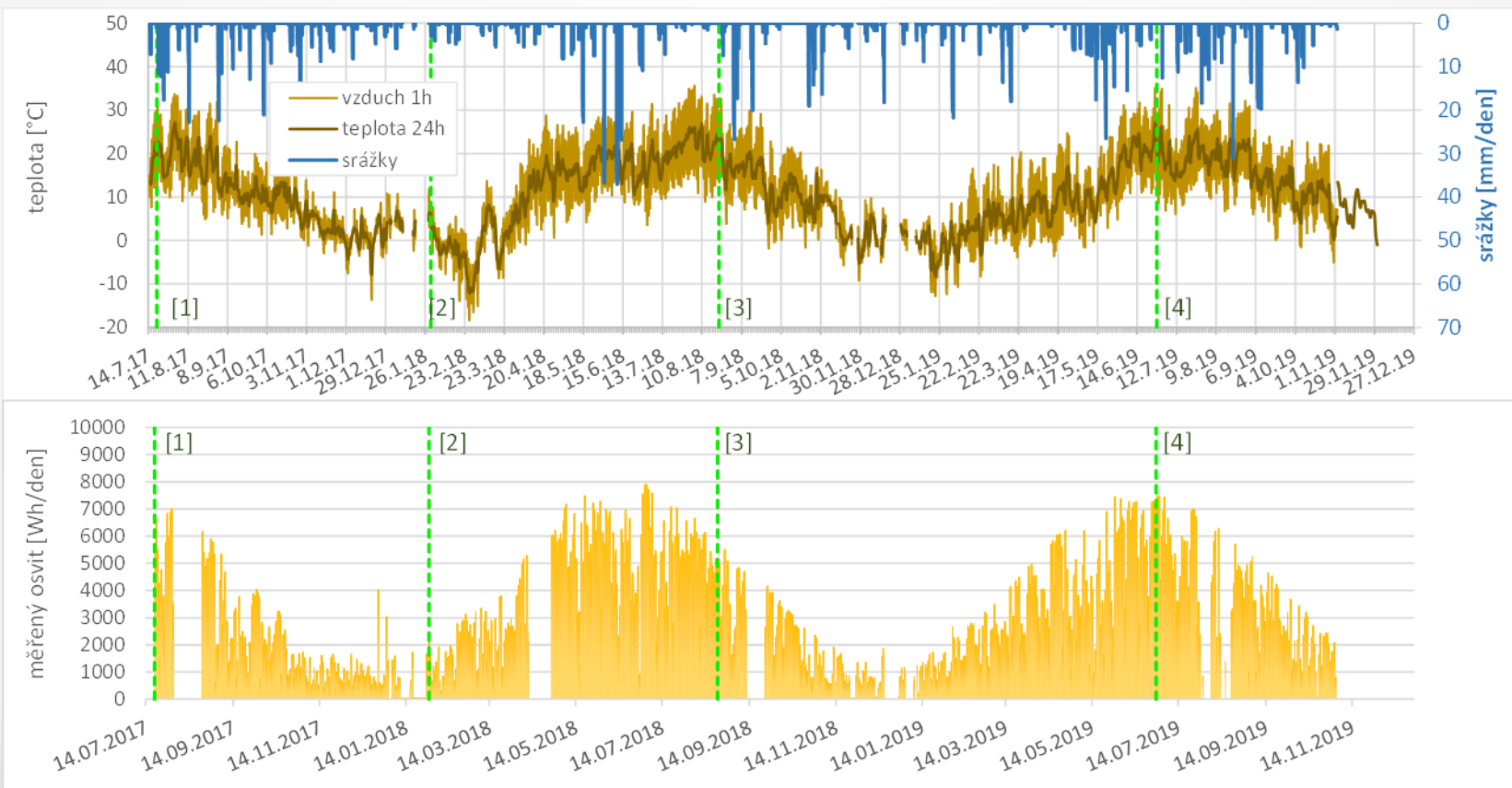
Vertikální výměník

- Dva jímací vrty (V1 a V2) s hloubkou 15 m, každý osazen 2x jímací U-smyčkou
- Vrt V1 injektován běžnou směsí a vrt V2 nově vyvinutou „TVH“
- Jímací vrty osazený tenzometry a teploměry v hloubkách 5, 7, a 14 m
- Monitorovací vrty (M1-M4, P1) osazený teploměry v hloubkách 5, 7, 9, 12, 14 a 16 m.

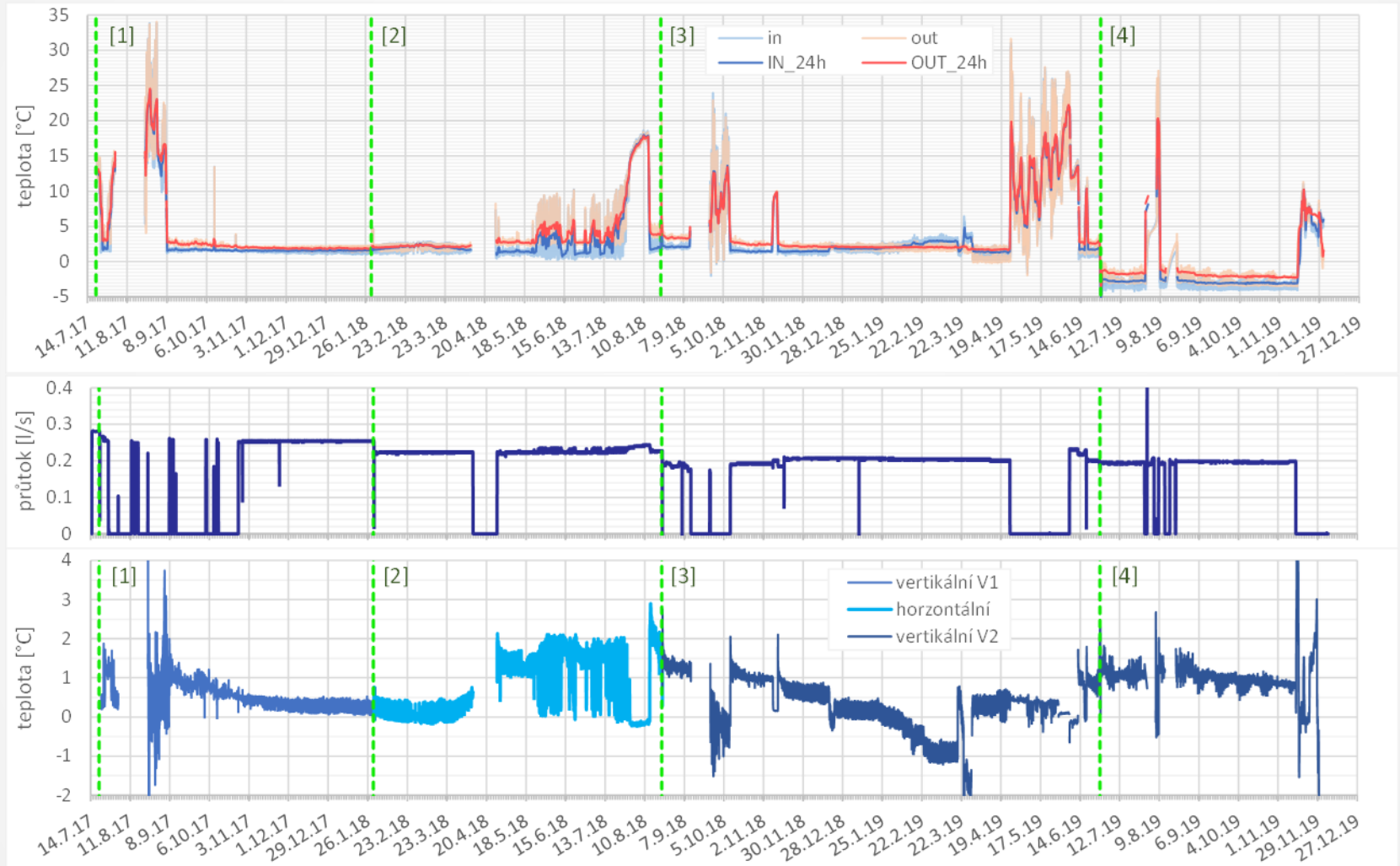


Provoz experimentů

- [1] spuštění prvního experimentu jímání z vrtu V1 (20.7.2017);
- [2] okamžik přepnutí jímání z vrtu V1 na horizontální výměník (30.1.2018);
- [3] je označeno první spuštění experimentu na vrtu V2 (22.8.2018);
- [4] odpovídá snížení teploty teplotnosné kapaliny na -3°C (27.6.2019).

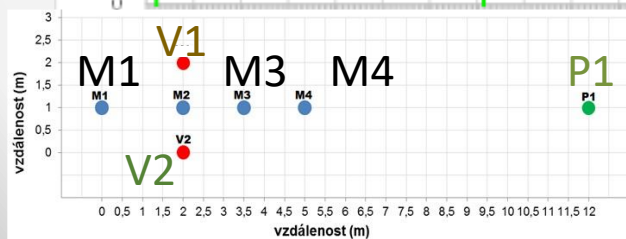
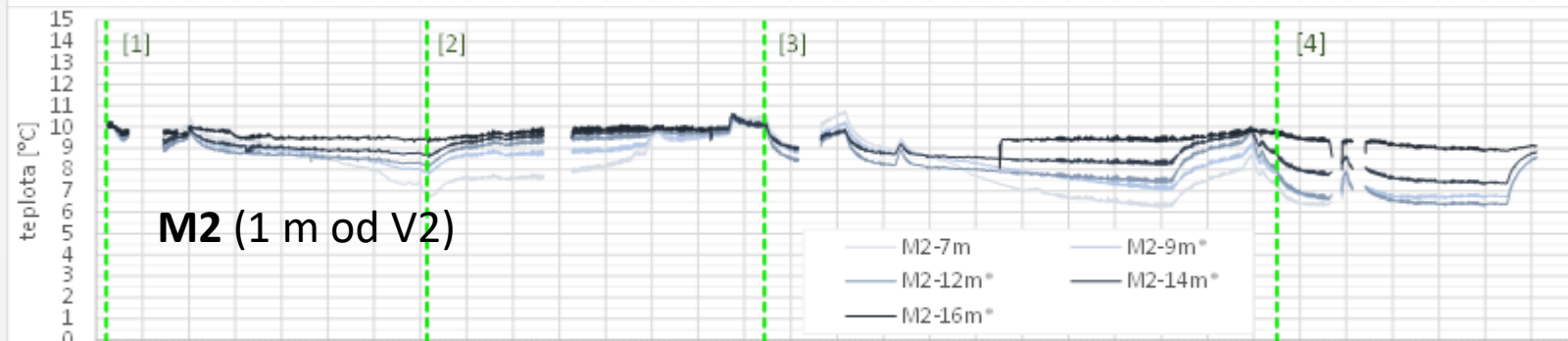
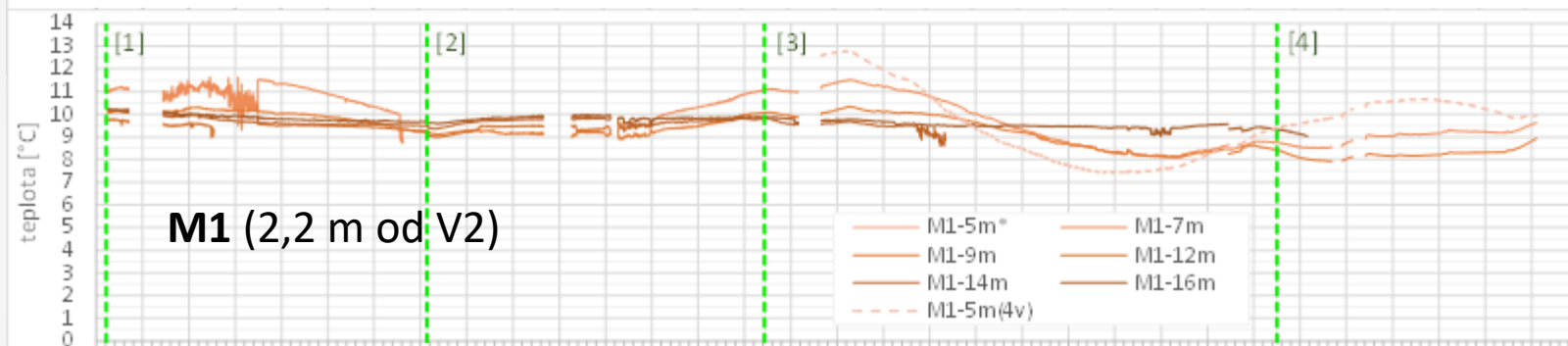
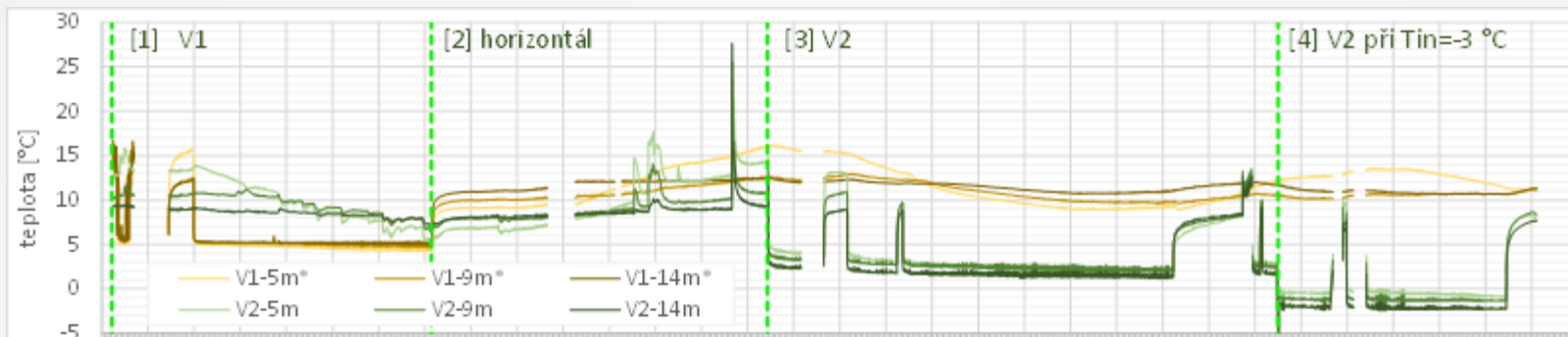


Provoz experimentů

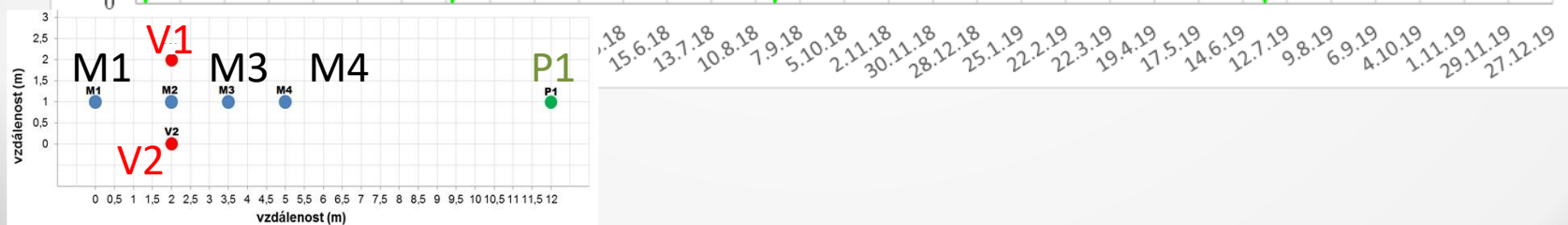
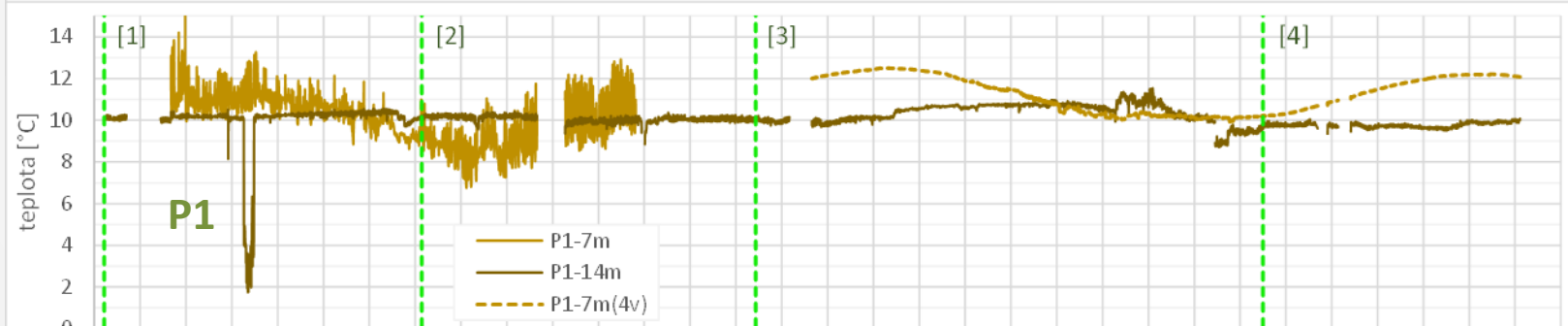
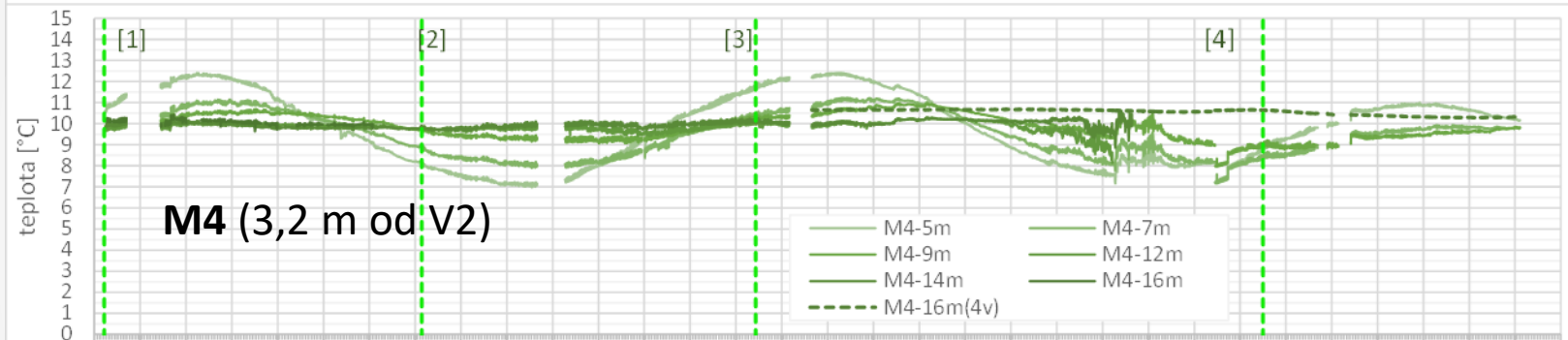
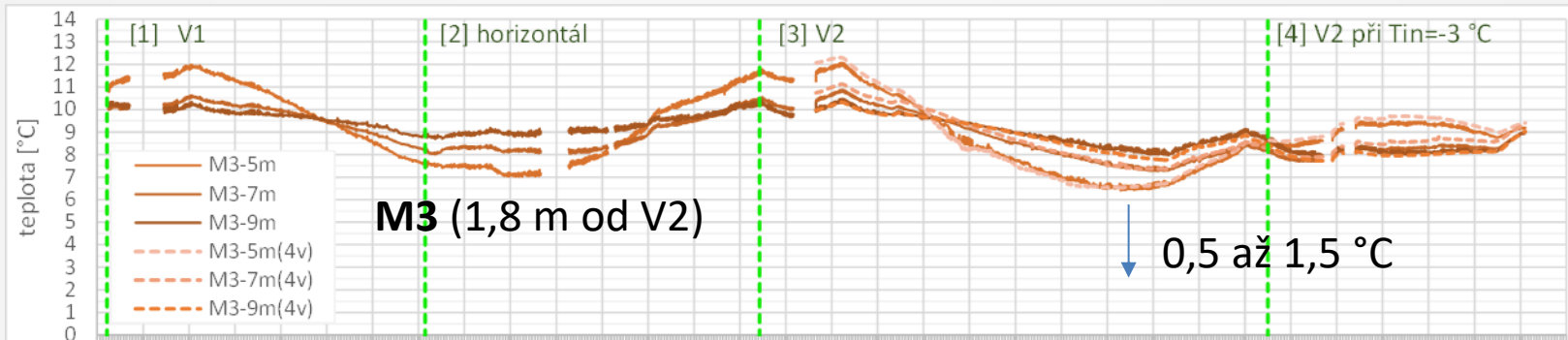


vrt V1

vrt V2



18.12.18
15.6.18
13.7.18
10.8.18
7.9.18
5.10.18
2.11.18
30.11.18
28.12.18
25.1.19
22.2.19
22.3.19
19.4.19
17.5.19
14.6.19
12.7.19
9.8.19
6.9.19
4.10.19
1.11.19
29.11.19
27.12.19



Modelování transportu tepla

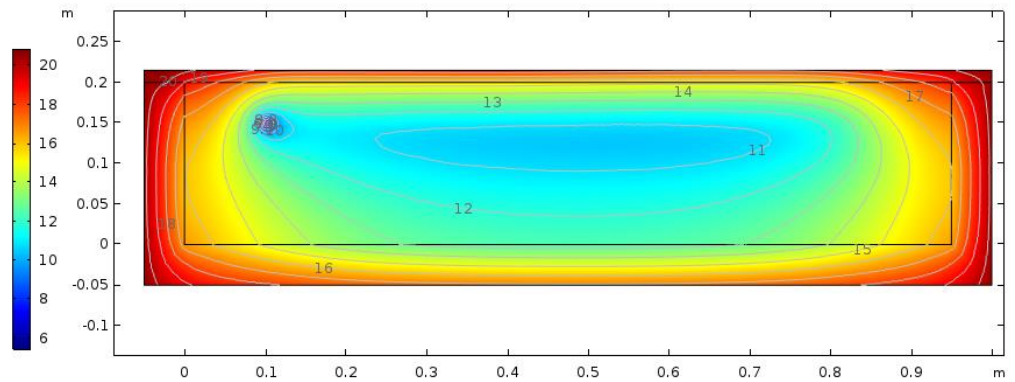
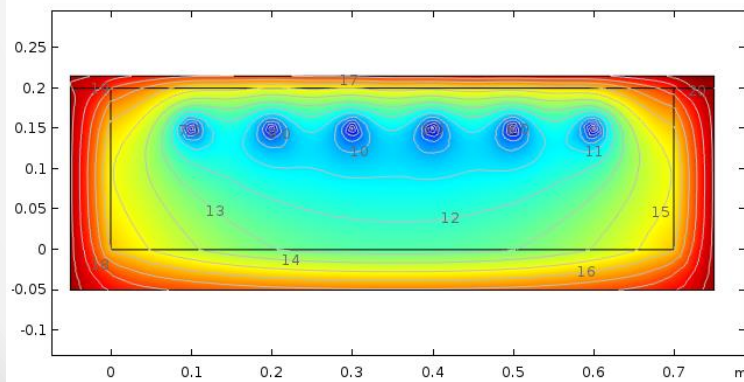
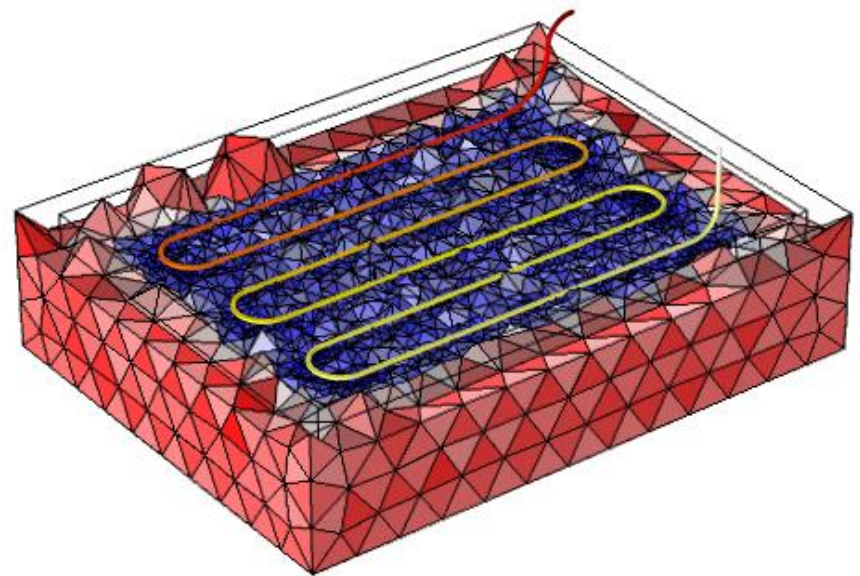
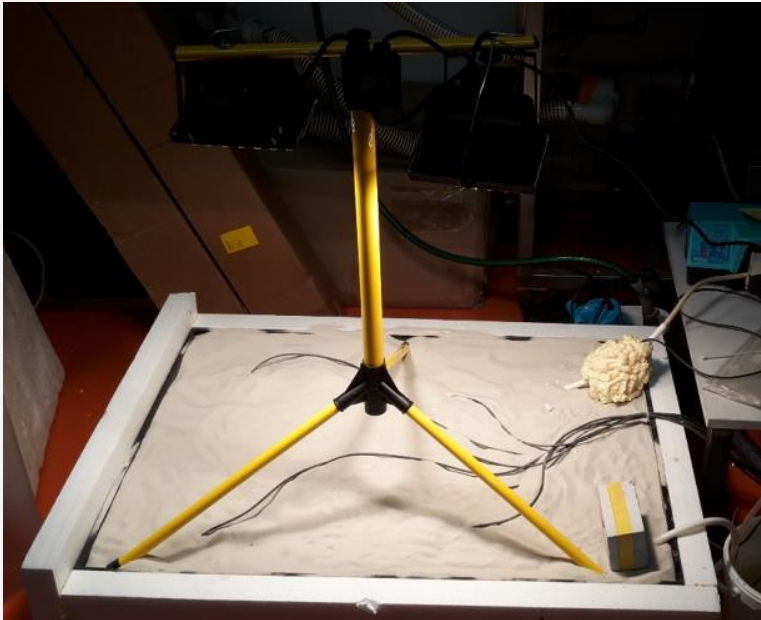
- Použít sw. Comsol Multiphysics
 - moduly Heat Transfer a Pipe flow
- Založený na metodě konečných prvků
- Kombinace vedení tepla v prostoru (3D) a proudění a unášení tepla v trubicích v liniích (1D)
- Využití při návrhu experimentů i jejich vyhodnocení

COMSOL
MULTIPHYSICS®



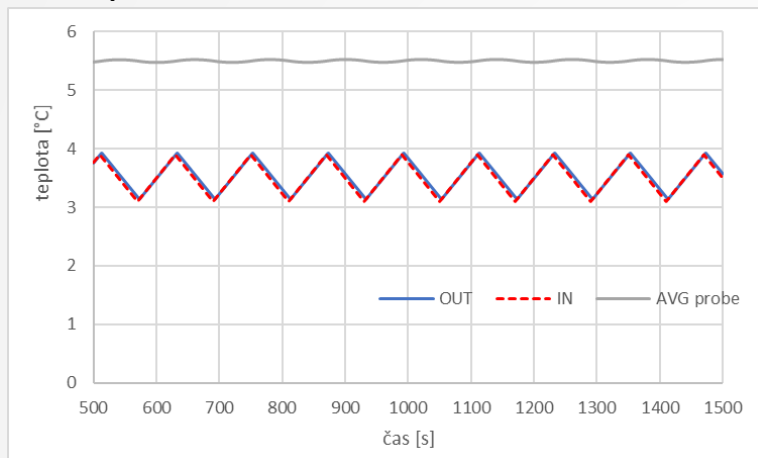
Laboratorní experiment

již při laboratorním experimentu nastal problém s měřením teploty

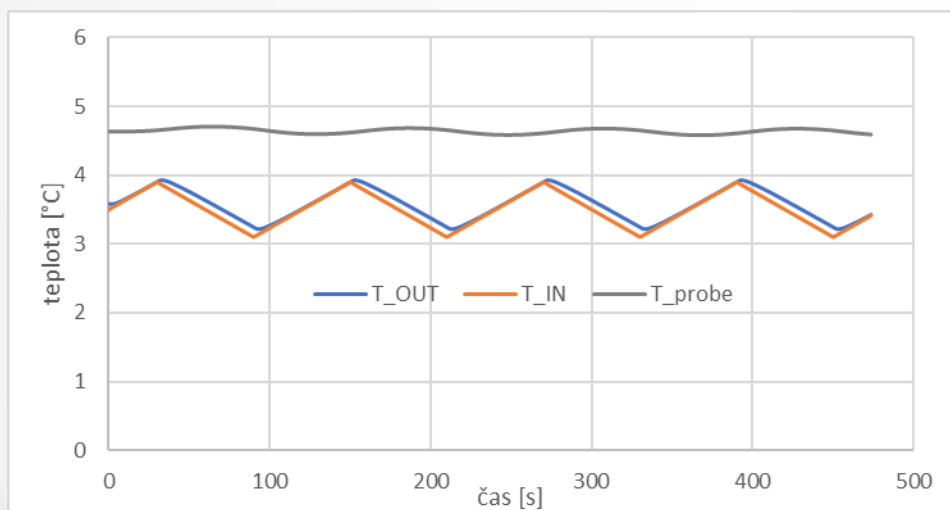
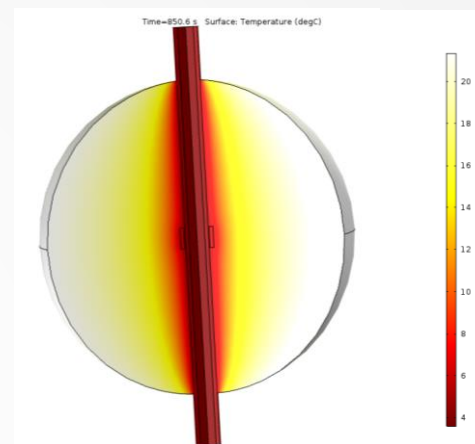


Problematika měření teploty

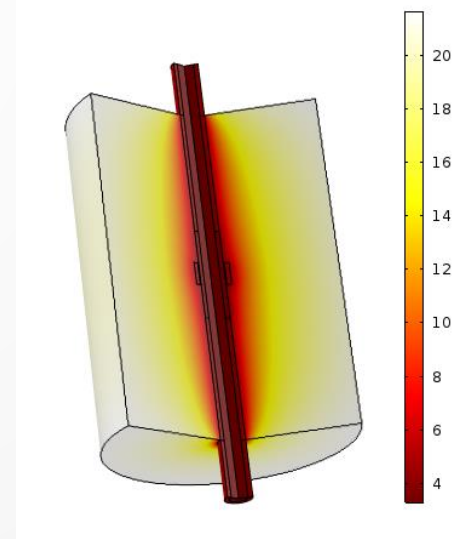
vstup: $3,5 \pm 0,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$



→ 5.5 $^{\circ}\text{C}$

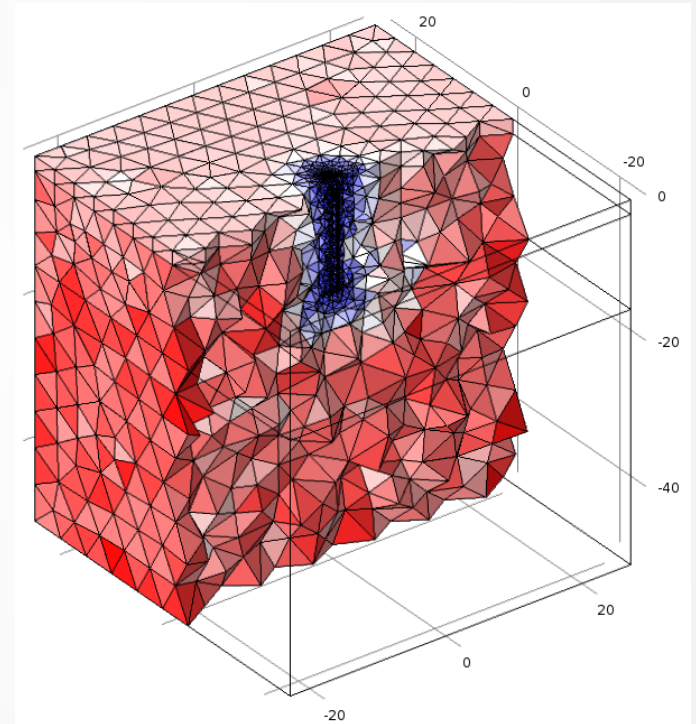


→ 4.6 $^{\circ}\text{C}$



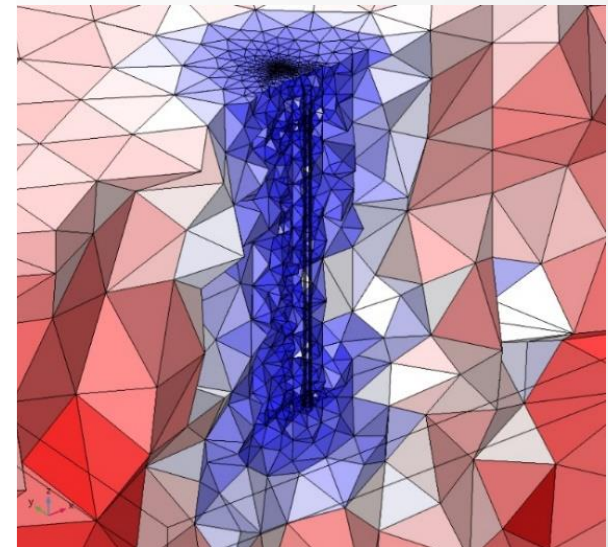
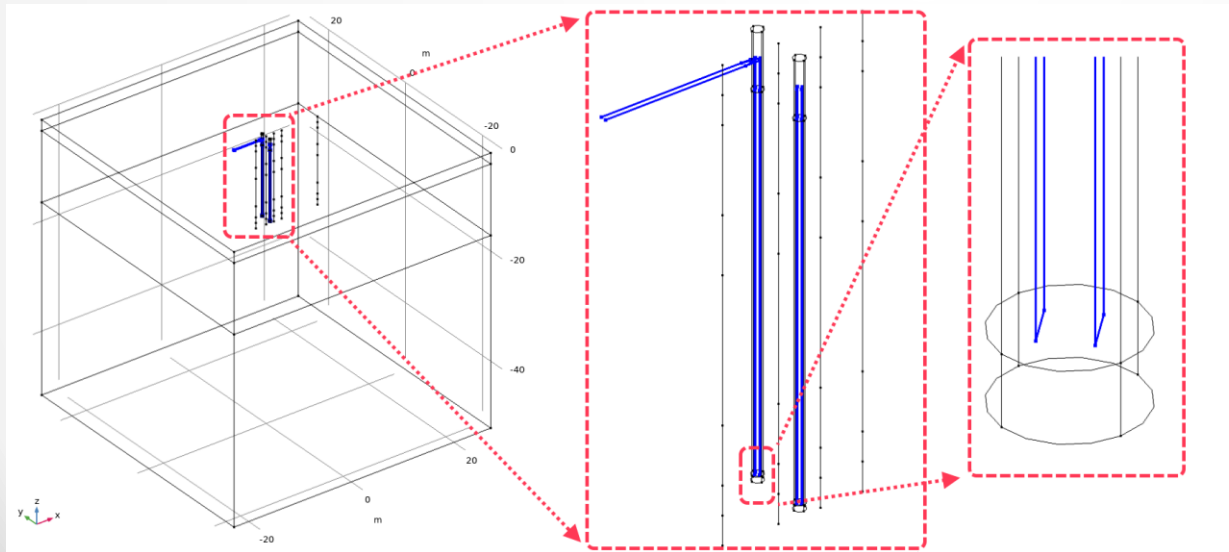
Model jímacích vrtů

- Výpočetní doména krychle 50 m
- Na bázi modelu zadán zemský tepelný tok (50 mW/m^2)
- Na povrchu modelu zadány okrajové podmínky
 - Newtonovského ochlazování s měřenými teplotami vzduchu
 - Sluneční záření měřené meteostanicí
 - Vyzařování do prostoru
- Vertikální stěny izolované



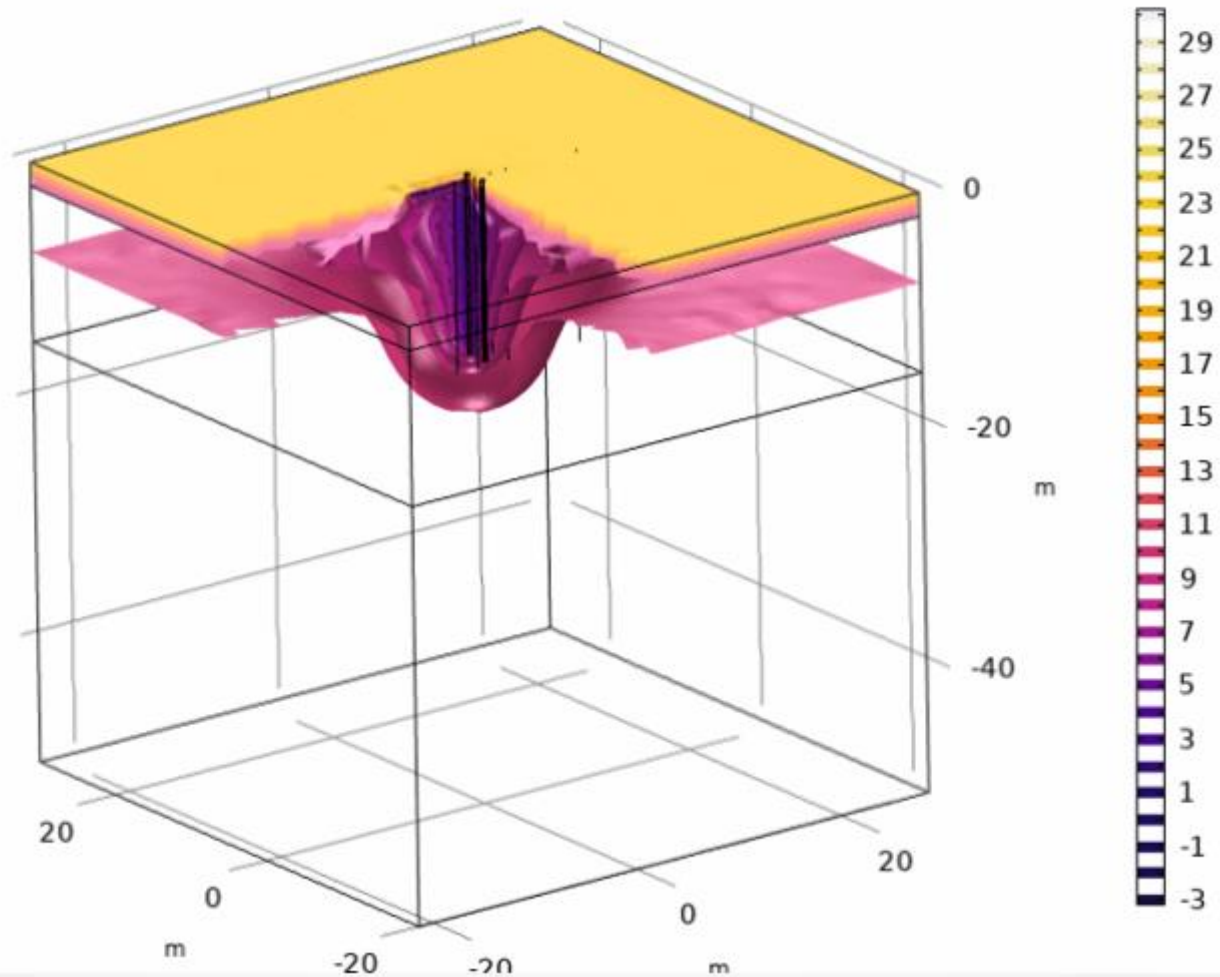
Model jímacích vrtů

- Průtok výměníkem 0,2 l/s (glykol)
- Teplota na vstupu 2°C, při [4] -3°C
- Model kalibrován na dva transientní stavy (před jímáním a během jímání)
- Extrapolace na 30 let, jímání tepla během topné sezóny

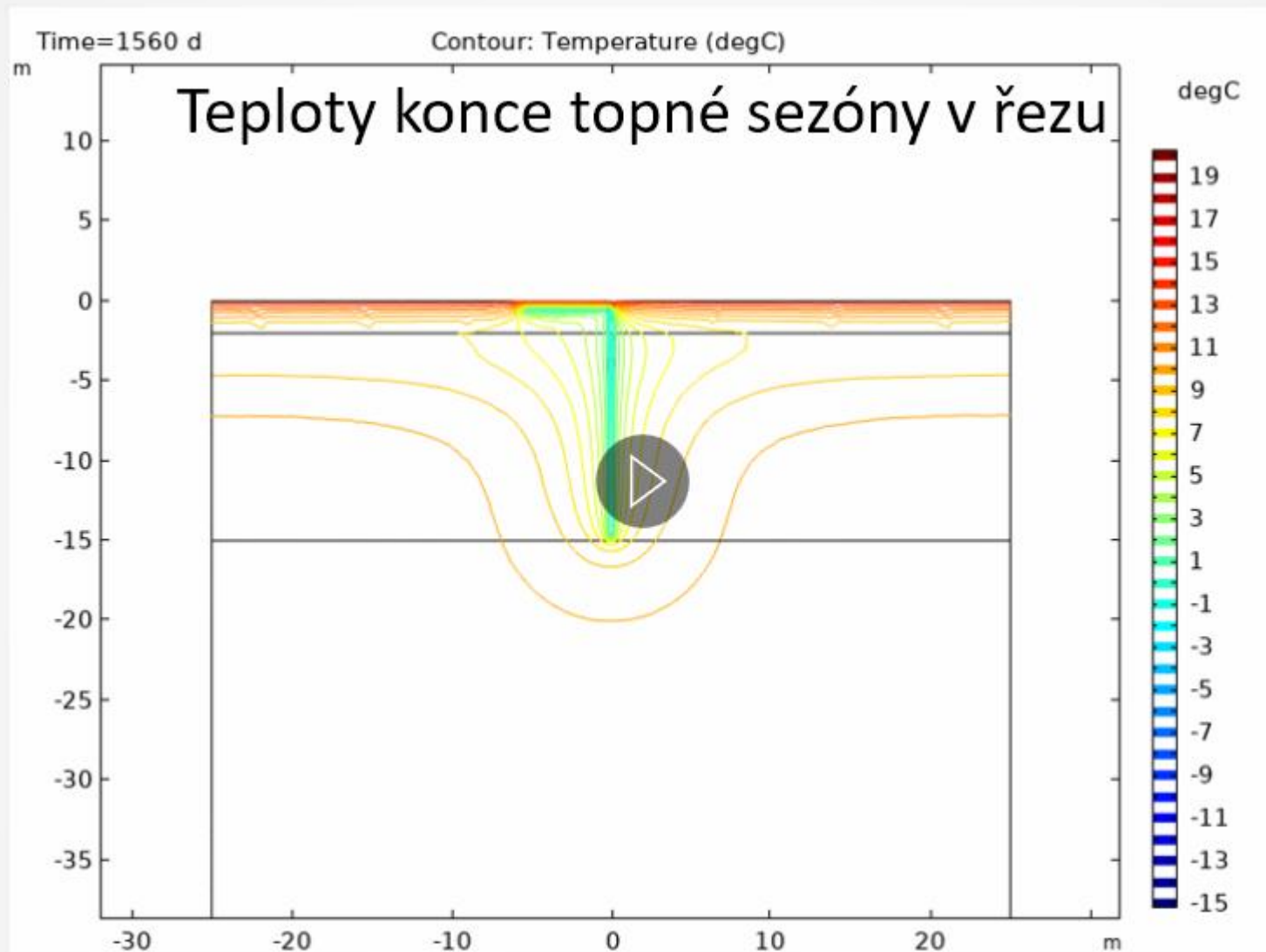


Time=851 d

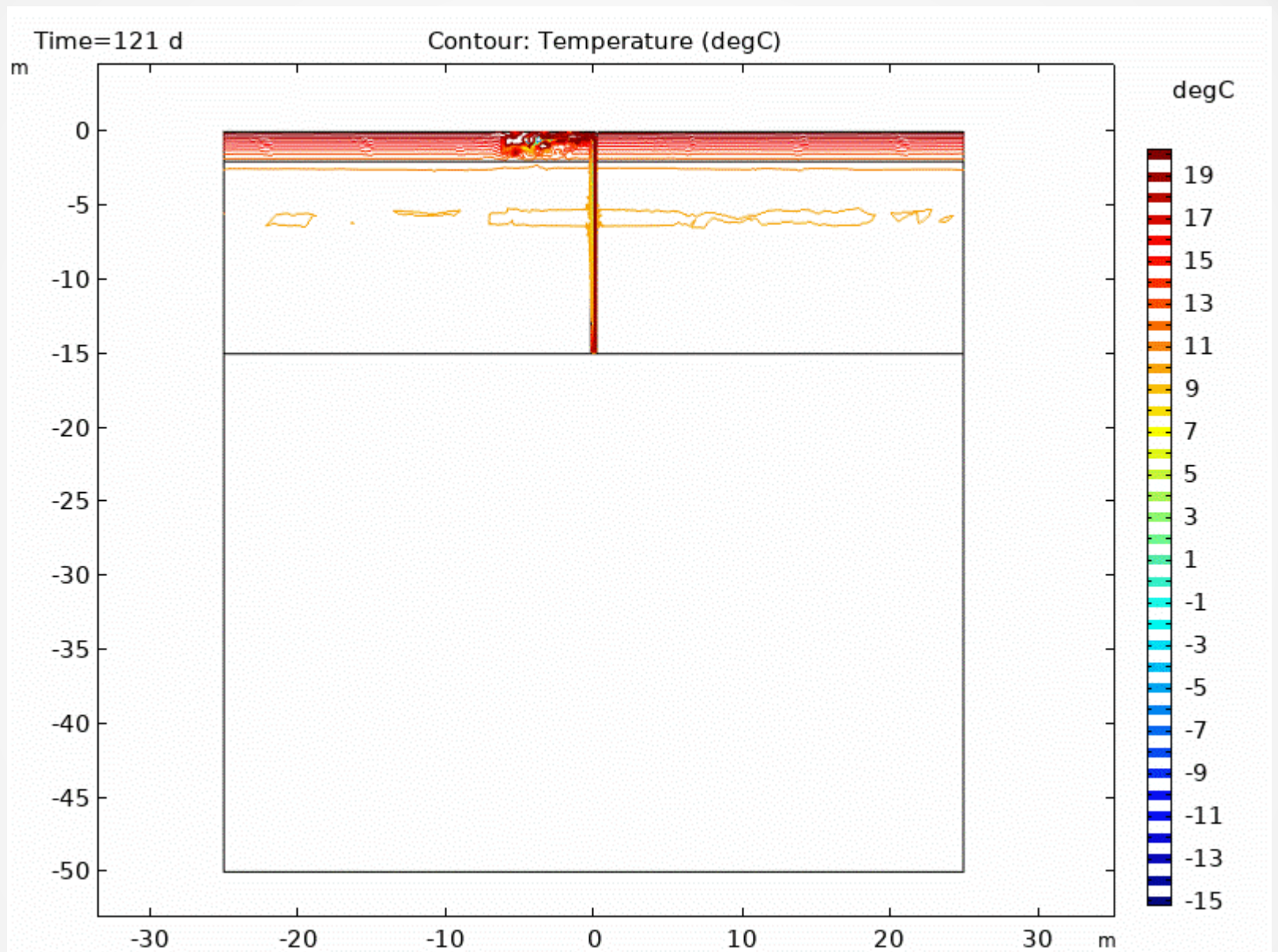
Isosurface: Temperature (degC) Line: Temperature (degC)



animace: <https://www.youtube.com/watch?v=-WIXS8J0R8>



kvazi ustálení cca po 6 letech, ale dochází k ochlazování spodních partií masivu



animace: <https://www.youtube.com/watch?v=3Gn-5BAT748>

Závěr: kdy modelovat?

- Návrh komplexních systémů
- Pohled „dovnitř“ (pod zem)
- „Co by kdyby“ scénáře (variace parametrů)
- Extrapolace prostorová i časová

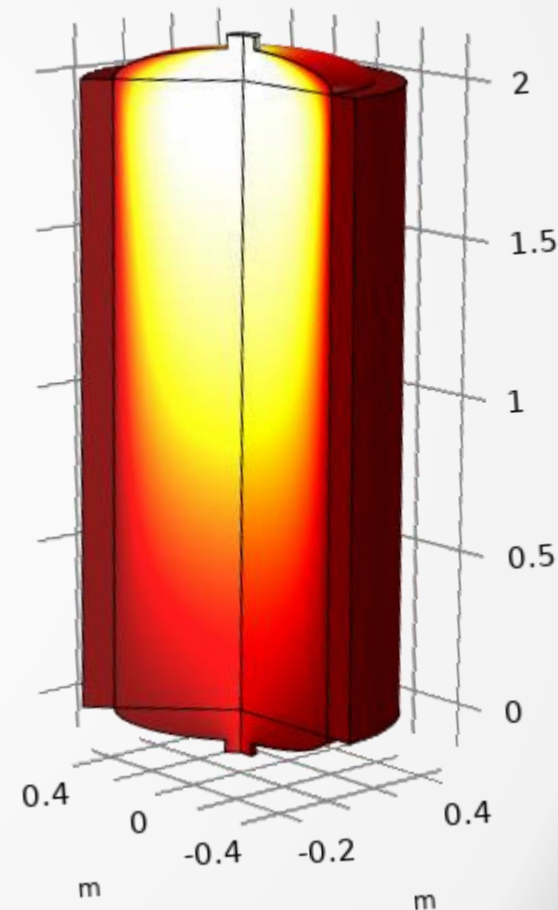
představení nového projektu:

Horninová akumulace sezónního tepla



Nový aktuálně běžící projekt (2024 – 2028)

- ukládání tepla do horniny při 400-650°C
- do kaverny s vodou při 120°C
- účastníci projektu
 - Podzemní laboratoř Josef (ČVUT)
 - PROGEO, s.r.o.
 - UCEEB (ČVUT)
 - SG Geotechnika a.s.
 - Watrad, a.s.





Děkuji za pozornost