KRYCÍ LIST – VÝSTUPY

Název výstupu	Metodika studia hydrofyzikálních parametrů horninového prostředí
Výzkumný program	Hydrogeologie, hydrochemie a termohydraulické modelování
Partner/partneři	Česká geologická služba
Termín zpracování	5/2020

Název projektu	Modernizace výzkumné infrastruktury RINGEN (RINGEN+)
Registrační číslo	CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_013/0001792
Žadatel	Univerzita Karlova – Přírodovědecká fakulta



Hydraulické parametry hornin a hydrogeologické poměry v okolí Litoměřic

Autoři: Lenka Rukavičková, Jaroslav Řihošek, Petružálek Matěj, Jan Holeček, Jiří Burda

Česká geologická služba

Praha, květen 2020



Obsah

1	Úvo	d	. 6
2	Zho	dnocení hydraulických vlastností hornin v širším okolí geotermálního vrtu v Litoměřicích	. 7
	2.1	Úvod, metodika	. 7
	2.2	Vnitřní polygon	8
	2.3	Střední polygon	9
	2.4	Velký polygon	11
3	Hyd	raulické vlastnosti horninové matrice z vrtu LT-1	13
4	Výsl	edky hydrodynamických testů ve vrtu LT-1	16
	4.1	Čerpací a stoupací zkoušky	16
	4.2	Vodní tlakové zkoušky	20
5	Úče	lová hydrogeologická mapa okolí Litoměřic	25
	5.1	Přehled hydrogeologických poměrů	25
	5.2	Hydrogeologické mapování	27
	5.3	Účelová hydrogeologická mapa	32
6	Závě	ér	34
7	Lite	ratura	36



Seznam obrázků

Obr. 1: Rozsah vnitřního (červená linie), středního (modrá linie) a velkého (černá linie) polygonu
zahrnujících zpracovaná hydrogeologická data s vyznačením hydrogeologických vrtů s hydraulickými
daty (data z čerpacích zkoušek); černý kříž – vrt z vnitřního polygonu, oranžový bod – vrt ze středního
polygonu, modrý bod – vrt z velkého polygonu
Obr. 2: Vzorek LIT 1
Obr. 3: Vzorek LIT 2
Obr. 4: Vzorek LIT 3 s odvrtanými zkušebními tělísky 14
Obr. 5: Zkušební tělíska pro stanovení hydraulické vodivosti14
Obr. 6: Křivka nástupu hladiny při stoupací zkoušce ze dne 17. 08. 2018
Obr. 8 Křivka čerpání a nástupu hladiny při stoupací zkoušce ze dne 24. 08. 2019
Obr. 9 Grafický výstup programu AQTESOLV, stoupací zkouška ze dne 17. 08. 2018
Obr. 10: Grafický výstup programu AQTESOLV, stoupací zkouška ze dne 24. 08. 2019
Obr. 11: Záznam z průběhu testování na vrtu LT-1; zkušební tlak - modrá čára, spotřeba vtláčené vody
(průtok) – oranžová čára, celkový objem vtláčené vody – fialová přerušovaná čára (Fischer et al.
2020)
Obr. 12: Odečet délky pulzu čerpadla z minutových záznamů tlaku
Obr. 13: Odečet délky pulzu čerpadla ze snímků obrazovky notebooku
Obr. 14: Pokles vtláčeného množství vody (směr modré šipky) při pulzu čerpadla během třetího
tlakového stupně
Obr. 15: Integrace plochy na snímcích obrazovky v programu ImageJ
Obr. 16: Průběh zkušebního tlaku a vypočítaných průtoků v průběhu prvního tlakového stupně (31,5
bar)
Obr. 17: Průběh zkušebního tlaku a vypočítaných průtoků v průběhu druhého tlakového stupně (35,5
bar)
Obr. 18: Průběh zkušebního tlaku a vypočítaných průtoků v průběhu třetího tlakového stupně (39,5
bar)
Obr. 19: Příklad vyhodnocení testu s využitím programu AQTESOLV
Obr. 20: Rozsah mapovaného území a pozice dokumentovaných hydrogeologických bodů
Obr. 21: LT001 zachycený pramen v údolí Pokratického potoka, teplické souvrství (křída)
Obr. 22: LT004 soustředěný vývěr ve svahu vjv. od Lbína, terciér, pyroklastika bazaltických hornin 29
Obr. 23: LT012 soustředěný vývěr ve svahu zjz. od Staňkovic, terciér, pyroklastika bazaltických hornin.
Obr. 24: LT029 zachycený pramen v obci Oparno, kontakt kolektoru A (křída) a krystalinika
Opárenského údolí
Obr. 25: LT073 soustředěný vývěr mezi Novým Mlýncem a Kotelicemi na kontaktu kolektoru D (křída)
a izolátoru
Obr. 26: LT084 zachycený pramen jižně od Dolních Řepčic, rohatecké vrstvy (křída)
Obr. 27: Durovův diagram chemických analýz vzorků podzemních vod odebraných z pramenů;
červená barva značek – prameny v oblastech s výskytem pyroklastik bazaltických hornin (terciér),
zelená barva – v oblasti křídových sedimentů, modrá barva – na kontaktu křídových sedimentů a
pyroklastik, žlutá barva – kvartérní sedimenty
Obr. 28: Výřez z hydrogeologické mapy s příklady použitých barev a šraf s náhledy na dynamickou
legendu mapové aplikace
Obr. 29: Náhled na úvodní stránku mapové aplikace hydrogeologické mapy okolí Litoměřic



Seznam tabulek

Tab. 1 Srovnávací hydraulické parametry hornin, vnitřní polygon	9
Tab. 2 Hodnoty koeficientů transmisivity a hydraulické vodivosti, vnitřní polygon	
Tab. 3 Srovnávací hydraulické parametry hornin, střední polygon	10
Tab. 4 Hodnoty koeficientů transmisivity a hydraulické vodivosti, střední polygon	10
Tab. 5 Srovnávací hydraulické parametry hornin, velký polygon	12
Tab. 6 Hodnoty koeficientů transmisivity a hydraulické vodivosti, velký polygon	13
Tab. 7: Koeficient hydraulické vodivosti včetně měřených hodnot pro jeho výpočet	15
Tab. 8: Vstupní a odvozené hydraulické parametry stoupacích zkoušek	18
Tab. 9: Hydraulické parametry testovaného intervalu vrtu PVGT-LT1	23
Tab. 10: Přehled křídových jednotek, kolektorů a izolátorů	26
Tab. 11: Hodnoty fyzikálně-chemických parametrů podzemních vod – statistické zpraco	vání terénních
měření	28
Tab. 12: Výsledky chemických analýz vzorků podzemních vod odebraných z pramenů – j	první část 31
Tab. 13: Výsledky chemických analýz vzorků podzemních vod odebraných z pramenů – o	druhá část. 32

Seznam příloh

Příloha č. 1: Petružálek, M. (2018): Koeficient hydraulické vodivosti hornin z vrtu Litoměřice. Závěrečná zpráva. GLÚ AV ČR, Praha.



1 Úvod

Studium hydrofyzikálních parametrů horninového prostředí mělo být podle projektu realizováno na vzorcích jader z nového geotermálního vrtu. Tento vrt měl být vyhlouben v rámci projektu Degree (OP VVV), který byl podán současně s projektem "Modernizace výzkumné infrastruktury RINGEN (RINGEN+)", dále RINGEN. Na projekt Degree nebyly přiděleny finanční prostředky, vrt proto nebyl realizován. Množství jádra odebrané při hloubení původního geotermálního vrtu PVGT-LT-1 (dále jen LT-1) v roce 2007 bylo malé, vzorky byly odebírány jen v několika krátkých intervalech.

Většina vrtného jádra byla využita zejména k petrologickým a dalším stanovením již v průběhu původního projektu (Myslil et al. 2008). Na začátku projektu RINGEN byly shromážděny všechny vzorky vrtného jádra z vrtu LT-1, které se podařilo dohledat. Byly nalezeny celkem čtyři části (zlomky) jádra o délce od 10 do 20 cm, tři z nich jsou zobrazeny v kapitole 3. Tyto vzorky byly využity na základní stanovení různých parametrů a experimenty v rámci výzkumných programů č. 1, 3 a 4 projektu RINGEN. V této zprávě jsou prezentovány výsledky laboratorního stanovení hydraulické vodivosti horninové matrice ve velkých hloubkách.

Další jádro pro rozsáhlejší experimentální výzkum zahrnující vývoj metodiky studia hydrofyzikálních parametrů horninového prostředí nebylo k dispozici. Výzkum se proto zaměřil v souladu s náplní skupiny aktivit v oboru hydrogeologie a hydraulika na stanovení hydraulických parametrů hornin.

Bylo provedeno shromáždění všech dostupných archivních dat z hydrodynamických zkoušek v širším okolí vrtu LT-1. Data byla zhodnocena s ohledem na zastiženou hydrogeologickou jednotku a hloubku testovaného intervalu. Ve vrtu LT-1 byl provedeny čerpací, stoupací a následně i vodní tlakové zkoušky a stanovena hydraulická vodivost, transmisivita a storativita zastižených hornin. V laboratoři byly stanoveny hydraulické parametry neporušených hornin na vzorcích jádra z vrtu LT-1.

Současně proběhlo hydrogeologické mapování, byla zdokumentována řada hydrogeologických objektů, odebrány vzorky podzemních vod a sestavena účelová hydrogeologická mapa okolí Litoměřic. Tato mapa je formou mapové aplikace zpřístupněna veřejnosti (viz. kapitola 5).



2 Zhodnocení hydraulických vlastností hornin v širším okolí geotermálního vrtu v Litoměřicích

2.1 Úvod, metodika

Zhodnocení hydraulických vlastností hornin bylo zpracováno s cílem poskytnout základní představu o hydrogeologických a hydraulických poměrech v okolí geotermálního vrtu v Litoměřicích a jejich změnách v prostoru. Výsledky zhodnocení archivních dat dále sloužily jako podklad pro srovnání s výsledky testů, které byly realizovány v geotermálním vrtu PVGT-LT-1, (dále jen LT-1) a budou dále využita při vrtných a dalších technických pracích v rámci následných výzkumných programů.

Zpracována byla veškerá data z hydrogeologické databáze České geologické služby, Geofondu a to ve třech oblastech (polygonech):

- 1. Vnitřní polygon (na Obr. 1 znázorněn červenou linií) odpovídá rozsahu 3D geologického modelu oblasti, který vznikl v rámci projektu RINGEN. Z toho polygonu byla zpracována data ze všech hydrogeologických vrtů nezávisle na hloubce. Polygon 3D geologického modelu je s ohledem na možnost získání a zahrnutí strukturních dat rozšířen z Litoměřic zejména směrem na západ do Opárenského údolí, část východně od Litoměřic do něj není zahrnuta. Datový soubor z vnitřního polygonu zahrnuje vrty s hloubkou do 200 m, hlubší vrty s hydrogeologickými daty se zde nevyskytují. Výběry hydrogeologických dat byly proto rozšířeny na další dvě větší oblasti s hlubšími vrty.
- 2. Střední polygon má protáhlý obdélníkový tvar se středem přibližně v obci Žitenice (cca 3 km sv. od centra Litoměřic; na Obr. 1 znázorněn modrou linií) a zahrnuje oblast, kde jsou shromažďována a ověřována povrchová hydrogeologická data pro účelovou hydrogeologickou mapu. Ze středního polygonu byly vybrány vrty hlubší než 30 m.
- Velký polygon zahrnuje vrty hlubší než 100 m z hydrogeologických rajonů, které zasahují do okolí města Litoměřice (viz kapitola 5.1) a hluboké vrty z jejich blízkého okolí vymezeného černým obdélníkem na Obr. 1.

Pro regionální zhodnocení hydraulických vlastností hornin na základě archivních dat byl pro získání hydraulických parametrů využíván výpočet koeficientu hydraulické vodivosti k (m . s⁻¹) a koeficientu transmisivity T (m² . s⁻¹) na základě přibližných (srovnávacích) logaritmických parametrů – indexu hydraulické vodivosti Z a indexu transmisivity Y (Jetel 1982; 1985). Výchozími daty pro výpočet byly hodnoty specifické vydatnosti q (l . s⁻¹ . m⁻¹) vrtů a studní získané z hydrogeologické databáze ČGS.





Obr. 1: Rozsah vnitřního (červená linie), středního (modrá linie) a velkého (černá linie) polygonu zahrnujících zpracovaná hydrogeologická data s vyznačením hydrogeologických vrtů s hydraulickými daty (data z čerpacích zkoušek); černý kříž – vrt z vnitřního polygonu, oranžový bod – vrt ze středního polygonu, modrý bod – vrt z velkého polygonu.

2.2 Vnitřní polygon

Vnitřní polygon zahrnuje celkem 61 hydrogeologických vrtů s daty s hydrodynamických zkoušek. Průměrná hloubka vrtů hodnoceného souboru je 59 m, maximální hloubka vrtu 192 m. Převažují vrty zasahující do kvartéru (hloubka do 15 m) a vrty v kolektoru AB. Výsledky zpracování datové sady z vnitřního kolektoru jsou shrnuté v Tab. 1 a Tab. 2.

Průměrné specifické vydatnosti vrtů v kvartéru a kolektoru AB jsou v jednotkách l.s⁻¹. m⁻¹ a jsou o řád vyšší než v kolektoru C, kde je průměrná specifická vydatnost 0,57 l.s⁻¹. m⁻¹ bez ohledu na to, zda se jedná o puklinový kolektor C nebo kolektor C s převažující průlinovou propustností. Z vrtů zasahujících do krystalinika a permokarbonu je v oblasti k dispozici jen velmi malý počet dat. Specifické vydatnosti vrtů v krystaliniku jsou v řádu desetin l.s⁻¹. m⁻¹, hodnoty jsou o dva řády nižší ve srovnání s vrty zasahujícími kvartéru a kolektoru AB.



kolektor	n		q (l.s⁻¹.m⁻¹))		Y		Z		
KOIEKLOI		min	х	max	min	х	max	min	х	max
kvartér	22	0,038	4,358	15,091	4,58	6,36	7,18	4,06	5,60	6,31
kolektor AB	16	0,026	5,937	35,000	4,42	5,91	7,54	2,44	4,26	5 <i>,</i> 98
kolektor C	9	0,0001	0,571	2,111	1,65	4,75	6,32	0,18	3,34	4,93
kolektor C puklinový	9	0,073	0,564	1,540	4,86	5,57	6,19	3,56	4,12	4,55
krystalinikum	3	0,013	0,032	0,052	4,11	4,41	4,72	2,68	3,17	3,66
permokarbon	2	0,137		0,602	5,14		5,78	3,06		3,72

Tab. 1 Srovnávací hydraulické parametry hornin, vnitřní polygon

n – počet hodnot, q – specifická vydatnost, Y – index transmisivity, Z – index hydraulické vodivosti, min – minimální hodnota, x – aritmetický průměr, max – maximální hodnota.

kolektor	n		<i>T</i> (m².s⁻¹)		<i>k</i> (m.s ⁻¹)			
KOIEKIDI		min	geom. x	max	min	geom. x	max	
kvartér	13	6,4 . 10 ⁻⁷	1,6 . 10 ⁻³	1,5 . 10 ⁻²	3,1 . 10 ⁻⁷	2,8 . 10 ⁻⁴	2,0 . 10 ⁻³	
kolektor AB	16	4,4 . 10 ⁻⁸	8,2 . 10 ⁻⁴	3,5 . 10 ⁻²	2,7 . 10 ⁻⁷	1,8 . 10 ⁻⁵	9,5 . 10 ⁻⁴	
kolektor C	9	4,4 . 10 ⁻⁸	5,2 . 10 ⁻⁵	2,1 . 10 ⁻³	1,5 . 10 ⁻⁹	2,0 . 10 ⁻⁶	8,6 . 10 ⁻⁵	
kolektor C puklinový	9	2, 9 . 10 ⁻⁶	2,2 . 10 ⁻⁴	1,5 . 10 ⁻³	3,6 . 10 ⁻⁶	1,3 . 10 ⁻⁵	3,6 . 10 ⁻⁵	
krystalinikum	3	1,3 . 10 ⁻⁵	2,3 . 10 ⁻⁵	5,2 . 10 ⁻⁵	4,8 . 10 ⁻⁷	1,5 . 10 ⁻⁶	4,6 . 10 ⁻⁶	
permokarbon	2	1,4 . 10 ⁻⁴		6,0 . 10 ⁻⁴	1,2 . 10 ⁻⁶		5,3 . 10 ⁻⁶	

Tab. 2 Hodnoty koeficientů transmisivity a hydraulické vodivosti, vnitřní polygon

n – počet hodnot, T – koeficient transmisivity, k – koeficient hydraulické vodivosti, min – minimální hodnota, geom. x – geometrický průměr, max – maximální hodnota.

Velkým rozdílům ve specifických vydatnostech vrtů odpovídá také značný rozsah hydraulické vodivosti jednotlivých hydrogeologických jednotek. V kvartéru zcela převažuje hydraulická vodivost v řádu 10⁻⁴ m.s⁻¹. V kolektoru AB vzhledem k větší délce testovaných úseků je hydraulická vodivost až na výjimky v rozsahu řádu 10⁻⁶ až 10⁻⁴ m.s⁻¹, se střední hodnotou 1,8 . 10⁻⁵ m.s⁻¹. U kolektoru C převažují hodnoty v řádech 10⁻⁶ a 10⁻⁵ m.s⁻¹, v hodnoceném souboru dat byla zaznamenána vyšší hydraulická vodivost u puklinového kolektoru C. V permokarbonu a krystaliniku jsou hydraulické vodivosti v řádu 10⁻⁷ a 10⁻⁶ m.s⁻¹.

2.3 Střední polygon

Do zpracování hydraulických dat ze středního polygonu byly zahrnuty vrty hlubší než 30 m, z hodnocení byly vyřazeny kvartérní vrty a vrty zasahující do velmi mělkých částí hydrogeologických jednotek. Vrtů s hydraulickými daty bylo ve výběru celkem 73. Zcela převažovaly vrty zasahující do kolektoru AB, menší datové soubory byly dostupné pro kolektory C a D a pro permokarbon. Jednotlivé vrty v granitech a terciérních vulkanitech do statistického zpracování dat v Tab. 3 a Tab. 4 zahrnuté nebyly.



Průměrná hloubka vrtu v souboru je 133 m, maximální hloubka vrtu je 394 m. Tedy ani ve středním polygonu nejsou vrty s hloubkovým dosahem, který by se alespoň blížil hloubce otevřeného úseku na LT-1. Vzhledem k pozici hydrogeologických jednotek jsou hloubky vrtů v hodnocených jednotkách rozdílné. Vrty v permokarbonu mají průměrnou hloubku 216 m, v kolektoru AB 165 m a v kolektorech C a D je hloubkový dosah výrazně nižší – průměrná hloubka 80 respektive 71 m.

Nejvyšší specifické vydatnosti byly zaznamenány u kolektoru AB, v průměru 4 l.s⁻¹.m⁻¹, nižší průměrné specifické vydatností mají vrty v kolektoru C a v permokarbonu 1,6 respektive 1,4 l.s⁻¹.m⁻¹. Nejnižší hodnoty byly zaznamenány v kolektoru C s puklinovou propustností a v kolektoru D 0,7 respektive 1 l.s⁻¹.m⁻¹. Ve srovnání s mělčími vrty vnitřního polygonu zde nejsou řádové rozdíly mezi jednotkami a výrazně se projevil vliv uzavírání puklin s hloubkou u puklinového kolektoru C.

kolektor	n	<i>q</i> (l.s ⁻¹ .m ⁻¹)				Y		Z			
	••	min	х	max	min	х	max	min	х	max	
kolektor AB	36	0,020	3,917	35,000	4,30	5,88	7,54	2,49	4,09	5,98	
kolektor C	15	0,000	1,590	10,000	1,65	5,23	7,00	0,18	3,70	4,99	
kolektor C	5	0.072	0 720	1 5 4 0	1 86	5 67	6 10	2 56	4.00	1 17	
puklinový	ſ	0,073	0,739	1,540	4,80	5,07	0,19	3,30	4,00	4,47	
kolektor D	7	0,018	1,002	2,418	4,26	5,63	6,38	2,66	4,02	4,79	
permokarbon	7	0,137	1,401	3,711	5,14	5,93	6,57	3,06	3,71	4,50	

Tab. 3 Srovnávací hydraulické parametry hornin, střední polygon

n – počet hodnot, q – specifická vydatnost, Y – index transmisivity, Z – index hydraulické vodivosti, min – minimální hodnota, x – aritmetický průměr, max – maximální hodnota.

kolektor	n		<i>T</i> (m ² .s ⁻¹)		<i>k</i> (m.s ⁻¹)			
		min	geom. x	max	min	geom. x	max	
kolektor AB	36	2,0 . 10 ⁻⁵	7,4 . 10 ⁻⁴	3,5 . 10 ⁻²	3,1 . 10 ⁻⁷	1,2 . 10 ⁻⁵	9,5 . 10 ⁻⁴	
kolektor C	15	4,4 . 10 ⁻⁸	1,4 . 10 ⁻⁴	1,0.10 ⁻²	1,5 . 10 ⁻⁹	4,7 . 10 ⁻⁶	9,8 . 10 ⁻⁵	
kolektor C puklinový	5	7,3 . 10 ⁻⁵	4 , 7 . 10 ⁻⁴	1,5 . 10 ⁻³	3,6 . 10 ⁻⁶	1,0 . 10 ⁻⁵	3,0 . 10 ⁻⁵	
kolektor D	7	1,8 . 10 ⁻⁵	4,2 . 10 ⁻⁴	2,4 . 10 ⁻³	4,6 . 10 ⁻⁷	1,1.10 ⁻⁵	6,1 . 10 ⁻⁵	
permokarbon	7	1,4 . 10 ⁻⁴	8,6 . 10 ⁻⁴	3,7 . 10 ⁻³	1,2 . 10 ⁻⁶	5,1.10 ⁻⁶	3,1 . 10 ⁻⁵	
tufy	2	9,3 . 10 ⁻⁶		9,8 . 10 ⁻⁵	8,4 . 10 ⁻⁷		6,1 . 10 ⁻⁶	

Tab. 4 Hodnoty koeficientů transmisivity a hydraulické vodivosti, střední polygon

n – počet hodnot, T – koeficient transmisivity, k – koeficient hydraulické vodivosti, min – minimální hodnota, geom. x – geometrický průměr, max – maximální hodnota.

Hydraulická vodivost hlubších vrtů kolektoru AB je v rozsahu čtyř řádů od 10^{-7} po 10^{-4} m.s⁻¹, 70% hodnot spadá do řádů 10^{-5} a 10^{-6} m.s⁻¹, geometrický průměr koeficientu hydraulické vodivosti byl 1,2. 10^{-5} m.s⁻¹. Srovnatelnou střední hodnotu koeficientu hydraulické vodivosti mají datové soubory puklinového kolektoru C a kolektoru D. Průměrné hodnoty v řádu 10^{-6} m.s⁻¹ byly zjištěny u kolektoru C a permokarbonu. Rozdíly v hydraulických vodivostech hydrogeologických jednotek nejsou velké, ve všech jednotkách výrazně převažují hodnoty v řádech 10^{-5} a 10^{-6} m.s⁻¹. Nižší průměrná hodnota u kolektoru C je dána výskytem několika vrtů s velmi nízkou hydraulickou vodivostí – minimum 1,5. 10^{-9} m.s⁻¹. U vrtů v permokarbonu převládají hodnoty v řádu 10^{-6} m.s⁻¹.



2.4 Velký polygon

Ve velkém polygonu bylo zpracováno celkem 163 vrtů hlubších než 100 m s daty z hydrodynamických testů. Do hydrogeologických jednotek se podařilo zatřídit 154 vrtů, ostatní vrty, pokud byla jejich četnost jeden nebo dva v jedné jednotce, do zpracování zahrnuté nebyly. Průměrná hloubka vrtu je 340 m, nejhlubší vrt dosahuje 1665 m. Hodnocený datový soubor velkého polygonu v okolí Litoměřic dosahuje i hloubek odpovídajících hloubce otevřeného úseku ve vrtu LT-1.

Pokud to počet vrtů v dané jednotce umožňoval, byla v rámci jednotky vyčleněna skupina hlubších vrtů. Rozhodujícím kritériem pro rozčlenění vrtů do skupin byla hloubka středu testovaného (otevřeného) intervalu vrtu. Některé hluboké vrty byly v této skupině testovány etážově, v několika hloubkových úrovních. V křídových kolektorech byly vyčleněny vrty se středem testovaného intervalu hlouběji než 200 m, u vrtů v permokarbonu byla tímto limitem hloubka 800 m.

Na rozdíl od předchozích polygonů se zde podařilo vyčlenit u některých vrtů samostatný kolektor A, který má současně s kolektorem AB nejčetnější zastoupení v hodnoceném souboru.

Průměrné specifické vydatnosti vrtů se v hlavních hydrogeologických jednotkách bez ohledu na hloubku testovaného úseku pohybují nejčastěji v prvních jednotkách a desetinách l.s⁻¹.m⁻¹. Nejvyšší průměrné specifické vydatnosti vykazuje stejně jako u předchozích polygonů kolektor AB (2,8 l.s⁻¹.m⁻¹). Průměrnou hodnotu nad 1 l.s⁻¹.m⁻¹ má také kolektor C. Naopak nejnižší průměrné specifické vydatnosti mají vrty v kolektoru BC, kolektoru D a v permokarbonu, kde se hodnoty pohybují od 0,1 do 0,5 l.s⁻¹.m⁻¹.

Rozdíly ve specifických vydatnostech mezi celým datovým souborem a souborem hlubších vrtů v rámci jedné jednotky nejsou dané jen hloubkou testovaného úseku, ale také průměrnou délkou otevřeného intervalu.

Průměrná délka testovaného úseku je u obou vyčleněných hloubkových úrovní obdobná u kolektoru AB a u permokarbonu. U obou jednotek se projevil výrazný pokles specifické vydatnosti s hloubkou testovaného úseku z 2,8 na 0,5 l.s⁻¹.m⁻¹ u kolektoru AB a z 0,5 na 0,02 l.s⁻¹.m⁻¹ u permokarbonu.

U kolektoru A a u kolektoru C je průměrná délka testovaného úseku v souboru hlubších vrtů dvojnásobná ve srovnání s celým souborem dané jednotky. Specifická vydatnost uvedená v Tab. 5 zdánlivě s hloubkou úseku roste, ale tento nárůst je dán pouze delším otevřeným intervalem u hlubších vrtů.



		hloubka			Y		Z				
kolektor	n	intervalu* (m)	min	х	max	min	х	max	min	х	max
kolektor A vše	42	184	0,003	0,844	3,711	3,47	5,80	7,29	1,55	3,97	5,27
kolektor A pod 200 m	8	472	0,003	0,879	2,759	3,47	5,54	6,44	1,55	3,49	4,34
kolektor AB vše	51	189	0,00005	2,774	35,000	1,68	5,43	7,54	-0,48	3,63	5,98
kolektor AB pod 200 m	17	354	0,00005	0,510	2,000	1,68	5,16	6,30	0,71	3,42	4,46
kolektor BC	5	275	0,056	0,111	0,155	4,75	5,02	5,19	2,47	2,99	3,46
kolektor C vše	22	184	0,001	1,615	10,000	2,75	5,63	7,00	1,27	3,70	4,99
kolektor C pod 200 m	6	379	0,084	1,835	5,706	4,93	5,93	6,76	2,92	3,59	4,30
kolektor C puklinový	8	162	0,009	0,940	3,236	3,96	5,60	6,51	2,34	3,84	4,97
kolektor D	6	107	0,016	0,391	1,354	4,20	5,10	6,13	2,66	3,30	4,18
Permokarbon vše	19	564	0,00001	0,545	3,711	1,15	4,16	6,57	-0,82	1,90	4,50
Permokarbon pod 800 m	7	1029	0,00001	0,002	0,006	1,15	2,73	3,76	-0,82	0,52	1,54

Tab. 5 Srovnávací hydraulické parametry hornin, velký polygon

*průměrná hloubka středu testovaného intervalu (m), n – počet hodnot, q – specifická vydatnost, Y – index transmisivity, Z – index hydraulické vodivosti, min – minimální hodnota, x – aritmetický průměr, max – maximální hodnota.

Geometrický průměr hydraulické vodivosti se u všech křídových kolektorů pohybuje v rozmezí řádu 10^{-6} m.s⁻¹, v případě kolektoru BC na spodní hranici tohoto řádu (Tab. 6). Průměrné hodnoty hydraulické vodivosti kompletních datových souborů pro křídové kolektory klesají postupně od kolektoru A – 9,3 . 10^{-6} m.s⁻¹ po kolektor D – 2,0 . 10^{-6} m.s⁻¹. Výjimku tvoří pouze kolektor BC, jehož nižší hydraulická vodivost je dána větší hloubkou testovaných intervalů v hodnoceném souboru – průměrná hloubka středu testovaného intervalu je 275 m. U ostatních křídových kolektoru D je to pouze 107 m.

Hodnoty hydraulické vodivosti nejsou ovlivněny délkou testovaného intervalu, u všech křídových kolektorů se projevil výrazný rozdíl v hydraulické vodivosti mezi hlubšími vrty (testované intervaly ve větší hloubce pod zemským povrchem) a celou datovou sadou. Nejvýraznější pokles je u kolektoru A, kde hydraulická vodivost poklesla z 9,3 10⁻⁶ m.s⁻¹ u celého souboru na 3,1 10⁻⁶ m.s⁻¹ u hlubších vrtů. U tohoto kolektoru je současně také největší rozdíl mezi průměrnou hloubkou intervalu celého souboru a výběru hlubších vrtů.

Vybrané vrty zasahující do permokarbonu mají testované intervaly výrazně hlouběji pod zemským povrchem ve srovnání s vrty z křídy (Tab. 6.). Nižší je také hydraulická vodivost testovaných úseků – pro celý datový soubor je geometrický průměr 8.10⁻⁸ m.s⁻¹, u výběru hlubokých vrtů je tato hodnota ještě o více než řád nižší – 3,3.10⁻⁹ m.s⁻¹. Výběr hlubokých vrtů z permokarbonu má průměrný střed testovaného intervalu v hloubce 1029 m, nejhlubší testovaný úsek zasahoval do hloubky 1300 m. Vrt



LT-1 je pažený do hloubky 852 m, svým otevřeným úsekem zasahuje částečně do permokarbonu a převážnou částí do proterozoických svorů. Ve svrchních částech otevřeného úseku vrtu LT-1 v porušených úsecích je tedy možné očekávat hydraulickou vodivost v řádu 10⁻⁹ a 10⁻¹⁰ m.s⁻¹ (permokarbon odpovídající hloubky).

Z krystalinika je z odpovídajících hloubek a hornin dostupný pouze jediný údaj. Vrt BR-1 u Brňan zastihl v úseku 1318 až 1384 m fylity a diority s hydraulickou vodivostí 1,7.10⁻⁹ m.s⁻¹.

,		hloubka		T (m ² .s ⁻¹)	71 75	k (m.s ⁻¹)			
kolektor	n	intervalu* (m)	min	geom. x	max	min	geom. x	max	
kolektor A vše	42	184	3,0 . 10 ⁻⁶	6,3 . 10 ⁻⁴	2,0 . 10 ⁻²	3,5 . 10 ⁻⁸	9,3 . 10 ⁻⁶	1,8 . 10 ⁻⁴	
kolektor A pod 200 m	8	472	3,0 . 10 ⁻⁶	3,5 . 10 ⁻⁴	2,8 . 10 ⁻³	3,5 . 10 ⁻⁸	3,1 . 10 ⁻⁶	2,2 . 10 ⁻⁵	
kolektor AB vše	51	189	4,8 . 10 ⁻⁸	2,7 . 10 ⁻⁴	3,5 . 10 ⁻²	3,3 . 10 ⁻¹⁰	4,3 . 10 ⁻⁶	9,5 . 10 ⁻⁴	
kolektor AB pod 200 m	17	354	4,8 . 10 ⁻⁸	1,5 . 10 ⁻⁴	2,0 . 10 ⁻³	5,1 . 10 ⁻⁹	2,7 . 10 ⁻⁶	2,9 . 10 ⁻⁵	
kolektor BC	5	275	5,6 . 10 ⁻⁵	1,0.10-4	1,6 . 10 ⁻⁴	3,0 . 10 ⁻⁷	9,9 . 10 ⁻⁷	2,9 . 10 ⁻⁶	
kolektor C vše	22	184	5,6 . 10 ⁻⁷	3,4 . 10 ⁻⁴	1,0 . 10 ⁻²	1,9 . 10 ⁻⁸	4,0 . 10 ⁻⁶	9,8 . 10 ⁻⁵	
kolektor C pod 200 m	6	379	2,7 . 10 ⁻⁶	3,3 . 10 ⁻⁴	5,7 . 10 ⁻³	4,0 . 10 ⁻⁸	1,8 . 10 ⁻⁶	2,0 . 10 ⁻⁵	
kolektor C puklinový	8	162	1,910 ⁻⁶	2,0 . 10 ⁻⁴	3,2 . 10 ⁻³	1,0 . 10 ⁻⁸	3,010 ⁻⁶	9,2 . 10 ⁻⁵	
kolektor D	6	107	1,6 . 10 ⁻⁵	1,2 . 10 ⁻⁴	1,4 . 10 ⁻³	4,5 . 10 ⁻⁷	2,0 . 10 ⁻⁶	1,5 . 10 ⁻⁵	
Permokarbon vše	19	564	1,4 . 10 ⁻⁸	1,5 . 10 ⁻⁵	3,7 . 10 ⁻³	1,5 . 10 ⁻¹⁰	8,0 . 10 ⁻⁸	3,1 . 10 ⁻⁵	
permokarbon pod 800 m	7	1029	1,4 . 10 ⁻⁸	5,4 . 10 ⁻⁷	5,7 . 10 ⁻⁶	1,5 . 10 ⁻¹⁰	3,3 . 10 ⁻⁹	3,4 . 10 ⁻⁸	

Tab. 6 Hodnoty koeficientů transmisivity a hydraulické vodivosti, velký polygon

*průměrná hloubka středu testovaného intervalu (m), n – počet hodnot, T – koeficient transmisivity, k – koeficient hydraulické vodivosti, min – minimální hodnota, geom. x – geometrický průměr, max – maximální hodnota.

3 Hydraulické vlastnosti horninové matrice z vrtu LT-1

Část zachovaného vrtného jádra z vrtu LT-1 byla využita pro laboratorní testy hydraulické vodivosti horninové matrice krystalických hornin z velkých hloubek. Jednalo se o 3 vzorky vrtného jádra z hloubky 980 až 993 m (Obr. 2, Obr. 3, Obr. 4). Vzorky jsou tvořeny kvarcitickým granátickým svorem s občasnými pásky čistého křemene do mocnosti 1 cm a délky 10 cm:

 Vzorek označený LIT 1 je z hloubky 992,3 m. Makroskopicky je zde svor relativně hrubozrnnější a obsahuje jen menší podíl makroskopicky viditelného granátu. Vzorek je petrograficky odlišný od vzorku LIT 2, je však podobný vzorku LIT 3. Svor zde má monoklinální foliaci o úklonu 63° (při předpokladu vertikální orientace osy vrtu).



- Vzorek LIT 2 je z metráže 980,5-980,8 m. Makroskopicky je svor relativně jemnozrnnější, obzvlášť v části u metráže 980,5, a obsahuje vysoký podíl zrn granátu cca 2 mm velkých. Svor zde má monoklinální foliaci s úklonem 56° (při předpokladu vertikální orientace osy vrtu).
- Vzorek LIT 3 je z hloubky 984,7 až 984,9 m. Makroskopicky je zde svor relativně hrubozrnnější a obsahuje jen menší podíl makroskopicky viditelného granátu. Tato varieta svoru je charakteristická pro převážnou většinu vzorků svoru z vrtného jádra PVGT-LT1. Svor zde má monoklinální foliaci o úklonu 66° (při předpokladu vertikální orientace osy vrtu).

Číslo za lomítkem v Tab. 7 odpovídá pořadí zkušebního tělíska připraveného z daného vzorku.



Obr. 2: Vzorek LIT 1

Obr. 3: Vzorek LIT 2



Obr. 4: Vzorek LIT 3 s odvrtanými zkušebními tělísky



Obr. 5: Zkušební tělíska pro stanovení hydraulické vodivosti.

Pokud to rozměr vzorku dovoloval, bylo ze vzorku odvrtáno více zkušebních tělísek s ohledem na směr foliace svoru. Testováno bylo celkem šest tělísek. Čtyři vzorky (LIT 1/1, LIT 2/1, LIT 2/3, LIT 3/3) byly měřeny s orientací foliace paralelní se směrem proudění. Dva vzorky (LIT 2/2, LIT 3/1) byly měřeny s orientací foliace kolmou ke směru proudění.

Podrobně je metodika testování, použité přístrojové vybavení a způsob výpočtu koeficientu hydraulické vodivosti popsána ve zprávě Petružálka (2018) v příloze č. 1 této zprávy.



Výsledky laboratorních testů jsou uvedeny v Tab. 7. Propustnost horninové matrice vzorků svoru z hloubky přibližně jednoho kilometru je extrémně nízká. Hodnoty se pohybují v řádech 10⁻¹⁵ a 10⁻¹⁶ m.s⁻¹. Podle klasifikace hornin Jetela (1985) jsou horniny s koeficientem hydraulické vodivosti nižším než 10⁻⁸ m.s⁻¹ nepatrně propustné. Naměřené hodnoty jsou o 6 až 8 řádů nižší než spodní limit Jetelovy klasifikace. Takové horniny je možné považovat za nepropustné. Mezi jednotlivými vzorky nejsou v hodnotách hydraulické vodivosti výraznější rozdíly. Nepotvrdil se předpoklad rozdílu hydraulické vodivosti při toku vody ve směru foliace a kolmo na ni. U vzorku č 2 (LIT 2) jsou hodnoty hydraulické vodivosti ve směru foliace vyšší než kolmo na ni, u vzorku č. 3 je to ale naopak. Rozdíly jsou malé, pravděpodobně při takto nízkých vodivostech, na hraně citlivosti měřící aparatury.

Hodnoty hydraulické vodivosti horninové matrice granitoidů a metamorfovaných hornin byly ve velkém rozsahu (stovky vzorků) stanovovány v rámci výzkumného projektu TIP MPO "Výzkum vlivu mezizrnné propustnosti granitů na bezpečnost hlubinného ukládání do geologických formací a vývoj metodiky a měřící aparatur". Hodnoty se pohybovaly v řádech 10⁻¹⁰ až 10⁻¹⁴ m.s⁻¹ s mediánem hodnot v řádu 10⁻¹² m.s⁻¹ (Rukavičková et al. 2013). Tyto vzorky byly odebírány z vrtů s maximální hloubkou 100 m. Ze srovnání s hodnotami v Tab. 7 je zřejmé, že i u mikropuklinových sítí dochází k výraznému uzavírání s narůstající hloubkou hornin pod zemským povrchem.

100171100											
vzorek	foliace	L	d	А	V	Н	t	k	k10		
	[°]	[mm]	[mm]	[cm ²]	[ml]	[m]	[min]	[m/s]	[m/s]		
LIT 1/1	2	51,38	49,44	20,73	5,382	153,1	3200	4,54E-15	3,50E-15		
LIT 2/1	15	51,18	49,41	20,57	1,395	153,1	2500	1,51E-15	1,17E-15		
LIT 2/3	5	51,04	49,43	20,46	15,957	153,1	4100	1,06E-14	8,15E-15		
LIT 3/3	3	51,26	49,36	20,64	0,910	153,1	1900	1,29E-15	9,98E-16		
LIT 2/2	80	51,13	49,46	20,53	2,695	153,1	6200	1,18E-15	9,09E-16		
LIT 3/1	80	51,14	49,49	20,54	14,023	153,1	4700	8,09E-15	6,24E-15		

Tab. 7: Koeficient hydraulické vodivosti včetně měřených hodnot pro jeho výpočet

t [min] je časový interval měření; V [ml] je objem proteklé vody za časový interval t; L [mm] je výška zkušebního vzorku před zkouškou; A [cm²] je průřezová plocha zkušebního vzorku, d [mm] je poloměr zkušebního vzorku, H [m] je rozdíl tlakových výšek hladin, k10 je koeficient hydraulické vodivosti přepočtený na teplotu 10°C.



4 Výsledky hydrodynamických testů ve vrtu LT-1

4.1 Čerpací a stoupací zkoušky

Stoupací zkouška ze dne 17. 8. 2018

První orientační stoupací zkouška byla provedena dne 17. 8. 2018 po jednodenním čerpání, kdy bylo postupně z vrtu odčerpáno cca 300 l vody. Voda byla čerpána v několika etapách, kdy byla postupně snižována hladina vody ve vrtu. Kontinuální čerpání nebylo možné kvůli vysoké koncentraci rozpuštěného plynu CH₄ ve vodě ve vrtu. Uvolněný CH₄ se vlivem snížení tlaku (hladiny při čerpání) nahromadil v turbíně čerpadla a čerpání se přerušilo. Data nástupu hladiny při stoupací zkoušce byla před dalším zpracováním barometricky zkompenzována, aby byl odstíněn vliv variací atmosférického tlaku. Zkompenzovaná data nástupu hladiny podzemní vody jsou zobrazena na Obr. 6.



Obr. 6: Křivka nástupu hladiny při stoupací zkoušce ze dne 17. 08. 2018.

Stoupací zkouška ze dne 24. 8. 2019

Druhá orientační stoupací zkouška byla provedena dne 24.8.2019 po cca dvouhodinovém čerpání. Data nástupu hladiny při stoupací zkoušce byla před dalším zpracováním barometricky zkompenzována, aby byl odstíněn vliv variací atmosférického tlaku. Zkompenzovaná data poklesu hladiny při čerpání i nástupu hladiny při stoupací zkoušce jsou zobrazena na Obr. 7.





Obr. 7 Křivka čerpání a nástupu hladiny při stoupací zkoušce ze dne 24. 08. 2019.

Vyhodnocení čerpacích zkoušek

Získaná data z čerpacích zkoušek byla vyhodnocena v programu AQTESOLV. K vyhodnocení křivky byla použita Theisova metoda pro stoupací zkoušku vrtu napjaté zvodně (1935). Jako vstupní parametr byl kromě dat z čerpací zkoušky použit průměr vrtu 152 mm. Čerpání před první stoupací zkouškou nebylo provedeno standardně. Přerušované čerpání trvalo cca 24 hodin a sestávalo z několika etap, kdy byla hladina vždy čerpáním relativně rychle snížena, načež bylo čerpání zastaveno a hladina cca 1-3 hodiny stoupala. Během každé epizody čerpání byla hladina snížena do větší hloubky, než jaké bylo snížení u předchozí epizody. V rámci zjednodušení, aby mohla být zkouška zhodnocena, bylo před první stoupací zkouškou předpokládáno čerpání konstantní rychlostí 0,64 l·min⁻¹ trvající 4 hodiny. Čerpání před druhou stoupací zkouškou bylo provedeno v jedné etapě postupně klesající rychlostí od 0,65 l·min⁻¹ do 0,15 l·min⁻¹, čerpání trvalo 2 hodiny.

Transmisivita otevřeného úseku vrtu LT-1 (852 – 2111 m) stanovená z první stoupací zkoušky je 6,2 . 10⁻⁹ m²·s⁻¹ (Obr. 8). Na grafu t/t' proti reziduálnímu snížení na Obr. 8 se projevuje zlom v rychlosti nástupu hladiny. Tento zlom se názorně projevuje jako prudší nástup hladiny během první 1,5 hodiny stoupací zkoušky (Obr. 6). Není zcela jasné, co tento zlom vyvolalo, ale pravděpodobně se jedná o projev vázaný na konstrukci vrtu spíše než na hydraulické vlastnosti zastižených hornin.

Transmisivita otevřeného úseku vrtu LT-1 (852 – 2111 m) stanovená z druhé stoupací zkoušky je 1,15 . 10^{-8} m²·s⁻¹, přičemž nebylo dosaženo lineárního tvaru křivky v grafu t/t' proti reziduálnímu snížení na konci stoupací zkoušky, což naznačuje, že hodnota transmisivity by měla být nižší než uvedená hodnota (Obr. 9).

Hodnota transmisivity i hydraulické vodivosti vypočítaná z druhé stoupací zkoušky je přibližně dvojnásobná oproti první stoupací zkoušce. Průměrná hydraulická vodivost celého testovaného úseku z první stoupací zkoušky je 4,94 . $10^{-12} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a 9,17 . $10^{-12} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ z druhé stoupací zkoušky.

Při předpokladu, že propustnost neporušených fylitů ve spodní části vrtu je zanedbatelná a přítok vody do vrtu je vázán pouze na několik poruch o předpokládané celkové mocnosti 1 m, pak je odvozená hodnota hydraulické vodivosti pro 1 m úsek 6,22 . $10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ pro první stoupací zkoušku a 1,15 . $10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ pro druhou stoupací zkoušku.



Při opakovaných teplotních měřeních v průběhu vodních tlakových zkoušek (viz kapitola 4.2) a následných testů byla v hloubce přibližně 800 m zjištěna ztráta chladné vody injektované z povrchu (Fischer et al. 2020). Řadou karotážních měření byla v hloubkovém intervalu cca 892 až 911 m registrována poruchová zóna s řadou dílčích poruch. Nejvýraznější poruchy jsou v hloubce kolem 900 m. Je proto možné předpokládat, že naprostá většina vody byla při vodních tlakových zkouškách vtláčena do této poruchy, která se nachází poloze křemenného porfyru na kontaktu permokarbonu s podložním krystalinikem. Z této poruchy také pravděpodobně přitékala z převážné části podzemní voda do vrtu.

Charakteristiky obou stoupacích zkoušek a odvozené hodnoty jsou uvedeny v Tab. 8.

Uvedené hodnoty získané z testování vrtu LT-1 odpovídají archivním datům. Je třeba si uvědomit, že v hlubokých strukturních vrtech byly hydraulicky testovány a vzorkovány úseky perspektivní z hlediska hydrogeologie, tedy úseky s indikací přítoku podzemních vod nebo porušené zóny.

Stoupací zkouška	Datum	Délka čerpání (h)	Odčerpané množství vody (I)	Snížení hladiny ve vrtu po čerpání (m)	Transmisivita T (m ² ·s ⁻¹)	Hydraulická vodivost k (m·s ⁻¹) pro celý otevřený interval	Hydraulická vodivost k (m·s ⁻¹) při předpokladu propustné zóny o mocnosti 1 m
1.	17.8.2018	4	300	38	6,22 . 10 ⁻⁹	4,94·. 10 ⁻¹²	6,22 . 10 ⁻⁹
2.	24.8.2019	2	32	9,2	1,15 . 10 ⁻⁸	9,17·. 10 ⁻¹²	1,15 . 10 ⁻⁸

Tab. 8: Vstupní a odvozené hydraulické parametry stoupacích zkoušek.





Obr. 8 Grafický výstup programu AQTESOLV, stoupací zkouška ze dne 17. 08. 2018.



Obr. 9: Grafický výstup programu AQTESOLV, stoupací zkouška ze dne 24. 08. 2019.



4.2 Vodní tlakové zkoušky

Vodní tlakové zkoušky (injekční zkoušky) byly realizovány ve dnech 24. 1. 2020 až 26. 1. 2020 firmou H. Anger's Söhne Bohr- und Brunnenbaugesellschaft mbH. Voda byla vtláčena uzavřeným zhlavím vrtu do celého profilu vrtu. Hodnoty hydraulické vodivosti hornin otevřeného úseku byly stanoveny ze tří tlakových stupňů označených číslem 3, 4 a 5 na Obr. 10. V těchto úsecích se prováděcí firmě dařilo udržovat konstantní hodnotu zkušebního tlaku umožňující vyhodnocení hydraulické vodivosti.



Obr. 10: Záznam z průběhu testování na vrtu LT-1; zkušební tlak - modrá čára, spotřeba vtláčené vody (průtok) – oranžová čára, celkový objem vtláčené vody – fialová přerušovaná čára (Fischer et al. 2020).

Hodnoty zkušebního tlaku a průtoku vtláčené vody byly registrovány v intervalu jedné minuty. Technické parametry používaného čerpadla neumožňovaly udržovat menší průtok vody do vrtu než 3,5 l.min⁻¹. Hydraulická vodivost horninového prostředí je velmi nízká, vtláčené množství vody (průtok) do vrtu bylo při nastavených tlakových stupních menší, než byl spodní limit čerpadla. Čerpadlo proto pracovalo pouze v krátkých pulzech. K zapnutí čerpadla došlo při poklesu tlaku pod nastavený spodní limit, k jeho opětovnému vypnutí při dosažení nastaveného horního limitu tlaku. Délka pulzu byla kratší než minuta, záznamy průtoku registrované v minutových intervalech proto nebylo možné využít pro vyhodnocení.

Hodnoty průtoku vtláčené vody potřebné k výpočtu hydraulické vodivosti byly proto v prvním kroku stanoveny z manuálních záznamů celkového množství vtláčené vody na instalovaném vodoměru. Z automatického záznamu tlaku po jedné minutě byla odečtena maxima (Obr. 11). Byl stanoven počet pulzů během jednoho tlakového stupně a dále stanovena délka časového intervalu mezi jednotlivými pulzy. Podílem celkové spotřeby za tlakový stupeň a počtu pulzů byla získána průměrná spotřeba vody za interval. Z délky trvání jednotlivých intervalů a ze spotřeby byl posléze určen průtok (I.min⁻¹). Tento způsob stanovení průtoku byl vyhovující pouze pro první tlakový stupeň (č. 3 na Obr. 10), kde se délka intervalů mezi pulzy pohybovala v rozsahu 10 až 17 minut.





Obr. 11: Odečet délky pulzu čerpadla z minutových záznamů tlaku.



Obr. 12: Odečet délky pulzu čerpadla ze snímků obrazovky notebooku.

Na začátku druhého tlakového stupně byl interval mezi pulzy čerpadla pouze 2 minuty. Při automatickém záznamu tlaku 1x za minutu docházelo při výše uvedeném postupu k velkému zkreslení výsledků. V druhé fázi zpracování dat byla délka intervalu stanovena manuálně z kontrolních snímků obrazovky notebooku, který byl v průběhu testů využíván k zobrazování aktuálně měřených hodnot (Obr. 12). Výpočty se tímto způsobem zpřesnily.

V průběhu prvních dvou tlakových stupňů byl objem vtláčené vody při jednom pulzu čerpadla relativně konstantní. Při třetím tlakovém stupni se objem vody vtlačený do vrtu při jednom pulzu čerpadla výrazně měnil (Obr. 13). Objem vtlačené vody v průběhu jednotlivých pulzů čerpadla byl proto na snímcích obrazovky notebooku stanoven integrací plochy pod křivkou průtoku (Obr. 14) a souběžně výpočtem průměrných objemů vtláčené vody pro kratší intervaly manuálních záznamů z vodoměru. Obě metody přinesly srovnatelné výsledky.



Obr. 13: Pokles vtláčeného množství vody (směr modré šipky) při pulzu čerpadla během třetího tlakového stupně.

Obr. 14: Integrace plochy na snímcích obrazovky v programu ImageJ

Výsledné grafy zkušebního tlaku a průtoku vtláčené vody do vrtu jsou na Obr. 15, Obr. 16 a Obr. 17.

V průběhu prvního tlakového stupně (zkušební tlak 31.5 bar) průtok na začátku poklesl z 0,31 na 0,26 l.min⁻¹, poté prudce vzrostl na 0,37 l.min⁻¹ a začal opět postupně klesat. Na konci tlakového stupně, po 13 hodinách vtláčení byl průtok v rozmezí 0,19 až 0,21 l.min⁻¹ (Obr. 15). Počáteční pokles průtoku a jeho následný prudký nárůst byly pravděpodobně způsobeny posunem nebo vypláchnutím puklinové výplně.





Obr. 15: Průběh zkušebního tlaku a vypočítaných průtoků v průběhu prvního tlakového stupně (31,5 bar).

Druhý tlakový stupeň (zkušební tlak 35,5 barů) trval pouze 3 hodiny. Průtok vtláčené vody do vrtu zpočátku kolísal kolem hodnoty 1,8 l.min⁻¹ a poté začal postupně klesat až na hodnotu 0,54 l.min⁻¹ na konci měření.



Obr. 16: Průběh zkušebního tlaku a vypočítaných průtoků v průběhu druhého tlakového stupně (35,5 bar).

Na začátku třetího tlakového stupně (zkušební tlak 39,5 barů) průtok velmi rychle poklesl z hodnoty 5,5 na přibližně 1 l.min⁻¹ a poté velmi pomalu klesal až k hodnotě 0,7 l.min⁻¹ na konci testu.





Obr. 17: Průběh zkušebního tlaku a vypočítaných průtoků v průběhu třetího tlakového stupně (39,5 bar).

Výsledky měření při jednotlivých tlakových stupních byly vyhodnoceny pomocí rovnice ustáleného stavu (Moye 1967) a metodami pro neustálené proudění toku (Cooper a Jacob 1946, Birsoy a Summers 1980) s využitím programu AQTESOLV (Obr. 18). Výsledky jsou uvedeny v Tab. 9.

		ustále	ené prouděi	ní	neustálené proudění			
	lakový tupeň (bar)	průtok na k (m/s) k		k (m/s) pro	k (m/s)	k (m/s) pro		
tlakový		konci	pro celý	pukliny	pro celý	pukliny	storativita	
stupeň		tlakového	testovaný	v 1 m	testovaný	v 1 m	3101011110	
		stupně (l/min)	interval	intervalu	interval	intervalu		
1	31,5	0,19	1,3 . 10 ⁻¹¹	4,6 . 10 ⁻⁹	3,1.10 ⁻¹²	4,0 . 10 ⁻⁹	8,0 . 10 ⁻⁴	
2	35,5	0,54	3,2 . 10 ⁻¹¹	1,2 . 10 ⁻⁸	4,7 . 10 ⁻¹²	5,9 . 10 ⁻⁹	5,7 . 10 ⁻³	
3	39,5	0,63	3,4 . 10 ⁻¹¹	1,2.10-8	7,1.10 ⁻¹²	8,9.10 ⁻⁹	2,7 . 10 ⁻³	

Tab. 9: Hydraulické parametry testovaného intervalu vrtu PVGT-LT1.

Průměrná hydraulická vodivost pro celý testovaný úsek vrtu LT-1 dlouhý 1259 m je v nižších hodnotách řádu 10⁻¹¹ m.s⁻¹ za předpokladu ustáleného proudění na konci testu (Tab. 9). Za předpokladu neustáleného proudění jsou vypočítané hodnoty nižší v řádu 10⁻¹² m.s⁻¹ Vzhledem k tomu, že v průběhu tlakových stupňů pravděpodobně nedošlo k ustálení tlakových poměrů v okolí vrtu, hodnoty hydraulické vodivosti v řádu 10⁻¹² m.s⁻¹ jsou věrohodnější.

Ve srovnání s výše uvedenou hydraulickou vodivostí horninové matrice jsou hodnoty pro horninové prostředí včetně puklinové sítě o tři až čtyři řády vyšší. Nicméně i tak se jedná o prostředí nepatrně propustné dle klasifikace Jetela (1985) a zjištěná hydraulická vodivost je srovnatelná s hodnotami vodivosti neporušených krystalických hornin v hloubkách do 100 m (Rukavičková et al. 2013).

V Tab. 9 jsou současně uvedeny teoretické hodnoty hydraulické vodivosti pro interval o délce 1 metru, obdobně jako u vyhodnocení stoupacích zkoušek v kapitole 4.1. Hodnoty uvedené v tabulce



velmi dobře korespondují s odhadem hydraulické vodivosti porušených úseků permokarbonu, který byl uveden v kapitole 2.4.

Hodnoty hydraulické vodivosti vztažené na 1 m úsek současně odpovídají hodnotě celkové transmisivity vrtu ($m^2.s^{-1}$).



Obr. 18: Příklad vyhodnocení testu s využitím programu AQTESOLV.



5 Účelová hydrogeologická mapa okolí Litoměřic.

5.1 Přehled hydrogeologických poměrů

Z hlediska hydrogeologického členění spadá území účelové mapy (Obr. 19) do celkem pěti hydrogeologických rajonů v základní vrstvě. Jsou to:

- hydrogeologický rajon "4523 Křída Obrtky a Úštěckého potoka", který se prostírá ve střední části území severně a východně od řeky Labe;
- hydrogeologický rajon "4540 Ohárecká křída", který leží jižně od Labe v okolí Lovosic a Terezína;
- hydrogeologický rajon "4611 Křída Dolního Labe po Děčín levý břeh, jižní část", který zaujímá oblast západně od řeky Labe v okolí Lovoše a Prackovic nad Labem;
- hydrogeologický rajon "4612 Křída Dolního Labe po Děčín levý břeh, severní část", který zasahuje do sz. cípu mapového území v okolí Dubice;
- hydrogeologický rajon "4620 Křída Dolního Labe po Děčín pravý břeh severní část" leží v severní části území východně od řeky Labe.

Ve svrchní vrstvě na území zasahuje hydrogeologický rajon "1180 Kvartér Labe po Lovosice".

Geologické a hydrogeologické poměr v okolí města Litoměřice jsou komplikované. Jsou zde zastoupeny kvartérní sedimenty řeky Labe včetně několika stupňů říčních teras, terciérní vulkanity, jejich tufy a tufity, dále sedimenty české křídové pánve od cenomanu po santon. V Opárenském údolí vychází na povrch karbonský ryolit, horniny krystalinika jsou odkryty v Opárenském údolí a v údolí Labe.

Kvartérní sedimenty

Z hydrogeologického hlediska mají význam pouze fluviální sedimenty údolní nivy Labe a sedimenty terasovitých stupňů Labe. Tyto sedimenty vytvářejí kolektory s průlinovou propustností a střední až velmi vysokou transmisivitou (dle klasifikace Krásného, 1986). Na mapovém území se vyskytují jižně od řeky Labe a v údolí Labe.

Pleistocénní uloženiny eolického a deluviálního původu nebyly na mapě znázorněny vzhledem k jejich malé mocnosti a menšímu hydrogeologickému významu.

Terciér

Terciérní vulkanity pronikají sedimenty české křídové pánve a na povrchu vytvářejí rozsáhlé příkrovy střídajících se poloh lávy, tufů a tufitů. Četnější výskyty těchto hornin jsou v sz. a s. části území. Vulkanity, převážně bazalty vytvářejí v přípovrchové zóně puklinové kolektory s nízkou až střední transmisivitou. Oběh podzemních vod je zde vzhledem k výrazné morfologické členitosti poměrně rychlý a mělký, drénovaný množstvím malých, převážně suťových pramenů.

U tufů a tufitů převažuje propustnost průlinová, variabilita hydraulických vlastností je zde velmi vysoká. Lokálně působí tato jednotka jako izolátor podložních křídových kolektorů, lokálně jako průlinový či puklinově průlinový kolektor v přípovrchové vrstvě.



Sedimenty svrchní křídy - česká křídová pánev

Na mapovém území se vyskytují sedimenty svrchní křídy od spodního cenomanu po santon. Přehled křídových jednotek uvádí Tab. 10. Pro celou oblast je charakteristický proměnlivý litofaciální vývoj svrchnokřídových sedimentů a to jak ve vertikálním směru (střídání poloh sedimentů s různou zrnitostí v rámci jednoho souvrství), tak ve směru horizontálním. V západní části území převažují spíše pelitické a slínito-jílovité sedimenty (s výjimkou pískovců merboltického, bělohorského a korycanského souvrství). Směrem k jihovýchodu dochází postupnému narůstání prachovité a písčité složky v jizerském souvrství a tedy k postupnému výskytu průlinového nebo průlinově-puklinového kolektoru C. V okolí Litoměřic se vyskytuje puklinový kolektor C se střední až vysokou transmisivitou. Vzhledem k tomu, že změny v litofaciálním vývoji jsou pozvolné, není možné stanovit jasnou hranici výskytu a absence průlinového kolektoru C. Kolektor C je proto v mapě znázorněn jednotně v místech výskytu jizerského souvrství.

stupeň křídy	horniny	souvrství	kolektory a izolátory
	pískovce s vložkami	merboltické	
santon	prachovců až jílovců	souvrství	kolektor D
		březenské	izolátor, puklinový kolektor
santon až coniac	slínovce, vápnité jílovce	souvrství	v připovrchové zóně
	silicifikované jílovité		izolátor, puklinový kolektor
coniak až turon svrchní	vápence	rohatecké vrstvy	v připovrchové zóně
			izolátor, puklinový kolektor
coniak až turon svrchní	slínovce, jílovité vápence	teplické souvrství	v připovrchové zóně
			izolátor, puklinový kolektor
turon střední až svrchní	jílovce, slínovce	jizerské souvrství	v připovrchové zóně
turon střední až svrchní	jílovito prachovité pískovce	jizerské souvrství	kolektor C
		bělohorské	
turon spodní až střední	prachovce slínovce	souvrství	izolátor
	středně až hrubě zrnité	hělohorské	
turon spodní až střední	křemenné nískovce	souvrství	kolektor B
		30011301	
cenoman střední až	křemenné jemně až		
svrchní	středně zrnité pískovce	korycanské vrstvy	kolektor A
cenoman spodní až střední	jílovité pískovce	perucké vrstvy	kolektor A

Tab. 10: Přehled křídových jednotek, l	kolektorů a izolátorů
----------------------------------------	-----------------------

Celý vývoj křídových sedimentů od kolektoru A po kolektor D se vyskytuje v severní části mapového území, kolektor A naopak vychází na povrch v okolí Opárenského údolí. Vzhledem k absenci výrazného izolátoru mezi korycanskými vrstvami reprezentujícími kolektor A a spodní částí bělohorského souvrství (kolektor B), je na většině území vytvořen spojitý kolektor AB.

Permokarbon

Z permokarbonských hornin vychází na sledovaném území na zemský povrch pouze ryolit v Opárenském údolí. Plošný rozsah výchozů ryolitu je malý, z hydrogeologického hlediska je ryolit ve srovnání s okolními křídovými sedimenty málo významný. V připovrchové zóně se zde vytváří puklinový kolektor s nízkou až střední transmisivitou. Mocné permokarbonské sedimenty mšensko-roudnické pánve leží v podloží české křídové pánve. Ve vrtu LT-1 byla zdokumentována poloha



permokarbonu o mocnosti přibližně 750 m. Tyto sedimenty v mapě znázorněny nejsou, jejich hydraulickým vlastnostem se věnuje kapitola 2.4.

Krystalinikum

Také výskyt krystalinika je v rámci mapového území v úrovni zemského povrchu velmi malý a z hydrogeologického hlediska nevýznamný. Fylity, migmatity, ortoruly, pararuly a zelené břidlice až amfibolity jsou odkryty v Opárenském údolí a v údolí Labe. V připovrchové zóně se v těchto jednotkách vytváří puklinový kolektor s převážně velmi nízkou a nízkou transmisivitou.

Proudění podzemních vod

K infiltraci srážkových vod dochází prakticky na celém území. Vhodnější podmínky k infiltraci a proudění podzemní vody jsou v oblastech významnějších akumulací kvartérních fluviálních a terasových sedimentů a ve výchozových partiích pískovců jednotlivých křídových kolektorů. Z výchozových částí jsou dotovány hlubší kolektory české křídové pánve. V bazálním křídovém kolektoru AB je režim podzemní vody relativně ustálený, rychlosti proudění podzemní vody jsou vzhledem k úložným poměrům menší, vliv množství atmosférických srážek, se projevuje opožděně a v dlouhodobých průměrech převážně jen pravidelným sezónním kolísáním piezometrické úrovně. Hladina podzemní vody je napjatá. K odvodnění tohoto kolektoru dochází uměle (vrty) anebo přírodní netěsností, přeléváním do vyšších kolektorů. Mělčí křídové kolektory jsou drénovány erozními bázemi různých výškových úrovní, hladina podzemní vody je v těchto kolektorech volná i napjatá, v závislosti na jejich zakrytí izolátorem. Režim mělčích kolektorů je více závislý na srážkových úhrnech. Osou regionální drenáže podzemních vod je údolí Labe.

V místech s výskytem terciérních vulkanitů a jejich tufů a tufitů; křídových sedimentů ve slinité a jílovito-vápnité facii, karbonského ryolitu a hornin krystalinika je infiltrace srážkových vod do hlubších částí horninového prostředí obtížnější. Aktivní oběh podzemních vod je zde vázán na relativně mělkou část tvořenou přípovrchovou zónou rozvolnění hornin (převažující puklinová propustnost), eluviem a kvartérními sedimenty s propustností průlinovou.

5.2 Hydrogeologické mapování

V rámci charakterizace hydrogeologických poměrů v zájmové oblasti potenciálního geotermálního zdroje v Litoměřicích probíhalo hydrogeologické mapování. Při terénní rekognoskaci území byl ověřován stav hydrogeologických objektů (prameny, pramenní jímky, vodní zdroje, mokřiny) registrovaných v archivních podkladech a současně byly dokumentovány objekty nové.

Součástí dokumentace bylo také měření chemicko-fyzikálních parametrů podzemních vod – pH, měrné elektrické vodivosti vody, teploty vody a vydatnosti zdroje. Z vybraných pramenů byly odebrány vzorky pro chemické analýzy. Výsledky analýz jsou uvedeny v Tab. 12 a Tab. 13.

Celkem bylo zdokumentováno 86 objektů. Pozice jednotlivých objektů i rozsah mapovaného území jsou znázorněny na Obr. 19. Příklady dokumentovaných pramenů uvádějí Obr. 20 až Obr. 25.





Obr. 19: Rozsah mapovaného území a pozice dokumentovaných hydrogeologických bodů.

Naprostá většina dokumentovaných drenáží podzemních vod se nachází v morfologicky členitém terénu v severní a v západní části území. Drobné prameny vznikají zejména v oblastech tvořených tufy a tufity terciérních vulkanitů a na jejich kontaktu s merboltickým souvrstvím kolektoru D (křída).

Drenáže jsou také časté na území merboltického souvrství pravděpodobně na kontaktu pískovců a vložek prachovců a jílovců. Početná skupina pramenů je vázána na kontakt merboltického souvrství a březenského souvrství, které působí jako izolátor. V západní části mapového území jsou časté prameny na kontaktu vulkanitů a březenského souvrství a na kontaktu křídových kolektorů a krystalinika v Opárenském údolí.

		měrná		
		elektrická		
		vodivost	teplota	vydatnost
	рН	(µS.cm ⁻¹)	vody (°C)	(I.s⁻¹)
maximum	8,48	1773	14,1	1,483
průměr*	7,27	775	10,4	0,163
medián	7,28	690	10,5	0,064
minimum	6,13	285	6,4	0,002

Tab 11. Hodpoty fyzikálně-chemických	narametrů nodzemních vod	— statistické zpracování te	rónních měřoní
<i>Tub.</i> 11. <i>Houndly Jyzikume-chennickych</i>	ραταπιετί α ροαζεπιπική νου '	– statistické zpračovaní te	iennen meren.

*u pH se jedná o geometrický průměr, průměry u ostatních parametrů jsou aritmetické.

Hodnoty měrné elektrické vodivosti, které odpovídají obsahům rozpuštěných látek ve vodách, se pohybovaly v poměrně širokém rozpětí od 285 do 1773 μS.cm⁻¹ se středními hodnotami kolem 700 μS.cm⁻¹. Prameny s vodivostí do 600 μS.cm⁻¹ leží výhradně ve výše položených severních částech mapového území, kde se vyskytují převážně vulkanity, jejich tufy a tufity. Vodivost v rozmezí 600 až 900 μS.cm⁻¹ je typická pro drenáže v údolích nebo na svazích údolí, která elevace vulkanitů lemují. Obvykle se jedná o mělce zaříznutá údolí v merboltickém nebo březenském souvrství. Vodivost podzemní vody z pramenů v Opárenském údolí je v intervalu 900 až 1200 μS.cm⁻¹. Obdobná vodivost byla změřena u některých pramenů v březenském souvrství. Prameny s vyšší měrnou elektrickou



vodivostí se nacházejí ve střední a jižní části mapového území, v plochém reliéfu křídových a kvartérních sedimentů.



Obr. 20: LT001 zachycený pramen v údolí Pokratického potoka, teplické souvrství (křída).



Obr. 21: LT004 soustředěný vývěr ve svahu vjv. od Lbína, terciér, pyroklastika bazaltických hornin.



Obr. 22: LT012 soustředěný vývěr ve svahu zjz. od Staňkovic, terciér, pyroklastika bazaltických hornin.



Obr. 23: LT029 zachycený pramen v obci Oparno, kontakt kolektoru A (křída) a krystalinika Opárenského údolí.

Hodnoty pH byly v rozmezí od 6,13 do 8,48, se středními hodnotami 7,3. Nejvyšší hodnoty pH byly zaznamenány v okolí Prackovic, na svazích vrchu Kubačka, který je tvořen bazaltoidy. Nejnižší hodnoty pH byly naopak změřeny ve vývěrech v kolektoru D nebo poblíž hranic s tímto kolektorem.

Vydatnosti pramenů byly nejčastěji v řádu setin, méně desetin l.s⁻¹. Hodnoty vydatnosti byly značně ovlivněny srážkovým deficitem posledních let. Množství pramenů zaznamenaných v archivních materiálech bylo při terénní dokumentaci bez měřitelného odtoku.

Řada revidovaných vodárenských objektů není v dobrém technickém stavu, přesto se dle Plánu vodovodů a kanalizací Ústeckého kraje jedná o využívané vodní zdroje pro zásobování obcí.





Obr. 24: LT073 soustředěný vývěr mezi Novým Mlýncem a Kotelicemi na kontaktu kolektoru D (křída) a izolátoru.



Obr. 25: LT084 zachycený pramen jižně od Dolních Řepčic, rohatecké vrstvy (křída).

Podzemní vody odebrané z pramenů jsou typu Ca-HCO₃, Ca-Mg-HCO₃, Ca-HCO₃-SO₄, další smíšené typy jsou zastoupeny pouze u jednotlivých vzorků.

Poměrné zastoupení kationtů v odebraných vzorcích podzemních vod z pramenů je obdobné, neprojevila se výrazná závislost složení na zdrojové hornině. U všech vzorků převažuje vápník, u tří vzorků je zastoupení hořčíku těsně na hranici 40 meq% (Obr. 26).

Mezi anionty u většiny vzorků převažují hydrogenuhličitany, u několika vzorků je vyšší zastoupení síranů nad 40 meq%, výjimečně nad 50 meq%. Vzorky vyšším zastoupením síranů byly odebrány v severní části území s vyšší nadmořskou výškou a s členitější morfologií. U těchto podzemních vod je proto možné předpokládat rychlejší oběh převážně v oxidační zóně kolektorů.

Celkový obsah rozpuštěných látek (TDS) je u většiny odebraných vzorků v rozsahu od 250 do 600 mg.l⁻¹. Hodnota TDS je závislá zejména na nadmořské výšce odběru (době setrvání vody v kolektoru), vyšší hodnoty jsou v níže položených částech území, kde byly odebrány dva vzorky s TDS v rozmezí 1000 až 1100 mg.l⁻¹. Hodnota pH se u vzorkovaných vod pohybuje v rozmezí od 6,2 do 7,1.

Limit obsahu dusičnanů daný vyhláškou MZd ČR č. 252/2004 Sb., kterou se stanoví hygienické požadavky na pitnou a teplou vodu a rozsah kontroly pitné vody, ve znění pozdějších předpisů, byl překročen u tří pramenů. Téměř dvojnásobné překročení limitu bylo zaznamenáno u studánky v obci Hlinná.

Výsledky chemických analýz jsou uvedeny v Tab. 12 a Tab. 13.





Obr. 26: Durovův diagram chemických analýz vzorků podzemních vod odebraných z pramenů; červená barva značek – prameny v oblastech s výskytem pyroklastik bazaltických hornin (terciér), zelená barva – v oblasti křídových sedimentů, modrá barva – na kontaktu křídových sedimentů a pyroklastik, žlutá barva – kvartérní sedimenty.

	/	/				/	1				
		Li⁺	${\sf NH_4}^+$	Na⁺	Mg ²⁺	Al	K^{+}	$Ca2^+$	Mn ²⁺	Fe	Zn ²⁺
označení objektu	datum odběru	ug/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	ug/l	mg/l	ug/l
LT001	11.04.2016	38,5	0,06	24,72	53,70	< 0,20	6,90	181,60	9,0	< 0,05	18,0
LT004	11.04.2016	< 2,00	0,04	5,67	12,33	< 0,20	4,34	43,67	< 5,0	< 0,05	10,0
LT005	11.04.2016	< 2,00	0,04	12,84	13,97	< 0,20	2,08	46,75	< 5,0	< 0,05	9,0
LT006	11.04.2016	< 2,00	0,04	17,28	38,28	< 0,20	2,46	76,97	< 5,0	< 0,05	7,0
LT007	12.04.2016	< 2,00	0,04	13,52	24,52	< 0,20	3,21	93,25	< 5,0	< 0,05	12,0
LT008	12.04.2016	< 2,00	0,04	11,18	15,42	< 0,20	3,20	50,02	< 5,0	< 0,05	10,0
LT009	12.04.2016	< 2,00	0,05	11,91	28,83	< 0,20	3,06	55,43	6,0	< 0,05	8,0
LT010	12.04.2016	< 2,00	0,05	4,68	19,81	0,26	1,06	43,35	23,0	0,47	8,0
LT012	13.04.2016	< 2,00	0,04	5,78	9,78	< 0,20	3,89	36,96	< 5,0	< 0,05	6,0
LT013	13.04.2016	< 2,00	0,04	11,54	19,38	< 0,20	3,26	57,19	< 5,0	< 0,05	10,0
LT014	13.04.2016	51,0	0,08	19,99	38,17	< 0,20	11,75	205,23	< 5,0	< 0,05	25,0

Tab. 12: Výsledky chemických analýz vzorků podzemních vod odebraných z pramenů – první část.



		(HCO₃) [°]	(NO ₃) ⁻	F	SiO ₂	$(SO_4)^{2-}$	Cl	рН	TDS
označení objektu	datum odběru	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l		mg/l
LT001	11.04.2016	360,00	68,89	0,81	17,10	247,59	67,39	6,18	1028,95
LT004	11.04.2016	54,90	25,90	0,17	34,00	104,20	5,05	6,46	290,41
LT005	11.04.2016	158,70	6,51	0,13	28,40	62,16	3,08	6,75	334,79
LT006	11.04.2016	183,10	39,64	0,14	38,90	90,60	77,47	6,73	565,01
LT007	12.04.2016	244,10	37,94	0,32	34,30	100,12	23,83	6,78	575,29
LT008	12.04.2016	152,60	9,35	0,22	34,90	73,95	7,57	6,86	358,59
LT009	12.04.2016	170,90	30,39	0,20	22,10	85,82	25,55	6,86	434,38
LT010	12.04.2016	131,20	10,02	0,15	37,70	81,68	5,29	7,00	335,75
LT012	13.04.2016	76,30	18,66	0,12	35,80	70,13	3,88	7,03	261,47
LT013	13.04.2016	164,80	47,35	0,27	23,40	54,76	19,82	7,02	401,96
LT014	13.04.2016	366,10	54,03	0,66	10,30	283,16	46,52	7,02	1036,20

Tab. 13: Výsledky chemických analýz vzorků podzemních vod odebraných z pramenů – druhá část.

5.3 Účelová hydrogeologická mapa

Hydrogeologická mapa okolí Litoměřic byla zpracována ve formě mapové aplikace přístupné veřejnosti na adrese: https://mapy.geology.cz/hgcr50.

V mapě jsou formou ploch vymezeny hydrogeologické jednotky. U hydrogeologických jednotek mimo českou křídovou pánev je barvou plochy vyjádřena transmisivita hornin, šrafou typ hydrogeologického prostředí. U jednotek v české křídové pánvi je šrafou vyjádřen výskyt a pozice jednotlivých kolektorů a izolátorů, barvou čáry hodnota transmisivity příslušného kolektoru (Obr. 27).



Obr. 27: Výřez z hydrogeologické mapy s příklady použitých barev a šraf s náhledy na dynamickou legendu mapové aplikace.

Hranice hydrogeologických jednotek v mapě vycházejí zejména z hydrogeologické interpretace geologické mapy 1: 50 000. Jedná se o vrstvu HydroGEOČR50, která vznikla v rámci projektu VaV MŽP ČR SP/2e1/153/07 a rastrové hydrogeologické mapy měřítka 1: 50 000 list 02-41 Ústí nad Labem (Hazdrová a Janušková 1991) a list 02-43 Litoměřice (Hazdrová a Teissigová 1992). Dále byly při interpretacích využity podklady pro 3D model okolí města Litoměřice vzniklé v rámci tohoto projektu.



Hodnoty transmisivity pro hydrogeologické jednotky byly stanoveny na základě zpracovaných dat z hydrodynamických zkoušek z hydrogeologické databáze České geologické služby – Geofond, případně analogií z obdobných hydrogeologických jednotek, pokud na mapovém území pro zhodnocení nebyl dostatek dat.

Z hydrogeologické databáze České geologické služby byly vybrány reprezentativní vrty pro hydrogeologické jednotky. Základní hydraulické údaje a údaje o hydrochemických vlastnostech podzemních vod jsou v mapě zobrazeny ve dvou vrstvách (viz níže).

Mapová aplikace zahrnuje (Obr. 28):

- 1. Plošné rozsahy hydrogeologických jednotek:
 - U křídových kolektorů je kombinací šraf různého typu vyjádřen výskyt jednotlivých kolektorů A, B, C a D, případně významných izolátorů mezi kolektory. Barvou příslušné šrafy je vyjádřena typická třída transmisivity pro daný kolektor. Barva šrafy u izolátorů odlišuje izolátory tvořené rozdílným sledem souvrství.
 - U ostatních hydrogeologických jednotek je barvou plochy vyjádřena transmisivita hornin a šrafou typ hydrogeologického prostředí.
- 2. Zlomovou síť vycházející z geologické mapy ČR měřítka 1:50 000.
- 3. Vrstvy bodových objektů:
 - Vrstva "Dokumentované objekty" obsahuje popis hydrogeologických objektů dokumentovaných v průběhu hydrogeologického mapování, jejich fotodokumentaci a výsledky terénních měření;
 - Vrstva "Vybrané vrty a studny s hydraulickými daty" obsahuje výběr vrtů z hydrogeologické databáze ČGS Geofond, které jsou reprezentativní pro dané hydrogeologické jednotky a jsou pro ně k dispozici data z čerpacích zkoušek. Vrstva obsahuje kromě základních informací o vrtu (souřadnice, název, hloubka, otevřený interval, zastižená geologická jednotka) také údaje o specifické vydatnosti vrtu, transmisivitě hornin a hloubce hladiny podzemní vody v době dokumentace vrtu.
 - Vrstva "Vybrané vrty a studny s hydrochemickými daty" obsahuje výběr vrtů z hydrogeologické databáze ČGS Geofond, které jsou reprezentativní pro dané hydrogeologické jednotky a jsou pro ně k dispozici data úplná a kvalitní data z chemických analýz vzorků podzemní vody. Vrstva obsahuje kromě základních informací o vrtu (souřadnice, název, hloubka, otevřený interval, zastižená geologická jednotka) také údaje o hydrochemickém typu vody ve vrtu, celkovém obsahu rozpuštěných látek a pH podzemní vody.





Obr. 28: Náhled na úvodní stránku mapové aplikace hydrogeologické mapy okolí Litoměřic.

6 Závěr

Byly zhodnoceny hydraulické vlastnosti hornin z širšího okolí města Litoměřice (vrtu LT-1), provedeny opakované hydrodynamické testy ve vrtu LT-1 a provedeny laboratorní testy hydraulické vodivosti vzorků horninového jádra z vrtu LT-1. Výsledky zpracování a zhodnocení datových souborů umožňují srovnání vývoje hydraulických vlastností hornin s hloubkou a stanovení hydraulických vlastností hornin ve velkých hloubkách.

Rozdíly v hydraulických vlastnostech hornin jsou ve studované oblasti značné. Mocnější polohy fluviálních sedimentů údolní nivy Labe a sedimentů terasovitých stupňů Labe mají střední hodnoty hydraulické vodivosti v řádu 10⁻⁴ m.s⁻¹. Vysoké hydraulické vodivosti jsou typické také pro křídové kolektory tvořené pískovci, zejména pro kolektor A respektive AB, kde se průměrné hodnoty hydraulické vodivosti pohybují na pomezí řádů 10⁻⁵ a 10⁻⁶ m.s⁻¹. Obdobnou hydraulickou vodivost má i puklinový kolektor C v okolí města Litoměřice.

Na druhou stranu, střední hodnoty hydraulické vodivosti v permokarbonských sedimentech jsou v řádu 10⁻⁸ m.s⁻¹. Vybrané vrty zasahující do permokarbonu mají ve srovnání s vrty z křídy testované intervaly hlouběji pod zemským povrchem (Tab. 6.).

Rozdělením vrtů v hodnocených hydrogeologických jednotkách na skupiny podle hloubky středu otevřeného intervalu prokázalo výrazný pokles hydraulické vodivosti s hloubkou. U křídových kolektorů jsou rozdíly dané hloubkou do jednoho řádu. U hornin permokarbonu je geometrický průměr hydraulické vodivosti celého datového souboru 8.10⁻⁸ m.s⁻¹. U výběru hlubokých vrtů v této jednotce (průměrná hloubka středu testovaného intervalu 1029 m) je tato hodnota ještě o více než řád nižší – 3,3.10⁻⁹ m.s⁻¹. Nejhlubší testovaný úsek zasahoval do hloubky 1300 m.

Z podložního krystalinika je dostupný z hloubek a hornin odpovídajících vrtu LT-1 pouze jediný údaj. Vrt BR-1 u Brňan zastihl v úseku 1318 až 1384 m fylity a diority s hydraulickou vodivostí 1,7.10⁻⁹ m.s⁻¹.



V hlubokých strukturních vrtech byly hydraulicky testovány úseky perspektivní z hlediska hydrogeologie, tedy úseky s indikací přítoku podzemních vod nebo porušené zóny. Na základě zhodnocení archivních dat bylo ve vrtu LT-1 možné předpokládat hydraulickou vodivost v řádu 10⁻⁹ m.s⁻¹ u vodivých poruchových zón a hydraulickou vodivost v řádu 10⁻¹⁰ m.s⁻¹ a menší u běžně porušeného horninového prostředí. Vrt LT-1 je pažený do hloubky 852 m, svým otevřeným úsekem o délce 1259 m zasahuje částečně do permokarbonu a převážnou částí do proterozoických svorů.

Průměrná hydraulická vodivost celého otevřeného úseku vrtu LT-1 stanovená ze stoupacích zkoušek byla 5 . $10^{-12} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ z první a 9 . $10^{-12} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ z druhé stoupací zkoušky. Hodnoty hydraulické vodivosti stanovené z měření v průběhu VTZ při třech tlakových stupních byly v rozsahu od 3 . 10^{-12} do 7 . $10^{-12} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Za předpokladu, že naprostá většina vody byla při čerpacích zkouškách čerpána a při vodních tlakových zkouškách vtláčena do sady puklin o celkové mocnosti 1 m v poloze křemenného porfyru, jsou odpovídající hodnoty hydraulické vodivosti ze stoupacích zkoušek 6 . 10^{-9} až 1 . 10^{-8} m·s⁻¹. Hodnoty z VTZ se pro 1 m úsek pohybují od 4 . 10^{-9} do 9 . 10^{-9} m·s⁻¹.

Výsledné hodnoty hydraulických parametrů stanovené z různých hydrodynamických zkoušek jsou srovnatelné a odpovídají archivním datům. Průměrná hydraulická vodivost hornin v hloubkách 850 až 2110 m je v řádu 10^{-12} m·s⁻¹, hydraulická vodivost poruchových zón může být až o 3 řády vyšší – v řádu 10^{-9} m·s⁻¹. V obou případech se jedná o horniny nepatrně propustné dle klasifikace Jetela (1985). Pro optimální funkci tepelného výměníku bude nutné hydraulickou vodivost hornin výrazně zvýšit pomocí hydraulického štěpení.

Hydraulická vodivost horninové matrice vzorků svoru z hloubky přibližně jednoho kilometru je o tři až čtyři řády nižší ve srovnání s in situ zjištěnými hodnotami pro celý vrt. Hodnoty se pohybují v řádech 10⁻¹⁵ a 10⁻¹⁶ m.s⁻¹. Mezi jednotlivými vzorky nejsou v hodnotách hydraulické vodivosti výraznější rozdíly. Nepotvrdil se předpoklad rozdílu hydraulické vodivosti při toku vody ve směru foliace a kolmo na ni. Rozdíly v hodnotách měřených v různých směrech jsou malé a pravděpodobně, při takto nízkých vodivostech, na hraně citlivosti měřící aparatury.

Byly zhodnoceny hydrogeologické poměry okolí města Litoměřice, provedena revize a hydrogeologická dokumentace objektů na vybraném území. Výsledky byly zpracovány do formy hydrogeologické mapy, která je prezentována formou webové aplikace na adrese: https://mapy.geology.cz/hgcr50.

V rámci regionu Litoměřice jsou v aplikaci zobrazeny hodnoty transmisivity hydrogeologických jednotek, typ hydrogeologického prostředí a sled kolektorů a izolátorů v české křídové pánvi. Pro vybrané archivní vrty a studny jsou prezentována data o chemickém složení podzemních vod a hydraulických vlastnostech hornin. U jednotlivých hydrogeologických objektů dokumentovaných v terénu (např. prameny) jsou k dispozici popisy, výsledky terénních měření a fotodokumentace.



7 Literatura

- Bisroy Y.K., Summers W.K. (1980): Determination of aquifer parameters from step tests and intermittent pumping data. Ground Water 18 (2), pp. 137-146.
- Cooper H. H., Jacob C.E. (1946): A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history Eos, Trans. Am. Geophys. Union, 27 (4) (1946), pp. 526-534,
- Fischer T., Dědeček P., Holeček J., Rukavičková L., Šafanda J., Řihošek J., Vlček J. (2020): Hydraulic tests in the PVGT-LT1 borehole in Litoměřice, 24-27 January 2020. Internal progress report, RINGEN consortium.15 p. Prague.
- Hazdrová M., Janušková M. (1991): Hydrogeologická mapa ČR 1 : 50 000 list 02-41 Ústí nad Labem. Ústř. Úst. Geol. Praha.
- Hazdrová M., Teissigová Z. (1992): Hydrogeologická mapa ČR 1 : 50 000 list 02-43 Litoměřice. Ústř. Úst. Geol. Praha.
- Jetel J. (1982): Určování hydraulických parametrů hornin hydrodynamickými zkouškami ve vrtech. Knihovna ÚÚG Praha 58. 246 s.
- Jetel J. (1985): Metody regionálního hodnocení hydraulických vlastností hornin. Metodická příručka č. 1. ÚÚG Praha. 147 s.
- Krásný J. (1986): Klasifikace transmisivity a její použití. Geol. Průzk. 6, 28, 177–179.
- Moye D.G. (1967): Diamond drilling for foundation exploration. Civ. Eng. Trans., pp. 95-100.
- Myslil V. et al. (2008). Geotermální vrtné ověření struktury Litoměřice pro energetické využití. Závěrečná zpráva o řešení projektu v programu Trvalá prosperita MPO v roce 2006 – 2007. MS MPO, Praha.
- Rukavičková L., Holeček J., Hanák J., Dobeš P., Breiter K. (2013): Shrnutí hlavních výsledků laboratorních a terénních prací provedených ČGS v letech 2009-2012, závěrečná zpráva projektu 'Výzkum vlivu mezizrnné propustnosti granitů na bezpečnost hlubinného ukládání do geologických formací a vývoj metodiky a měřící aparatury'. Závěrečná zpráva, 89 s. MS Archiv ČGS.
- Ščučka J. (2019): Optimalizace metod pro určování tepelných vlastností hornin na základě jejich mineralogického složení a vybraných strukturních parametrů. Zpráva za milník č. 3 výzkumného programu č. 1 projektu RINGEN.
- Theis, C.V. 1935. The relation between lowering of the piezometric surface and rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. *Transactions of the American Geophysical Union* 16, 519–524.



Název výstupu	Metodika studia hydrofyzikálních parametrů horninového prostředí
Výzkumný program	Hydrogeologie, hydrochemie a termohydraulické modelování
Partner/partneři	Česká geologická služba
Termín zpracování	5/2020

Příloha č. 1:

Petružálek, M. (2018): Koeficient hydraulické vodivosti hornin z vrtu Litoměřice. Závěrečná zpráva.

Název projektu	Modernizace výzkumné infrastruktury RINGEN (RINGEN+)
Registrační číslo	CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_013/0001792
Žadatel	Univerzita Karlova – Přírodovědecká fakulta



KOEFICIENT HYDRAULICKÉ VODIVOSTI HORNIN Z VRTU LITOMĚŘICE

Závěrečná zpráva

Geologický ústav AV ČR, v. v. i. Rozvojová 269, 165 00 Praha 6

KOEFICIENT HYDRAULICKÉ VODIVOSTI HORNIN Z VRTU LITOMĚŘICE

Závěrečná zpráva

Praha prosinec 2018

KOEFICIENT HYDRAULICKÉ VODIVOSTI HORNIN Z VRTU LITOMĚŘICE

Závěrečná zpráva

č. úkolu GLÚ AV ČR, v. v. i.: 7045

Mgr. Matěj Petružálek, Ph.D. Odpovědný řešitel Ing. Tomáš Lokajíček, CSc. Vedoucí laboratoře

RNDr. Tomáš Přikryl, Ph.D. Ředitel GLÚ AV ČR, v. v. i.

GLÚ AV ČR zřízen na základě usnesení 3. zasedání prezidia ČSAV ze dne 7. 2. 1990 s účinností od 1. 3. 1990.

Organizace je zapsána v rejstříku veřejných výzkumných institucí vedeném MŠMT ČR, spis. zn.: 17113/2006-34/GLÚ.

Živnostenské oprávnění k IČ 67985831 vydala Městská část Praha 6 pod čj. MCP6 058113/2011.

Geologický ústav AV ČR, v. v. i. Rozvojová 269 165 00 Praha 6 - Lysolaje

KOEFICIENT HYDRAULICKÉ VODIVOSTI HORNIN Z VRTU LITOMĚŘICE

Intepretace a vyhotovení závěrečné zprávy:

Mgr. Matěj Petružálek, Ph.D.

Spolupracovali: Ing. Libor Svoboda Vlastimil Filler

Odběratel:

Česká geologická služba Pracoviště ČGS Barrandov Geologická 6, Praha 5, 152 00 IČ: 67985831

Šiřitelnost:

Závěrečná zpráva je uložena v knihovně GLÚ AVČR, v. v. i. Výsledky laboratorních zkoušek jsou považovány za důvěrné a jakožto takové, nesmí být poskytnuty třetím stranám či jakkoliv jinak publikovány bez výslovného souhlasu objednatele.

Anotace/abstrakt:

Zpráva obsahuje výsledky laboratorních zkoušek provedených na vzorcích hornin z vrtu Litoměřice z hloubky cca. 985 m. Stanoven byl především koeficient filtrace na šesti orientovaných tělískách. Doplňkově byly ultrazvukem měřeny dynamické moduly a stanoveny popisné vlastnosti.

Doporučená forma citace:

Petružálek M. (2018): *Koeficient hydraulické vodivosti hornin z vrtu Litoměřice*. Závěrečná zpráva. – Nepublikovaná zpráva, Geologický ústav AV ČR, v. v. i. pro Českou geologickou službu: 1 – 14. Praha.

© Geologický ústav Akademie věd České republiky, v. v. i., Rozvojová 269, 165 00 Praha 6 – Lysolaje

Obsah

Úvod	6
Dodaný horninový materiál	6
Požadované laboratorní zkoušky	7
Popisné vlastnosti, rychlosti seismických vln a dynamické elastické moduly	9
Stanovení koeficientu hydraulické vodivosti	. 12
Citovaná literatura	. 14

Seznam textových tabulek

Tab. 1 Požadované laboratorní zkoušky, včetně norem a pracovních postupů, podle kterých	
jsou prováděny a kalibrovaných měřidel (tab. 3)	7
Tab. 2 Přehled kalibrovaných měřidel využívaných pro zkoušky uvedené v tabulce 1	8
Tab. 3 Přehled kalibrovaných měřidel využívaných pro zkoušky uvedené v tabulce 1	9
Tab. 4 Dynamické moduly stanovené pro vysušené vzorky, nahoře počítané z rychlé příčné	
vlny S1, dole počítané z pomalé příčné vlny S21	1
Tab. 5 Dynamické moduly stanovené pro nasycené vzorky, nahoře počítané z rychlé příčné	
vlny S1, dole počítané z pomalé příčné vlny S2 1	1
Tab. 6 Koeficient hydraulické vodivosti včetně měřených hodnot pro jeho výpočet 1	4

Seznam textových obrázků:

Obr. 1 Příprava orientovaných vzorků, jádro LIT 3, zleva: první vzorek kolmo k foliaci, další
dva paralelně s foliací
Obr. 2 Ultrazvukové prozařování horninových vzorků, vlevo: pulzní zdroj, osciloskop a
zesilovač; vpravo: testovaný vzorek osazený mezi ultrazvukovými snímači
Obr. 3 Fotografie měřeného vzorku mezi dvěma písty a tlakové komory pro měření
hydraulické vodivosti (nahoře). Fotografie permeametru Quizix 5000 (dole) 13
Obr. 4 Fotografie měřených vzorků, zleva: LIT 1/1 (vertikální foliace), LIT 2/2 (horizontální
foliace), LIT 2/3 (vertikální foliace), LIT 3/1 (horizontální foliace), LIT 3/3 (vertikální
foliace). Vzorek LIT 2/1 nebyl vyfocen14

Úvod

Pro objednatele (Česká geologická služba), zastoupeného Mgr. Janem Holečkem, Ph.D., byly na základě objednávky č. 180688 provedeny laboratorní zkoušky na horninových vzorcích jádra (hloubka 985 m) z vrtu Litoměřice. Zpráva obsahuje stanovené koeficienty filtrace, dynamické moduly a popisné vlastnosti.

Zkoušky byly provedeny v Oddělení fyzikálních vlastností hornin Geologického ústavu AV ČR, v. v. i., na Puškinově nám. 9 v Praze 6 (číslo zakázky GLÚ 7045).

Dodaný horninový materiál

Testovanou horninou byla kvarcitickým granátický svor z vrtu Litoměřice z hloubky 985 m. Vzorky byly dodány ve formě vrtného jádra o průměru 100 mm. Svor má mikroskopicky viditelnou foliaci se sklonem cca 20 stupňů vzhledem k ose jádra. Z dodaného vrtného jádra byly odvrtány orientované válcové vzorky (Obr. 1) pro měření koeficientu hydraulické vodivosti. Foliace válcových zkušebních tělísek (50 mm výška, 50 mm průměr) byla buď vertikální (paralelní s osou válce a směrem proudění) nebo horizontální (kolmá k ose válce a směru proudění). Značení vzorků, např. LIT 3/1: číslo před lomítkem odpovídá číslu dodaného jádra (1,2,3), číslo za lomítkem odpovídá pořadí zkušebního tělíska připraveného z daného jádra. Na stejných vzorcích byly stanoveny rovněž popisné vlastnosti a dynamické moduly.



Obr. 1 Příprava orientovaných vzorků, jádro LIT 3, zleva: první vzorek kolmo k foliaci, další dva paralelně s foliací

Požadované laboratorní zkoušky

Tabulka 1 uvádí požadované zkoušky. Jejich kvalita vychází z dodržování uvedených norem a zkušebních postupů. Uvedené zkoušky provádí a interpretují zaměstnanci *Oddělení fyzikálních vlastností hornin, GLÚ AV ČR, v. v. i..* Použitá měřidla a jejich kalibrace je uvedena v tabulce 2.

Tab. 1 Požadované laboratorní zkoušky, včetně norem a pracovních postupů, podle kterých jsou prováděny a kalibrovaných měřidel (tab. 3)

Zkouška	Norma	Zkušební postup	Čísla měřidel
stanovení zdánlivé hustoty pevných částic	není platná norma pro zkoušení hornin, využívá se zkušební postup pro testování zemin	ČSN CEN ISO/TS 17892-3 (2005): Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin – Část 3: Stanovení zdánlivé hustoty pevných částic zemin pomocí pyknometru	3
stanovení objemové hmotnosti	ČSN EN 1936 (2007): Zkušební metody přírodního kamene – Stanovení měrné a objemové hmotnosti a celkové a otevřené pórovitosti	odpovídá uvedené normě	1, 2
stanovení pórovitosti	ČSN EN 1936 (2007): Zkušební metody přírodního kamene – Stanovení měrné a objemové hmotnosti a celkové a otevřené pórovitosti	odpovídá uvedené normě	1, 2, 3
stanovení dynamických elastických modulů	není platná norma pro zkoušení hornin, využívá se zkušební postup uvedený v "Metodiky laboratorních zkoušek v mechanice zemin a hornin"	kapitola 13. Rychlost šíření podélných a příčných vln, dynamický modul pružnosti ve Zavoral, J. et al. (1987), Metodiky laboratorních zkoušek v mechanice zemin a hornin III. Český geologický úřad. Praha	1, 2, 13, 14
stanovení rychlosti šíření seismických vln	není platná norma pro zkoušení hornin, využívá se zkušební postup uvedený v "Metodiky laboratorních zkoušek v mechanice zemin a hornin"	kapitola 13. Rychlost šíření podélných a příčných vln, dynamický modul pružnosti ve Zavoral, J. et al. (1987), Metodiky laboratorních zkoušek v mechanice zemin a hornin III. Český geologický úřad. Praha	1, 13, 14
stanovení koeficientu hydraulické vodivosti	není platná norma pro zkoušení hornin, využívá se zkušební postup pro testování zemin	ČSN CEN ISO/TS 17892-11 (2005): Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin – Část 11: Stanovení propustnosti zemin při konstantním a proměnném spádu	1, 18

Číslo měřidla	Měřidlo	Značka	Rozsah	Dílek	Datum Kalibrace	Perioda kalibrace	Provedl	č. kalib. Listu
1	elektronické posuvné měřítko	Proma	150 mm	0.01 mm	3/10/2018	měsíčně	vlastní	-
3	elektronická váha	Mettler Toledo PB 3002-S/FACT	3200 g	0.01 g	17/10/2018	ročně	LABO - MS, spol. s r.o.	K-18-471-1
2	elektronická váha	Precisa 240A	240 g	0.0001 g	17/10/2018	ročně	LABO - MS, spol. s r.o.	K-18-471-2
13	ultrazvukové snímače podélného vlnění	PANAMETRICS V150	-	0.01 us	3/10/2018	ročně	vlastní	-
14	ultrazvukové snímače příčného vlnění	PANAMETRICS V153	-	0.01 us	3/10/2018	ročně	vlastní	-
18	Permeameter	Quizix 5000	9 ml; 70 MPa	0.1 ul; 0.01 MPa	20/4/2018	ročně	vlastní	-

Tab. 2 Přehled kalibrovaných měřidel využívaných pro zkoušky uvedené v tabulce 1

Popisné vlastnosti, rychlosti seismických vln a dynamické elastické moduly

Popisné vlastnosti: objemová hmotnost vysušeného a nasyceného vzorku (ρ_{DRY} a ρ_{SAT}); specifická objemová hmotnost (ρ_{SPEC}); celková pórovitost (N_C) a efektivní pórovitost (N_EF) byly stanoveny podle platných norem a pracovních postupů uvedených v tabulce 1. Jako zkušebních vzorků bylo využito tělísek pro měření koeficientu hydraulické vodivosti, s výjimkou vzorku LIT 2/1. Tento vzorek byl bezprostředně po změření hydraulické vodivosti převrtán na kulový vzorek pro měření ultrazvukové anizotropie. Sušení vzorků probíhalo po dobu 48 hodin při teplotě 105 °C. Sycení probíhalo v průběhu měření hydraulické vodivosti. Použité váhy jsou pravidelně kalibrované, spolehlivost použitého posuvného měřítka je pravidelně ověřována měřením standardizovaného etalonu (tab. 2). Stanovené popisné vlastnosti jsou v tabulce 3.

	vzorek	foliace	ρSAT	ρDRY	ρSPEC	N_C	N_EF
		[°]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[%]	[%]
	LIT 1/1	2	2.828	2.827	2.841	0.51	0.11
	LIT 2/2	80	2.766	2.765	2.772	0.25	0.12

2.756

2.818

2.844

2.772

2.854

2.854

0.56

0.84

0.33

0.15

0.16

0.16

Tab. 3 Přehled kalibrovaných měřidel využívaných pro zkoušky uvedené v tabulce 1

2.758

2.820

2.846

LIT 2/3

LIT 3/1

LIT 3/3

5

80

3

Stejná válcová tělíska byla, ve vysušeném a nasyceném stavu prozářena podélnými (P) a příčnými (S) ultrazvukovými vlnami. Prozařování probíhalo v ose válcových tělísek. Příčné vlny byly měřeny ve dvou navzájem kolmých polarizacích: paralelně s foliací a napříč foliaci. Využito bylo snímačů *PANAMETRICS V150* (1 MHz, podélné vlny) a *PANAMETRICS V153* (1 MHz, příčné vlny), zesilovače *Sedlak PA31*, pulzního zdroje *Olympus 5072PR* a osciloskopu *Agilent Technoligies, DSO1024A*. Celý tento systém (obr. 2) je kalibrovaný. Kalibrace je kontrolována pomocí prozařování duralového etalonu před každou sérií měření (tab. 2).



Obr. 2 Ultrazvukové prozařování horninových vzorků, vlevo: pulzní zdroj, osciloskop a zesilovač; vpravo: testovaný vzorek osazený mezi ultrazvukovými snímači

Podle vztahů (1) byly z naměřených rychlostí (v_p rychlost podélné vlny, v_s rychlost příčné vlny) a objemové hmotnosti (ρ) spočteny dynamické elastické moduly: Youngův modul E_d , smykový modul μ_d , objemový modul K_d a poissonův poměr v_d .

$$E_{d} = \frac{\rho v_{s}^{2} (3v_{p}^{2} - 4v_{s}^{2})}{v_{p}^{2} - v_{s}^{2}} \qquad \qquad v_{d} = \frac{v_{p}^{2} - 2v_{s}^{2}}{2(v_{p}^{2} - v_{s}^{2})}$$
(1)
$$\mu_{d} = \rho v_{s}^{2} \qquad \qquad K_{d} = v_{p}^{2} - 4/3v_{s}^{2}$$

Vypočtené dynamické moduly jsou počítány za předpokladu, že testovaná hornina představuje homogenní izotropní prostředí. Vzhledem k tomu, že testované horniny jsou anizotropní, bylo by potřeba k popisu jejich elastického chování více než dvou nezávislých elastických parametrů.

V tabulce 4 jsou shrnuty naměřené rychlosti seismických vln a z nich vypočtené dynamické elastické moduly.

Tab. 4 Dynamické moduly stanovené pro vysušené vzorky, nahoře počítané z rychlé příčné vlny S1, dole počítané z pomalé příčné vlny S2

vzorek	foliace	L	d	m _d	tP	tS1	vP	vS1	ρ	E _d	u _d	v _d	K _d
	[°]	[mm]	[mm]	[g]	[us]	[us]	[km/s]	[km/s]	[g/cm ³]	[GPa]	[GPa]		[GPa]
LIT 1/1	2	51.38	49.44	278.79	7.50	13.00	6.851	3.952	2.826	110.4	44.2	0.25	73.8
LIT 2/3	5	51.04	49.43	269.94	8.20	13.38	6.224	3.815	2.756	96.2	40.1	0.20	53.3
LIT 3/3	3	51.26	49.36	278.97	7.76	12.96	6.606	3.955	2.844	108.6	44.5	0.22	64.8
LIT 2/2	80	51.13	49.46	271.58	9.08	15.04	5.631	3.400	2.765	77.5	32.0	0.21	45.1
LIT 3/1	80	51.14	49.49	277.22	10.04	15.82	5.094	3.233	2.818	68.5	29.4	0.16	33.8
vzorek	foliace	L	d	m _d	tP	tS2	vP	vS2	ρ	E _d	u _d	v _d	K _d
	[°]	[mm]	[mm]	[g]	[us]	[us]	[km/s]	[km/s]	[g/cm ³]	[GPa]	[GPa]		[GPa]
LIT 1/1	2	51.38	49.44	278.79	7.50	16.02	6.851	3.207	2.826	79.1	29.1	0.36	93.9
LIT 2/3	5	51.04	49.43	269.94	8.20	14.86	6.224	3.435	2.756	83.3	32.5	0.28	63.4
LIT 3/3	3	51.26	49.36	278.97	7.76	16.36	6.606	3.133	2.844	75.7	27.9	0.35	86.9
LIT 2/2	80	51.13	49.46	271.58	9.08	15.04	5.631	3.400	2.765	77.5	32.0	0.21	45.1
LIT 3/1	80	51.14	49.49	277.22	10.04	15.70	5.094	3.257	2.818	69.0	29.9	0.15	33.2

Tab. 5 Dynamické moduly stanovené pro nasycené vzorky, nahoře počítané z rychlé příčné vlny S1, dole počítané z pomalé příčné vlny S2

vzorek	foliace	L	d	m _d	tP	tS1	vP	vS1	ρ	E _d	u _d	v _d	K _d
	[°]	[mm]	[mm]	[g]	[us]	[us]	[km/s]	[km/s]	[g/cm ³]	[GPa]	[GPa]		[GPa]
LIT 1/1	2	51.38	49.44	278.79	7.38	12.70	6.962	4.046	2.826	115.2	46.3	0.25	75.3
LIT 2/3	5	51.04	49.43	269.94	8.10	13.20	6.301	3.867	2.756	98.7	41.2	0.20	54.5
LIT 3/3	3	51.26	49.36	278.97	7.65	13.35	6.701	3.840	2.844	105.3	41.9	0.26	71.8
LIT 2/2	80	51.13	49.46	271.58	8.88	14.95	5.758	3.420	2.765	79.4	32.3	0.23	48.5
LIT 3/1	80	51.14	49.49	277.22	9.40	16.35	5.440	3.128	2.818	69.1	27.6	0.25	46.6
vzorek	foliace	L	d	m _d	tP	tS2	vP	vS2	ρ	E _d	u _d	v _d	K _d
	[°]	[mm]	[mm]	[g]	[us]	[us]	[km/s]	[km/s]	[g/cm ³]	[GPa]	[GPa]		[GPa]
LIT 1/1	2	51.38	49.44	278.79	7.38	16.16	6.962	3.179	2.826	78.2	28.6	0.37	98.9
LIT 2/3	5	51.04	49.43	269.94	8.10	15.86	6.301	3.218	2.756	75.6	28.5	0.32	71.4
LIT 3/3	3	51.26	49.36	278.97	7.65	16.6	6.701	3.088	2.844	74.0	27.1	0.37	91.5
LIT 2/2	80	51.13	49.46	271.58	8.88	14.95	5.758	3.420	2.765	79.4	32.3	0.23	48.5
LIT 3/1	80	51.14	49.49	277.22	9.40	16.35	5.440	3.128	2.818	69.1	27.6	0.25	46.6

Stanovení koeficientu hydraulické vodivosti

Pro stanovení koeficientu hydraulické vodivosti byla využitá triaxiální buňka (osový a komorový tlak do 100 MPa) v kombinaci s propustoměrem Quizix 5000, který umožňuje, díky velmi přesným měřením objemových změn za vysokých tlaků, stanovení koeficientu filtrace až do řádu 10⁻¹⁸ m/s (Obr. 2).

Pro stanovení koeficientu hydraulické vodivosti byly provedeny v triaxiální komoře za plášťového i osového tlaku 5 MPa. Tlak na vstupu do vzorku (dolní drenáž, 3.5 MPa) a výstupu ze vzorku (horní drenáž, 2 MPa) byl udržován konstantní po celou dobu experimentu. Tzn., že měření bylo provedeno s tlakovou diferencí 1.5 MPa, což odpovídá hydraulickému gradientu 153 m. Za předpokladu laminárního proudění by stanovený koeficient filtrace neměl být závislý na hydraulickém gradientu. Pro generování tlaku na dolní a horní drenáži, stejně jako pro měření a registraci tlaků a proteklého objemu byl použit permeameter Quizix 5000 (Obr. 2).

Testováno bylo šest vzorků, všechny s výjimkou vzorku LIT 2/1 jsou na obrázku 4. Tento vzorek byl bezprostředně po změření hydraulické vodivosti převrtán na kulový vzorek pro měření ultrazvukové anizotropie a bohužel nebyl jako váleček vyfocen. Čtyři vzorky (LIT 1/1, LIT 2/1, LIT 2/3, LIT 3/3) byly měřeny s orientací foliace paralelní se směrem proudění. Dva vzorky (LIT 2/2, LIT 3/1) byly měřeny s orientací foliace kolmou ke směru proudění. Měření bylo provedeno při konstantní laboratorní teplotě 20°C.

Z parametrů vzorku a hodnot změřených permeametrem vypočteme podle vztahu (2) koeficient hydraulické vodivosti *k* (Tab. 6):

$$k = konst^{*}[V/(t^{*}A^{*}H/L)] [m \cdot s^{-1}] (2)$$

kde *t* [*min*] je časový interval měření; *V* [*ml*] je objem proteklé vody za časový interval *t*; *L* [*mm*] je výška zkušebního vzorku před zkouškou; *A* [cm^2] je průřezová plocha zkušebního vzorku a *H* [*m*] je rozdíl tlakových výšek hladin. Data z permeametru byla vyhodnocována až po ustálení průtoku na dolní (do vzorku) a horní (ze vzorku) drenáži.

Stanovený koeficient hydraulické vodivosti, měřený při konstantní laboratorní teplotě 20°C, byl podle normy ČSN CEN ISO/ TS 17892 – 11 přepočten na koeficient filtrace při teplotě vody 10° C (*k10* v Tab. 6).



Obr. 3 Fotografie měřeného vzorku mezi dvěma písty a tlakové komory pro měření hydraulické vodivosti (nahoře). Fotografie permeametru Quizix 5000 (dole).

Tab.	6 Koeficient	hvdraulické	vodivosti	včetně	měřených	hodnot i	pro jeh	o výpočet
	2	~			~	1	,	~ 1

vzorek	foliace	L	d	А	V	Н	t	т	konst	k	alfa	k10
	[°]	[mm]	[mm]	[cm2]	[ul]	[m]	[min]	[°C]		[m/s]		[m/s]
LIT 1/1	2	51.38	49.44	20.73	5.382	153.1	3200	20		4.54E-15	0.771283	3.50E-15
LIT 2/1	15	51.18	49.41	20.57	1.395	153.1	2500	20	1 67E 10	1.51E-15	0.771283	1.17E-15
LIT 2/3	5	51.04	49.43	20.46	15.957	153.1	4100	20	1.076-10	1.06E-14	0.771283	8.15E-15
LIT 3/3	3	51.26	49.36	20.64	0.910	153.1	1900	20		1.29E-15	0.771283	9.98E-16
LIT 2/2	80	51.13	49.46	20.53	2.695	153.1	6200	20	1.675.10	1.18E-15	0.771283	9.09E-16
LIT 3/1	80	51.14	49.49	20.54	14.023	153.1	4700	20	1.67E-10	8.09E-15	0.771283	6.24E-15



Obr. 4 Fotografie měřených vzorků, zleva: LIT 1/1 (vertikální foliace), LIT 2/2 (horizontální foliace), LIT 2/3 (vertikální foliace), LIT 3/1 (horizontální foliace), LIT 3/3 (vertikální foliace). Vzorek LIT 2/1 nebyl vyfocen.

Citovaná literatura

Zavoral, J. (1987). Metodiky laboratorních zkoušek v mechanice zemin a hornin. Ústř. úst. geol., Praha, 186.