



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

Studijní program: P 2612 - Elektrotechnika a informatika
Obor: 3901V025 - Přírodovědné inženýrství

Vývoj metodiky hydraulického testování
rozpukaného masivu

Development of a method to hydraulic testing
of fractured massif

Autoreferát disertační práce

Autor: **Lenka Rukavičková**
Vedoucí DP: Doc. RNDr. Tomáš Pačes, DrSc.

Liberec 2006

Abstrakt

Do puklinového prostředí pevných hornin jsou v současné době projektovány zásobníky a úložiště různého typu včetně hlubinného úložiště radioaktivních odpadů. Pro bezpečnostní analýzy projektů jsou nezbytné matematické modely proudění podzemních vod založené na dobré znalosti hydraulických vlastností puklinového prostředí.

Tato práce se zabývá hydrogeologickým výzkumem puklinového prostředí granitových masivů v hlubokých vrtech, návrhem vhodné metodiky tohoto výzkumu a využitím dat získaných v terénu pro matematický model proudění podzemních vod.

Hydraulické vlastnosti rozpukaných granitových masivů byly zkoumány na lokalitě Podlesí u Potůčků v Krušných horách a na melechovském masivu na Českomoravské vysočině. Tyto lokality zahrnují čtyři typy granitů. Na osmi hydrogeologických vrtech sahajících do hloubky od 150 do 350 m bylo provedeno 230 etážových hydrodynamických zkoušek. Reakce na hydrodynamické zkoušky byly monitorovány v několika izolovaných úsecích okolních vrtů pomocí multipakového systému. Rozsáhlý datový soubor poskytl v rámci České republiky nové informace o hydraulických vlastnostech puklinového prostředí granitů. Jde o piezometrické poměry puklinových systémů, hloubkové profily hydraulické vodivosti masivu, identifikaci hlavních vodivých puklin a míry jejich propojení v prostoru mezi vrty. Rozpukané masivy granitů mají v závislosti na počtu a charakteru puklin velký rozsah koeficientů filtrace. Otevřené pukliny v poruchových pásmech mají v průměru koeficient filtrace 10^{-5} m.s^{-1} , zatímco neporušený granit a granit s uzavřenými, nebo sekundárně vyplněnými puklinami má tento koeficient řádově $10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$.

V práci je navržena nová metodika terénního hydrogeologického výzkumu puklinového prostředí a popsáno nově vyvinuté technické zařízení pro etážové hydrodynamické testy. Z hydrodynamických testů se pro výzkum puklinového prostředí s velmi nízkou propustností nejvíce osvědčily vodní tlakové zkoušky.

V závěrečné části jsou prezentovány matematické modely, které vznikly na základě geologických dat z obou zkoumaných lokalit. Je zde hodnocena možnost využití dat získaných v průběhu komplexního geologického výzkumu pro tvorbu a kalibraci matematických modelů a schopnost modelu vystihnout zjištěné hydraulické chování granitového masivu.

Klíčová slova: Hydrogeologie granitů, puklinové prostředí, proudění podzemní vody, hydrodynamické zkoušky, matematický model, Český masiv

Abstract

Various reservoirs and repositories including a radioactive waste repository are presently designed to be placed in fractured hard rocks. Mathematical models of groundwater flow are fundamental for safety analyses of the repositories. The models should be based on reliable knowledge of hydraulic properties of fractured rock.

Hydraulic properties of fractured granite massifs were studied at the test site of Potůčky-Podlesí in the Krušné hory Mountains and at the test site in Melechov massif at Českomoravská vysočina. These sites comprise four types of granite. All together 230 hydrodynamic tests in isolated borehole sections were carried out in eight boreholes. The depths of the boreholes were from 150 to 350 m. Responses of hydraulic pressure on hydrodynamic testing in a selected borehole were monitored in several isolated sections of adjacent boreholes using a multipacker system. The obtained data set has provided new information about hydraulic properties of fractured granites characterized by a very small permeability of the rock matrix. This set includes piezometric levels of fracture systems, vertical profiles of the hydraulic conductivity, identification of main conductive fractures and their interconnection among boreholes in the rock space. Fractured granite massifs have a wide range of hydraulic conductivity depending on amount and character of the fractures. The open fractures in faulted zones have hydraulic conductivity 10^{-5} m.s⁻¹ at average, whereas the compact granite and granite with closed fractures or with fractures filled with secondary minerals has hydraulic conductivity in order of 10^{-10} m.s⁻¹.

A new method is proposed in this thesis to evaluate in field the hydrogeological characteristics of the fractured rocks with very low permeability of the rock matrix. The design of the method includes a newly developed equipment for the hydrodynamic tests in the isolated sections. Water pressure tests appear to be the best type of the hydrodynamic tests to evaluate the hydraulic parameters of this type of fractured rock environment.

Mathematical models, which are based on hydrogeological data from the two test sites, are presented in the final part of this thesis. The field data obtained in this complex hydrogeological research are evaluated as to their suitability for the mathematical model creation and calibration. The model ability was tested to represent the hydraulic behavior of the granite massifs.

Key words: Hydrogeology of granite, fractured environment, groundwater flow, hydrodynamic tests, mathematical model, Bohemian Massif

Obsah:

1	Úvod.....	5
2	Metodika.....	7
3	Výsledky výzkumu.....	9
3.1	Geograficko geologická charakteristika zkoumaných oblastí.....	9
3.2	Piezometrické poměry puklinových systémů granitových masivů	11
3.3	Hlubkové profily hydraulické vodivosti masivu	12
3.4	Identifikace hlavních vodivých puklin, míra jejich propojení	14
4	Diskuse výsledků.....	16
5	Návrh vhodné metodiky VTZ a souvisejících prací.....	22
6	Příklady matematických modelů	24
7	Závěr.....	27
8	Literatura	29

1 Úvod

Puklinové prostředí kompaktních hornin s velmi nízkou propustností je v současné době stále více využíváno pro umístění podzemních zásobníků ropy či zemního plynu a pro úložiště nebezpečných látek, ať už se jedná o toxické látky z chemického průmyslu nebo vysoce aktivní odpady z provozu jaderných elektráren. Tento trend bude zcela jistě pokračovat i v budoucnosti.

Horniny s ryze puklinovou propustností (vyvřelé a metamorfované horniny) zaujímají významnou část České republiky. Velké množství sanací starých skládek a nových ekologických havárií se proto bezprostředně týká puklinového prostředí. S převahou proudění podzemních vod po tektonických liniích se setkáváme také u konsolidovaných sedimentárních hornin, které mají ve větších hloubkách propustnost smíšenou – puklinově průlinovou. Při průniku kontaminantů z povrchového zdroje přes zvětralinový plášť do pevné horniny se kontaminace dále šíří po preferenčních cestách puklinovým systémem, a to často na značné vzdálenosti.

Specifikace hydraulických vlastností puklinového prostředí pevných hornin je obtížná a komplikovaná záležitost. Hydraulická vodivost se zde často mění o několik řádů na velmi krátkou vzdálenost. Tato skutečnost je způsobena přítomností omezeného počtu významných otevřených propustných puklin či poruchových zón a rozdílnou mírou propojení jednotlivých puklinových systémů. Vysoká četnost poruch (puklin a zlomů) v horninovém prostředí i vysoká míra jejich propojení ve strukturním slova smyslu nemusí indikovat i vysokou hydraulickou vodivost zastiženého horninového prostředí.

Pukliny i poruchové zóny jsou velmi často vyplněny sekundárními minerály nebo zcela uzavřeny vlivem geostatického napětí. Hydraulické vlastnosti uzavřených a vyplněných puklin se blíží vlastnostem neporušeného horninového prostředí a pro aktivní oběh podzemních vod mají tyto pukliny jen omezený význam. Podzemní voda proudí pouze po řídké síti komunikujících otevřených puklin a to ne v celé jejich ploše, ale jen v částech, které mají charakter kanálů.

Pokud chceme spolehlivě předpovědět hydraulické chování podzemní vody v horninovém prostředí, musíme v terénu co nejpřesněji stanovit pozici, orientaci, hydraulické vlastnosti a míru propojení hlavních propustných poruch. Pro terénní výzkum těchto charakteristik je nutné speciální technické vybavení a specifická metodika testovacích prací.

Puklinové prostředí dlouho nebylo středem zájmu hydrogeologů protože v oblastech pevných rozpukaných hornin se zřídka vyskytují významnější zásoby podzemních vod. Pokud pak byly průzkumné práce v tomto prostředí prováděny, postupovalo se obdobně jako v prostředí průlinovém. Výrazná změna v přístupu hydrogeologů k puklinovému prostředí nastala před 20-30 lety v souvislosti s řešením ekologických problémů. Ve světě nastal prudký rozvoj v oblasti komplexního geologického výzkumu puklinového prostředí pevných hornin. Výzkum probíhal a probíhá na mnoha lokalitách ve světě převážně v rámci národních programů zemí vlastnicích jaderné elektrárny. Jako příklad takových lokalit je možné uvést Äspö (Tsang et al., 1996; Svenson, 2001b, Gustafson a Fransson 2005) a Finnsjön (Andersson et al. 1991) ve Švédsku, Grimsel ve Švýcarsku (Mauldon et al. 1993; Martinez-Landa and Carrera 2005), Hastholmen Island (Pirhonen 1988) a Olkiluoto (Ahokas 2003) ve Finsku, Fanay-Auge`res ve Francii (Cacas et al. 1990); Mirror Lake v USA (Shapiro a Hsieh 1991; Day-Lewis et al. 2000, Tiedeman a Hsieh 2001); El Berrocal (Guimera` et al. 1995) ve Španělsku.

Hydrogeologický výzkum těchto lokalit je orientován na etážové hydrodynamické zkoušky v hlubokých malopřůměrových vrtech, nebo ve vrtech ve stěnách tunelů podzemních

laboratoří (Äspö, Grimsel). Technické vybavení pro hydrodynamické zkoušky je obvykle vyvíjeno v rámci výzkumných projektů a je uzpůsobováno cílům výzkumu, geologickým poměrům zkoumaných lokalit, typu zkoušek a v neposlední řadě použitým vrtným technologiím a technickým parametrům vrtů (Laaksoharju 1991, Öhberg 1991, Mejías a López-Geta 2003).

Metodika hydrogeologických výzkumů v jednotlivých zemích se liší. Při hydrodynamickém testování jsou nejčastěji v různých variantách využívány čerpací zkoušky, slug testy a vodní tlakové zkoušky.

V České republice byl do nedávné doby výzkum puklinového prostředí zaměřen převážně na povrchový výzkum spojený s hydrogeologickým mapováním a využitím geografických informačních systémů (Buchtele et al. 2003, Krásný 2003). Výzkum ve vrtech zahrnoval klasické čerpací zkoušky vyvinuté pro průlinové prostředí. Také pro následné simulace proudění podzemních vod byly využívány v naprosté většině komerční modely pro průlinové prostředí. Intenzivní vývoj metodiky výzkumu puklinového prostředí České republiky započal výzkumným projektem VaV630/3/00 – „Komplexní geochemický výzkum interakcí a migrací organických a anorganických látek v horninovém prostředí“ (Pačes a kol. 2002). Problematika puklinového prostředí byla řešena v rámci dílčího úkolu 2 – „Geochemická interakce mezi fluidy a puklinovým horninovým prostředím“ (rok řešení 2000-2002). Na výsledky výzkumu v letech 2003-2005 bezprostředně navázal nový projekt VaV/660/2/03 „Vývoj metodiky identifikace a matematického modelování proudění a geochemické interakce v rozpukaném prostředí kompaktních hornin“ (Rukavičková a kol. 2006a). Oba projekty byly financovány MŽP ČR a hlavním řešitelem byla Česká geologická služba. Autorka vedla hydrogeologický výzkum ve vrtech v průběhu obou projektů a úzce spolupracovala se skupinou matematického modelování Fakulty mechatroniky a mezipodobových inženýrských studií Technické Univerzity v Liberci při vývoji ryze puklinových a kombinovaných modelů proudění.

V průběhu řešení obou uvedených projektů byly v podlaském granitovém masivu v Krušných horách (lokalita Potůčky-Podlesí) vyvrtány tři hydrogeologické vrty PTP-3, PTP-4a a PTP-5 do hloubky 350, 300 a 296 m. Pro hydrogeologický výzkum jsme vyvinuli technické zařízení pro hydrodynamické testy v úzkoprofilových vrtech. Toto zařízení umožňuje testovat propustnost jednotlivých puklin a puklinových zón *in situ* a současně sledovat i nepatrné odezvy na tyto testy ve vrtu sousedním. Dvě etapy výzkumných prací ve vrtech zahrnovaly více než 100 hydrodynamických testů (vodní tlakové zkoušky a slug testy) a 8 stopovacích zkoušek. Horninové jádro všech vrtů bylo velmi podrobně zkoumáno z hlediska petrologie (typy granitů, chemické složení hornin), strukturní geologie (četnosti, orientace a sklony puklin) a mineralogie (výplně puklin). Současně proběhl podrobný geologický a strukturně geologický výzkum povrchových výchozů na lokalitě. V současné době jsou ze čtyř izolovaných etáží v pravidelných intervalech odebírány vzorky podzemních vod.

Výsledky výzkumů uvedených ve výzkumných zprávách (Pačes a kol. 2002, Rukavičková a kol. 2006a) byly aplikovány na melechovském granitovém masivu, který se rozkládá přibližně v oblasti mezi Humpolcem, Světlou nad Sázavou a Ledčí nad Sázavou. Toto granitové těleso bylo vybráno jako lokalita určená pro testování metod geologického výzkumu, které budou posléze využity na vybraných perspektivních lokalitách pro umístění hlubinného úložiště jaderného odpadu. V rámci projektu „Provedení geologických a dalších prací na testovací lokalitě melechovský masiv – 2. etapa“ (Procházka a kol. 2006) v letech 2004-2006 zde bylo vyvrtáno 6 výzkumných vrtů do hloubky 150-200 m. Ve vrtech bylo realizováno 127 hydrodynamických zkoušek včetně tří zkoušek stopovacích. Nedílnou částí projektu byl komplexní geologický výzkum lokality, který zahrnoval hydrogeologické

mapování perspektivních ploch P-1a, P-1b, P-2a a P-2b (obr. 3.1.2) v měřítku 1:10 000 (Rukavičková, Budkovský 2004 a 2005). Projekt byl financován Správou úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO) a autorka disertace byla vedoucí hydrogeologické části projektu.

Předkládaná práce shrnuje výsledky šestiletého studia hydraulických vlastností puklinového prostředí čtyř typů granitů na lokalitách Potůčky-Podlesí v Krušných horách a melechovský masiv na Českomoravské vysočině. Jejím hlavním cílem je přispět k zefektivnění a zkvalitnění komplexního hydrogeologického výzkumu (včetně matematického modelování) puklinového prostředí lokalit v České republice, které byly vybrány pro umístění úložiště nebezpečného odpadu, nebo na kterých je nutné řešit únik znečištění z již provozovaného úložiště (skládky).

2 Metodika

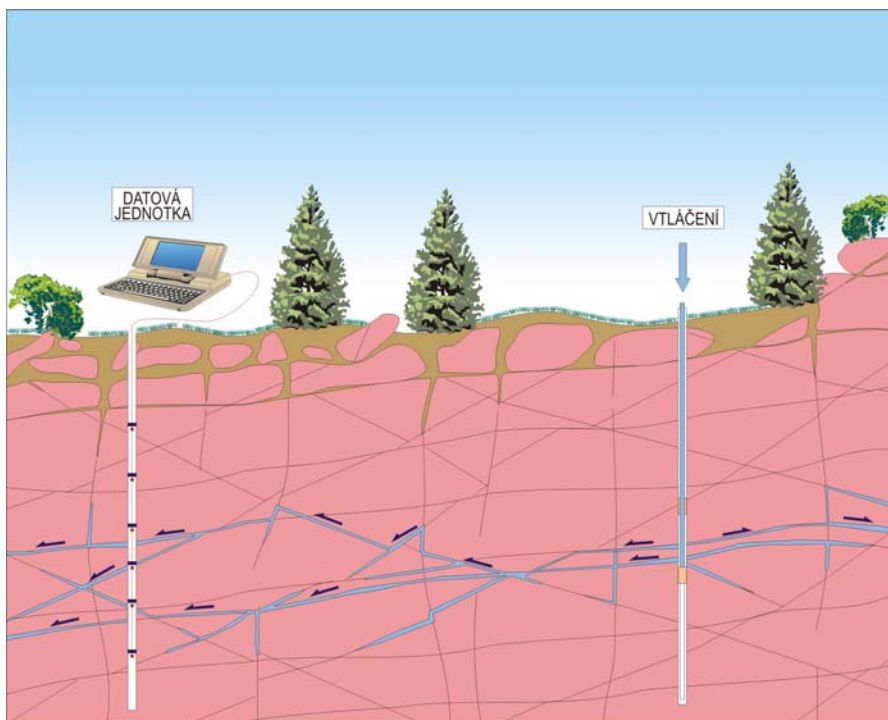
Hydrodynamické zkoušky ve vrtech, jejichž cílem je identifikovat hydraulické vlastnosti puklinového prostředí, vyžadují specifické technické zajištění a metodiku testování. V takovémto prostředí není možné použít v hydrogeologii běžně užívané čerpací zkoušky na otevřeném vrtu. Výslednou průměrnou hodnotu hydraulické vodivosti by bylo možné jen v omezené míře využít pro regionální modely většího rozsahu.

Při hydrogeologickém výzkumu na obou lokalitách jsme úspěšně aplikovali kombinaci etážových hydrodynamických zkoušek s karotážním měřením (geofyzikální měření ve vrtech).

Všechny hydrodynamické zkoušky byly realizovány etážově (na izolovaných úsecích vrtů), což nám umožnilo sestavit pro každý vrt hloubkový profil hydraulické vodivosti v masivu. Převážná část testů byla interferenčních, tedy současně s testováním vrtu byly sledovány tlakové odezvy v několika izolovaných úsecích sousedního či sousedních vrtů. K vlastnímu hydrodynamickému testování jsme využívali dvojici pryžových pakuřů (straddle test) a testovací sestavu zahrnující tlaková čidla, testovací soutyčí, čerpadla, automatický průtokový i objemový odečet spotřeb a datovou jednotku. Monitoring tlakových odezev v okolních vrtech umožňoval multipakový systém sestávající ze sady pakuřů a tlakových čidel napojených na datovou jednotku. Uvedené technické vybavení je v České republice zcela ojedinělé, bylo vyvinuto v rámci řešení výše uvedených projektů a je podrobně popsáno v Rukavičková et al. 2006b a d, Martinec, Rukavičková 2005. Schéma interferenční hydrodynamické zkoušky je na obrázku č. 2.1.

Jako základní typ hydrodynamických zkoušek jsme vybrali vodní tlakové zkoušky (VTZ). Tento typ zkoušek byl zvolen pro svou univerzálnost, lze jej využít v prostředích s vysokou i s extrémně nízkou hydraulickou vodivostí. Doplnkovým typem testů byly čerpací zkoušky a stopovací zkoušky. V prvním projektu VaV 630/3/00 jsme testovali také vhodnost slug-out testů, tento typ zkoušky se ale v prostředí s velmi nízkou hydraulickou vodivostí neosvědčil (Rukavičková 2002).

VTZ byly aplikovány ve standardní a speciální variantě. Standardní VTZ byly využívány v první etapě hydrogeologického výzkumu a pokryly vždy celý profil vrtu se stejnou vzdáleností pakuřů (délka etáže) a stejným vstupním tlakem. Jejich cílem bylo získat profil propustnosti masivu s hloubkou. Délka trvání vtláčecí fáze standardních VTZ byla do 1 hodiny a vstupní tlak se pohyboval v rozmezí 100-300 kPa, v závislosti na geologických poměrech testované lokality.



Obrázek 2.1: Schéma interferenční VTZ, vpravo testovaný vrt s dvojicí pakrů, vlevo multipakový systém.

Cílem speciálních VTZ bylo ověření hydraulických vlastností významných propustných puklin nebo poruchových zón, studium dynamiky VTZ a ověření komunikace po puklinovém systému mezi dvojicemi či trojicí vrtů. Parametry speciálních zkoušek jsem přizpůsobovala výhradně sledovaným cílům. Délka etáže se řídila rozsahem zkoumané poruchy či puklinového systému. Speciální zkoušky trvaly obecně déle než zkoušky standardní, maximální délka vtláčecí fáze byla 6 hodin.

VTZ byly primárně vyhodnocovány podle vzorce Moye (1967) pro ustálené proudění, kde je koeficient filtrace stanovován ze vztahu:

$$k = \frac{Q}{L.H} \cdot \frac{1 + \ln(L/d)}{2\pi}$$

k je koeficient filtrace ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), Q tok do vrtu – spotřeba ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$), L délka testované etáže (m), H zkušební tlak převedený na výšku vodního sloupce (m), d průměr vrtu (m).

Výsledky zpracované do tabulek a grafů s vývojem vstupních tlaků, tlaků nad testovanou etáží, spotřeb vtláčené vody a tlaků v monitorovaných etážích sousedních vrtů, sloužily jako podklady pro lokální i regionální matematické modely proudění podzemních vod (viz kapitola 6), které vznikaly na Fakultě Mechatroniky a mezioborových inženýrských studií TU v Liberci.

Z karotážních metod byla přímo pro účely hydrogeologického výzkumu využívána zejména metoda rezistivimetrie, která umožňuje v kombinaci s čerpáním vody z vrtu zjistit místa přítoku podzemní vody do vrtu (významné propustné pukliny) a zefektivnit tak následný hydrogeologický výzkum. Metodou rezistivimetrie za klidového stavu byla na obou lokalitách identifikována rychlost a směr vertikálního proudění podzemní vody ve vrtu, které jsou přímo závislé na piezometrických poměrech a hydraulických vlastnostech rozpukaného masivu. A konečně byla tato metoda využívána při stopovacích zkouškách mezi vrtů ke zjišťování míst a času příchodu stopovací látky z testované pukliny do sousedních vrtů.

3 Výsledky výzkumu

Na dvou výzkumných lokalitách zahrnujících čtyři typy granitů bylo realizováno celkem 230 etážových hydrodynamických zkoušek v 8 vrtech sahajících do hloubky od 150 do 350 m. V několika etapách hydrogeologického výzkumu bylo osazeno 5 multipakových systémů a reakce monitorovány také v jednom otevřeném vrtu. Rozsáhlý datový soubor poskytl v rámci České republiky první a jedinečné informace hydraulických vlastnostech puklinového prostředí granitů. Tyto informace můžeme rozdělit do tří hlavních částí:

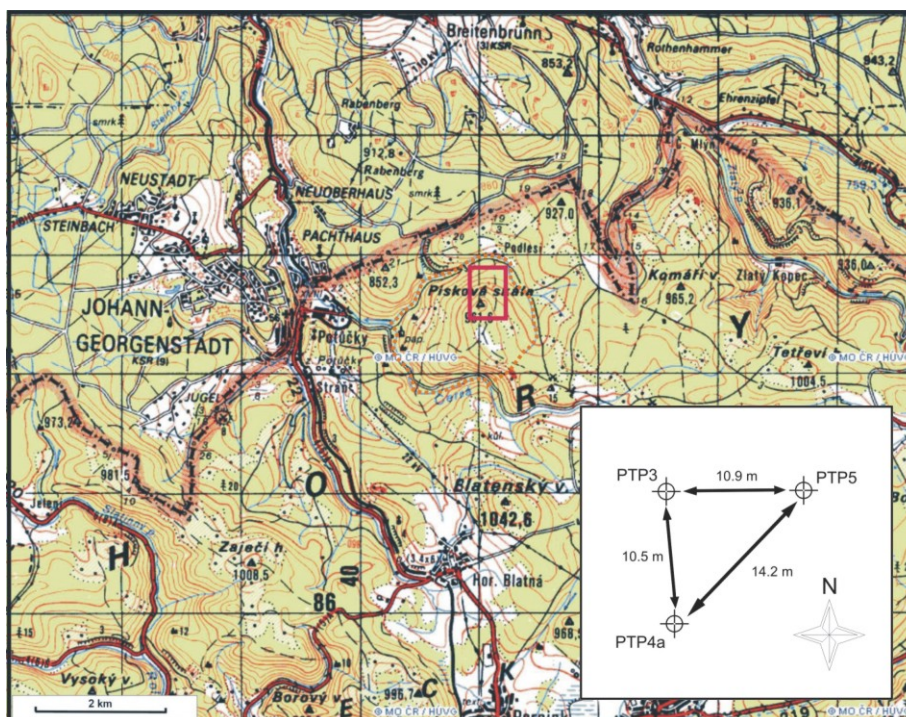
- Piezometrické poměry puklinových systémů granitových masivů.
- Hloubkové profily hydraulické vodivosti masivů.
- Identifikace hlavních vodivých puklin, míra jejich propojení.

Vzhledem k omezenému rozsahu autoreferátu jsou v kapitole uvedeny pouze příklady výsledků dosažených v průběhu sedmiletého výzkumu. Podrobně jsou výsledky prezentovány ve vlastní disertační práci a v etapových a závěrečných zprávách projektů (Rukavičková a kol. 2002, 2005, 2006a-e).

3.1 Geograficko geologická charakteristika zkoumaných oblastí

Lokalita Potůčky-Podlesí

Lokalita se nachází v západní části Krušných hor poblíž státní hranice se Spolkovou republikou Německo, přibližně 3 km východně od obce Potůčky (obr 3.1.1). Území spadá do hydrogeologického rajonu 612 Krystalinikum v mezipovodí Ohře po Kadaň.



Obrázek 3.1.1: Mapa okolí a pozice vrtů na lokalitě Potůčky-Podlesí.

Výzkumné vrty PTP-3, PTP-4a a PTP-5 byly vyhloubeny na severním svahu vrchu „Písková skála“ v granitovém pni Podlesí. Geologicky peň Podlesí reprezentuje nejvíce frakcionovanou část variského nejdecko-eibenstockého granitového masívu (Breiter 2006).

Granitový peň Podlesí intrudoval do ordovických fylitů a biotitického granitu, který je hlavní intruzivní fází nejdeckého masívu. Kontakt pně jak s fylity, tak s biotitickým granitem je ostrý. Granitový peň tvoří eliptický výchoz o rozměrech cca 400x250 m protažený SV-JZ směrem. Peň se skládá ze dvou jazykovitých těles albit-protolithionit-topazového granitu (granit pně), které se v hloubce spojují (Breiter 2006).

Nadmořská výška terénu u ústí vrtů je 864,0 m (PTP-3 a PTP-5) a 865,5 m (PTP-4a). Vrtů jsou od sebe vzdáleny přibližně 10 m v horní části a tvoří vrcholy pravoúhlého trojúhelníka. Pozice vrtů je zachycena v detailu na obrázku č. 3.1.1.

Aktivní oběh podzemních vod je zde vázán na zvětralinový plášť a zónu připovrchového rozvolnění puklin. Převážná část infiltrovaných srážek zůstává v pásmu zvětralinového pláště a zúčastňuje se, vzhledem ke značně členitému reliéfu Krušných hor, poměrně rychlého oběhu podzemních vod. V místě výzkumných vrtů byla v hloubce 20 m ve svrchní části granitového tělesa zastížena významná propustná poloha. Směr a sklon polohy sleduje terén. Je pravděpodobné, že se jedná o poruchu většího rozsahu, která drénuje nadložní sedimenty a odvádí jejich vody do Podleského potoka.

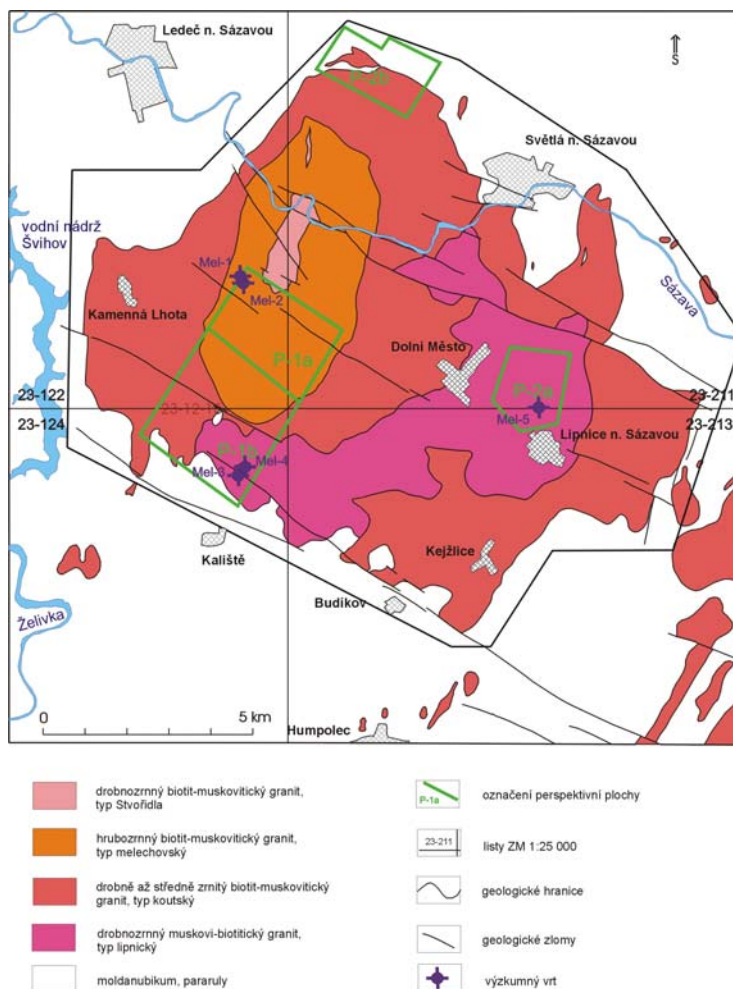
Lokalita melechovský masiv

Melechovský granitový masiv se rozkládá přibližně v oblasti mezi Humpolcem, Světlou nad Sázavou a Ledčí nad Sázavou (obr. 3.1.2). Celé mapované území má typický vrchovinný reliéf. Nejvyšším bodem území je vlastní vrch Melechov s nadmořskou výškou 709 m. Hluboce zaříznuté koryto řeky Sázavy odděluje vrch Melechov od elevace Žebrákovského kopce (601 m n.m.). V místech, kde řeka Sázava opouští masiv se zároveň nachází nejnižší položený bod - 360 m n.m.

Melechovský granitový masiv (MGM) je nejsevernější součástí centrálního masívu Moldanubika. Je tvořen granitoidy variského stáří, s pláštěm pararul monotónní, na z. i pestré série moldanubika. Na základě kombinace geologických a geochemických údajů (Mlčoch a kol. 2000) lze MGM rozčlenit do tří základních jednotek, které reprezentují tři časově a patrně i zdrojově odlišné pulsy granitového magmatu (obr. 3.1.2):

- drobozrný muskovit-biotitický granit, **typ Lipnice** tvořící nepravidelnou kru mezi Lipnicí, Dolním Městem a Prosečí,
- drobně až středně zrnitý biotit-muskovitický granit, **typ Kouty** tvořící periferii masívu a drobná tělesa v jeho okolí,
- vlastní složený melechovský peň tvořený hrubozrným biotit-muskovitický **granitem melechovským** na obvodu a drobně zrnitým řídkce porfyrickým **granitem Stvořidla** v centrální části.

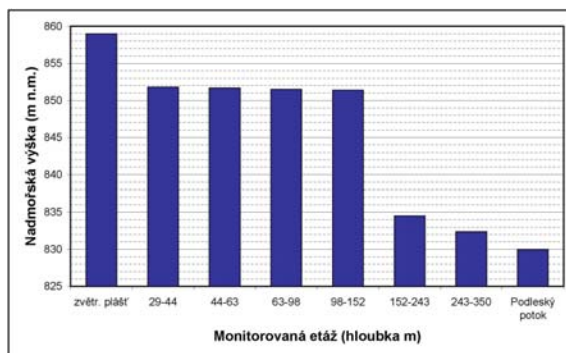
Hydrogeologický výzkum byl prováděn celkem v pěti výzkumných vrtech Mel-1 až Mel-5. Vrtů Mel-1 a Mel-2 se nacházejí na perspektivní ploše P-1a v homogenním geologickém prostředí tvořeném granitem melechovského typu (lokalita Kostelní les), jejich vzdálenost je 21 m. Vrtů Mel-3 a Mel-4 se nacházejí na perspektivní ploše P-1b v geologicky komplikovaném prostředí s četnými poruchovými pásmy (lokalita Zadní les) v granitu typu Lipnice a jsou od sebe vzdáleny 123 m. Vrt Mel-5 leží na perspektivní ploše P-2a s četným výskytem lomů (lokalita Lipnice), taktéž v granitu typu Lipnice (obrázek č. 3.1.2).



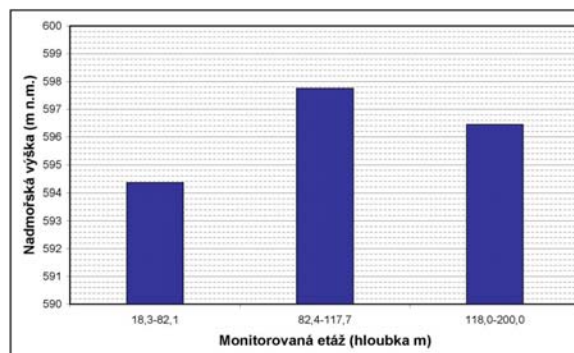
Obrázek 3.1.2: Schematická geologická mapa melechovského masivu s vyznačením perspektivních ploch a testovaných výzkumných vrtů.

3.2 Piezometrické poměry puklinových systémů granitových masivů

Piezometrické poměry puklinových systémů byly ve všech vrtech zkoumány karotážní metodou rezistivimetrie za přirozeného stavu a poté na dvou lokalitách a to Potůčky-Podlesí v Krušných horách a Kostelní les na melechovském masivu pomocí multipakového systému. Příklady výsledků měření jsou uvedeny na obrázcích 3.2.1 a 3.2.2.



Obrázek 3.2.1: Piezometrické úrovně ve vrtu PTP-3 na lokalitě Potůčky-Podlesí v Krušných horách.



Obrázek 3.2.2: Piezometrické úrovně ve vrtu Mel-1 na lokalitě Kostelní les na melechovském masivu.

Podle konvenčních hydrogeologických modelů se na lokalitě **Potůčky-Podlesí** jedná o infiltrační oblast, piezometrické úrovně klesají s hloubkou. Ve zvětralinovém plášti je hloubka hladiny podzemní vody 4-7 m pod terénem (861-858 m n.m.). Dále můžeme vydělit zónu připovrchového rozvolnění puklin s hloubkovým dosahem do 110 m. Zde piezometrická úroveň pozvolna klesá s hloubkou – z 851,8 na 851,4 m n.m. u vrtu PTP-3 a z 851,1 na 849,6 m n.m. u vrtu PTP4a. V hloubkách pod 110 m je piezometrická úroveň výrazně nižší, ve vrtu PTP-3 je to 834,5 a ve vrtu PTP4a 842,1 m n.m. Konečně ve spodní části vrtů klesá piezometrická úroveň na 832,4 (PTP-3) a 833,4 m n.m. (PTP-4a). U obou vrtů se tato piezometrická úroveň velmi blíží nadmořské výšce nejbližší erozní báze, kterou zde tvoří Podleský potok (obrázek 3.2.1.).

Běžným karotážním měřením metodou rezistivimetrie za přirozeného stavu nebylo ve vrtech na lokalitě Potůčky-Podlesí zaznamenáno vertikální proudění podzemní vody ve vrtu (Lukeš 2002a, 2002b, 2004, 2006a). Významné přítoky podzemní vody do vrtu se vyskytují pouze v připovrchové zóně rozvolnění puklin, v rámci které nebyly později zjištěny významné rozdíly v piezometrické úrovni (viz výše). Proto jsme na lokalitě provedli po ukončení testovacích prací opakovaná karotážní měření v přibližně měsíčním intervalu. Ve spodní části vrtu PTP-3 byla zjištěna tři odporová rozhraní v hloubkách 105, 175 a 258 m, která se v průběhu dalších měření pomalu posouvala ke dnu vrtu. Objemová rychlost postupu podzemní vody se pohybovala v rozsahu 3,2 až 1,2 litru za den. Karotážním měřením jsme ověřili předpokládaný směr proudění podzemní vody stvolem vrtu od shora dolů, zjištěná rychlost proudění velmi dobře koresponduje s hydraulickou vodivostí příslušných hloubkových úseků.

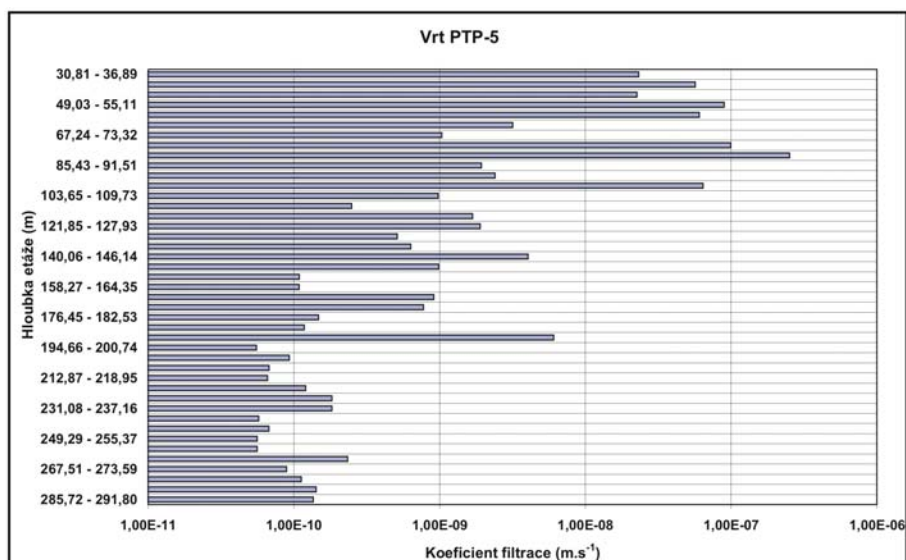
Na lokalitě **Kostelní les** na melechovském masivu byly sledovány tři etáže - ve svrchní (18,3-82,1 m pod terénem) je průměrná piezometrická úroveň hladiny podzemní vody 4,0 m pod terénem (594,35 m n.m.), ve střední etáži (82,4-117,7 m) je to pouze 0,6 m pod terénem (597,75 m n.m.) a ve spodní etáži (118, 0-200,0 m) leží piezometrická úroveň 1,9 m pod terénem (obrázek 3.2.2.). Na této lokalitě jsou piezometrické úrovně hladiny podzemní vody zásadní měrou ovlivněny výskytem významných puklinových systémů, které spolu navzájem komunikují jen v omezené míře.

Poznatky o piezometrických úrovních jsou zcela v souladu s výsledky karotážního měření, které indikovalo ve vrtu Mel-1 vertikální proudění podzemní vody z přítoků v hloubkách 148 m až 95,5 m směrem vzhůru k propustné poloze v hloubce 56 m (Lukeš 2006b).

3.3 Hloubkové profily hydraulické vodivosti masivu

Výsledky hydrodynamického testování granitových masivů potvrdily vysokou míru nehomogenity puklinového prostředí, zjištěné koeficienty filtrace k ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) se pohybovaly v rozsahu sedmi řádů od 10^{-12} do 10^{-5} $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

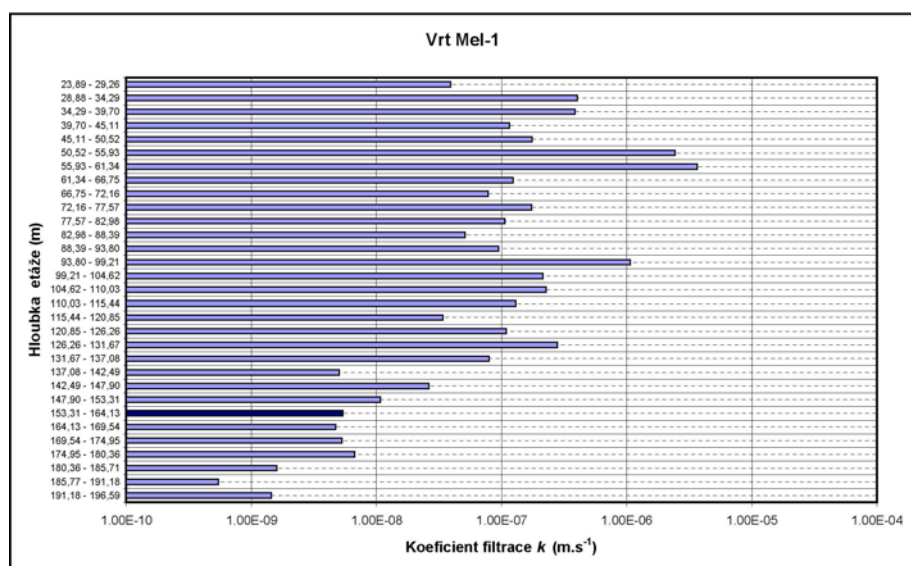
Na lokalitě Potůčky – Podlesí, v hloubkách pod 150 m je koeficient filtrace nejčastěji v řádu 10^{-11} $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ nebo v nižších hodnotách řádu 10^{-10} $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. V hloubkovém úseku od 170 m do 100 m hodnota k přechází do vyšších hodnot řádu 10^{-10} a zasahuje až do nižších hodnot řádu 10^{-9} $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Projevuje se zde vyšší míra otevření puklin, úseky s velmi nízkou propustností $k = 1\cdot 10^{-10}$ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ a menší se vyskytují jen ojediněle v úseku okolo 160 m. V pásmu rozvolnění puklin od 100 m výše se výrazně projevují jednotlivé propustné pukliny propojené sítě vedlejších puklin s nižší propustností. Koeficient filtrace kolísá v rozsahu tří řádů od $1,01\cdot 10^{-9}$ po $2,56\cdot 10^{-7}$ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Příklad hloubkového profilu hydraulické vodivosti ve vrtu PTP-5 na lokalitě Potůčky-Podlesí je uveden na obrázku č. 3.3.1.



Obrázek 3.3.1: Profil hydraulické vodivosti ve vrtu PTP-5.

V oblasti melechovského masivu byly testovány vrty na lokalitách Kostelní les (Mel-1 a Mel-2), Zadní les (Mel-3 a Mel-4) a Lipnice (Mel-5).

Vrty na lokalitě Kostelní les prošly hrubozrnným dvojslídňým melechovským granitem, s častým výskytem otevřených propustných puklin s vysokou mírou hydraulického propojení, která výrazně zvyšuje hydraulickou vodivost horninového prostředí. V přípovrchové zóně rozvolnění puklin do hloubky 150 m se koeficient filtrace pohybuje nejčastěji v rozsahu řádů 10^{-8} a 10^{-7} $m.s^{-1}$. Etáže, které zastihly významné propustné pukliny a úseky s hustou sítí propojených otevřených puklin, vykazují k v řádu 10^{-6} $m.s^{-1}$. Pod 150 m hydraulická vodivost klesá až k řádu 10^{-9} $m.s^{-1}$. Příklad hloubkového profilu hydraulické vodivosti z vrtu Mel-1 je na obr. 3.3.2.



Obrázek 3.3.2: Profil hydraulické vodivosti ve vrtu Mel-1, tmavě modrým sloupcem je vyznačen koeficient filtrace odpovídající poruchové zóně.

Vrt Mel-3 na lokalitě Zadní les zastihl v hloubce 120-132 m významnou poruchovou zónu s vysokou hydraulickou vodivostí v řádu 10^{-6} $m.s^{-1}$. Zóna významného ovlivnění hydraulických vlastností hornin sahá směrem vzhůru do vzdálenosti 40 m od středu poruchové zóny, který je tvořen dvojicí nestabilních poruch o mocnosti 1 + 1 m. Mimo tuto

zónu je k nejčastěji v řádu 10^{-8} a 10^{-7} $m.s^{-1}$. Vrt Mel-4 leží 123 m ssv. od vrtu Mel-3, již zcela mimo hlavní poruchovou zónu. V tomto vrtu převažuje granit s velmi nízkou hydraulickou vodivostí v řádu 10^{-10} $m.s^{-1}$. Zastižené vodivé polohy mají koeficient filtrace v řádu 10^{-7} $m.s^{-1}$ a jsou tvořeny jednotlivými puklinami s malou storativitou.

Ve vrtu Mel-5 na lokalitě Lipnice byly zastiženy dvě vodivé poruchy o mocnosti 8-10 m v hloubkách okolo 50 a 100 m. Jejich hydraulická vodivost se pohybuje v řádu 10^{-6} a 10^{-7} $m.s^{-1}$. Hydraulické vlastnosti neporušeného granitu jsou obdobné jako ve vrtu Mel-4.

Silně drcené tektonické zóny bývají často vyplněny sekundárními minerály, které zatěsňují puklinovou síť a zmenšují její prostupnost. Z geologického hlediska významné poruchové zóny zastižené vrty Mel-1, Mel-2 a Mel-4 měly srovnatelné hydraulické vlastnosti s okolním neporušeným horninovým prostředím (obrázek 3.3.2).

Na obrázku č. 3.3.3 je část poruchové zóny zastižené vrtem Mel-1 se silně porušeným granitem a $k=4,5*10^{-9}$ $m.s^{-1}$. Na obrázku č. 3.3.4 je fotografie jádra z úseku vrtu, kde byly změřeny největší spotřeby vtláčené vody $k=4,5*10^{-6}$ $m.s^{-1}$. Tedy hydraulická vodivost onoho na první pohled neporušeného úseku na obrázku č. 3.3.4 je 1000x vyšší než vodivost poruchové zóny.



Obrázek 3.3.3: Jádro vrtu Mel-1 v místě poruchové zóny $k=4,5*10^{-9}$ $m.s^{-1}$.



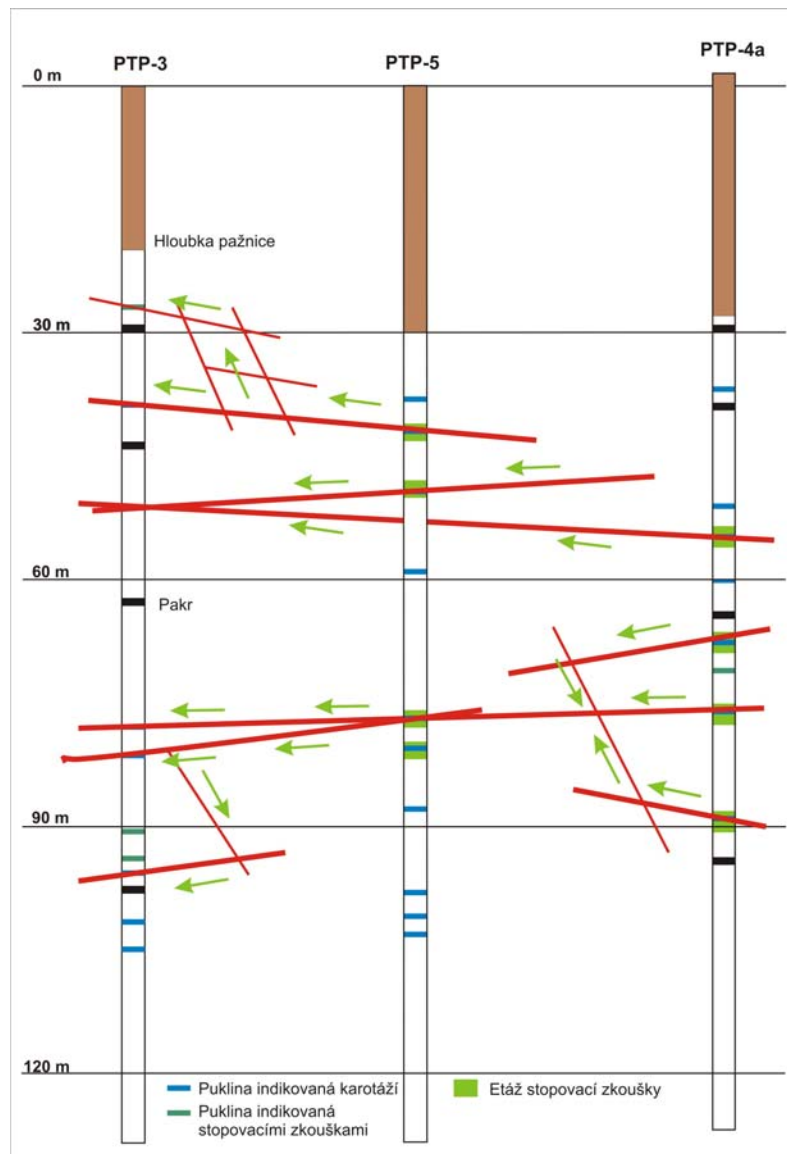
Obrázek 3.3.4: Jádro vrtu Mel-1 v místě s nejvyšší zjištěnou hydraulickou vodivostí $k=4,5*10^{-6}$ $m.s^{-1}$.

3.4 Identifikace hlavních vodivých puklin, míra jejich propojení

Na lokalitě Potůčky-Podlesí byla komunikace po puklinových systémech mezi trojicí vrtů PTP-3, PTP 4a a PTP-5 (vzdálenost vrtů je přibližně 10 m) zaznamenána od hloubky 110 m výše. Komunikace a současně i vyšší propustnost byla ve třech hlubkových úsecích, můžeme mluvit o třech dílčích puklinových systémech (obrázek 3.4.1):

- Puklinový systém v hloubce 37-61 m je tvořen výraznými propustnými puklinami v hloubkách 38,5, 42,0, 49,8 a 59,8 m (vrt PTP-5) a systémem dalších, méně propustných převážně vertikálních puklin. Rychlost postupu stopovací látky tímto systémem je v řádu 10^{-3} $m.s^{-1}$.

- Puklinový systém v hloubce 74 – 86 m tvoří nejvýznamnější zastižená puklina vrtu PTP-5 v hloubce 81 m a s touto puklinou bezprostředně komunikující propustná puklina v hloubce 78.7 m. Puklina v hloubce 81 m ve vrtu PTP-5 je propojena se sítí drobných puklin ve vrtu PTP-3 v hloubce 90.5-101.5 m a se třemi puklinami různých propustností v hloubkách 52.5-77.5 m ve vrtu PTP-4a. Rychlost postupu stopovací látky byla menší než $5 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.
- Puklinový systém v hloubce 97-110 m. Je tvořen drobnými puklinami v hloubkách 99, 102 a 104 m (vrt PTP-5). Jeho komunikace s okolními vrty je ve srovnání s předchozími puklinovými systémy nevýrazná.



Obrázek 3.4.1: Schéma hlavních puklinových systémů na lokalitě Potůčky-Podlesí. Zelenými šipkami je vyznačeno šíření stopovače puklinovým systémem. Kvůli větší přehlednosti obrázku byly vynechány drobné pukliny v hloubkách kolem 100 m.

V rámci melechovského masivu byla sledována komunikace mezi vrty Mel-1 a Mel-2 (vzdálenost 21 m) a mezi vrty Mel-3 a Mel-4 (vzdálenost 123 m).

Byla prokázána tlaková komunikace mezi vrty Mel-4 a Mel-3 po propustných puklinách v hloubce 103 a 107 m (Mel-4). Podle našich představ je vrt Mel-4 v této hloubkové úrovni propojen s vrtem Mel-3 pomocí systému méně významných puklin, který ústí do významné

poruchy zastižené vrtem Mel-3. Tlakové ztráty v puklinovém systému mezi oběma vrty jsou 98,5%.

Interferenčními hydrodynamickými a stopovacími zkouškami byla prokázána také komunikace mezi vrty Mel-1 a Mel-2 na lokalitě Kostelní les a to ve třech hloubkových úrovních. Rychlost postupu stopovací látky se pohybovala od 0,17 po 1,3 m.min⁻¹ a proporcionalně odpovídala měřeným spotřebám vtlačného roztoku.

Lokalita Kostelní les se vyznačuje vysokou hydraulickou vodivostí a vysokou mírou propojení puklinových systémů. Nejvýznamnější roli zde hrají subhorizontální pukliny, rychlá komunikace byla prokázána v hloubkové úrovni kolem 50 m (52,3 m Mel-2 a 56,0 m Mel-1) a 100 m (96,5 m Mel-1, 91,0 a 93,2 m Mel-2). Obě pukliny mezi vrty vedou téměř paralelně. Směr sklonu je na spojnici mezi vrty SSZ, k vrtu Mel-1 a úhel sklonu je 13°. Sklon puklin na spojnici vrtů odpovídá přibližně průměrnému sklonu svahu v okolí vrtů, který je 11°. Piezometrické poměry těchto puklin se liší přibližně o 3,5 m.

4 Diskuse výsledků

Tato kapitola je shrnutím a zhodnocením výsledků terénních výzkumů na lokalitě Potůčky-Podlesí a na melechovském masivu s cílem navrhnout vhodnou metodiku terénního hydrogeologického výzkumu kompaktních, rozpukaných hornin v hlubokých malopřůměrových vrtech.

Proudění podzemních vod v puklinovém prostředí

Výsledky hydrodynamických a geofyzikálních měření na obou zkoumaných lokalitách dobře dokumentují heterogenitu puklinového prostředí a z ní vyplývající nespojitost piezometrických úrovní. Významné změny piezometrických úrovní na krátké vzdálenosti jsou dány vlastnostmi zastižených puklinových systémů s různou hydraulickou vodivostí a různou mírou propojení s hlavními preferenčními cestami. Tlakové poměry mezi hlavními puklinovými systémy se nevyrovnávaly díky tlakovým ztrátám při proudění mezilehlou, méně propustnou sítí drobnějších puklin. Piezometrickou úroveň ovlivňuje kromě morfologické pozice zkoumaného bloku horniny zejména přítomnost významných hydraulicky vodivých zón. Tlakové poměry těchto zón závisí na výškové pozici míst infiltrace a drenáže, která mohou být od zkoumané lokality vzdálena několik kilometrů.

Piezometrické poměry a jimi dané proudění podzemních vod v Podleském granitovém pni a v melechovském masivu mají odlišný charakter. Na lokalitě Potůčky-Podlesí piezometrická úroveň s hloubkou klesá, což je typické pro infiltrační oblast. Tento pokles není plynulý jako v průlinovém prostředí, ale mění se ve „skocích“ v závislosti na hydraulické vodivosti horninového prostředí v hloubce. Pomineme-li zvětralinový plášť, největší rozdíl v piezometrických úrovních a smyslu proudění podzemních vod byl zaznamenán mezi přípovrchovou zónou rozvolnění puklin, která zde sahá do hloubky přibližně 110 m a hlubší zónou zpomaleného oběhu podzemních vod. V přípovrchové zóně piezometrická úroveň s hloubkou jen velmi slabě klesá, zcela zde převažuje subhorizontální složka proudění, která s nejvyšší pravděpodobností sleduje sklon terénu. Přestože se zde vyskytují výrazné propustné puklinové systémy, jejich piezometrické úrovně nevykazují žádné výrazné rozdíly. Při krátkodobém měření metodou rezistivimetrie za přirozeného stavu nebylo zaznamenáno vertikální proudění v žádném z vrtů na lokalitě. V hlubších částech masivu v hloubce 110 m a vyšší, převažuje subvertikální složka proudění směrem k místní erozní bázi. Toto proudění je velmi pomalé, jeho objemová rychlost ve volném vrtu se pohybuje v desetinách až prvních jednotkách litrů za den.

V rámci melechovského masivu je proudění podzemních vod zásadní měrou ovlivněno existencí významných puklinových systémů, jejichž piezometrické úrovně se liší až o desítky metrů na krátké vzdálenosti. Znatelné rozdíly se projeví i v melechovském granitu, pro který je typická vysoká míra propojení puklin. Morfologická pozice v místním či regionálním proudovém systému zde má často až druhořadou roli. Vrtý Mel-1 a Mel-2 na lokalitě Kostelní les leží stejně jako vrtý na lokalitě Potůčky-Podlesí v infiltrační oblasti. Směr proudění podzemní vody v otevřeném vrtu je zde ale opačný, podzemní voda ve vrtech Mel-1 a Mel-2 proudí od zdola nahoru.

Rozdílný charakter proudění podzemních vod je způsoben:

1. *Hydraulickou vodivostí zastižených granitů.* Na lokalitě Potůčky-Podlesí existuje výrazná hranice mezi zónou připovrchového rozvolnění puklin a zónou zpomaleného oběhu podzemních vod v hloubce přibližně 110 m. Koeficient filtrace ($m \cdot s^{-1}$) na této hranici klesá o dva řády. Na melechovském masivu je hydraulická vodivost obecně vyšší, mění se po blocích hornin, rozdíly mezi nimi nejsou tak výrazné, jako na lokalitě Potůčky-Podlesí.
2. *Vlastnostmi puklinových systémů.* Z charakteru odezev na interferenční VTZ vyplývá, že hlavní propustné pukliny zastižené vrtý PTP-3, 4a a 5 mají malou storativitu, a proto u nich předpokládám malý prostorový dosah – maximálně desítky metrů. Ve vrtech melechovského masivu byly prokázány významné propustné polohy regionálního charakteru (jednotky km) s vysokou storativitou a specifickými piezometrickými poměry. Výskyt vodivých puklin zde není vázán pouze na připovrchovou zónu.

Dobrá znalost piezometrických poměrů je nutná nejen pro sestavení koncepčního modelu proudění podzemních vod na zkoumané lokalitě a následné matematické modelování proudění, ale i pro volbu vhodných parametrů terénních testů a vyhodnocení měření. Jedná se například o volbu vhodného snížení hladiny podzemní vody ve vrtu při aplikaci karotážní metody rezistivimetrie při čerpání, nebo vhodného vstupního tlaku při stopovacích zkouškách.

Pro určení piezometrických poměrů puklinového prostředí se nejvíce osvědčila kombinace karotážní metody rezistivimetrie za přirozeného stavu s následným monitoringem izolovaných puklinových systémů pomocí multipakového systému.

Hydraulická vodivost granitových masivů

Výsledky hydrodynamického testování granitovým masivům potvrdily vysokou míru nehomogenity puklinového prostředí. Zjištěné koeficienty filtrace k ($m \cdot s^{-1}$) se pohybovaly v rozsahu sedmi řádů od 10^{-12} do $10^{-5} m \cdot s^{-1}$. Hydraulická vodivost granitů s hloubkou obecně klesá. Tento pokles není lineární, ale mění se skokem. Hydraulické vlastnosti bývají poměrně stabilní pro blok hornin určitého hloubkového rozsahu. Zcela mimo tento trend stojí hydraulická vodivost významných otevřených puklin a puklinových zón, která může být o 2-4 řády vyšší, než je hydraulická vodivost okolních hornin.

Poznatky o hydraulických vlastnostech puklinového prostředí granitových masivů na území České republiky plynoucí z tohoto výzkumu jsou shrnuty v tabulce 4.1.

Tabulka 4.1: Koeficienty filtrace v závislosti na míře porušení horninového prostředí.

Koeficient filtrace k ($m.s^{-1}$)	Horninové prostředí
10^{-11} - 10^{-10}	neporušený granit, granit s uzavřenými puklinami nebo puklinami vyplněnými sekundárními minerály
10^{-9} - 10^{-8}	připovrchová zóna rozvolnění puklin, poruchová pásma částečně zatěsněná minerálními výplněmi
10^{-7}	vodivé poruchy a pukliny menšího rozsahu, připovrchová zóna rozvolnění puklin s vysokou mírou propojení puklinových systémů
10^{-6}	regionálně významná otevřená poruchová pásma, významné otevřené pukliny
10^{-5}	otevřené pukliny v poruchových pásmech

Hlavním otevřeným puklinám, které jsou součástí širší poruchy, je možné přiřadit o řád až dva vyšší k , než odpovídá poruše jako celku.

Hydraulická vodivost obecně nezávisí na četnosti puklin zkoumaného úseku, ale výhradně na přítomnosti otevřených puklin a jejich fyzikálních a prostorových vlastnostech. Vodivost zejména ovlivňuje rozvětvení puklin, míra jejich sekundární výplně a propojení s okolním puklinovým systémem. Korelace počtu puklin zastižených na vrtném jádře s hydraulickou vodivostí testované etáže často ukazují inverzní trend. Tedy čím je vyšší počet zastižených puklin, tím je menší pravděpodobnost výskytu otevřené vodivé pukliny. Tento trend jsem zaznamenala například u vrtu PTP-5 na lokalitě Potůčky-Podlesí. Na proudění podzemních vod zde má zásadní význam zóna připovrchového rozvolnění puklin. V této zóně je velmi nízká četnost puklin v rozmezí 8-22 puklin na 10 m (Havíř 2006) a současně se zde vyskytují významné propustné pukliny, které v hlubších částech masivu s vysokou četností puklin zcela chybí.

Dalším příkladem inverzní závislosti mezi četností puklin a hydraulickou vodivostí je lokalita Kostelní les na melechovském masivu. Četnost puklin ve svrchním úseku vrtů Mel-1 a Mel-2 do hloubky 120 m je nízká, výrazně nižší než u vrtů Mel-3 až 5 v lipnickém granitu melechovského masivu (Lexa, Schulmann 2006) a nižší než u vrtů na lokalitě Potůčky-Podlesí. Přesto byla ve vrtech zjištěna vysoká hydraulická vodivost, srovnatelná s vrtem Mel-3, který byl ovšem umístěn do významné poruchové zóny. Průměrný koeficient filtrace pro celý vrt Mel-1 je $3,25 \cdot 10^{-7} m.s^{-1}$ a pro vrt Mel-2 $1,44 \cdot 10^{-6} m.s^{-1}$. Ve svrchních částech vrtů se k pohybuje v řádu 10^{-7} až 10^{-6} , výjimečně $10^{-8} m.s^{-1}$. Úseky s hydraulickou vodivostí v řádu 10^{-11} až $10^{-10} m.s^{-1}$ typickou pro neporušený granit, například na lokalitě Potůčky-Podlesí nebo pro vrty Mel-4 a Mel-5 v lipnickém granitu, se zde až na jednu výjimku vůbec nevyskytují.

Hydrodynamické testy ve vrtu Mel-3 ukázaly, že přítomností velké propustné poruchy jsou významně ovlivněny hydraulické vlastnosti puklinové sítě v jejím okolí. Pohybem po zlomových plochách se zřejmě rozvolnily a otevřely pukliny v jejím okolí a zvýšila se jejich hydraulická vodivost. Současně se zvýšilo propojení puklin v puklinovém systému. Nejvíce se toto ovlivnění projevilo ve vzdálenosti do 40 m od vlastní poruchy. Toto je velmi zásadní poznatek pro pochopení a následné modelování proudění podzemních vod v puklinovém prostředí.

Ve zkoumaných granitových masivech jsme zjistili dva „typy“ puklinové propustnosti:

První z nich se vyskytuje na lokalitě Potůčky-Podlesí (granit pně Podlesí, granit typu Luhy) a v rámci melechovského masivu na lokalitě Lipnice a Zadní les (lipnický granit). Pro tento typ puklinové propustnosti je charakteristická vysoká míra nehomogenity hydraulických vlastností, velké rozdíly v koeficientech filtrace mezi vodivými puklinami a okolním horninovým prostředím. Propustné pukliny či puklinové systémy se vyskytují jen v omezené

míře, míra jejich propojení je nízká. Storativita jednotlivých proustrných puklin je nízká, ale vyskytují se zde také vodivé poruchy regionálního rozsahu s vysokou storativitou.

Druhý typ puklinové propustnosti se vyskytuje na lokalitě Kostelní les na melechovském masivu (melechovský granit). Melechovský granit se vyznačuje relativně hustou sítí otevřených, dobře propojených puklin a celkově vyšší hydraulickou vodivostí. Rozdíly v koeficientech filtrace mezi významnou propustnou puklinou a okolní horninou jsou do jednoho, maximálně do dvou řádů. Storativita puklinových systémů je ve srovnání s předchozím typem vysoká.

Odlišný charakter propustnosti může být způsoben tektonickou a morfologickou pozicí lokality, zrnitostí granitu nebo rozdílnou výplní puklin. Důvody a zákonitosti výskytu těchto tak rozdílných puklinových prostředí a možnosti jejich predikce nejsou doposud zcela zřejmé a měly by být předmětem výzkumu v dalších letech.

Z metodického hlediska je pro další výzkumy spojené zejména s vyhledáváním vhodné lokality pro hlubinné úložiště radioaktivního odpadu důležitý poznatek, že lze jen velmi obtížně predikovat stupeň porušení masivu a zejména výskyt vodivých poruch na základě povrchového výzkumu. Vrtý na lokalitě Potůčky-Podlesí byly situovány do míst, kde povrchový geologický a geofyzikální výzkum předpokládal významnou tektonickou zónu (Pačes a kol. 2002). Pro vrtý PTP-3, 4a, a 5 je ale charakteristický kompaktní granit s velmi nízkou hydraulickou vodivostí.

Vrtý Mel-1 a Mel-2 byly umístěny podle výsledků povrchové geofyziky do oblastí s vysokými hodnotami zdánlivých měrných odporů a s vysokými rychlostmi seismických vln, které indikovaly homogenní neporušený horninový blok (Karous 2006). V bezprostředním okolí vrtů nebyla geofyzikálními ani jinými povrchovými geologickými pracemi indikována žádná významná tektonická linie. Tato lokalita ale vykazuje nejvyšší hydraulickou vodivost z doposud zkoumaných vrtů, vyskytují se zde výrazné propustné puklinové systémy a vrtý komunikují na vzdálenost 21 m v několika hloubkových úrovních.

Jedním z možných vysvětlení je, že ve svrchní části melechovského granitu (do hloubky 150 m) se ve srovnání s ostatními doposud zkoumanými granity Českého masivu ve zvýšené míře vyskytují otevřené pukliny bez, nebo s minimem minerální výplně, které tvoří relativně dobře propojenou síť s velkou storativitou. Na hydraulickou vodivost puklinové sítě melechovského granitu má vliv jeho velká zrnitost. Velká zrna zamezují svírání puklin. Otevřenost puklinového systému může být způsobena extenzním napětovým polem v okolí lokality Kostelní les. Na velkou storativitu a propojení puklinové sítě ukazuje i dynamika VTZ. U převážné většiny etáží spotřeba velmi pomalu, téměř lineárně klesala, což je typické právě pro systémy s velkou storativitou. Současně jsem poměrně často zaznamenala případy obtékání pakrů puklinovou sítí, které je známkou dobrého vzájemného propojení puklin.

V budoucích výzkumných projektech by proto bylo vhodné omezit rozsah povrchových prací na nezbytné podrobné geologické a hydrogeologické mapování a povrchovou geofyziku zájmových oblastí a o to větší pozornost věnovat výzkumu v hlubokých vrtech. Naše dosavadní znalosti se zatím omezují na hloubku 200-300 m.

VTZ – zdroj dat pro matematické modely

Cílem studia dynamiky VTZ bylo zhodnotit možnosti využití analytických vzorců pro ustálené proudění pro vyhodnocení etážových VTZ, tedy najít jednoduchý způsob vyhodnocení dat, který by byl obecně využitelný pro desítky až stovky standardních VTZ a který by splňoval s dostatečnou přesností požadavky matematických modelů na vstupní data, a kalibrační parametry. Využití inverzní varianty vzorců pro neustálené proudění odvozených pro čerpací zkoušky je velmi problematické, protože délka trvání VTZ ve většině

případů neumožňuje kvalitní vyhodnocení křivek spotřeb. Analytické vzorce pro neustálené proudění bude pravděpodobně možné po úpravě využít pro vyhodnocení dlouhodobých VTZ na významných puklinách. Aplikace stávajících vzorců (Jacob, Lohman 1952) nepřinesla doposud, zejména při stanovení hodnot storativity, uspokojivé výsledky. To je s největší pravděpodobností kromě heterogenity puklinového prostředí způsobeno významným vlivem objemu vrtu nad a pod testovanou etáží a vlivem objemu etáží sousedních vrtů na dynamiku VTZ. Tyto vlivy lze do analytického vzorce velmi obtížně zahrnout.

Pro praktické řešení problému výpočtu koeficientu filtrace na základě výsledků vodních tlakových zkoušek se jeví jako nejvhodnější dva způsoby řešení:

1. Využití standardních vzorců pro ustálené proudění pro objemové prvky matematických modelů

Koeficient filtrace vypočtený hydrogeologem pomocí analytických vzorců je využíván v převážné míře k zadání materiálových vlastností ekvivalentního průlinového prostředí homogenních bloků kombinovaných modelů. Bodové údaje z výzkumných vrtů jsou v regionálním modelu interpolovány na modelové vrstvy o rozsahu několika km². Pro modelovanou vrstvu (blok hornin) reprezentovanou ekvivalentním porézním prostředím je proto zcela postačující zadávat koeficienty filtrace s přesností poloviny řádu nebo jednoho řádu. Zadávání přesných hodnot změřených na jediném bodu rozsáhlého bloku nemá význam.

Rozdíly v koeficientech filtrace vypočtených z počátečních fází VTZ a ze závěrečných fází při kvazi ustáleném stavu jsou do jednoho řádu a v naprosté většině do poloviny řádu. Odchytky se tedy pohybují v mezích zjednodušení, které aplikujeme při tvorbě modelu. Pokud je to možné, zadáváme do matematického modelu hydraulickou vodivost vypočítanou ze závěrečné fáze VTZ, tedy z velikosti spotřeb, která se nejvíce blíží ustálenému stavu. Pro sestavení profilu hydraulické vodivosti masivu je naopak nutné přizpůsobit rozsah hodnocených dat VTZ s nejkratší délkou trvání, tak aby výsledné koeficienty filtrace byly srovnatelné.

Uvedený přístup není ale možné bez výhrad aplikovat pro hlavní propustné pukliny a puklinové zóny, které mají v matematických modelech proudění podzemních vod a v navazujících transportních modelech zásadní význam.

2. Využití puklinových a kombinovaných matematických modelů v podrobném měřítku

Detailní puklinové a kombinované modely mohou velmi věrně simulovat průběh hydrodynamické zkoušky na puklinové síti v okolí testované etáže hydrogeologického vrtu. V průběhu kalibrace těchto modelů je tenzor hydraulické vodivosti puklin nastavován tak, aby bylo dosaženo co nejlepší shody mezi průběhy veličin sledovaných při VTZ (spotřeby, průběhy vstupních tlaků, tlakové reakce v okolních vrtech) a průběhy těch samých veličin vypočtených numerickým modelem. Model je kalibrován pomocí primárních dat z terénních měření a odvozená data (koeficienty filtrace) jsou výsledkem kalibrace.

Nevýhodou tohoto způsobu řešení je velká pracnost. Pro každou VTZ je nutné vygenerovat puklinovou síť, sestavit numerický model a provést kalibraci modelu. Proto je možné využít podrobné ryze puklinové a kombinované modely k identifikaci hydraulických parametrů pouze u významných vodivých poloh.

Uvedený způsob stanovení hydraulických parametrů je v současné době na počátku vývoje (viz kapitola 6). Současně s vývojem kombinovaných modelů neustáleného proudění bude v příštích letech třeba zaměřit pozornost na výběr vhodných metod analytického

vyhodnocení VTZ v puklinovém prostředí, které budou sloužit jako kontrolní nástroj při kalibracích modelů.

Rozsah a propojení puklinových systémů v granitových masivech

Významné informace o propojení puklinových systémů na různé vzdálenosti přinesly hydrodynamické, interferenční a stopovací zkoušky. Na třech výzkumných lokalitách Potůčky-Podlesí, Kostelní les a Zadní les bylo zjištěno prostorové rozložení řady komunikujících puklin a puklinových systémů. Ukazuje se, že ve svrchních 200 m masivu hrají nejvýznamnější roli subhorizontální pukliny. S hloubkou pod terénem rostl při komunikaci mezi vrty význam šikmých puklin. Šikmé pukliny procházely monitorovanými vrty buď přímo, jako to bylo mezi vrty Mel-1 a Mel-2 v hloubkách pod 120 m, nebo propojovaly subhorizontální pukliny s vyšší hydraulickou vodivostí, například na lokalitě Potůčky-Podlesí v hloubkách pod 80 m. Předpokládám, že v hloubkách přibližně 100 m se subhorizontální pukliny začínají uzavírat tíhou nadložních hornin, jejich dominantní roli v proudění podzemních vod přebírají pukliny šikmé a ve větších hloubkách podzemní voda proudí převážně po strmých puklinách.

Komunikaci se podařilo prokázat na vzdálenost deset metrů v kompaktním podleském granitu do hloubky 110 m, na vzdálenost 21 m v melechovském granitu s vysokou hydraulickou vodivostí a vysokou mírou propojení puklinové sítě na lokalitě Kostelní les a na vzdálenost 123 m v lipnickém granitu, kde byla prokázána komunikace mezi poruchovou zónou zastíženou vrtem Mel-3 a propustnou puklinou menšího rozsahu, která procházela vrtem Mel-4.

Tlakové ztráty zaznamenané při šíření tlakových vzruchů mezi vrty se pohybovaly od 25 % po téměř 99% původního tlakového impulsu. Nejmenší ztráty vykazovaly pukliny s vysokou hydraulickou vodivostí, která umožňuje rychlé proudění podzemních vod, a velmi malým objemem, tedy velmi malou storativitou. U méně propustných, menších puklin jsou tlakové ztráty tak výrazné, že pokud pukliny komunikují, je tlaková odezva pod citlivostí tlakových čidel v monitorovaných etážích.

Také šíření tlakového impulsu je v prostředí s velmi nízkou hydraulickou vodivostí tak pomalé, že na jeho záznam nepostačuje ani délka speciálních VTZ, která byla většinou do 6 hodin. Například odezva na dlouhodobou VTZ na etáži 150-190 m vrtu PTP-4a se v sousedním, 10 m vzdáleném vrtu, PTP-3 projevila až těsně po ukončení VTZ tedy po 12 hodinách od zvýšení tlaku ve vrtu PTP4a (Rukavičková a kol. 2002).

Výsledkem stopovacích zkoušek je nejen přesná identifikace puklin propojujících zkoumané vrty, ale také důležitá informace o rychlosti šíření roztoku puklinovou sítí. Rychlost postupu stopovací látky mezi vrty, přepočtená na jednotkový gradient, se pohybovala od $7 \cdot 10^{-5}$ po $7 \cdot 10^{-4}$ m.s⁻¹. Z časových a finančních důvodů byly stopovacími zkouškami testovány pouze významné pukliny s vysokou hydraulickou vodivostí a s výraznou tlakovou komunikací zjištěnou předchozími interferenčními zkouškami. Stopovací látka byla zatlačována z testované etáže do volného vrtu, uvedené rychlosti tedy platí pro úseky vysoce vodivých puklin bez prostorového omezení navazující puklinové sítě.

Pro studium komunikace po puklinových systémech byl ve všech výzkumných projektech naprosto nepostradatelným nástrojem multipakový systém, který umožňoval monitorovat tlakové odezvy v různých hloubkových úrovních již v průběhu vrtných prací. Na vytipovaných komunikujících puklinách se pak při stopovacích zkouškách velmi osvědčila kombinace VTZ s karotážní metodou rezistivimetrie.

5 Návrh vhodné metodiky VTZ a souvisejících prací

Terénní hydrogeologický výzkum hydraulických vlastností puklinového prostředí v hlubokých malopřůměrových vrtech je náročný na technické vybavení, přesnost měření, čas, finanční prostředky a kvalifikaci a zkušenosti technických pracovníků. Jedním z hlavních cílů této práce je shrnout sedmileté zkušenosti s realizací výzkumných prací do návrhu vhodné metodiky výzkumných prací a přispět tím k zefektivnění budoucích výzkumů zejména v rámci programů hlubinného úložiště radioaktivních odpadů (HÚ VAO).

Při návrhu metodiky jsem se zaměřila na vodní tlakové zkoušky. Současně je do metodiky zahrnuta i karotáž, která tvoří neoddelitelnou část hydrogeologického výzkumu ve vrtech.

Vrtné práce

Hydrogeologické výzkumné vrty v puklinovém prostředí je třeba vrtat jádrově s co nejlepším výnosem jádra, optimální technologie je wire-line. Standardní průměr vrtu je 76 mm.

Puklinové prostředí s nízkou hydraulickou vodivostí je extrémně citlivé na zanášení puklinové sítě vrtným kalem během hloubení vrtu. Výplachová kapalina musí být proto pouze čistá voda bez jakýchkoliv příměsí a stabilizátorů. Systém výplachu musí být otevřený, tedy výplachová voda je ve vrtu kontinuálně nahrazována novou čistou vodou.

Vodní tlakové zkoušky během vrtných prací

V průběhu vrtných prací může být testován s pomocí jednoho pakru nově vyvrtaný úsek vrtu mezi pakrem a dočasným dnem vrtu. Důvodem provedení VTZ už v průběhu vrtání je snaha uskutečnit zkoušky v co nejméně narušeném horninovém prostředí, na právě vyvrtaném úseku vrtu. Tento typ VTZ ale často neúměrně prodlužuje délku trvání vrtných prací a zvyšuje finanční náklady. Proto doporučuji omezit v průběhu vrtání hydrodynamické zkoušky pouze na polohy s významnou ztrátou výplachu, významným přítokem podzemní vody do vrtu a zejména pak na nestabilní polohy, u kterých hrozí zavalení vrtu. Kontrolu zanášení puklin postupem vrtných prací může efektivněji zajistit karotáž (viz dále).

Karotáž

Z karotážních metod je pro hydrogeologický výzkum nejvýznamnější metoda rezistivimetrie, která indikuje místa přítoků podzemní vody do vrtu. Pro kvalitní usazení pakrů je nutný záznam kavernometrie. Ze záznamu dalších karotážních metod (např. gama karotáž, neutron-neutron karotáž, gama-gama karotáž, termometrie, elektro karotáž) získáváme informace o míře porušení hornin v okolí vrtu a v případě nestabilního stvolu vrtu lze zjistit velikosti kaveren i při měření ve vrtných tyčích. Karotážní měření při hydrogeologickém výzkumu je optimální rozvrhnout do tří etap:

1. **Karotáž v průběhu vrtných prací** slouží ke kontrole stavu a směru vrtu a zejména ke kontrole ovlivnění puklinového systému procesem vrtání. U hlubokých vrtů je vhodné karotovat po každých odvrtných 100 metrech.
2. **Komplexní karotáž po ukončení vrtných prací** je nepostradatelným podkladem pro následující etapu hydrodynamických testů. U metody rezistivimetrie se plně osvědčily dvě varianty měření a to rezistivimetrie (RM) za přirozeného stavu, která poskytuje velmi důležité první poznatky o piezometrických poměrech na lokalitě a je nezbytným podkladem pro umístění pakrů multipakového systému, a rezistivimetrie při čerpání,

s jejíž pomocí lze indikovat přítoky podzemní vody do vrtu (propustné pukliny) a na ně posléze orientovat hydrogeologický výzkum.

- Doplňková karotáž po ukončení hydrodynamických testů.** Během hydrodynamického testování ve vrtech mohou být zjištěny skutečnosti, které jsou ve zdánlivém rozporu s výsledky komplexní karotáže. Například v úseku bez karotáží indikovaných přítoků podzemní vody do vrtu je změřena vysoká hydraulická vodivost. Metodou rezistivimetrie můžeme zdánlivý rozpor ověřit. Optimální snížení hladiny vody ve vrtu při rezistivimetrii se řídí nově získanými informacemi o piezometrických poměrech na lokalitě. Tyto poměry zjistíme z monitoringu tlaků v etážích multipakrového systému. Mezi doplňkovou karotáž řadíme i využití metody rezistivimetrie při stopovacích zkouškách.

Vodní tlakové zkoušky po ukončení vrtných prací

Hlavní stádium hydraulického testování puklinového prostředí nastává po ukončení vrtných prací. Všechny testy musí být uskutečněny etážově, na izolovaných úsecích vrtů pomocí pakrů. V průběhu hydrogeologického výzkumu melechovského masivu se velmi osvědčila kombinace VTZ jako výchozí typ a čerpací zkoušky jako doplňkový typ testů. Čerpací zkoušky jsou prováděny v etážích, kde jsou významné pukliny nebo puklinové systémy. Tyto zkoušky slouží k odběrům vzorků podzemní vody a současně i ke kontrole výsledků VTZ.

Typ VTZ

Pro hydrogeologický výzkum puklinového prostředí doporučuji jednostupňovou variantu VTZ s dostatečnou délkou trvání zkoušky (viz dále). Vícetupňové VTZ je možné využít v samém začátku testovacích prací jako pomocný nástroj pro volbu vhodného vstupního tlaku pro další výzkum.

Vstupní tlak

Volba vstupního tlaku na ústí vrtu závisí na podmínkách zkoumané lokality a na možnostech technického vybavení. Zvolený vstupní tlak nesmí vyvolávat deformace puklin a zejména puklinových výplní. U standardních typů testů, které by měly pokrýt celý zkoumaný profil vrtu je nezbytné použít jediný, vždy stejný tlakový stupeň tak, aby v úsecích s velmi nízkou hydraulickou vodivostí bylo dosaženo měřitelných spotřeb a v úsecích s vysokou spotřebou byla technicky možná dodávka vtláčené kapaliny. Vhodný rozsah vstupního tlaku je 100-300 kPa.

Délka trvání VTZ a délka etáže.

Oba parametry uvádím současně, protože jsou na sobě úzce závislé. Obecně existují tři časové hranice, na kterých se spotřeby při VTZ ustalují. První je mezi 10-20 minutami od začátku vtláčení, druhá mezi 40-50 minutami a třetí mezi druhou a třetí hodinou od začátku zkoušky. Optimální délka trvání u standardních VTZ jedna hodina. V prostředí s velmi nízkou hydraulickou vodivostí, kde jsou měřené spotřeby v řádu 10^{-3} l/min/m a menší, lze v případě nutnosti délku zkoušky redukovat na 10-20 minut. Naopak u významných vodivých poloh je vhodné VTZ prodloužit na 2-3 hodiny, nebo se na ně znovu zaměřit při následné etapě výzkumu (viz etapovitost prací).

Délku etáže volíme s ohledem na charakter rozpukání horninového prostředí, technické a finanční možnosti výzkumného projektu. Pro první etapu výzkumu je vhodné zvolit stabilní interval rozestupu pakrů pro všechny testované vrty na lokalitě. Délka etáží by měla být v rámci daných možností co nejmenší pro standardní VTZ by neměla překračovat 10 m. Kratší etáže lépe vystihnou vývoj propustnosti s hloubkou a proudové poměry se ustalují rychleji. Pokud by ovšem z finančních důvodů krátká délka etáží měla být na úkor délky

trvání zkoušky, doporučuji dodržet doporučené délky trvání a krátké etáže aplikovat v druhé etapě testování na zjištěné významné polohy.

Etapovitost prací

Hydrogeologický výzkum ve vrtech by měl být rozdělen minimálně do tří etap:

- 1. Přípravná etapa** zahrnuje výzkumné práce v průběhu, nebo těsně po dokončení vrtných prací. Jejich cílem je poskytnout podklady nezbytné pro rozvržení následujícího hydrodynamického testování a pro volbu vhodných parametrů standardních VTZ. Spadají do ní zkrácená karotáž v průběhu vrtných prací, komplexní karotáž, VTZ s jedním pakrem prováděné na problematických polohách v průběhu vrtných prací a monitoring reakcí na vrtné práce pomocí multipakrového systému.
- 2. Základní etapa** V základní etapě jsou zkoumané vrty pokryty v celé délce standardními VTZ se stabilním intervalem pakrů a jednotným vstupním tlakem. V této etapě je velmi důležité dodržovat jednotnou metodiku u všech VTZ tak, aby výsledky pro jednotlivé testované úseky i vrty byly srovnatelné. Stabilní interval pakrů umožňuje rychlejší a efektivnější postup testování. VTZ jsou realizovány vzestupně, ode dna vrtu směrem vzhůru. V závěru základní etapy jsou standardní VTZ vyhodnoceny a jsou vybrány významné pukliny, puklinové systémy a zajímavé polohy pro následnou detailní etapu hydrogeologického výzkumu.
- 3. Detailní etapa** zahrnuje speciální VTZ a čerpací zkoušky na vybraných významných polohách, stopovací zkoušky a doplňkovou karotáž. Metodika VTZ se zcela podřizuje účelu výzkumu. Délky trvání VTZ volíme v rozsahu několika hodin (minimálně 3 hodiny), délky etáží odrážejí zkoumaný puklinový systém a pohybují se od desítek centimetrů po desítky metrů. V této fázi je možné volit různé vstupní tlaky, například pro potvrzení komunikace mezi vzdálenými vrty.

Využití dat a jejich vyhodnocení

Primární data získaná hydrogeologickým výzkumem puklinového prostředí t.j. záznamy spotřeb a tlaků v průběhu VTZ, čerpané množství, hloubky hladiny podzemní vody, prostorová identifikace vodivých puklin, záznamy tlakových komunikací mezi vrty a rychlosti prostupu stopovacího roztoku po vybraných puklinách tvoří nezbytné podklady pro tvorbu, kalibraci a verifikaci puklinových a kombinovaných modelů proudění podzemních vod. Data odvozená, t.j. interpretace testů a koeficienty filtrace vypočítané podle analytických vzorců, slouží jako vstupy do modelů regionálního charakteru. Pro regionální modely jsme často nuceni extrapolovat bodové údaje na velká území a horninové objemy. Pro tento účel je přesnost výpočtu koeficientu filtrace podle analytických vzorců v rámci jednoho řádu pro ustálené proudění dostačující.

Podrobně byla problematika vyhodnocení VTZ rozebrána v kapitole 4.

6 Příklady matematických modelů

Současně s terénním hydrogeologickým výzkumem probíhal na Technické univerzitě v Liberci vývoj matematických modelů, jejichž úkolem bylo simulování procesů, které probíhají v puklinovém prostředí granitů. Cílem tohoto vývoje, který pokračuje i v současnosti, je příprava simulačních nástrojů, které budou schopny využít efektivně většinu dat získaných v průběhu terénního geologického výzkumu.

V první etapě výzkumných prací na lokalitě Potůčky-Podlesí byl pro simulace proudění vodních tlakových zkoušek využíván ryze puklinový model *FFLOW* (Severýn 2002). Systém se skládá z generátoru sítí, modelu proudění, transportu a grafického

postprocesoru. Do modelu vystupují jednotlivé pukliny, simulované jako 2D polygony umístěné do 3D prostoru zkoumané oblasti. V průběhu výzkumu se ukázalo, že vyvíjený puklinový model dokáže velmi dobře vystihnout charakter puklinové sítě, jeho rozsah je však omezen na několik prvních desítek metrů. Diskretizace většího prostoru, který zahrnuje desítky až stovky tisíc puklin je velmi obtížná a vede na řadu problémů s popisem geometrie sítě včetně problémů s její regularitou. Proto bylo pro modely většího rozsahu nezbytné nahradit puklinovou síť hydraulicky méně významných drobných puklin ekvivalentním průlinovým prostředím a do oblasti deterministicky zařadit pouze hydraulicky významné pukliny (2D objekty) a průsečnice těchto puklin (1D objekty). Výsledkem dalšího vývoje byl kombinovaný model *Flow123D* (Maryška, Královcová a kol. 2006, Severýn a kol. 2006). Tento model byl aplikován na simulace VTZ na melechovském masivu.

Puklinový model – lokalita Potůčky-Podlesí

Pro simulace pomocí puklinového modelu na lokalitě Potůčky-Podlesí byly vybrány tři standardní interferenční VTZ na významných puklinách v hloubce 49,8, 78,7 a 81 m. S ohledem na intervaly pakrů multipakrového systému v sousedních vrtech PTP-3 a PTP-4a byly pro simulace VTZ stanoveny dvě oblasti a to v hloubce 40–65 a 65–95 metrů pod povrchem, v obou případech jsou rozměry modelované oblasti 30 × 30 metrů v rovině kolmé na osy vrtů.

Puklinové sítě byly generovány ve dvou krocích (Severýn a kol. 2006). Při generování první sady puklinových sítí byly použity informace o četnosti a geometrických charakteristikách puklin získané v průběhu strukturně geologického výzkumu lokality (Havíř 2006). Druhá sada sítí byla upravena podle výsledků hydrogeologického výzkumu. Obsahovala poloviční četnost puklin s dvojnásobnou charakteristickou délkou, deterministicky zadané význačné pukliny a propojení puklin stvolů vrtů přidáním liniových elementů.

V tabulce 6.1 jsou uvedeny hodnoty sledovaných veličin zjištěné při terénním měření a současně hodnoty těchto veličin získané výpočtem v konečné fázi kalibrace.

Tabulka 6.1: Srovnání hodnot veličin naměřených při hydrodynamických zkouškách na vrtech a výsledků numerické simulace.

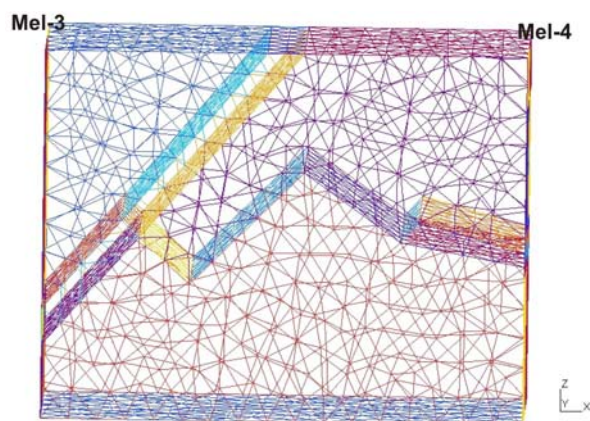
	Veličina	VTZ35 79,38 - 85,46	VTZ36 73,31 - 79,39	VTZ40 49,03 - 55,11
naměřené hodnoty	Zkušební tlak v testované etáži ve vrtu PTP-5 (kPa)	420	420	420
	Celkový tok (l.min ⁻¹) (hodnota v konečné fázi testování)	2,8	0,9	1,5
	Přírůstek tlaku v odpovídající etáži ve vrtu PTP-3 (kPa)	383	127	28
	Přírůstek tlaku v odpovídající etáži na vrtu PTP-4a (kPa)	156	73	27,7
výsledky simulace	Zkušební tlak v testované etáži ve vrtu PTP-5 (kPa)	420	420	420
	Celkový tok (l.min ⁻¹)	2,2	0,7	1,2
	Přírůstek tlaku v odpovídající etáži ve vrtu PTP-3 (kPa)	296	161	28
	Přírůstek tlaku v odpovídající etáži ve vrtu PTP-4a (kPa)	280	67	26

Velmi dobré shody bylo dosaženo při simulaci VTZ40. Odchylka naměřených a vypočtených tlaků v PTP-3 a PTP-4a byla do 10%, což je velmi dobrý výsledek. U ostatních

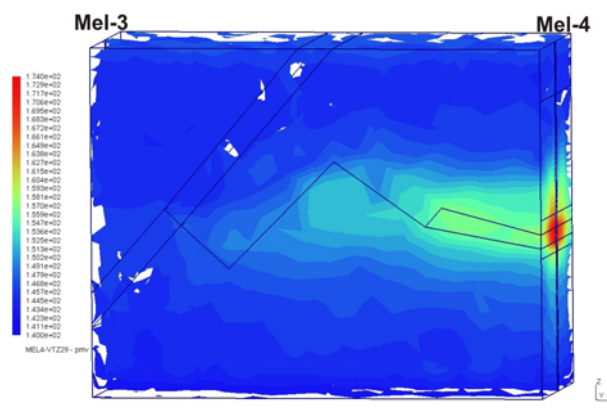
VTZ byly odchylky měřených a simulovaných hodnot vyšší. U VTZ35 nebylo na generované síti dosaženo tlakových poměrů v souladu s experimentem. Důvodem těchto rozdílů je pravděpodobně extrémně heterogenní charakter puklinové sítě v hloubkách, které pokryly VTZ35 a VTZ36 s významnými puklinami v hloubkách 78,7 a 81 m (vrt PTP-5). Ani druhá sada generovaných sítí zřejmě zcela nepostihla tuto heterogenitu a pro další simulace by bylo třeba vytvořit síť novou, kde by byl ještě více potlačen vliv méně významných puklin na proudění podzemních vod. VTZ40 zastihla vyšší část masivu s vyšší mírou otevření a propojení menších puklin, zde se tedy vygenerovaná síť pravděpodobně velmi blížila realitě.

Kombinovaný model – melechovský masiv

Z VTZ prováděných na melechovském masivu jsem pro simulaci vybrala VTZ na propustných puklinách v hloubce 103 a 107 m. (VTZ29) ve vrtu Mel-4. Při této zkoušce byl zaznamenán tlakový nárůst v sousedním monitorovaném vrtu Mel-3. Vzdálenost vrtů je 123 m. Na základě výsledků hydrodynamických testů, karotážních měření a povrchové geofyziky byl sestaven koncepční model proudění po puklinových systémech mezi vrtu Mel-4 a Mel-3. Tento koncepční model tvořil základ pro tvorbu sítě matematického modelu. Vzhledem k rozsahu modelované oblasti 130x60x100 m bylo rozhodnuto realizovat model na kombinované síti kombinující 2D a 3D elementy. Generovaná síť programem GMSH je na obrázku 6.1.



Obrázek 6.1: Síť generovaná programem GMSH (na obrázku jsou pro přehlednost zobrazeny pouze hrany 2D elementů vygenerované sítě).



Obrázek 6.2: Izoplochy piezometrické výšky v modelované oblasti, hodnoty jsou v metrech.

V první fázi bylo simulováno ustálené proudění, jako kalibrační parametry sloužily hodnoty naměřené v závěrečné fázi VTZ, která se blížila ustálenému stavu. Na obrázku č. 6.2 jsou zobrazeny piezometrické výšky v modelované oblasti při simulaci VTZ29 na vrtu Mel-4.

Po několika kalibracích bylo pro ustálené proudění dosaženo velmi dobré shody mezi experimentálními daty a výsledky modelových výpočtů. Simulovaná hydraulická vodivost při posledním kalibračním kroku byla $3 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ u 2D elementů puklin a $5 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ u 3D elementů v tektonické zóně. To velmi dobře koresponduje s hodnotami koeficientu filtrace stanovenými na základě hydrodynamických zkoušek.

Další fází byla simulace neustáleného proudění v průběhu VTZ. Výchozím bodem pro tuto simulaci byl kalibrovaný model ustáleného proudění. Výpočty neustáleného proudění byly potom postupně prováděny pro různé hodnoty storativity prostředí, která byla volena v intervalu od 10^{-7} do 10^{-6} m^{-1} .

Kalibrace modelu neustáleného proudění nebyla úspěšná. Ze získaných výsledků bylo zřejmé, že chování modelu a reálné soustavy při sledování přechodového děje je odlišné. Hodnoty sledovaných veličin simulacích vykazují v první fázi provádění VTZ dynamičtější chování než jak bylo pozorováno při reálném měření. Naopak v závěrečné fázi zkoušky se výsledky simulací jeví ustálenější než hodnoty veličin získaných experimentem. Větší přiblížení výsledkům terénního měření nepřinesla ani simulace, ve které byly voleny pro různé prvky sítě různé hodnoty storativity (Maryška, Královcová a kol. 2006).

Shrnutí

Simulace s využitím puklinového modelu ukázaly, že stochasticky generovaná puklinová síť pouze na základě statistického zpracování strukturně geologických dat nepřináší uspokojivé výsledky. Kromě problémů s diskretizací sítě a její regularitou takto vytvořená síť současně neodpovídá skutečnostem zjištěným v horninovém prostředí, kde podzemní voda proudí po malém počtu otevřených puklin. Jak již bylo uvedeno v kapitole 4, závislost mezi hydraulickou vodivostí v testovaném úseku vrtu a četností puklin v tomto úseku má často inverzní charakter. Proto je nutné při tvorbě sítě vycházet z hydrogeologického a karotážního měření ve vrtech, do modelu zadávat přednostně deterministicky určené významné pukliny a stochasticky zadanou síť ostatních puklin spíše potlačovat.

Z tohoto hlediska se jeví velmi přínosné modely kombinované, které umožňují deterministické zadání významných puklin a puklinových zón a méně významné pukliny nahrazují ekvivalentním porézním médiem. Při simulaci ustáleného proudění při VTZ29 ve vrtu Mel-4 se kombinovaný model *FLOW123D* plně osvědčil, shoda simulovaných a měřených hodnot byla velmi dobrá. Simulace neustáleného proudění s pomocí modelu *FLOW123D* je zatím v počátečních fázích vývoje a v příštích letech bude třeba provést podrobnou analýzu vlivu jednotlivých vstupních parametrů modelu na časový průběh hodnot sledovaných výstupních veličin.

7 Závěr

Výsledky hydrogeologického výzkumu puklinového prostředí čtyř typů granitů na lokalitách Potůčky-Podlesí a na melechovském masivu poskytly velké množství nových informací o hydraulických vlastnostech hornin, charakteru proudění podzemních vod a míře propojení puklinových systémů.

Mezi nejdůležitější data potřebná pro matematický model proudění podzemních vod patří hodnoty piezometrických úrovní jednotlivých puklinových systémů. Ukázalo se, že piezometrické úrovně se zde liší na krátké vzdálenosti až o desítky metrů. Piezometrickou úroveň ovlivňuje kromě morfologické pozice zkoumaného bloku horniny zejména přítomnost významných hydraulicky vodivých zón. Pokud jsou významné vodivé puklinové systémy propojeny méně propustnou sítí drobnějších puklin, k vyrovnání tlakových poměrů mezi systémy nedochází díky tlakovým ztrátám při proudění.

Hydrodynamické testy potvrdily vysokou míru nehomogenity puklinového prostředí granitů. Koeficienty filtrace k ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) se pohybovaly v rozsahu sedmi řádů od 10^{-11} do 10^{-5} $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Důležitým poznatkem pro matematické modelování je fakt, že hydraulická vodivost granitů neklesá s hloubkou lineárně, ale mění se ve „skokách“. Hydraulické vlastnosti jsou poměrně stabilní pro blok hornin určitého hloubkového rozsahu. Tomuto trendu se ale zcela vymykají významné otevřené pukliny a poruchové zóny. Jejich hydraulická vodivost může být o 2-4 řády vyšší, než je hydraulická vodivost okolních hornin. Tyto objekty identifikované terénním výzkumem je nutné do matematického modelu zadávat jako deterministické 2D nebo 3D prvky.

V hloubkách do 300 m jsme zjistili dva „typy“ puklinové propustnosti. První z nich se vyznačuje vysokou mírou nehomogenity hydraulických vlastností, pro druhý je typická vysoká míra propojení vodivých puklin a hydraulické vlastnosti, které se částečně blíží průlinovému prostředí. Důvody odlišného charakteru propustnosti granitů nejsou dosud zcela zřejmé a budou předmětem výzkumu v dalších letech. Mezi možná vysvětlení patří tektonická a morfologická pozice lokality, zrnitost granitu nebo rozdílná výplň puklin.

Studium dynamiky VTZ ukázalo, že použití vzorců pro ustálené proudění při vyhodnocení zkoušek poskytuje dostatečně přesné výsledky pro zadávání materiálových vlastností objemových prvků matematických modelů. U významných propustných puklin a puklinových zón bude nutné při vyhodnocení využít kalibraci puklinových nebo smíšených modelů na primární data získaná v průběhu VTZ, popřípadě upravené či nově odvozené analytické vzorce pro neustálené proudění. Výzkum této problematiky je v současné době v počátcích, proto nebyl v rámci této práce podrobně zmiňován.

Součástí disertační práce je návrh vhodné metodiky hydrogeologického výzkumu ve vrtech. Jeho cílem bylo zefektivnit budoucí výzkumné práce. Za velký přínos považuji vývoj technického vybavení pro etážové zkoušky bez nějž by byl výzkum heterogenního puklinového prostředí neproveditelný. Z hydrodynamických testů se nejvíce osvědčily vodní tlakové zkoušky. Jejich největší výhodou je jejich univerzálnost. Pro určení piezometrických poměrů puklinového prostředí a identifikaci vodivých puklin je nejpřínosnější karotážní metoda rezistivimetrie, monitorování izolovaných puklinových systémů pomocí multipakového systému a stopovací zkoušky.

Hydrogeologický výzkum ve vrtech jednoznačně ukázal, že hydraulické vlastnosti hornin, které hrají jednu z nejdůležitějších rolí při plánování budoucího úložiště radioaktivního odpadu, lze s dostatečnou přesností stanovit pouze na základě etážového hydrodynamického testování v hlubokých vrtech. Predikce na základě povrchových prací má omezenou vypovídací schopnost. Pro prostředí, které se z povrchového geologického a geofyzikálního výzkumu jeví jako kompaktní s nízkou mírou porušení, může mít vysokou hydraulickou vodivost. Naopak drcené, alterované poruchové zóny bývají často zcela vyplněny sekundárními minerály a jejich hydraulické vlastnosti jsou srovnatelné s okolními neporušenými horninami.

Během výzkumných projektů se nepodařilo přirozeně vyřešit všechny otázky spojené s hydrogeologickým výzkumem hydraulických vlastností puklinového prostředí granitů, naopak v některých případech provedený výzkum přispěl k otevření dalších problémů pro následné studium. Protože výzkumné práce byly zaměřeny zejména na terénní část a vývoj metodiky terénních měření, velký prostor pro další výzkum je zejména v oblasti vyhodnocení zkoušek metodami pro neustálené proudění. V dalších letech navrhuji zaměřit výzkum na:

1. Dlouhodobé studium dynamických procesů na vybraných puklinových systémech.
2. Studium hydraulických vlastností granitů v hloubkách od 500 do 1000 m (plánovaná hloubka pro úložiště radioaktivního odpadu).
3. Vývoj vhodných analytických vzorců pro stanovení hydraulické vodivosti a storativity puklinových systémů na základě dynamického chování spotřeb při dlouhodobých etážových VTZ.
4. Vývoj kombinovaného modelu pro neustálené proudění podzemních vod a studium vhodných postupů jeho kalibrace tak, aby tento model bylo v budoucnu možné využít pro stanovení hydraulických vlastností konkrétních puklin puklinových zón.

8 Literatura

- Ahokas H. (2003): Summary of hydraulic conductivity measurements and differences between different methods in boreholes KR1 – KR10 at Olkiluoto, Finland. Proceedings of Groudwater in Fractured rocks 2003 (Krásný, Hrkal, Bruthans eds.), Prague, Czech Republic.
- Andersson J.E., Ekman L., Nordquist R., Winberg A. (1991): Hydraulic testing and modeling of low angle fracture zone at Finnsjorn, Sweden. Jour. Hydrology, 126(½), 45-78.
- Breiter K. (2006): Geologický výzkum na lokalitě Potůčky – Podlesí. Dílčí zpráva, In Rukavičková L. a kol. (2006): Závěrečná zpráva Programu státní podpory výzkumu a vývoje MŽP – projekt VaV/660/2/03 „Vývoj metodiky identifikace a matematického modelování proudění a geochemické interakce v rozpukaném prostředí kompaktních hornin“. MS MŽP, Praha.
- Buchtele J., Čurda S., Hrkal Z., Krásný J. (2003): New approach to using GIS in groundwater runoff assessment: the Krušné Mts., Czech Republic. Proceedings of Groudwater in Fractured rocks 2003 (Krásný, Hrkal, Bruthans eds.), Prague, Czech Republic.
- Cacas M.C., Ledoux E., de Marsily G., Barbreau A. (1990): Modeling fracture flow with a stochastic discrete fracture network: calibration and validation: 1. The flow model. Water Resour. Res. 26 (3), 479–489.
- Day-Lewis F., Hsieh P.A., Gorelick S.M. (2000): Identifying fracture-zone geometry using simulated annealing and hydraulic-connection data. Water Resour. Res. 36 (7), 1707–1721.
- Guimera J., Vives L., Carrera J. (1995): A discussion of scale effects on hydraulic conductivity at a granitic site (El Berrocal, Spain). Geophys. Res. Lett. 22 (11), 1449–1452.
- Gustafson, G., Fransson, Å. (2005): The use of the Pareto distribution for fracture transmissivity assessment. Hydrogeology Journal (14), 15-20.
- Havíř. J. (2006): Studium křehkých poruch v širším okolí obce Potůčky. Dílčí zpráva, In Rukavičková L. a kol. (2006): Závěrečná zpráva Programu státní podpory výzkumu a vývoje MŽP – projekt VaV/660/2/03 „Vývoj metodiky identifikace a matematického modelování proudění a geochemické interakce v rozpukaném prostředí kompaktních hornin“. MS MŽP, Praha.
- Jacob C.E., Lohman S. (1952): Nonsteady flow to a well of constant drawdown in an extensive aquifer. Trans. Am. Geophys. Union 33(4), 559-569.
- Karous M. a kol. (2006): Detailní pozemní geofyzikální výzkum v rámci 2. etapy výběru polygonů na testovací lokalitě, 2. část, Detail Kostelní les. MS SÚRAO, Praha.
- Krásný J. (2003): Important role of deep-seated hard rocks in the global groundwater flow: possible consequences. Proceedings of Groudwater in Fractured rocks 2003 (Krásný, Hrkal, Bruthans eds.), Prague, Czech Republic.
- Laaksoharju M. et al. (1991): Light-weight double packer equipment for water sampling and hydraulic measurements in deep drill holes. Geological survey of Finland. Report YST-74. Espoo.
- Lexa O., Schulmann K. (2006): Vyhodnocení povrchových křehkých struktur a puklinové sítě na testovací lokalitě Melechovský masiv. Projekt: Provedení geologických a dalších prací na testovací lokalitě Melechovský masiv – 2. etapa. MS SÚRAO, Praha.
- Lukeš J. (2002a): Zpráva o karotážním měření ve vrtu PTP3. Dílčí zpráva, In Pačes T. a kol. (2002): Komplexní geochemický výzkum interakcí a migrací organických a anorganických látek v horninovém prostředí, VaV/630/3/00. MS MŽP, Praha.
- Lukeš J. (2002b): Zpráva o karotážním měření ve vrtu PTP4a. Dílčí zpráva, In Pačes T. a kol. (2002): Komplexní geochemický výzkum interakcí a migrací organických a anorganických látek v horninovém prostředí, VaV/630/3/00. MS MŽP, Praha.

- Lukeš J. (2004): Zpráva o kontrolním karotážním měření ve vrtech PTP3 a PTP4a. Dílčí zpráva, In Rukavičková L. a kol. (2004): Etapová zpráva za rok 2004 Programu státní podpory výzkumu a vývoje MŽP – projekt VaV/660/2/03 „Vývoj metodiky identifikace a matematického modelování proudění a geochemické interakce v rozpukaném prostředí kompaktních hornin“. MS MŽP, Praha.
- Lukeš J.(2006a): Zpráva o karotážním měření ve vrtu PTP-5. Dílčí zpráva, In Rukavičková L. a kol. (2006): Závěrečná zpráva Programu státní podpory výzkumu a vývoje MŽP – projekt VaV/660/2/03 „Vývoj metodiky identifikace a matematického modelování proudění a geochemické interakce v rozpukaném prostředí kompaktních hornin“. MS MŽP, Praha.
- Lukeš J. (2006b): Etapová zpráva o karotážním měření ve vrtech Mel-1 a Mel-6. Projekt: Provedení geologických a dalších prací na testovací lokalitě Melechovský masiv – 2. etapa. MS SÚRAO, Praha.
- Martinec T., Rukavičková L. (2005): Data logger for measured data from boreholes. Sborník konference Mechatronika 2005.
- Maryška J., Severýn O., Rukavičková L.(2005b): Hydrogeological processes in a compact rock massif - a New Approach to the Numerical Modelling. Proceedings of Eurock 2005 (Konečný P. ed.), Leden.
- Maryška J., Severýn O., Rukavičková L. (2005c): Data management and data-mining for numerical modelling in the complex hydrogeological projects. Proceedings of VIIth IAHS Scientific Assembly, Foz do Iguacu.
- Maryška J., Královcová J. a kol.: (2006): Matematické modelování pohybu fluid v puklinovém prostředí testovací lokality. Závěrečná zpráva. MS. Technická universita, Liberec.
- Martinez-Landa L., Carrera J. (2006): A methodology to interpret cross-hole tests in a granite block. Journal of Hydrology, 325(1-4), 222-240.
- Mejías M., López-Geta J. A. (2003): Instrumentation and methodology for the hydraulic characterization of fractured rocks. Proceedings of Groundwater in Fractured rocks 2003 (Krásný, Hrkal, Bruthans eds.), Prague, Czech Republic.
- Mlčoch B., Breiter K., Schulmannová B. (2000): Geologická mapa melechovského masívu 1:10000. MS ČGS Praha.
- Moye D.G.(1967): Diamond drilling for foundation exploration. Australian CivilEngineering Trans. 9, 95-100.
- Öhberg A. (1991): Site investigations equipment developed by Teollisuuden Voima oy. Report 91.06, Helsinki.
- Pačes T. a kol. (2002): Závěrečná zpráva o výsledcích řešení projektu VaV/630/3/00 „Komplexní geochemický výzkum interakcí a migrací organických a anorganických látek v horninovém prostředí“. MS MŽP, Praha.
- Pirhonen V.O. (1988): Combined geophysical and hydraulic methods for 3D mapping of fractures and siting rock caverns in granite. Engineering Geology, 25 (1), 45-68.
- Procházka J. a kol. (2006): Výběr polygonů na testovací lokalitě – 2. etapa. Závěrečná zpráva projektu. MS. ČGS. Praha.
- Rukavičková L. (2001): Účelová hydrogeologická mapa melechovského masívu 1:25 000 (Zpráva o hydrogeologickém výzkumu). MS ČGS. Praha.
- Rukavičková L. a kol. (2002): Hydrodynamické testy ve vrtech PTP-3 a PTP-4a na lokalitě Potůčky – Podlesí. Dílčí zpráva, In Pačes T. a kol. (2002): Komplexní geochemický výzkum interakcí a migrací organických a anorganických látek v horninovém prostředí, VaV/630/3/00. MS MŽP, Praha.
- Rukavičková L., Budkovský J. (2004):Detailní povrchový hydrogeologický výzkum a režimní měření na perspektivních plochách P-1a a P-1b. Etapová zpráva projektu Provedení

- geologických a dalších prací na testovací lokalitě Melechovský masiv – 2. etapa. MS SÚRAO, Praha.
- Rukavičková L. a kol. (2005): Hydrodynamické zkoušky na vrtu MEL-3. Etapová zpráva projektu Provedení geologických a dalších prací na testovací lokalitě Melechovský masiv – 2. etapa. MS, SÚRAO, Praha.
- Rukavičková L. (2005a): Hydrogeologický výzkum puklinového prostředí na lokalitě Potůčky-Podlesí v Krušných horách. Zprávy o geologických výzkumech v roce 2004, 166-168.
- Rukavičková L. (2005b): Měření propustnosti puklinového prostředí granitového masivu (Využití pakrových systémů v hydrogeologii). Sborník abstrakt a exkursní průvodce 2. sjezdu České geologické společnosti, Slavonice 19.-22. října 2005, 89-90.
- Rukavičková L., Budkovský J. (2005): Doplnkový povrchový hydrogeologický výzkum na perspektivních plochách P-2a a P-2b. Etapová zpráva projektu Provedení geologických a dalších prací na testovací lokalitě Melechovský masiv – 2. etapa. MS SÚRAO, Praha.
- Rukavičková L. a kol. (2006a): Závěrečná zpráva Programu státní podpory výzkumu a vývoje MŽP – projekt VaV/660/2/03 „Vývoj metodiky identifikace a matematického modelování proudění a geochemické interakce v rozpukaném prostředí kompaktních hornin“. MS MŽP, Praha.
- Rukavičková L. a kol. (2006b): Hydrogeologický výzkum ve vrtech na lokalitě Potůčky – Podlesí. Dílčí zpráva, In Rukavičková L. a kol. (2006): Závěrečná zpráva Programu státní podpory výzkumu a vývoje MŽP – projekt VaV/660/2/03 „Vývoj metodiky identifikace a matematického modelování proudění a geochemické interakce v rozpukaném prostředí kompaktních hornin“. MS MŽP, Praha.
- Rukavičková L., Bláha V., Otrubová D. (2006c): Hydrodynamické zkoušky na vrtu Mel-3, Mel-4 a Mel-5. Etapová zpráva projektu Provedení geologických a dalších prací na testovací lokalitě Melechovský masiv – 2. etapa. MS SÚRAO, Praha.
- Rukavičková L., Bláha V., Otrubová D. (2006d): Hydrogeologický výzkum ve vrtech Mel-1, Mel-2, Mel-3, Mel-4 a Mel-5 2. etapy výběru testovacích polygonů. MS SÚRAO, Praha.
- Severýn O. (2002): Model proudění a transportu látek v puklinovém prostředí. Disertační práce, FM TU Liberec.
- Severýn O. a kol. (2006): Matematické modelování. Dílčí zpráva, In Rukavičková L. a kol. (2006): Závěrečná zpráva Programu státní podpory výzkumu a vývoje MŽP – projekt VaV/660/2/03 „Vývoj metodiky identifikace a matematického modelování proudění a geochemické interakce v rozpukaném prostředí kompaktních hornin“. MS MŽP, Praha.
- Shapiro A.M., Hsieh P.A. (1991): Research in fractured-rock hydrogeology: characterizing fluid movement and chemical transport in fractured rock at the Mirror Lake drainage basin. In: Mallard G.E., Aronson D.A. (Eds): Proceedings of the Technical Meeting of US Geological Survey Toxic Substances Hydrology Program, Monterey, CA, March 11–15, Reston, VA.
- Svenson U. (2001b): A continuum representation of fracture networks. Part II: application to the Äspö Hard Rock laboratory. *J. Hydrol.*, 250, 187–205.
- Tiedeman C.R., Hsieh P.A. (2001): Assessing an Open-Well Aquifer Test in Fractured Crystalline Rock. *Journal of Ground Water*, 39(1), 68-78.
- Tsang Y.W., Tsang C.F., Hale F.V., Dverstorp B. (1996): Tracer transport in a stochastic continuum model of fractured media. *Water Resour. Res.* 32(10), 3077–3092.