



ZPRÁVA A VÝSLEDKY - THERMAL RESPONSE TEST VRT V53

test teplotní odezvy vrtu a horninového prostředí

datum testu: 12. 3. 2024 - 15. 3. 2024

Ostravská univerzita - Koleje Jana Opletala

Investor: Ostravská univerzita,
Dvořákova 138/7, 701 03 Ostrava

Zadavatel: VBV GEO s.r.o.
Hornosušská 19b, 735 64 Havířov

Zhotovitel: ARTEG s.r.o.
Strakonická 714, 460 08 Liberec

OBSAH:

1.	ODBORNÉ NÁZVOSLOVÍ	str. 2
2.	CÍL TESTU	str. 2
3.	METODIKA VÝPOČTU	str. 3
4.	CHARAKTERISTIKA VRTU	str. 3
5.	VÝPOČET NEOVLIVNĚNÉ TEPLoty HORNINOVÉHO MASÍVU	str. 3
6.	VÝPOČET TEPELNÉ VODIVOSTI HORNINY λ [W/(m*K)]	str. 4-5
7.	VÝPOČET TEPELNÉHO ODPORU VRT-HORNINA R_b [(m*K)/W]	str. 5
8.	SHRNUTÍ A ZÁVĚR	str. 6
9.	PŘÍLOHY: TABULKA HODNOT, GRAFY	str. 7-10

PŘÍLOHY:

GRAF 9.1 Čas, teplota a výkon (získaný z PLC)

GRAF 9.2 Průměrné teploty

GRAF 9.3 Průměrná teplota - Ln času

GRAF 9.4 Lambda - čas

GRAF 9.5 Tepelný odpor - čas

1. ODBORNÉ NÁZVOSLOVÍ

λ	[W/(m*K)]	Průměrná tepelná vodivost horniny
R_b	[(m*K)/W]	Tepelný odpor vrtu, injektáže a nejbližšího horninového okolí
T_g	[K]	Neovlivněná teplota horninového prostředí
T_f	[K]	Průměrná teplota oběhové kapaliny
H	[m]	Délka vrtu
r_b	[m]	Poloměr vrtu
ρC	[MJ/(m³*K)]	Tepelná kapacita horniny
t	[s]	Čas
a	[m²/s]	Koeficient tepelné difuzivity stanovený experimentálně v laboratoři
a_{eff}	[m²/s]	Koeficient efektivní tepelné difuzivity (stanovený na základě naměřené hodnoty λ)
Q	[kW]	Tepelný příkon za jednotku času
q	[W/m]	Tepelný příkon na jednotku délky vrtu a jednotku času
T_a	[K]	Vstupní teplota oběhové kapaliny do vrtu
T_b	[K]	Výstupní teplota oběhové kapaliny z vrtu
T_e	[K]	Venkovní teplota
P	[l/h]	Průtok
V	[V]	Elektrické napětí
γ		Eulerova konstanta
t_{20}	[s]	Minimální doba potřebná pro vykonání testu
$m \equiv K$		Směrnice přímkové hodnot T_f v závislosti na $\ln t$
λ_{eff}		Efektivní tepelná vodivost horniny zjištěná testem
λ_{cond}		Laboratorní hodnoty tepelné vodivosti
w.s.		water saturated (nasyčená voda)
c.a.		otevřený oběh (výstupní kapalina protéká přes malý reintegrační zásobník s max. průtokem 40 litrů)
c.c.		uzavřený oběh (výstupní kapalina vtéká rovnou do sacího hrdla cirkulačního čerpadla)

2. CÍL TESTU

Cílem testu teplotní odezvy vrtu je:

Stanovení průměrné tepelné vodivosti horniny

$$\lambda \text{ [W/(m*K)]}$$

Stanovení tepelného odporu kolektoru, injektáže a nejbližšího horninového okolí vrtu

$$R_b \text{ [(m*K)/W]}$$

Stanovení neovlivněné teploty hornin

$$T_g \text{ [K]}$$

3. METODIKA VÝPOČTU

K výpočtu šíření tepla v okolí vrtu je použita metodika teorie lineárního zdroje tepla (Eklöf a Gehlin 1996). Koncept měření tepelné charakteristiky vrtů pomocí konstantní dodávky tepla do horninového masívu byl vyvinut již v roce 1983 P. Mogensenem spolu se dvěma studenty z Royal Institute of Technology ve Švédsku. Ve skutečnosti se dnes v různých menších obměnách používá po celém světě. Data a výsledky z provedeného testu je tak možné porovnat s výsledky ostatních konvenčních TRT (označovanými též jako GRT - Geothermal Response Test). Přesnost měření tepelné vodivosti terénu a tepelného odporu vrtu pomocí klasického TRT byla ověřena pomocí tzv. DTRT (Distributed Thermal Response Test podle Acuña-Mogensen-Palm v roce 2008), pomocí kterého byly tyto parametry měřeny pro každou z celkových 12 hloubkových úrovní vrtu. Hodnota λ získaná z klasického TRT byla prakticky shodná s průměrem, získaným ze všech hloubkových úrovní vrtu při DTRT. Hodnota tepelného odporu vrtu byla při konvenčním TRT nadhodnocena o 28 % proti DTRT měření. Odchylka je způsobena nadhodnocením teploty kapaliny ve vrtu T_f , kdy se k jejímu stanovení používá průměr mezi vstupní a výstupní teplotou do/z vrtu namísto průměru získaného z celé délky vrtu při DTRT.

4. CHARAKTERISTIKA VRTU

typ kolektoru:	dvojitá U sonda
délka vrtu:	120 m
střední průměr vrtu: 2rb:	146,38 mm (Ø152 mm do 93 m, dále Ø127 mm do 120 m)
injektáž:	směs $\lambda = 2,0 \text{ W/(m}^{\circ}\text{K)}$
vnější průměr trubice kolektoru:	32 mm
tloušťka stěny trubice kolektoru:	2,9 mm
materiál kolektoru:	PE100 RC, PN16

5. VÝPOČET NEOVLIVNĚNÉ TEPLoty HORNINOVÉHO MASÍVU T_g

Neovlivněná teplota horninového masívu je určena na základě měření vstupní a výstupní teploty oběhové kapaliny v kolektoru. Teploty kapaliny jsou měřeny při zapnutém oběhovém čerpadle před začátkem ohřevu kapaliny topnými spirálami.

hodina	Tepl. vstup	Tepl. výstup	Tepl. vzduch	Průtok l/s
10:52	11,0	11,8	9,8	0,33 c.a.
11:10	12,5	12,4	9,8	0,33 c.a.
11:20	12,6	12,6	10,1	0,35 c.a.
11:35	12,8	12,7	10,2	0,42 c.a.
11:38	12,8	12,7	10,2	0,59 c.a.
11:40	12,8	12,7	10,2	0,59 c.c.
11:45	12,8	12,7	9,9	0,42 c.c.

Uvažujeme průměrnou kautelární minimální teplotu.

$$T_g = 12,7^{\circ}\text{C}$$

6. VÝPOČET TEPELNÉ VODIVOSTI HORNINY λ [W/(m*K)]

- zapojené do termické výměny se sondou

Pro výpočet je použito řešení podle metody liniového zdroje uvedené Mogensenem (1983) a později rozpracované v Eklöf-Gehlin (1996):

$$T_f(t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \cdot \left(l_n \left(\frac{4at}{r^2} \right) - \gamma \right) + q \cdot R_b + T_g \quad 6.1$$

z toho po zjednodušení

$$T_f(t) = K \cdot l_n t + b$$

následně

$$K = \frac{q}{4\pi\lambda} \text{ směrnice přímky hodnot } T_f \text{ v závislosti na } \ln t$$

kde

$$\lambda = \frac{q}{4\pi K}$$

$$q = \frac{Q}{H} \text{ tepelný příkon na jednotku délky vrtu a jednotku času}$$

pro měření byl použit konstantní výkon blízký hodnotě výkonu systému, který se bude realizovat:

$$Q = 8000 \text{ [W]}.$$

V praxi 8000 W reprezentuje nastavený výkon, dodávaný elektrickými topnými spirálami, který je měřen ampérmetry a voltmetry. Drobné kolísání napětí v elektrické síti, teplota okolního prostředí, tření kapaliny o stěnu kolektoru cirkulací v průběhu testu a další faktory mají za následek, že skutečný efektivní výkon dodaný do kapaliny může v průběhu testu mírně kolísat. Celková doba testu je však vždy dostatečná k tomu, aby mohly být tyto vnější vlivy zanedbány a na přesnost výpočtu hodnoty λ a R_b mají proto minimální vliv. Dataloger v přístroji ukládá hodnoty každou minutu.

Analýza grafů 9.1 a 9.2 ukazuje postupnou tendenci linearizace křivek teplot po jejich počátečním prudkém nárůstu. Prvních 12 hodin měření proto není pro výpočet směrnice přímky bráno v potaz. Statistická analytická hodnota K vyjadřuje směrnicí přímky se zanesenými daty pro T_f v závislosti na logaritmu času.

Výsledky :

$$\Delta t \text{ použitý pro test (výpočet } K \text{ a } \lambda) = 219660 \text{ [s]} > \frac{20 \cdot r_b^2}{a_{eff}} = 3,3510 \cdot 10^4 \text{ [s]} \quad 6.2$$

$$\begin{aligned} a_{eff} &= 3,1806 \cdot 10^{-6} \text{ vypočtena na základě výsledků hodnoty } \lambda \text{ z testu} \\ R^2 &= 0,9572 \text{ statistická hodnota spolehlivosti} \\ K &= 0,794 \text{ směrnice přímky} \end{aligned}$$

Skutečný průměrný efektivní výkon na základě naměřených dat (Δt pro hmotnostní tok)

$$Q = 7875 \text{ [W]}$$

získáme

$$\lambda = \frac{q}{4\pi K} = 6,56$$

$$\lambda \text{ min.} = 6,13$$

$$\lambda \text{ střed} = 6,56$$

$$\lambda \text{ max.} = 7,06$$

7. VÝPOČET TEPELNÉHO ODPORU VRT-HORNINA

$$R_b \text{ [(m}^2\text{K)/W]}$$

Dosazením hodnoty λ a dalších proměnných do rovnice dostaneme řešení pro výpočet hodnoty R_b .

Po vyřešení rovnice 6.1 v závislosti na R_b dosazením výsledné hodnoty λ a všech ostatních údajů dostaneme R_b v závislosti na čas:

$$R_b = \frac{T_f - T_g}{q} - \frac{1}{4\pi\lambda} \cdot l_n \left(\frac{4at}{r_b^2} \right) + \frac{\gamma}{4\pi\lambda} \quad 7.1$$

$$R_b \text{ min.} = 0,093$$

$$R_b \text{ střed} = 0,101$$

$$R_b \text{ max.} = 0,109$$

8. SHRNUTÍ A ZÁVĚR

Na základě provedeného testu teplotní odezvy byly získány tyto výsledky:

Efektivní délka trvání testu - s ohledem na přesné stanovení K a střední hodnoty λ

$$\Delta t = 61 \text{ h } 1' [\text{h/min}] > \frac{20 \cdot r_b^2}{a_{eff}} = 3,1982 \cdot 10^4 [\text{s}] = 8 \text{ h } 53 \text{ min}$$

Naměřená tepelná vodivost horniny:

$$\lambda = 6,56 [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$$

Výkon aparatury byl po celou dobu trvání testu konstantní na průměrné úrovni **7875 W**.

Nenastal žádný výpadek elektrické energie, tedy ani žádný výpadek termické energie předané do půdy. Hodnota $\cos \varphi$ byla rovna 1 po celé délce testu, jelikož tepelná zatížení pro ohřev jsou jednofázové a odporové. Data byla ukládána do vnitřní paměti přístroje každou minutu (v tabulce jsou uvedena data 15-ti minutových intervalů). Oběhové čerpadlo s frekvenčním měničem je kontrolováno z PLC (s bezpečnostním akumulátorem UPS), tím je zaručen prakticky konstantní průtok po celou dobu trvání testu.

Průměrná naměřená hodnota tepelné vodivosti horniny $\lambda = 6,56 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ je vyšší než maximální teoretická hodnota $\lambda = 2,90 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ získaná v laboratoři pro podobné typy půd (VDI a Chiasson et al. 2000).

Naměřený tepelný odpor vrtu :

$$R_b = 0,101 [(\text{m} \cdot \text{K})/\text{W}]$$

V odborných studiích ASHRAE 2003 se uvádí hodnota **$R_b = 0,10$** [$\text{K}/(\text{W}/\text{m})$] u vrtu o průměru 158 mm a vyplňové geotermické injektáži s $\lambda = 2,0$.

9. PŘÍLOHY: TABULKA HODNOT, GRAFY, GEOLOGICKÁ SKLADBA HORNIN

9.1 Graf závislosti výkonu a teplot na čase

Osa X:	čas		
Osa Y:	T_a	vstupní teplota kapaliny do vrtu	[°C] červeně
	T_b	výstupní teplota kapaliny z vrtu	[°C] žlutě
	T_e	teplota okolí	[°C] modře
	Q	výkon	[kW] zeleně

9.2 Graf závislosti střední teploty kapaliny ve vrtu na čase

Osa X:	čas		
Osa Y:	T_f	střední teplota kapaliny ve vrtu	[°C] fialově

9.3 Graf závislosti střední teploty kapaliny ve vrtu na logaritmu času

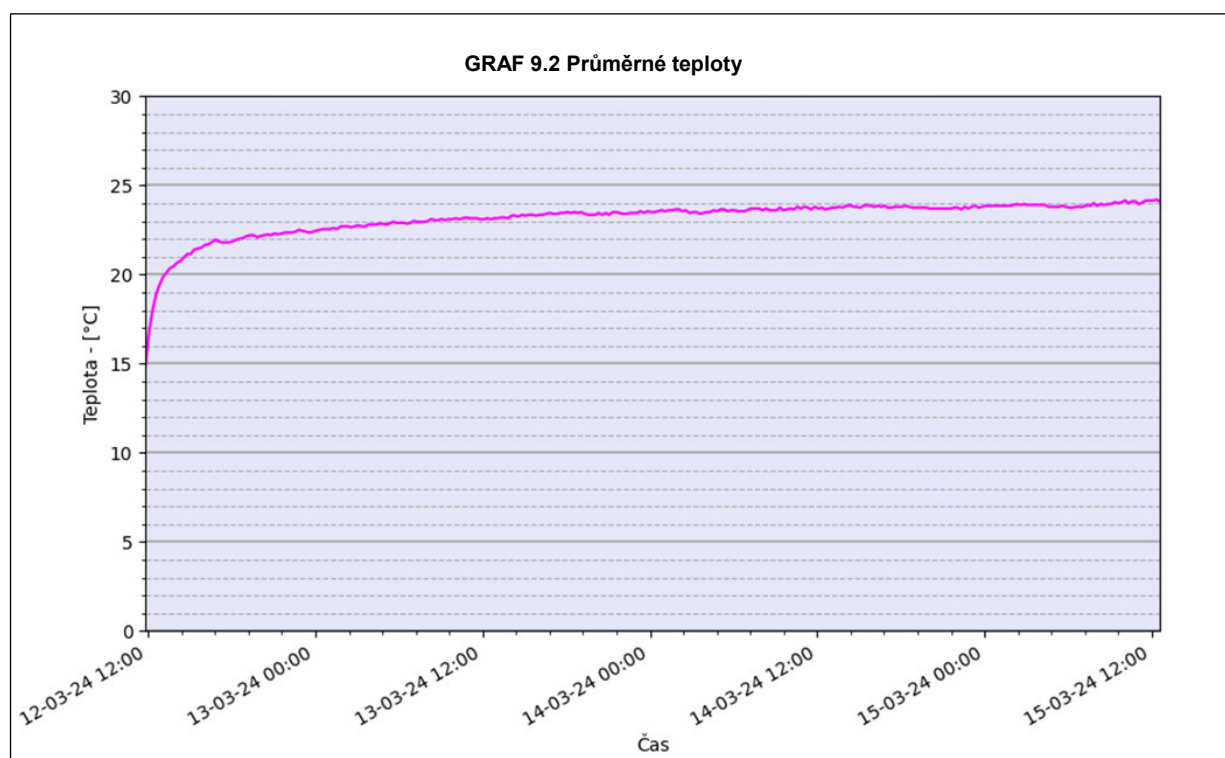
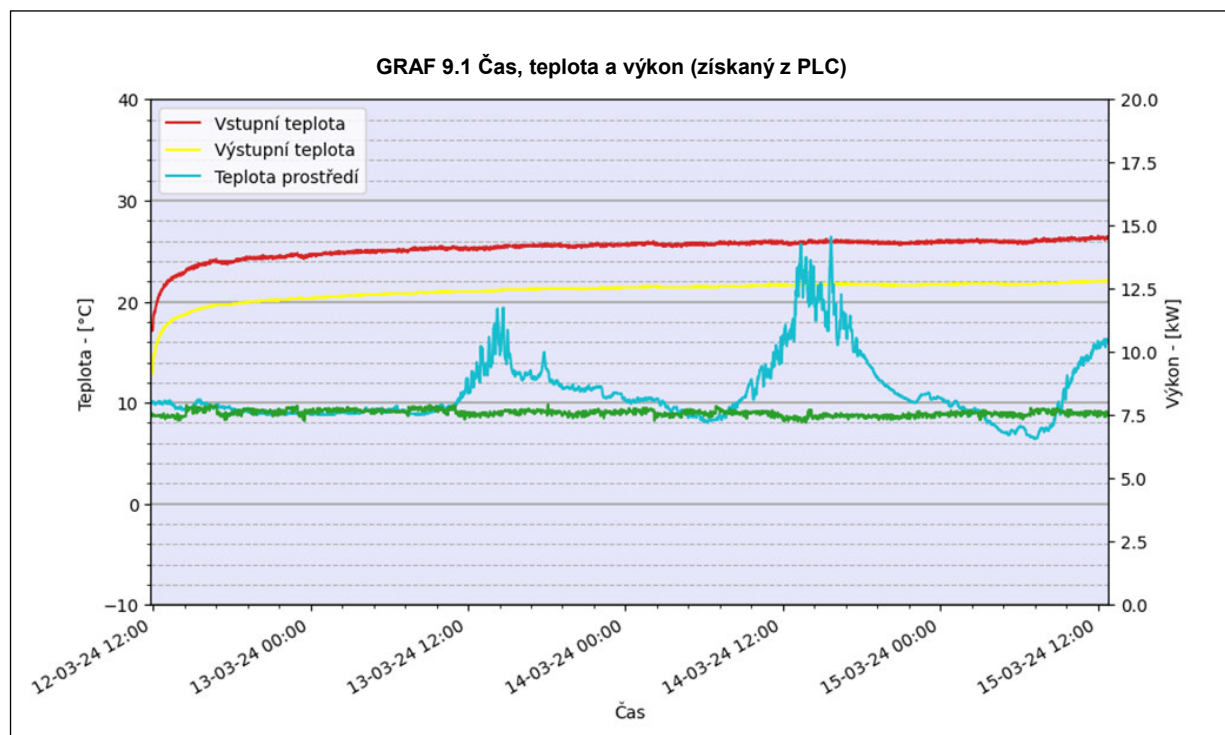
Osa X:	čas		
Osa Y:	T_f	střední teplota kapaliny ve vrtu	[°C] fialově / černě
	Křivka hodnot $\ln t$ a T_f		fialově
	Přímka lineární interpolace (černě)	$y = mx + b$ (m)	(m \equiv K)
	Statistická hodnota spolehlivosti lineární regrese	přímky R^2	

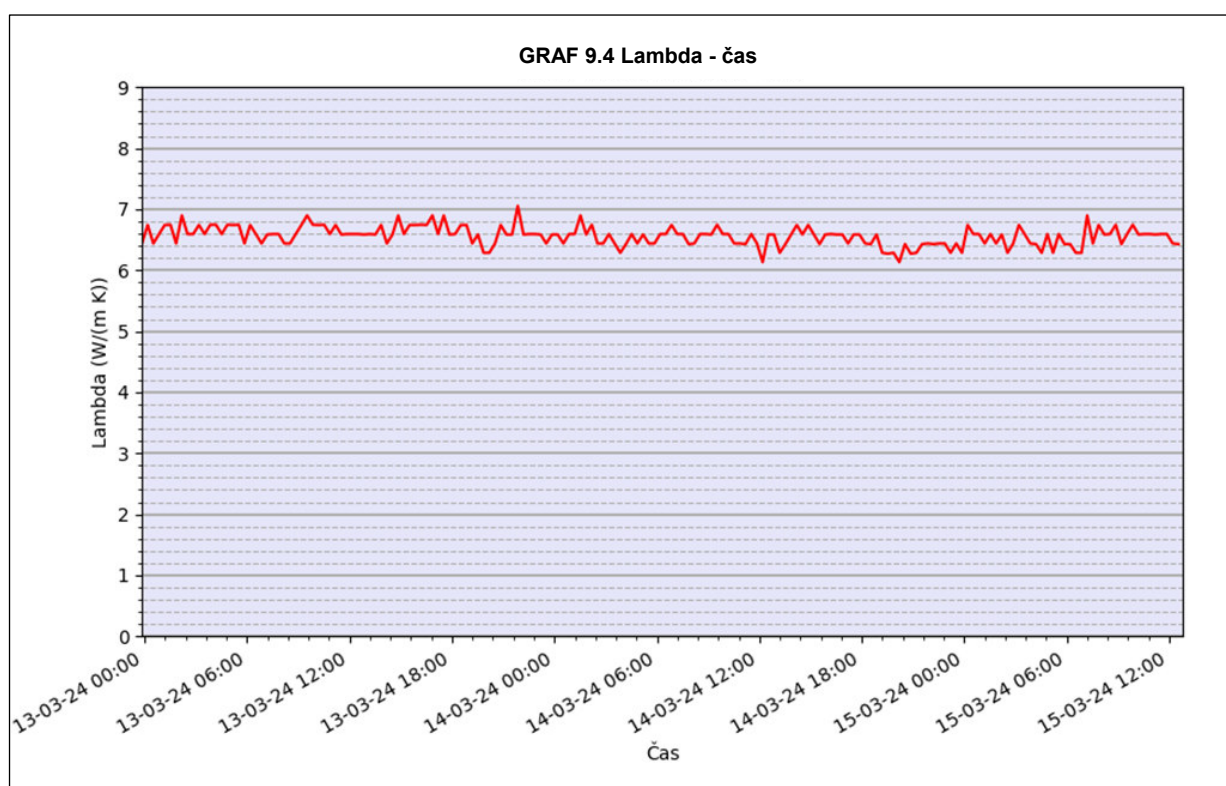
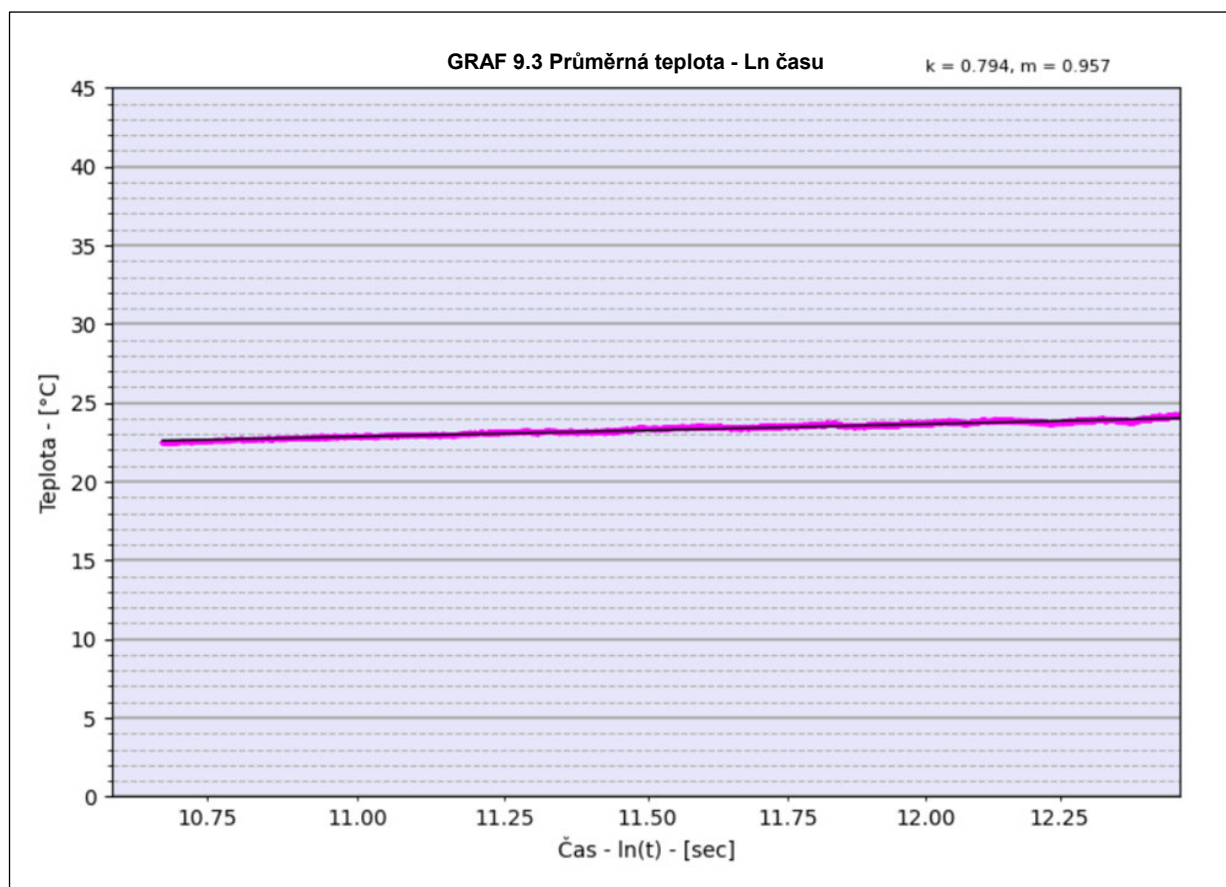
9.4 Graf vývoje hodnoty λ v průběhu testu

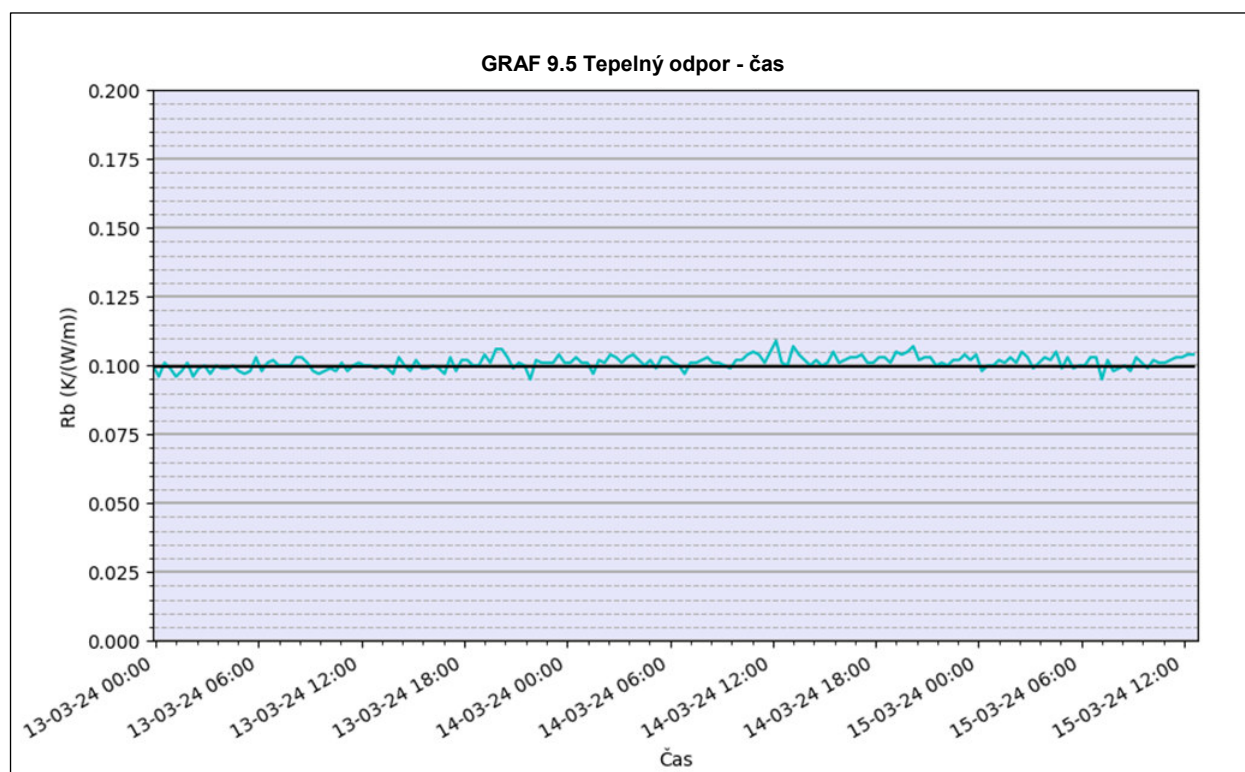
Osa X:	čas		
Osa Y:	λ	[W/(m*K)]	

9.5 Graf vývoje hodnoty R_b v průběhu testu

Osa X:	čas		
Osa Y:	R_b	[(m*K)/W]	







V Liberci dne 20. 3. 2024

Vypracovala: Helena Křížová

ARTEG s.r.o.

Strakonická 714, 460 08 Liberec 8

Mobil: +420 775 289 323

Email: imra.drapak@arteg-projekt.cz

Web: www.arteg-projekt.cz



ARTEG s.r.o., Strakonická 714, 460 08 Liberec