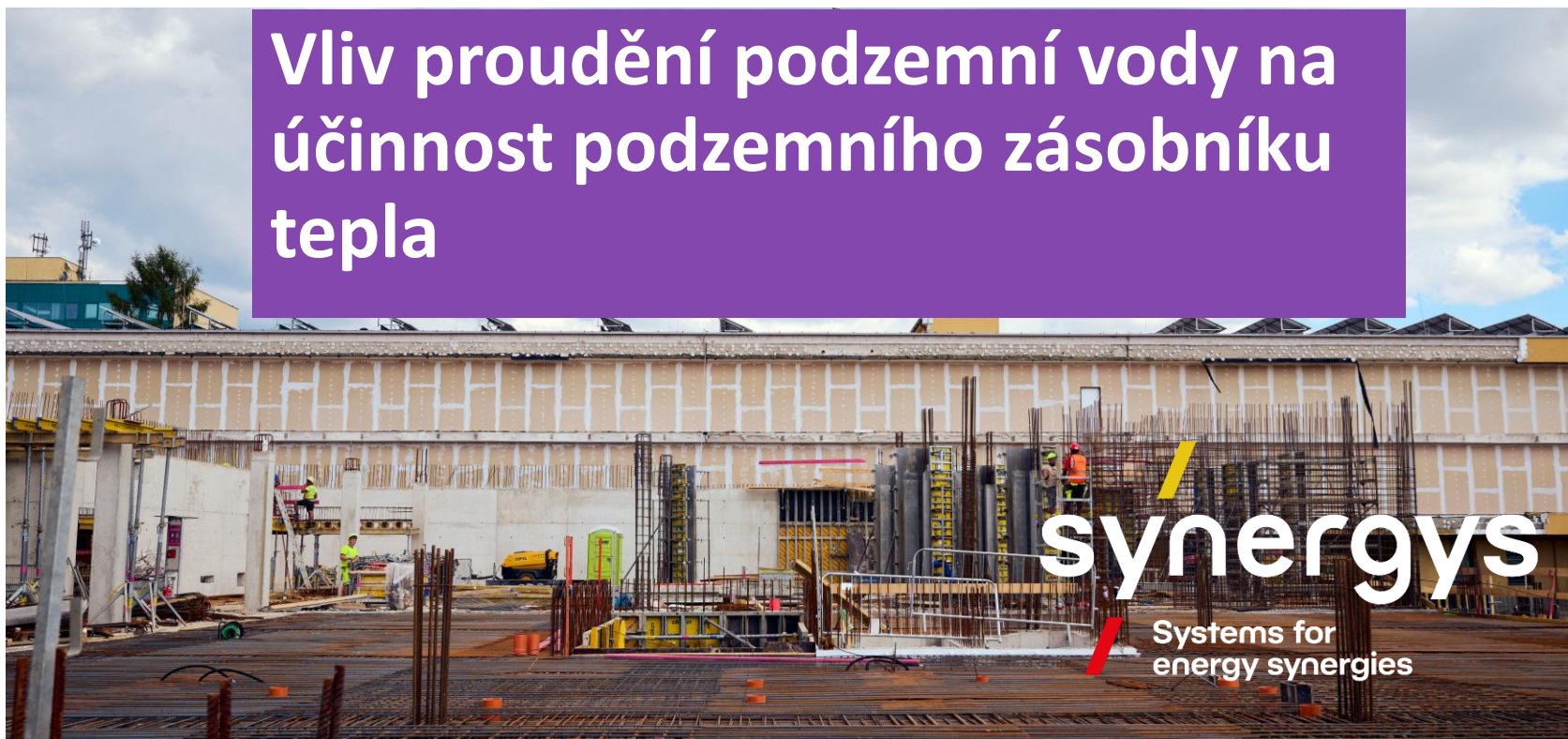


Vliv proudění podzemní vody na účinnost podzemního zásobníku tepla



Funded by
the European Union

Ministerstvo životního prostředí

Nad'á Rapantová (VŠB-TUO, ČGS)
Martin Lanzerdörfer (UK, PřF)
Pavel Štrof (VŠB-TUO)

Obsah

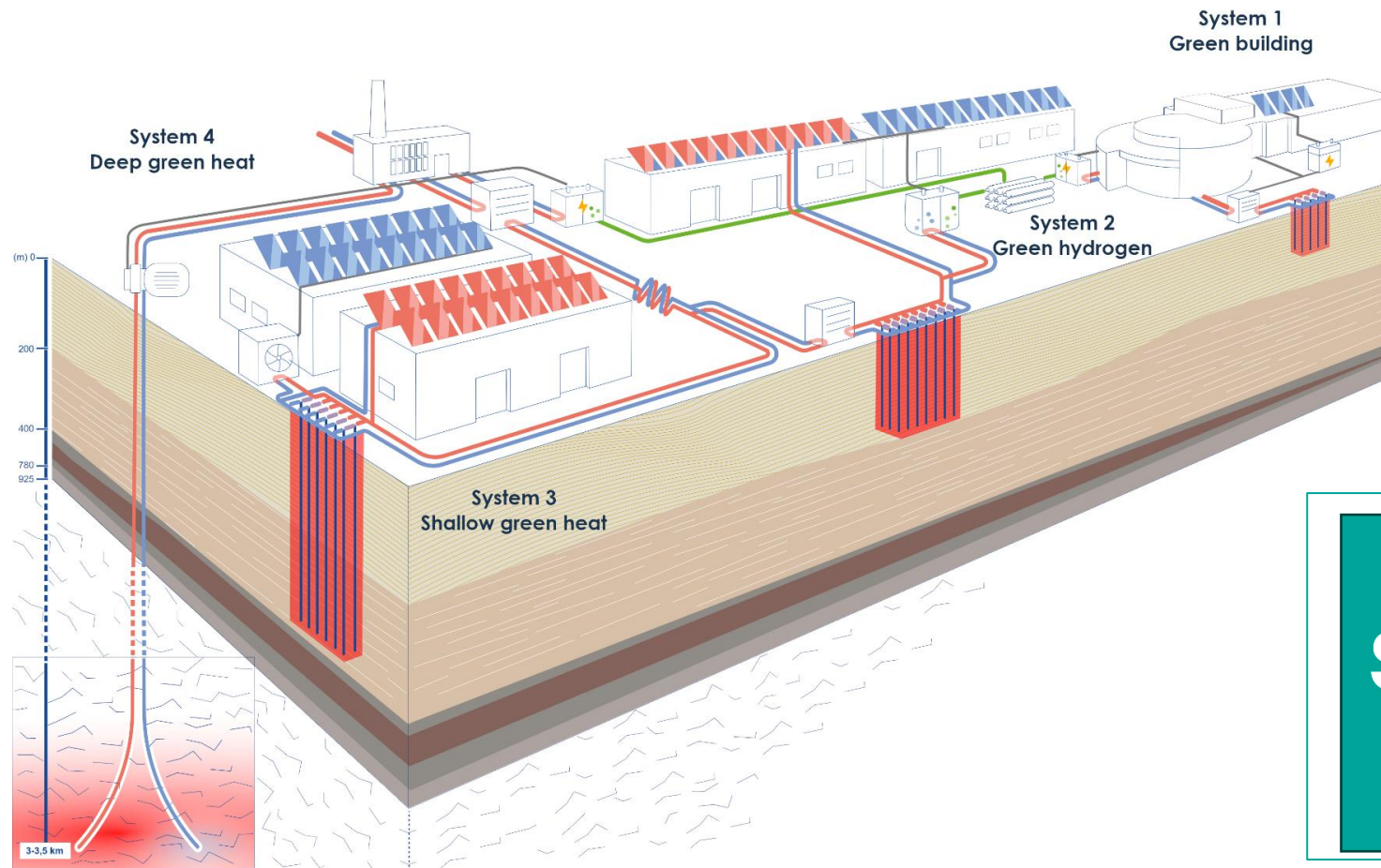
- Úvod
- Synergys projekt
- Zásobníky tepelné energie - typy, parametry
- Případová studie projektu Synergys - Litoměřice



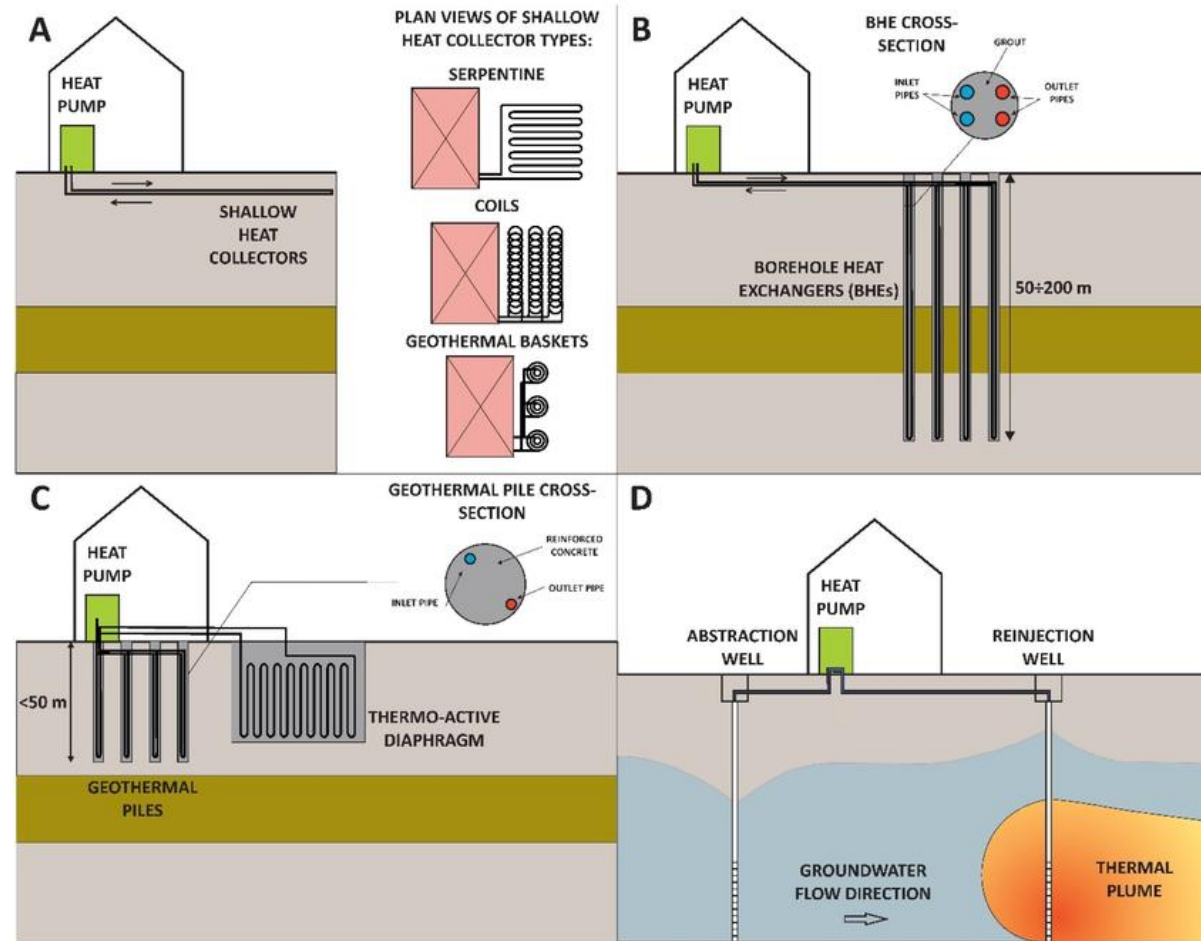
Ministerstvo životního prostředí

SYNERGYS energetická transice prostřednictvím integrovaných technologií obnovitelných zdrojů

SYNERGYS
system



Nízkopotenciální geotermální zdroje



[Zdroj: Classification-of-ground-source-heat-pump-GSHP-systems-closed-loop-horizontal-heat.tif \(850×668\)](#)

Zásobníky tepelné energie

Přispívají k účinnému hospodaření s tepelnou energií vždy, když dojde k nerovnováze mezi výrobou a spotřebou energie z hlediska času, teploty, výkonu nebo místa. Důležité tam, kde je silně sezónní klima.

Tepelnou energii lze skladovat jako změnu vnitřní energie materiálu citlivého na teplo (skladování tepelné energie ve vzduchu, vodě a v podzemí), latentní teplo (u materiálů s fázovou změnou), termochemické (chemické reakce a sorpční systémy) teplo nebo jejich kombinací.

Sezónní vs. krátkodobá úložiště

K dispozici je řada zdrojů tepelné energie, například teplo z kombinované výroby tepla a elektřiny (kogenerační jednotky), teplo vyrobené z obnovitelných zdrojů energie, které převyšuje poptávku v síti a odpadní teplo z průmyslových procesů.

Vysokoteplotní a okolní teplotní úložiště

Zásobníky tepelné energie

Akumulační média - horninové prostředí - přístupné prostřednictvím vrtných tepelných výměníků (BHE) – vrtané úložiště tepelné energie (**Borehole Thermal Energy Storage BTES**), hluboké vodonosné vrstvy omezené nepropustným okolím - akviferové úložiště tepelné energie (**Aquifer Thermal Energy Storage ATES**) a inženýrské stavby - **shora izolované mělké vystrojené rezervoáry** vyplněné štěrkem a vodou, zásobníky tepelné energie typu akumulární nádrže, **kavernózní úložiště tepelné energie (např. důlní vody – Mine Thermal Energy Storage MTES)**.

Množství uloženého tepla závisí na měrné tepelné kapacitě média, změně teploty a objemu akumulárního materiálu - nejúčinnější kompaktní uspořádání.

Účinnost definovaná jako poměr odebraného a vloženého tepla

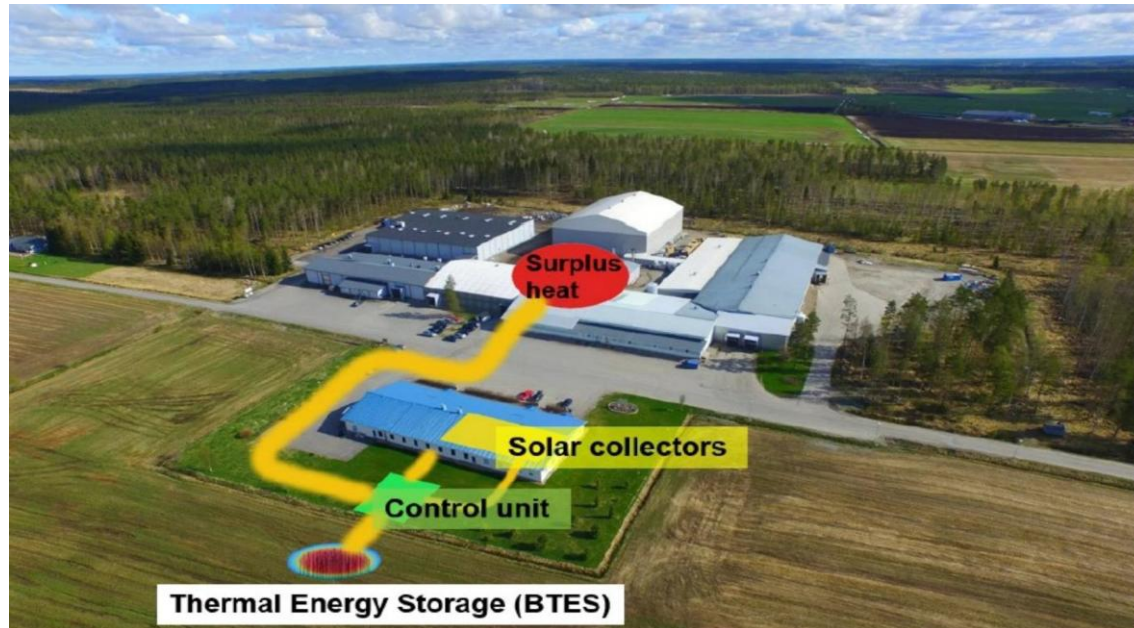
Bilance tepla

$E_{\text{vložené}} + E_{\text{odebrané}} = E_{\text{uložené}} + E_{\text{ztráty, které je třeba minimalizovat.}}$

Zásobníky typu Borehole Thermal Energy Storage BTES

- Vrtané výměníky pro ukládání tepelné energie (BTES) představují sezónní ukládání tepelné energie na dlouhá období - až několik měsíců. Ukládání tepla nebo chladu. Schopnost nabíjet teplo v létě a uvolňovat teplo v zimě je pro tyto zásobníky tepla žádoucím účelem.
- Jednou z hlavních nevýhod podzemních sezónních zásobníků, jako je BTES, jsou tepelné ztráty do okolí.
- Lokality vhodné pro instalaci BTES musí mít vhodné geologické vlastnosti. Vysoká měrná tepelná kapacita. Minimalizace proudění podzemní vody - nejlépe izolátor - aquitard, aquiclude.
- Nejnovější studie prokázaly, že ekonomicky efektivní instalace BTES by měly mít poměrně velké objemy (od 20 000 m³). Velký objem relativně snižuje tepelné ztráty.
- Instalace vyžadují provedení mělkých vrtů o hloubce 30 až 200 m s odstupem 3 až 4 m. Hloubka vrtů v posledních instalacích dosahuje až 200 m. Válcový tvar zásobníku snižuje ztráty.

Zásobníky typu Borehole Thermal Energy Storage BTES

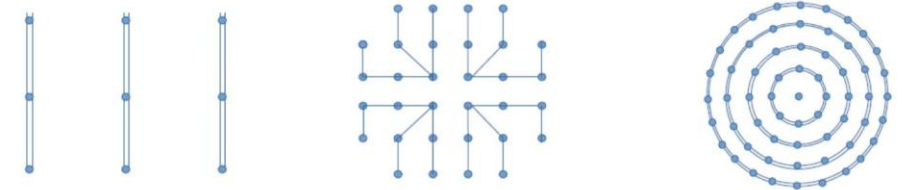


Different generations of BTES systems Parameter comparison

	1st gen 90's	2nd gen 2005	3rd gen 2016
Example installation	SOK Sipoo	Drake Landing	Heliostorage ®
Borehole depth	300 m	35 m	35-70 m
Borehole spacing	20 m	2,5 m	2-5 m
Borehole connection	Parallell matrix	Serial radial	Parallell circle ©
Auxilliary equipment	Heat pump	Large water tank	Controller
Max temperature	20 °C	85 °C	85 °C
CAPEX	High	3 €/kWh	1 €/kWh
OPEX	50€/MWh	10€/MWh	3 €/MWh

CapEx (Capital expenses): funds used to acquire physical assets such as technology.

OpEx (Operating expenses): an ongoing cost for running a system.



Srovnání různých generací BTES (Borehole Thermal Energy Storage) a geotermálních tepelných čerpadel
Rauli Lautkankare, Timo Sivula and Birgitta Martinkauppi

Parametry určující účinnost BTES

1/ Přírodní vlastnosti lokality - tepelné parametry horninového prostředí, proudění podzemní vody, vlhkost.

Nenasycená zóna - lepší účinnost BTES - nižší tepelná vodivost

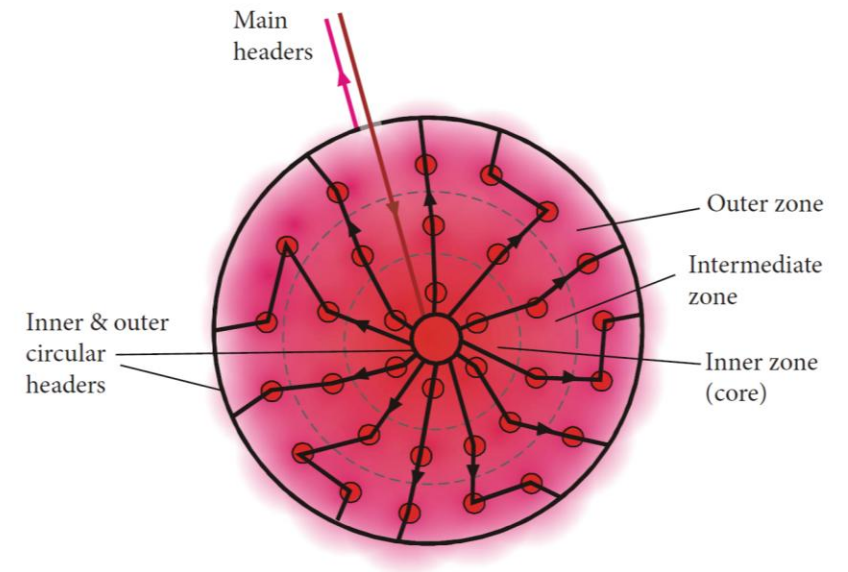
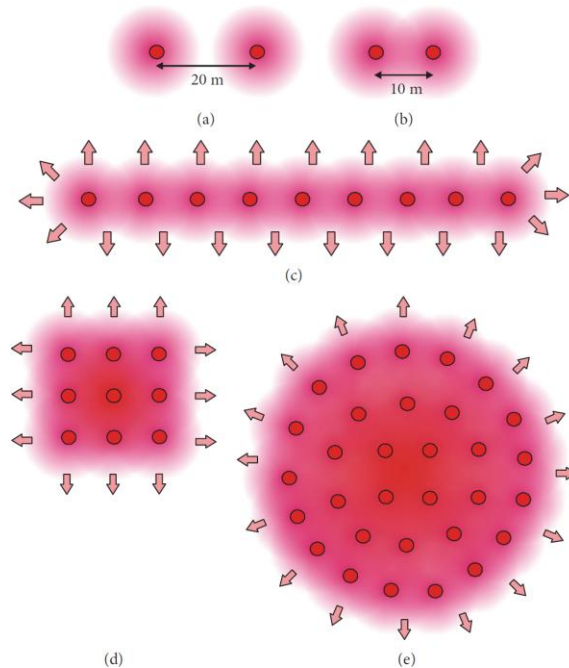
2/ Parametry konstrukce BTES - hloubka BHE, uspořádání, průměr trubek, tloušťka stěny trubek, vzdálenost mezi trubkami, tepelná vodivost injektáže.

3/ Provozní parametry BTES - typ proudění (laminární vs. turbulentní), vstupní teploty kapalin, místní klimatické podmínky.

Proudění podzemní vody a kolísání teploty okolního vzduchu snižují efektivitu - důležitá izolace shora

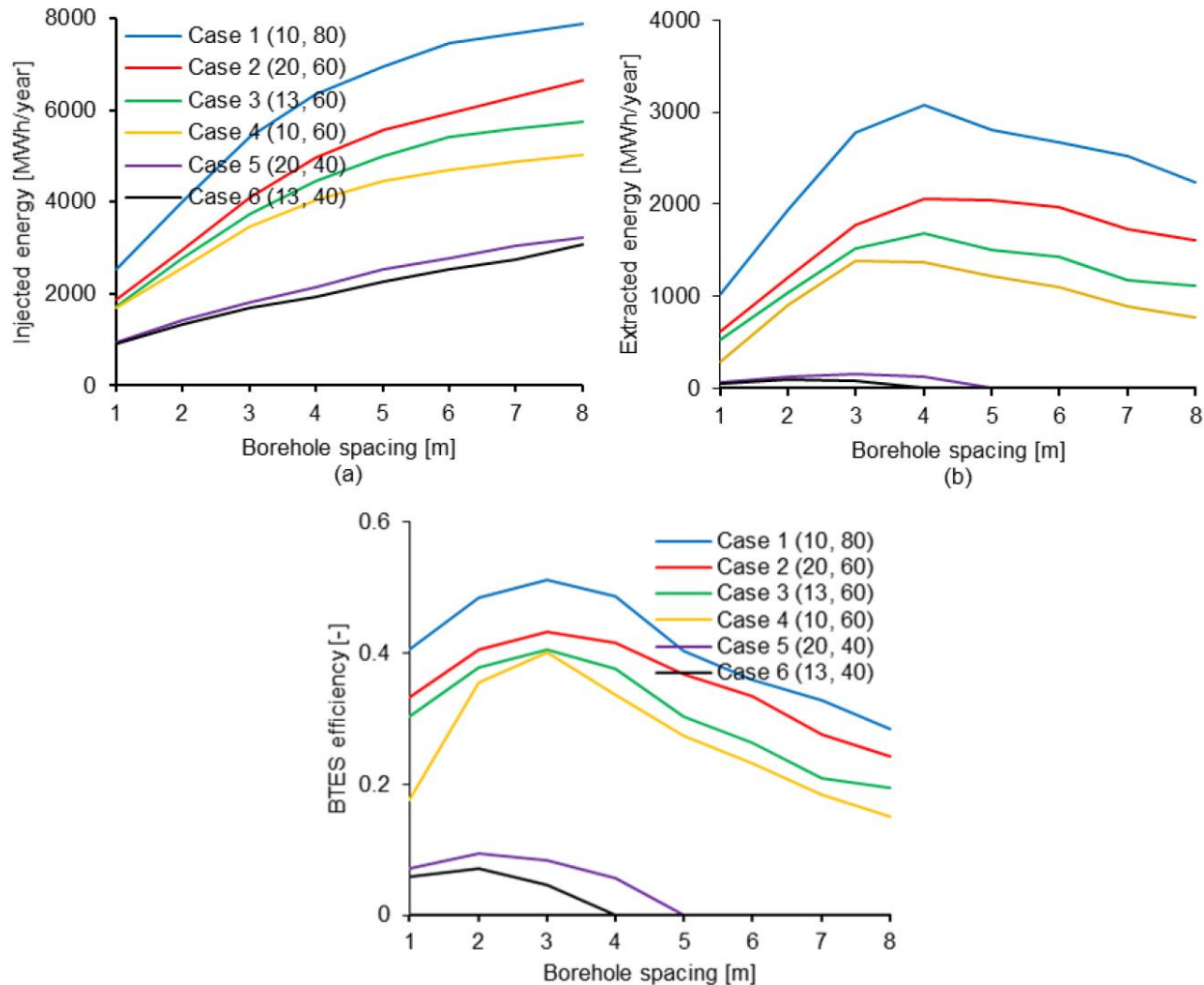
Parametry určující účinnost BTES

Kompaktní design – optimalizace poměru BTES povrchu k objemu



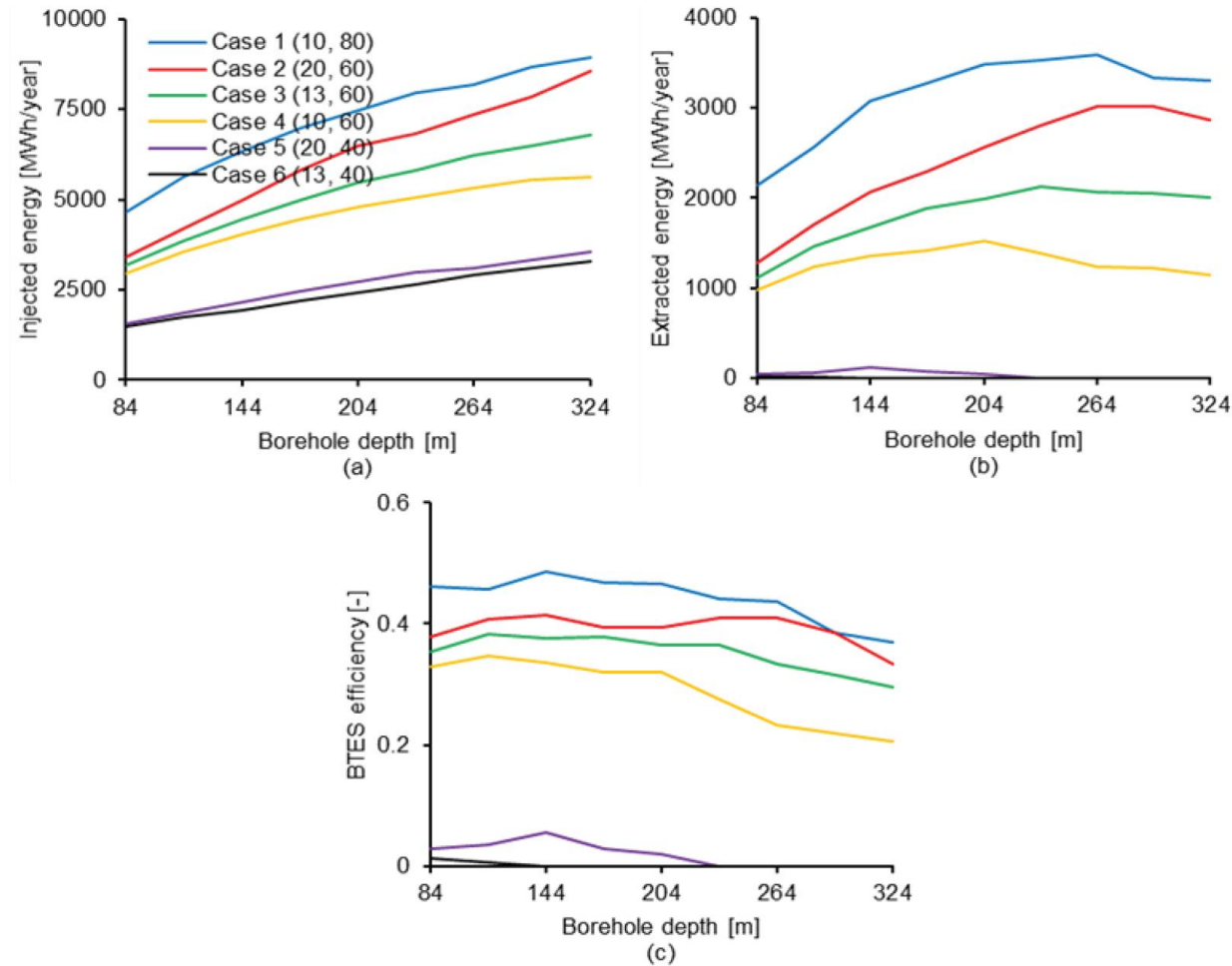
Skarphagen et al. 2019 Design Consideration for BTES

Parametry určující účinnost BTES – vzdálenost vrtů



Nilsson Emil, Ph.D.
thesis, Linköping
university, Sweden,
2020

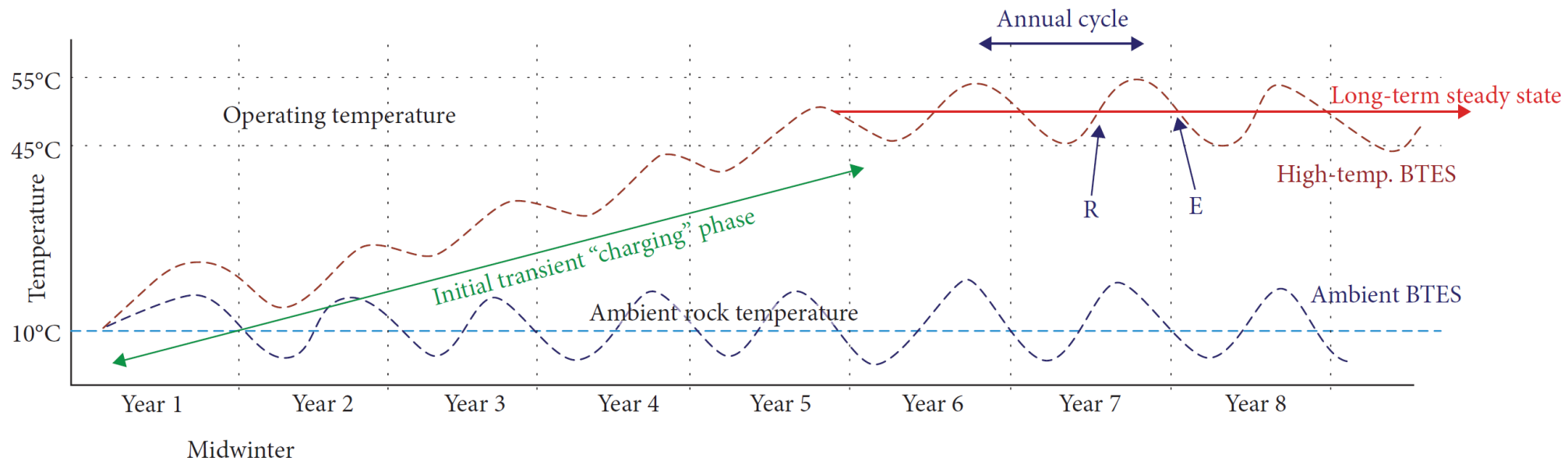
Parametry určující účinnost BTES – hloubka vrtů



Nilsson Emil, Ph.D.
thesis, Linköping
university, Sweden,
2020

Parametry určující účinnost BTES – provozní

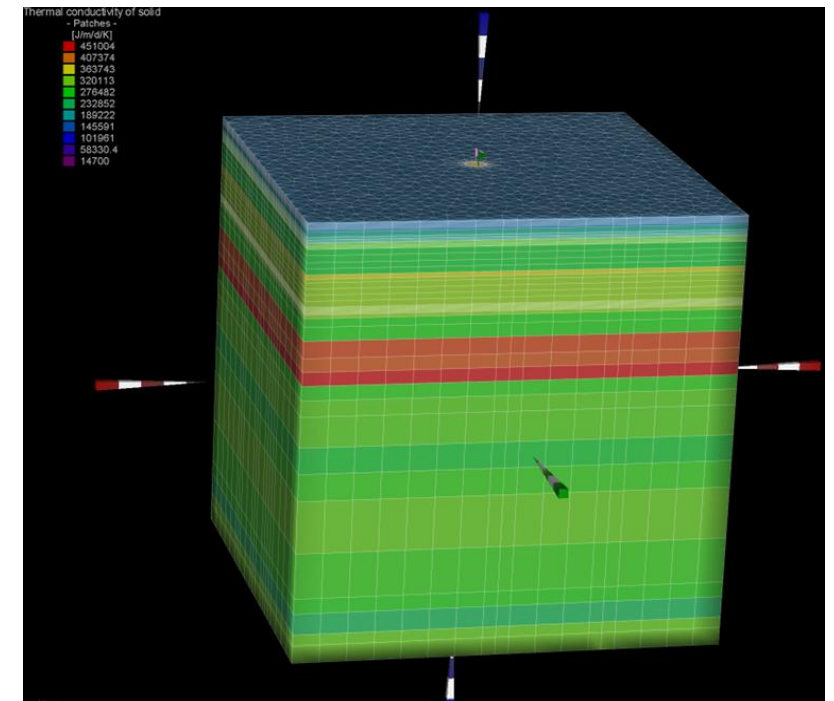
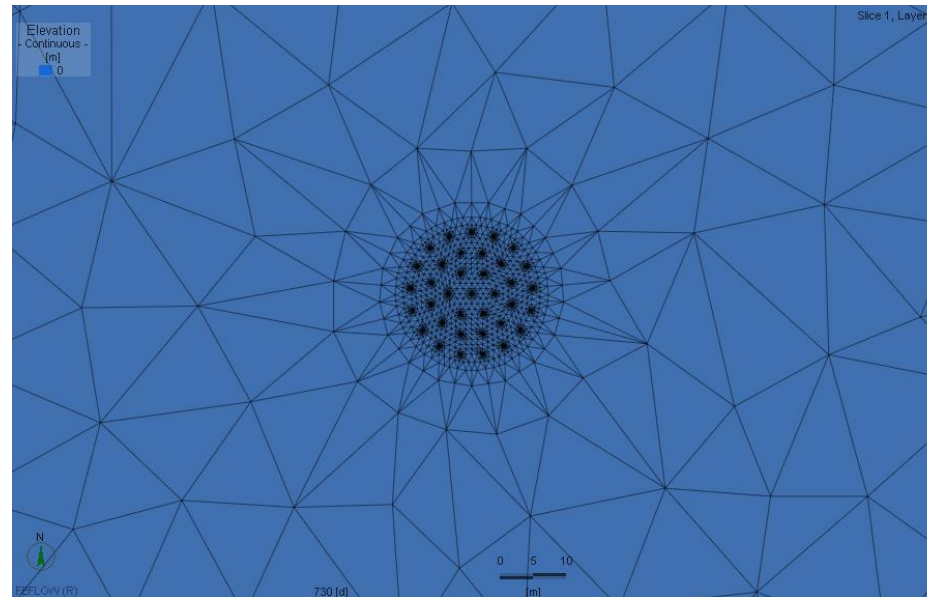
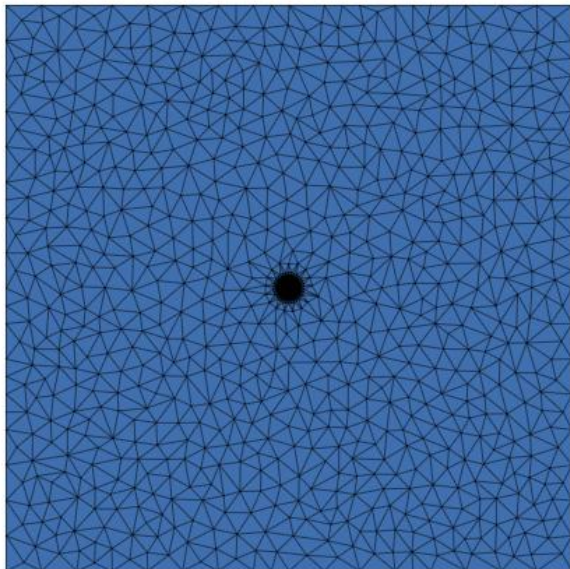
Provozní parametry - vysokoteplotní BTES (45-55° C) vs. teplota okolí (10° C) BTES



Skarphagen et al. 2019 Zohlednění designu BTES

Simulace BTES - FEFLOW, 36 vrtů 100 m

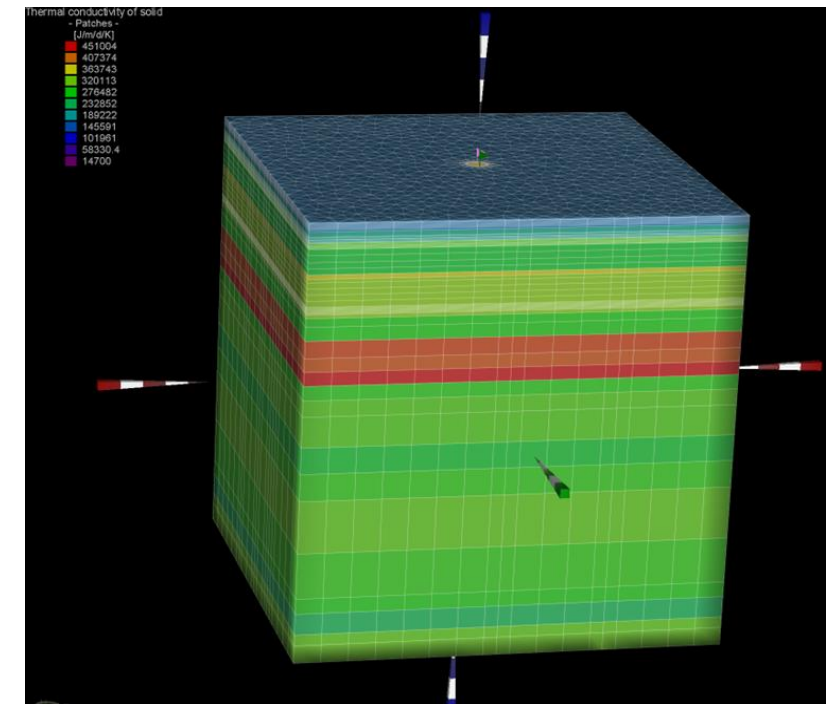
Doména 500x500x515 m vertikálně členěna na 61 vrstev, každá 4510 elementů v trojúhelníkové síti, která je zahuštěna v okolí 36 BHE (Borehole Heat Exchanger) vrtů hlubokých 100 m.



Simulace BTES - FEFLOW, 36 vrtů 100 m

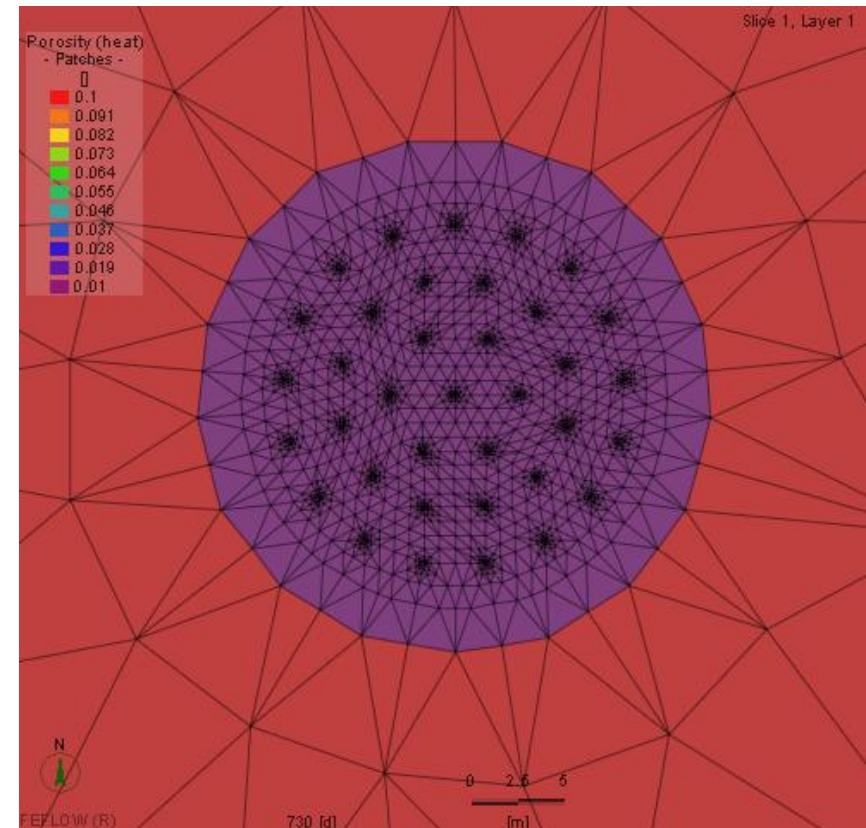
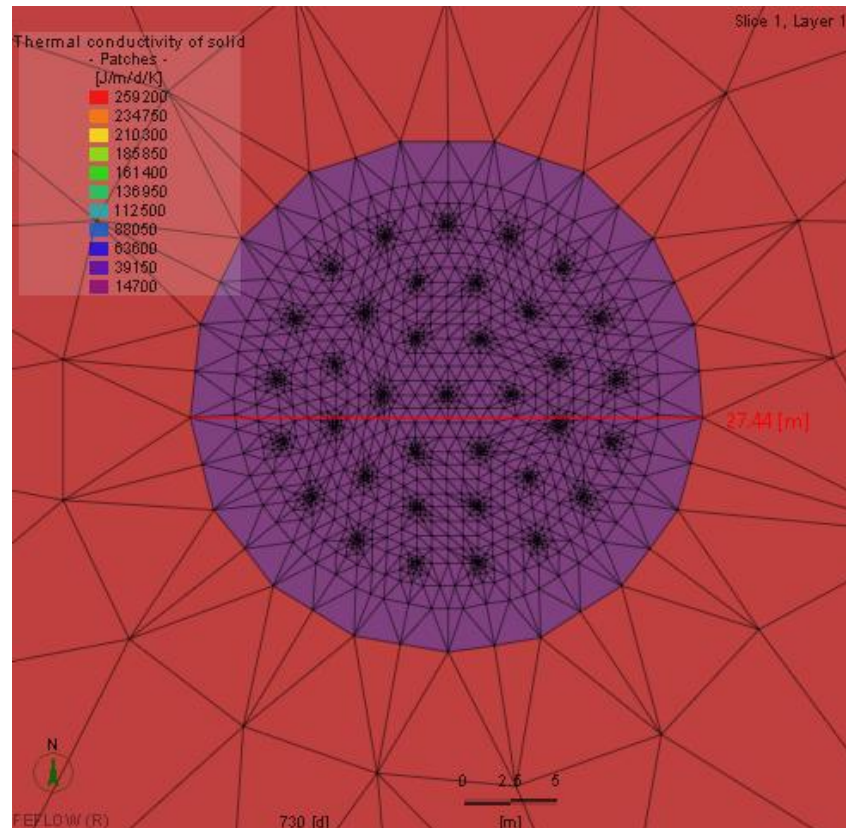
Doména 500x500x15 m vertikálně členěna na 61 vrstev, každá 4510 elementů v trojúhelníkové síti, která je zahuštěna v okolí 36 BHE (Borehole Heat Exchanger) vrtů hlubokých 100 m.

NO	Hloubka od	Hloubka do	Litostratigrafie	TC solid (W/mK)	Cv solid (MJ/m ³ K)	aniso TC ver/hor	TC_hor (W/mK)	Cv (MJ/m ³ K)	TC_ver (W/mK)	porozita (celkova)	hydraulic conductivity_hor (m/s)	hydraulic conductivity_vert (m/s)
1	0	10	Kvarter - antropogenní navážka	1,84	2,08	1,00	1,6	2,5		0,2	2,8E-04	1,4E-04
2	10	23	Kvarter - převážně jílovitá hlína (spraš)	2,34	2,21	1,00	2	2,6		0,2		
3	23	30	Kvarter - převážně štěrkopískek, štěrk - voda	3,46	1,96	1,00	2,9	2,4		0,2		
4	30	59	Jizera Fm- prachovce+slinovce	3,01	2,52	0,84	2,58	2,82	2,16	0,181	5,1E-06	5,1E-07
5	59	64	Bíla hora- jemné pískovce	4,23	2,39	0,92	3,55	2,73	3,28	0,190	1,2E-05	1,2E-06
6	64	109	Bíla hora- pískovce- irregularly bedded	3,83	2,45	0,93	3,19	2,8	2,98	0,202	1,2E-05	1,2E-06
7	109	135	Bíla hora- pískovce- carbonate nodules	3,25	2,54	0,91	2,44	3,05	2,21	0,311	1,2E-05	1,2E-06
8	135	155	Peruc- Korycany Fm- kolektor A	4,97	2,16	0,89	3,8	2,71	3,39	0,271	3,4E-05	3,4E-06
9	155	171	Peruc- Korycany Fm- kolektor A	4,89	1,61	0,91	3,48	2,46	3,18	0,332	3,4E-05	3,4E-06
10	171	187	Peruc- Korycany Fm- kolektor A	5,22	1,67	0,97	3,83	2,43	3,7	0,304	3,4E-05	3,4E-06
11	187	204	Lině Fm- jemné pískovce+ prachovce 50/50	3,30	2,21	0,92	2,92	2,49	2,69	0,144	2,5E-06	5,0E-08
12	204	223	Lině Fm- jemné pískovce+ prachovce 70/30	3,52	2,16	0,93	3,11	2,45	2,9	0,144	2,5E-06	5,0E-08
13	223	259	Lině Fm- jemné pískovce+ konglomeráty 80/20	3,50	2,10	0,88	3,09	2,4	2,73	0,144	2,5E-06	5,0E-08
14	259	290	Lině Fm- jemné pískovce+ konglomeráty 80/20	3,01	2,26	0,92	2,67	2,54	2,45	0,144	2,5E-06	5,0E-08
15	290	322	Lině Fm- konglomeráty+ pískovce 60/40	3,33	2,10	0,91	2,88	2,45	2,61	0,169	2,5E-06	5,0E-08
16	322	384	Lině Fm- pískovec+ konglomerát 60/40	3,59	2,17	0,92	3,15	2,47	2,91	0,150	2,5E-06	5,0E-08
17	322	438	Lině Fm- pískovec; Slaný Fm- Kamenný most mem	3,34	2,13	0,89	2,94	2,44	2,61	0,150	2,5E-06	5,0E-08
18	438	456	Slaný Fm- Hředle member- Ca	3,25	2,07	0,87	2,86	2,39	2,49	0,150	2,5E-06	5,0E-08
19	456	481	Slaný Fm- Mšec member- tufy	2,73	2,21	0,74	2,42	2,51	1,8	0,150	2,5E-06	5,0E-08
20	481	494	Slaný Fm- Jelenice member	3,59	2,07	0,85	3,15	2,39	2,68	0,150	2,5E-06	5,0E-08
21	494	515	Týnec Fm	3,64	2,09	0,87	3,19	2,4	2,77	0,150	2,5E-06	5,0E-08



Simulace BTES FEFLOW

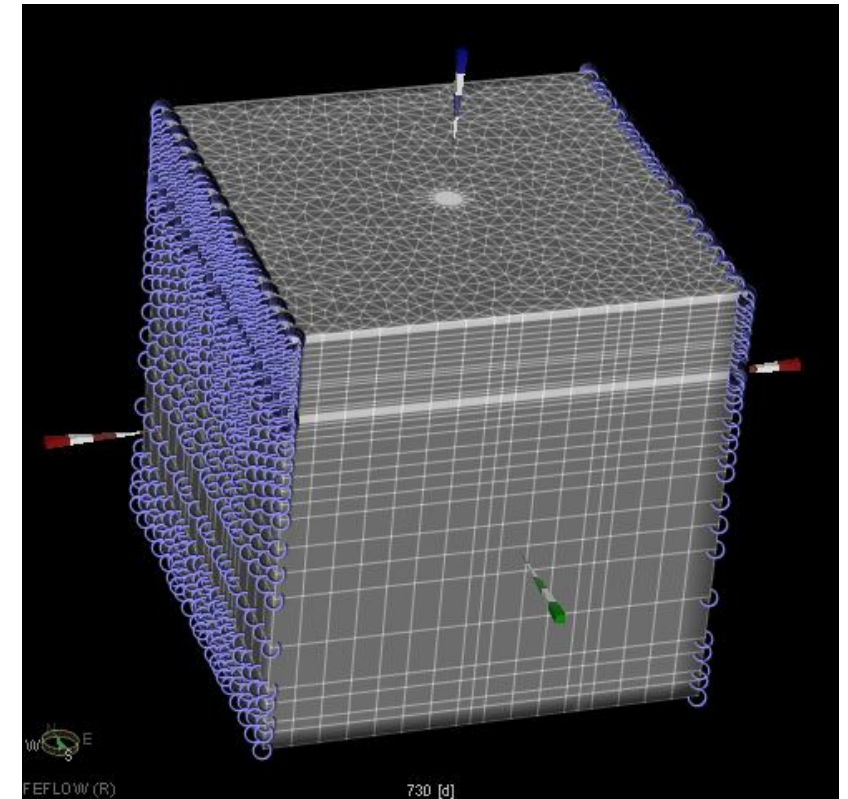
Materiálové vlastnosti byly následně změněny v první vrstvě (30cm) v okolí BHE vrtů (kruh průměru cca 28m), porozita 0.1 a tepelná vodivost 14700 J/(m.d.K), tj. 0.17 W/(m.K).



Simulace BTES FEFLOW

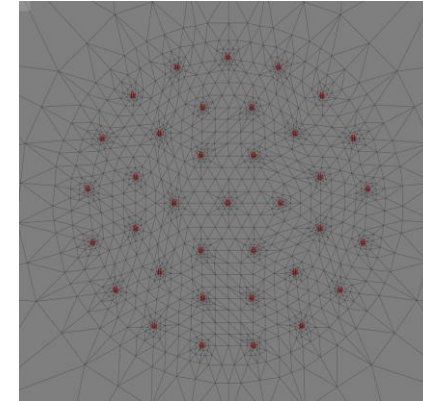
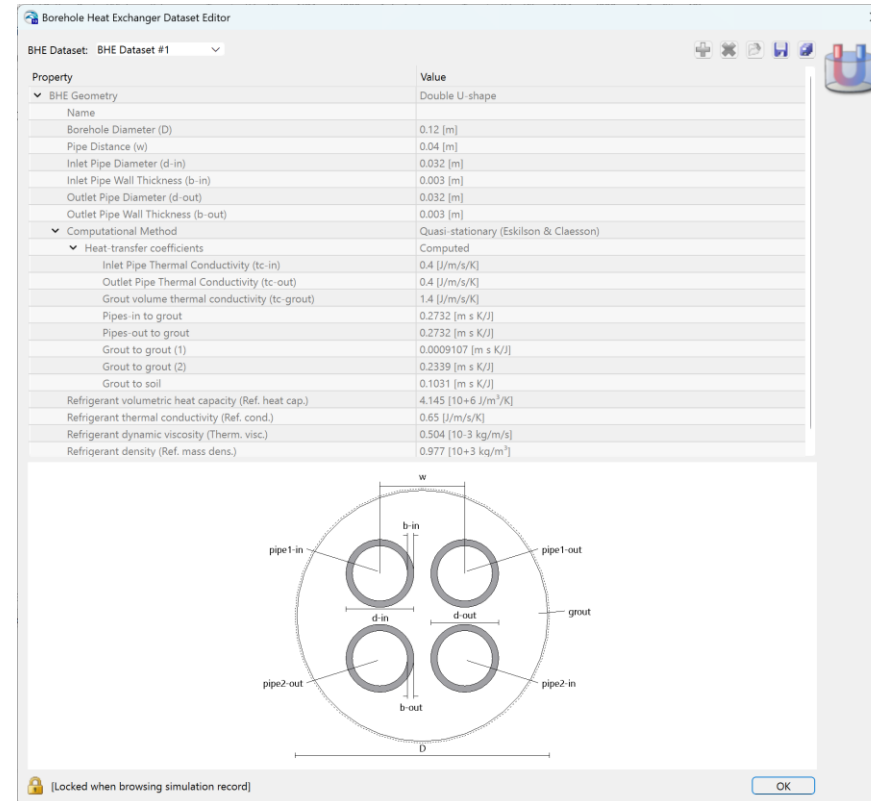
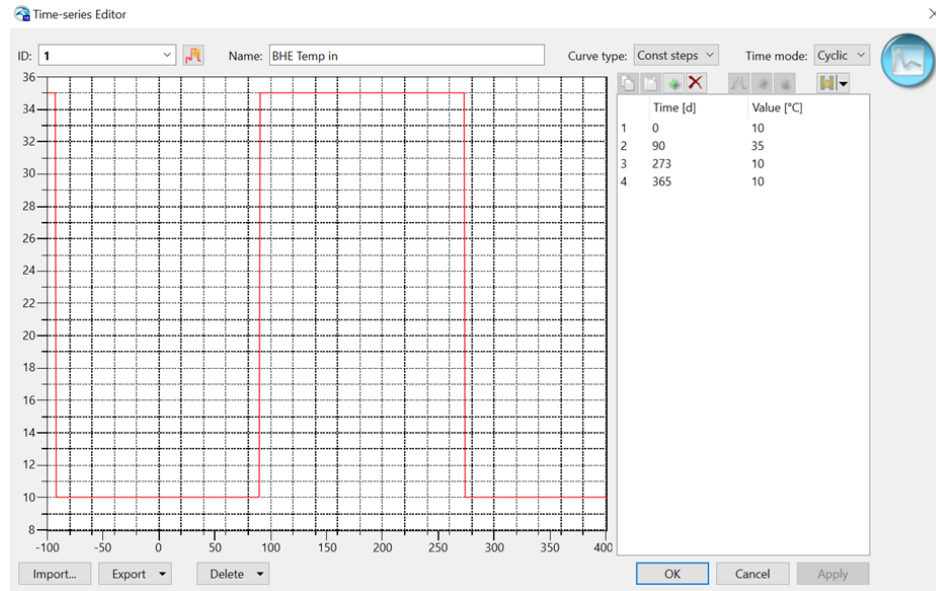
Různé hydraulické gradienty

I	Hstřed-Q+turon	Hstřed-cenoman	Hsever-Q+turon	Hsever-cenoman	Hjih-Q+turon	Hjih-cenoman
0.0168	151.2	150.5	155.4	154.7	147	146.3
0.014	151.2	150.5	154.7	154	147.7	147
0.012	151.2	150.5	154.2	153.5	148.2	147.5
0.01	151.2	150.5	153.7	153	148.7	148
0.009	151.2	150.5	153.45	152.75	148.95	148.25
0.007	151.2	150.5	152.95	152.25	149.45	148.75
0.005	151.2	150.5	152.45	151.75	149.95	149.25



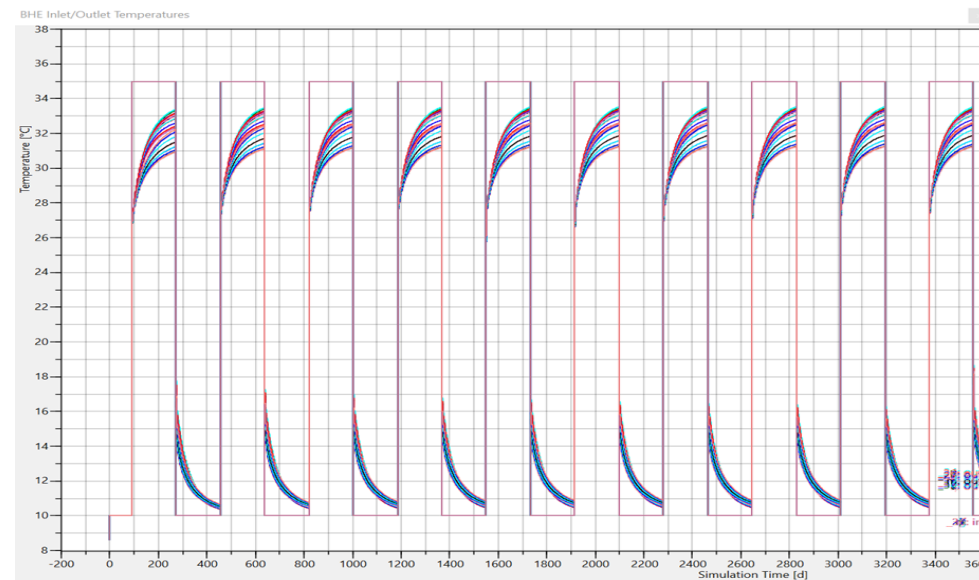
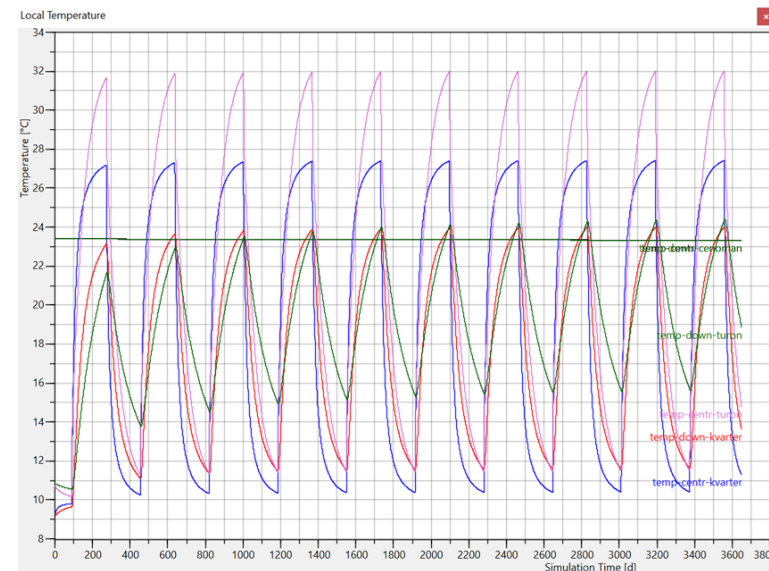
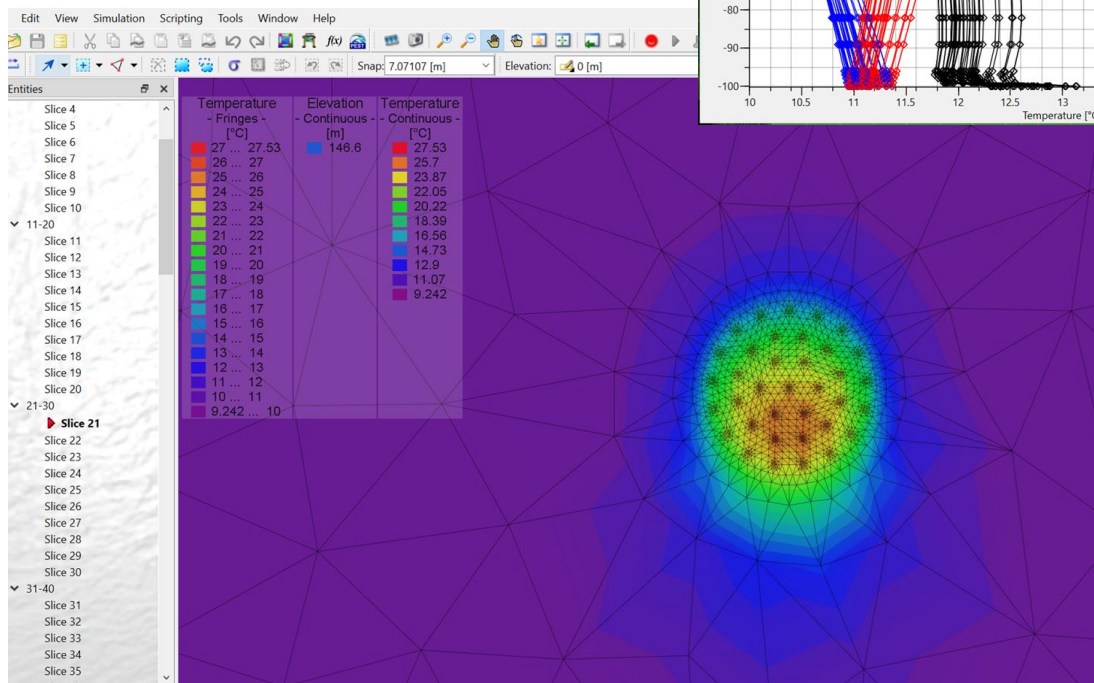
Simulace BTES FEFLOW

Nabíjení od 1.4. do 31.10., T_{in} 35 °C, vybíjení zbytek roku T_{in} 10 °C, 10 let

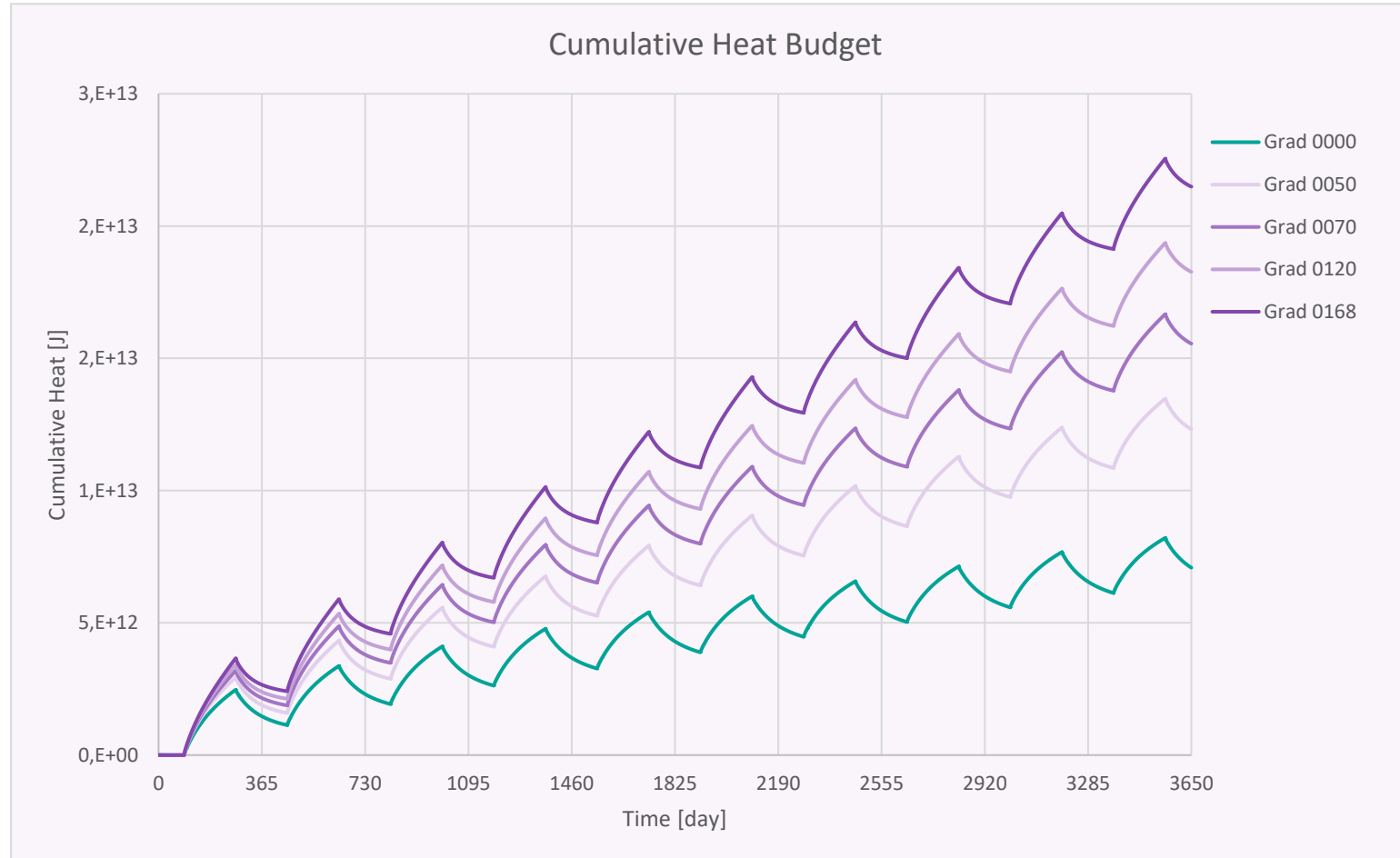


Simulace BTES FEFLOW

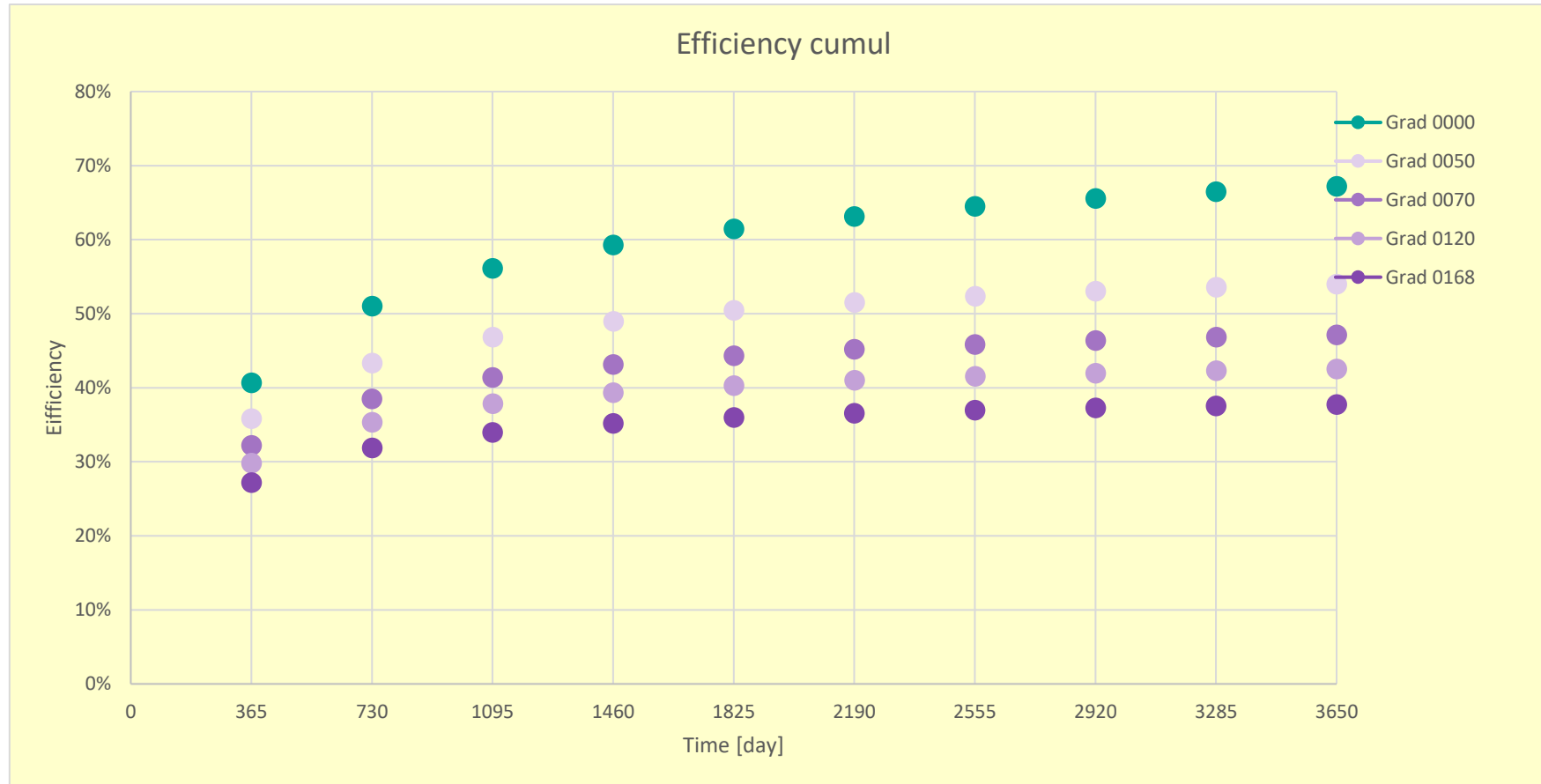
Výsledky výpočtů
ukázka



Vliv hydraulického gradientu – tepelná bilance



Vliv hydraulického gradientu - efektivita

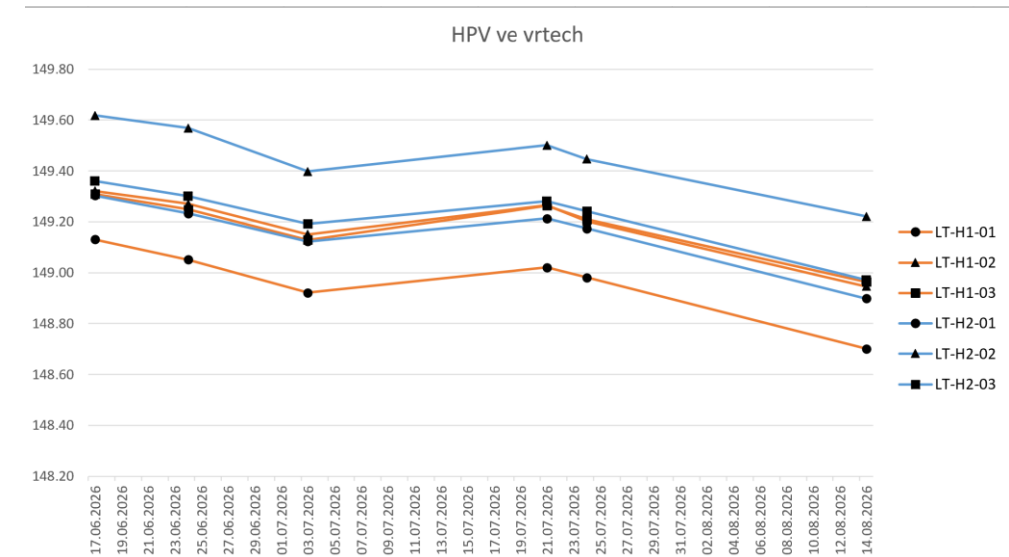
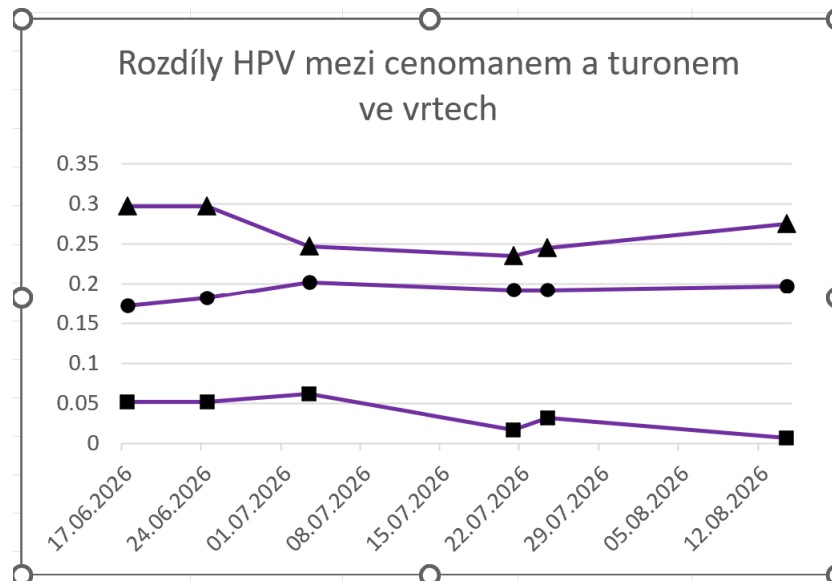


Závěr

- V současné době proběhl hydrogeologický průzkum včetně karotážních měření (hydrodynamické zkoušky, resistivimetrie) – aktualizace modelu
- Zatím přetrvávají nejistoty – nicméně hydraulické gradienty turon: gradient 0,0013-0,0018, cenoman: gradient 0,002-0,024, kvartér minimální zvodnění
- Problém proudění puklinové a konektivita , vzestupné vs. sestupné, rychlost proudění značná - cca 0,4 m/min.
- Efektivita ukládání tepla by se mohla pohybovat nad 50%

Děkuji za pozornost

Závěr



Vliv hydraulického gradientu - bilance, efektivita

