

Univerzita Karlova
Přírodovědecká fakulta
Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užitá geofyziky

Studijní program: Geologie
Studijní obor: Aplikovaná Geologie
Zaměření: užitá geofyzika



Bc. David Hanák

Zpracování komplexního karotážního měření
Data processing of well log complex

Diplomová práce
Vedoucí diplomové práce: RNDr. Martin Procházka

Praha, 2018

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce, ani její podstatná část, nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, dne 17. 8. 2018

.....

Bc. David Hanák

Poděkování

Nejprve bych rád na tomto místě poděkoval svému školiteli RNDr. Martinu Procházkovi za vedení mé práce, cenné rady, ochotu a trpělivost.

Dále děkuji karotážnímu oddělení společnosti Aquatest a.s. a jeho pracovníkům za poskytnutí technického vybavení a zasvěcení do jeho obsluhy, pomoc při měření, poskytnutí zázemí pro zpracování naměřených dat, za výklady postupů při zpracování a interpretaci.

A v neposlední řadě také chci poděkovat i členům rodiny za jejich trpělivost a podporu.

Abstrakt

Tato práce se zabývá problematikou stanovení smykových ploch svahových nestabilit (včetně fosilních) z výsledků měření komplexu karotážních metod. Popisuje provedené kroky během měření, zpracování a interpretace dat. Veškerá data pocházejí z měření ve vrtech provedených v rámci inženýrskogeologického průzkumu sesuvného území v bezprostředním okolí dálničního tělesa dálnice D8 či měření ve vrtu z lokality Děčín-Loubí. Na druhé zmíněné lokalitě mohl být z důvodu odlišné konstrukce vrtů použit rozsáhlejší komplex karotážních metod. Po vymezení smykových ploch svahových nestabilit bylo provedeno porovnání, zda si výsledky v sousedících vrtech navzájem odpovídají, a zhodnotit jaké metody (či kombinace metod) se pro daný úkol osvědčily nejlépe.

Abstract

This thesis is focused on the problem of the determination of shear surfaces of slope instabilities (including fossil ones) from the results of the complex of logging methods. It describes the steps taken during data measurement, processing, and interpretation. All the data comes from the measurements conducted in the boreholes carried out for the geotechnical survey of the sliding area in the immediate proximity of the D8 highway or measurements in a well from the Děčín-Loubí locality. On the second mentioned locality, due to a different well construction, a more extensive logging complex could be carried out.

After locating shear surfaces in a slope instability, a comparison was made to determine whether the results in neighboring boreholes corresponded to each other, and to evaluate which methods (or combination of methods) suits best for the task.

Obsah

1. Úvod	1
2. Geomorfologický popis a stručná geologická charakteristika oblasti	4
3. Svahové pohyby	8
3.1 Rozdělení svahových pohybů	8
3.2 Příčiny svahových pohybů	11
3.3 Změny fyzikálních parametrů	14
4. Stručný popis použitých karotážních metod	15
4.1 Kavernometrie	15
4.2 Inklinometrie	16
4.3 Odporová karotáž	17
4.4 Fotometrie	18
4.5 Termometrie	18
4.6 Rezistivimetrie	19
4.7 Metoda ředění označené kapaliny a metoda konstantního čerpání označené kapaliny	19
4.8 Indukční karotáž	20
4.9 Magnetická karotáž	21
4.10 Gama karotáž	21
4.11 Hustotní karotáž	22
4.12 Neutronová karotáž	23
4.13 Akustický televizor	24
4.14 Vlnová akustická karotáž	25
5. Interpretace karotážních měření	26
5.1 Kalibrace a výpočet odvozených veličin	26
5.2 Popis provozně používaného postupu zpracování a interpretace metod ABI a FWS	28
5.3 Vliv vrtu a jeho konstrukce na karotážní měření	32
6. Interpretace metod.	34
6.1 Stanovení litologického profilu.	35
6.2 Vyhodnocení hydrodynamiky ve vrtu.	36
6.3 Určení smykových ploch.	37
7. Výsledky měření.	38
8. Závěr.	50

8.1 Diskuze výsledků z D8.	50
8.2 Diskuze výsledků z lokality Děčín.	53
8.3 Shrnutí.	54
9. Použitá literatura.	55
10. Přílohy.	59

Seznam příloh

- Příloha 1 Výřez z geologické mapy s legendou pro zájmovou oblast a její okolí
- Příloha 2 Výsledky karotážního měření ve vrtu IN3p-B
- Příloha 3 Výsledky karotážního měření ve vrtu IN14p
- Příloha 4 Výsledky karotážního měření ve vrtu IN15p
- Příloha 5 Výsledky karotážního měření ve vrtu IN17p
- Příloha 6 Výsledky karotážního měření ve vrtu IN18p
- Příloha 7 Výsledky karotážního měření ve vrtu IN19p
- Příloha 8 Výsledky karotážního měření ve vrtu IN20p
- Příloha 9 Výsledky karotážního měření ve vrtu IN21p
- Příloha 10 Výsledky karotážního měření ve vrtu IN22p
- Příloha 11 Výsledky karotážního měření ve vrtu IN23p
- Příloha 12 Výsledky karotážního měření ve vrtu IN24p
- Příloha 13 Výsledky karotážního měření ve vrtu IN25p
- Příloha 14 Výsledky karotážního měření ve vrtu IN26p
- Příloha 15 Výsledky karotážního měření ve vrtu HV-L66
- Příloha 16 Výsledky měření vlnové akustické karotáže sondou FWS50 ve vrtu HV-L66
- Příloha 17 Výsledky měření akustickým televizorem ABI40 ve vrtu HV-L66
- Příloha 18 Četnosti azimutů registrovaných nehomogenit ve vrtu HV-L66
- Příloha 19 Četnosti úklonů registrovaných nehomogenit ve vrtu HV-L66
- Příloha 20 Stereogram registrovaných nehomogenit ve vrtu HV-L66 zobrazený ve Wulffově projekci
- Příloha 21 Výsledky inklinometrického měření ve vrtu HV-L66, horizontální projekce vrtu

Příloha 22 Výsledky inklinometrického měření ve vrtu HV-L66,
vertikální projekce vrtu

1. Úvod

Sesuvy jsou přírodní jev vyskytující se po celém světě, a naše republika není výjimkou. Při zanedbání řádného průzkumu, územního plánování a technických postupů dochází ke značným hospodářským škodám (přímým i nepřímým), vyřazují se z běžného využití zemědělské i lesní plochy, vzniká riziko pro všechny druhy pozemních staveb (s tím, že obzvláště zranitelné jsou liniové dopravní stavby) a bohužel někdy dochází i ke ztrátám na životech. K zjištění míry nebezpečnosti sesuvů se často používají i geofyzikální metody a vrtné práce, i když v současnosti jsou považovány spíše za doplněk klasického inženýrsko-geologického průzkumu. Karotážní měření nabízí možnost získat podle zvolené metodiky informace o celé řadě fyzikálních parametrů a tím přináší cenné výsledky při řešení rozličných úkolů (nejen) z oblasti inženýrské geologie. Výhodou karotážního měření je zkoumání parametrů horninového prostředí in-situ a teoreticky neomezený hloubkový dosah při zachování stejné přesnosti měření. Dále je i zde možné pozorovat obecný trend, že díky neustále se rozvíjejícím technickým možnostem jsou vyvíjeny nové metody, či nová použití již existujících metod, což skýtá potenciál pro snadnější či přesnější řešení celé řady geologických úkolů. Baroň a Supper (2013) dokonce ve svém srovnání použití geofyzikálních metod na sesuvech získali u karotážních měření velice vysoké procento spolehlivosti pro průzkum a monitoring svahové nestability (85 %). Zároveň však tyto metody patřily k velice zřídka využívaným (použity byly pouze u 3 % případů). I přes zde uváděnou vysokou spolehlivost karotážních měření není rozpor s výsledky práce inženýrského geologa nikterak neobvyklý. Je to částečně dáno tím, že inženýrský geolog se musí opírat o geologický popis vrtných jader, kdy zařídí horniny podle vzhledu a tvrdosti. Karotážní měření ale měří fyzikální parametry hornin. Geolog nemusí odhalit tenká souvrství či drobné změny v chemizmu hornin. Při absenci orientovaného vrtného jádra není schopen určit prostorový průběh puklin a jiných nehomogenit. Nehledě na to, že vrtná jádra bývají

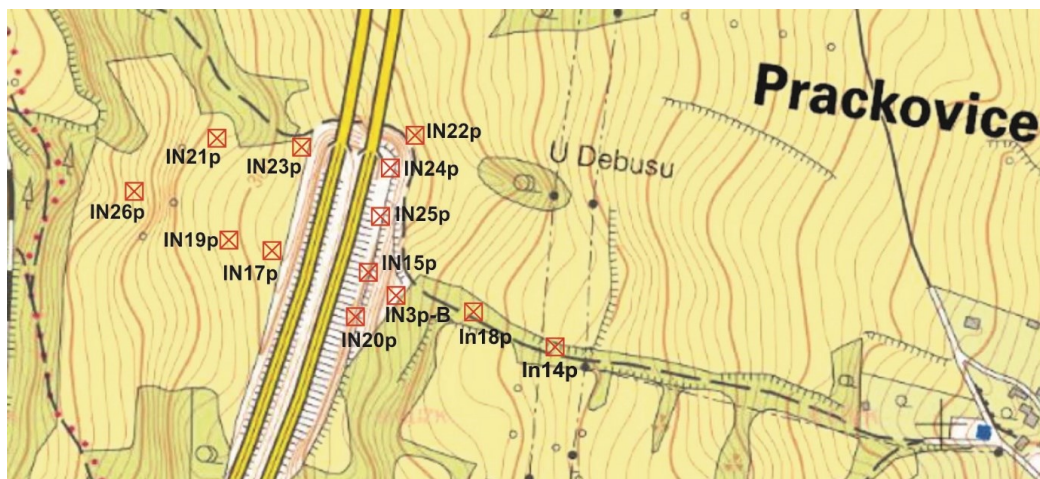
vrtáním značně poznamenána nebo že v některých místech nesoudržných hornin je dokonce výnos jádra nulový.

V současnosti probíhá v Česku na několika lokalitách inženýrsko-geologický průzkum v okolí stávajících i plánovaných dopravních staveb, a to v oblasti, kde už k sesuvu došlo, nebo v oblastech, jež jsou pouze sesuvem ohroženy. I již uklidněný sesuv může být opět aktivován – ať již v důsledku samotných stavebních prací, statického zatížení od dodané hmoty stavebního tělesa či dynamického zatížení vyvolaného provozem. Tato práce popisuje měření v několika vrtech provedených v sesuvné oblasti Českého středohoří, zpracování a interpretace naměřených dat s cílem určit potenciální smykovou plochu sesuvu. Přitom je nutné rozlišit, zda je příčinou anomálií v naměřených datech skutečně přítomnost sesuvu či zda jde o projev negeologického původu – zejména konstrukce vrtu. Dále je nutné zohlednit, že hmoty na svahové deformaci mohou být silně heterogenní. S tím souvisí i nerovnoměrná rychlost pohybu hmot v různých místech a existence dílčích svahových deformací v rámci jediného sesuvu. Kvůli tomu není možné spoléhat pouze na jedinou metodu, ale je potřeba mít údaje o dalších fyzikálních parametrech, které pak případnou anomálii potvrdí či vyloučí. Výběr komplexu metod, které budou měřeny na dané lokalitě, je vždy nutné přizpůsobit místní geologické situaci a technickým podmínkám.

Zvolena byla lokalita na dálnici D8 vedoucí z Prahy na Drážďany. Nachází se poblíž 57. kilometru dálnice, nedaleko obce Prackovice nad Labem. Blízký sesuv z roku 2013 upoutal k této stavbě pozornost veřejnosti a médií. Aby se předešla situace neopakovala, bylo zde realizováno mnoho geofyzikálních povrchových měření, vrtných prací a karotážních měření. Průzkum zde probíhal již dlouho před samotným sesuvem a realizací stavby dálnice (a také odhalil jisté pohyby svahu). Mimo to je oblast dlouhodobě monitorována na probíhající svahové deformace. Kvůli tomuto monitoringu tam byla vybudována síť inklinometrických vrtů osazených speciálními pažnicemi, které jsou však bez perforace a neumožňují komunikaci vod ve vrtu s okolní podzemní vodou. Konstrukce vrtu, použitý druh

výstroje a výška hladiny podzemní vody jsou rozhodující pro možnost aplikace karotážních metod. Z tohoto důvodu bylo vyloučeno použití metod odporové karotáže, fotometrie a rezistivimetrie. Jak se později ukázalo, další nevhodnou metodou pro toto měření byl akustický televizor, kdy v měkkých horninách jílové konzistence byl útlum signálu tak veliký, že z této metody nebyly někde rozpoznatelné žádné užitečné informace. Pro srovnání možností karotáže ve vrtech s rozdílným typem výstroje a s rozdílnou geologickou stavbou se do této práce začlenila ještě data z lokality na břehu Labe v těsné blízkosti Děčína. Ta také leží v oblasti Českého středohoří – i když na samém okraji – a také jde o oblast ohroženou svahovými deformacemi. Samozřejmě se jedná o rozdílnou geologickou situaci, ale úkol vymezit potenciální smykové plochy zůstal stejný. Proto by tato lokalita měla poskytnout dobré srovnání, co se týče možností jednotlivých karotážních metod.

Měření bylo realizováno přibližně v období od května do října 2017. Měřilo se ve 13 vrtech na lokalitě Dobkovičky (označení vrtů je: IN3p-B, IN14p, IN15p, IN17p, IN18p, IN19p, IN20p, IN21p, IN22p, IN23p, IN24p, IN25p, IN26p), jejichž pozice je naznačena na obrázku č. 1. Na lokalitě u Děčína se jednalo o vrt HV-L66. Provedeno bylo karotážní aparaturou Gearhard-Owen Industry s registrační jednotkou od výrobce Mineral Logging Systems, zabudovanou ve vozidle Toyota Hiace. Malá část měření byla také provedena na aparatuře BLS od výrobce W&R Instruments, instalované v tomtéž voze. K převedení naměřených dat byl použit digitální planimetr Ushikata X-Plan C. Samotné zpracování proběhlo v softwaru GD Base v5 a WellCAD 5.0. Většina karotážních sond je o průměru 36 až 50 mm, s deklarovanou použitelností do maximálního tlaku 200 bar a teplot 70 – 80 °C.



Obr. 1: Přibližné vymezení vrtů v zájmové oblasti u dálnice D8. Výřez mapy na stránkách <http://archivnimapy.cuzk.cz>, upraveno

2. Geomorfologický popis a stručná geologická charakteristika oblasti

Lokalita se nachází v oblasti Kostomlatského středohoří, což je nejvyšší z částí Českého středohoří (resp. jeho podcelku nazývaného Milešovské středohoří). Území je tvořené plochou hornatinou až členitou vrchovinou (Demek, 1987). Nadmořská výška v oblasti se pohybuje přibližně od 150 m. n. m. u hladiny Labe až po 837 m. n. m. na vrcholu Milešovky. Je budováno převážně čedičovými, v menší míře znělcovými horninami, vulkanity, svrchnokřídovými slínovci, písčitymi slínovci, jíly, tufy, tufity a nalezneme zde i výskyt spraší a sprašových hlín. Jsou zde četná vypreparovaná podpovrchová sopečná tělesa, produkty mrazového zvětrávání a balvanové sutě. Viz příloha č. 1.

Geologický vývoj Českého středohoří byl poměrně složitý. Cajz (1996) ho popisuje následujícím způsobem: „Celá oblast Českého středohoří je součástí Českého masivu. Vznikala na styku dvou odlišných jednotek – krušnohorskodurynské oblasti na severozápadě a tepelsko-barrandienské oblasti na jihovýchodě“.

Z období **starohor** a prvohor jsou v podloží vyvřelých a usazených hornin v Českém středohoří zastoupeny metamorfované horniny a hlubinné vyvřeliny spadající do skupiny krušnohorského krystalinika. To je přítomné téměř pod celým Českým středohořím a sahá až po spojnici Děčína a České Lípy na severu a k litoměřickému zlomu na jihovýchodě. Na povrch se dostalo na několika místech díky tektonickým pohybům, které probíhaly v minulosti. Vznik tohoto krystalinika je spjat s paleozoickým variským vrásněním, kdy proběhla intenzivní metamorfóza a intruze granitoidních těles.

Z období **permokarbonu** jsou zde horniny zastoupeny pouze v menším množství. Jedná se o denudační zbytky původně rozsáhlejšího pokryvu – sedimenty říčního i jezerního původu (hlavně slepence a arkózové pískovce). Kyselý vulkanismus v karbonu zanechal v oblasti horniny typu ryolitových tufů. Výchozy těchto tufů jsou k nalezení například v Opárenském údolí, odkud pokračují pod křídovými horninami jihozápadním směrem od Lovosic.

Druhohorní etapa je velmi významnou kapitolou v geologickém vývoji Českého středohoří (zejména pak období svrchní křídly). Vytváří se zde pokryv usazenin mocný několik stovek až tisíc metrů. Ten tvoří podklad třetihornímu vulkanosedimentárnímu komplexu. V období cenomanu došlo v důsledku poklesu oblasti a celosvětového zdvihu mořské hladiny k záplavě území a vytvoření mělkého moře, které tam pak existovalo asi 12 mil. let. V turonu a coniacu se v jihozápadní části Středohoří ukládá 400 a více metrů sedimentů, tvořených vápnitými jílovci, slínovci a jílovitými vápenci. Na severovýchodě jsou to pak pískovce, jelikož se zde utvořila deprese na mořském dně, kam se ukládal písčité materiál vzniklý zvětráváním žul z lužické oblasti. Sedimenty obsahují i vápník, pocházející ze schránek mořských živočichů. Kvůli nerovnoměrné rychlosti poklesu mořského dna a různým směrům přínosu materiálu se vytvořily sedimentární vrstvy s rozdílnými mocnostmi. V mladším coniacu až santonu se moře postupně změlčovalo, jak se mořská pánev zaplňovala písčitém sedimentem. Toto mocné těleso písků s vložkami jílovců bylo nesouvisle denudováno a zachovaly se z něj pouze lokální

zbytky s mocností maximálně 150 až 200 m. Tyto pískovce obsahují více živců a kaolinitické složky. Po skončení křídové sedimentace došlo k rozlámání málo zpevněného pokryvu na více ker podél četných zlomů.

V **třetihorách** dochází ke změně klimatu na teplé a vlhké, což napomáhá zvětrávání a odnosu křídových hornin (a také se v něm velice dařilo tehdejší vegetaci, z které pocházejí hnědouhelné sedimenty). Místy nastává i prokřemenění původního povrchu. Při nastupující sopečné činnosti jsou křídové sedimenty ve styku s tělesy vulkanitů tepelně přeměněny. Zároveň dochází k jejich vyzdvižení až o několik stovek metrů průnikem těles vulkanitů. Vulkanismus je vázán zejména na Oherský rift. V první fázi pravděpodobně nastalo uvolňování plynů z hlubokého sopečného krbu podél zlomů. Při tom vznikají maary – silně explozivní vulkány, ze kterých najdeme zejména v okolí litoměřického zlomu přírodní dráhy vyplněné sopečnými brekciemi. Později se v oblasti vytváří riftová deprese a nastává výstup magmatu k povrchu podél zlomů, což dalo vzniknout mnoha výlevům různých hornin (zejména trachyty, znělce a čediče). Místy docházelo k přeměňování hornin na styku žhavých láv s vodou. To vedlo k jejich rozpadu a vzniku nemalých objemů nesoudržného úlomkovitého materiálu. Ten byl dále transportován vodou a gravitací. Na některých místech deprese stále pokračovala organogenní sedimentace. Vznikly tak sedimenty s vrstvami uhlí a diatomitů. Jedno období sopečné činnosti postupně ustávalo, a to umožnilo vyplnění riftové deprese, až do stavu zarovnání reliéfu. Ale tektonické pohyby neustaly a později došlo k obnovení vulkanismu. V další fázi vznikl stratovulkán, který vytvářel tufy a v menší míře také výlevy láv. Vznikající tefrity a tufy putovaly jak staršími přírodními drahami, tak i drahami novými, které vznikaly díky pohybům na zlomech. V podloží i ve vrstvách vulkanických produktů se vytvářela podpovrchová intruzivní tělesa trachytů a čedičů. Na konci třetihorního období pak na horniny působí poměrně intenzivní eroze.

Čtvrtohorní období přineslo značné klimatické změny v podobě střídání dob ledových a meziledových, které významně přispěly k vytvarování krajiny do dnešní podoby. Nadále pokračoval pozvolný výzdvih celé oblasti, což přispělo k zahlubování řek a zvyšovalo jejich erozní schopnost. To se týkalo i řeky Labe, která vytvořila několik říčních teras a celkově se zahlubila asi o 100 metrů. Sedimenty byly transportovány i pomocí kontinentálních ledovců. Jako doklad toho slouží skandinávské červené horniny uložené v terasách okolo Ploučnice. Během období oteplování na konci glaciálu vzrostl v řekách průtok vody a tím i jejich schopnost transportu materiálu. Ten se pak ukládal v oblastech s malým spádem jako výplavové vějíře. Tím vznikly i akumulace bohaté na pyrop, které se v Českém středohoří vyskytují. Během chladnějších období glaciálů – tzv. stadiálů – se významně uplatňovala činnost větru, který transportoval množství prachu vzniklého zvětráváním. To vedlo k vzniku akumulací spraší a sprašových hlín v mocnostech až 20 metrů, zejména pak na závětrných stranách kopců (hlavně na východních úbočích) a v nižších polohách u vodních toků. Dále se v oblasti uplatňovalo mrazové zvětrávání, kdy docházelo k rozpadu skal na jednotlivé kamenité sutě. Ty se pak gravitačně pohybovaly po příkrých svazích i formou skalních řícení a sesuvů půd. Tento pohyb byl snazší díky malému množství vegetace v tehdejší době. Svahové sedimenty se nahromadily v údolích a na úpatích kopců, kde ojediněle dosahují mocnosti až 20 metrů.

Při prozkoumání geologické mapy zájmového území (viz příloha č. 1) a jeho okolí zjistíme, že se zde nachází bazaltoidní horniny pod vrchem Kubačka. Z něj po svahu dolů opadávají sutě. Dále tu jsou místy přítomny trachyty, slínovce s obsahem jílu a slínovce prachovité, spraše a sprašovitě hlíny, vulkanické tufy a na několika místech navážky, pravděpodobně související se stavbou. Relativně vysoké převýšení reliéfu (spolu s dalšími faktory) poskytuje vhodné podmínky ke vzniku svahových deformací. Zvětralé vyvřelé horniny a sutě jsou propustné, obvykle zvodnělé a tvoří vrstvy a čočky v jílech, dotují je vodou, a to dále přispívá k vzniku sesuvů. (Paseka, 2014).

3. Svahové pohyby

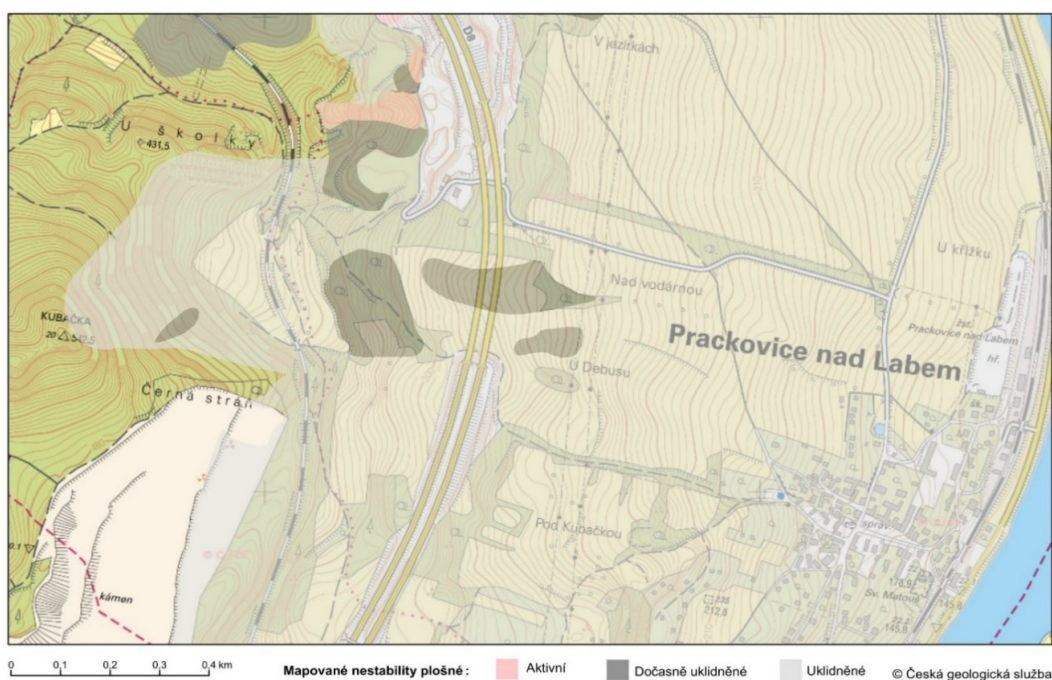
Q. Záruba a V. Mencl (1987) definují sesuv takto: „Porušením stability svahu vznikají svahové pohyby podmíněné účinkem zemské tíže, při nichž těžiště pohybujících se hmot vykonává dráhu po svahu dolů. Náhlé pohyby hornin, při nichž sesouvající se hmoty jsou odděleny od pevného podloží zřetelnou smykovou plochou, se označují jako *sesuvy* v užším slova smyslu“. V této kapitole je stručně popsáno základní rozdělení druhů sesuvů a faktory, které vedou k jejich vzniku. Ty jsou klíčové k rozpoznání toho, na jaké změny fyzikálních parametrů se při interpretaci karotážních měření zaměřit.

3.1 Rozdělení svahových pohybů

Svahové pohyby se dají dělit podle několika různých faktorů. Jako hlavní kritérium se nejčastěji uvádí klasifikace podle způsobu a rychlosti pohybu. Podle vedlejších kritérií se pak dělí dle stupně stabilizace, věku, příčiny vzniku, vývojového stupně, podle průběhu smykových ploch a jejich pozice vůči dalším svahovým deformacím atd. (Malgot, Klepsatel, Trávníček, 1992).

Pro technické účely je důležité rozdělení svahových pohybů podle stupně stabilizace – a to na živé – aktivní, dočasně uklidněné – potenciální a trvale uklidněné – stabilizované (Paseka, 2014). Aktivní svahové pohyby lze určit podle čerstvých projevů doprovázejících pohyb, jako jsou stromy vychýlené do různých směrů, roztrhaný povrch území, přerušené liniové prvky v krajině (cesty, meze, stromořadí), poškození budov, napjaté kořeny v trhlinách atd. Čerstvé projevy sesuvu obvykle ještě nejsou poškozeny ronem či erozí. Zvláštní případ nastává u obzvláště pomalých sesuvů, kdy se některé stopy nevytvoří vůbec nebo jsou zahlazeny ještě dříve, než pohyb skončí. To se týká zejména sesuvů v jílech, které jsou relativně pomalé, ale pohyby přetrvávají dlouhou dobu, řádově několik let (Paseka, 2014). Dočasně uklidněné pohyby jsou již poškozeny erozí a pokryté novou vegetací. Stopy dokládající svahový pohyb se poměrně rychle ztrácí,

takže již po několika letech může být problém těleso sesuvu opětovně vymezit. Faktory vedoucí ke vzniku sesuvu však stále přetrvávají, takže se stále může za vhodných podmínek pohyb obnovit. Trvale uklidněné pohyby probíhaly v dobách s rozdílnými morfologickými a klimatickými podmínkami. Příčiny takového svahového pohybu již v dnešní době neexistují, a proto nehrozí obnovení pohybu. Na webu české geologické služby je v současnosti k nahlédnutí také registr svahových nestabilit s rozdělením sesuvů podle stupně stabilizace. Obrázek č. 2 ukazuje výřez z mapy svahových nestabilit z okolí lokality na Dobkovičkách.



Obr. 2: Rozsah vymapovaných svahových nestabilit v zájmovém území a jeho okolí. Vytvořeno ve webových aplikacích ČGS

Další důležité rozdělení sesuvů je podle způsobu a rychlosti pohybu. Je nutno poznamenat, že různí autoři uveřejnili své verze rozdělení sesuvů, které se v nějakých bodech více či méně liší, a tak systémů třídění je velmi mnoho. V tuzemské literatuře se často objevuje

system třídění podle Záruby a Mencla (1987), (kteří však uvádějí, že vychází ze systému vypracovaného autory Nemčok, Pašek, Rybář, 1974), který je přizpůsoben našim regionálním poměrům. Ten dělí hlavní typy svahových pohybů do čtyř skupin, a to na plouživé pohyby, sesouvání, stékání a skalní řícení. V některých případech mohou sesuvy přecházet z jednoho typu na jiný, či se v jisté míře uplatňují naráz.

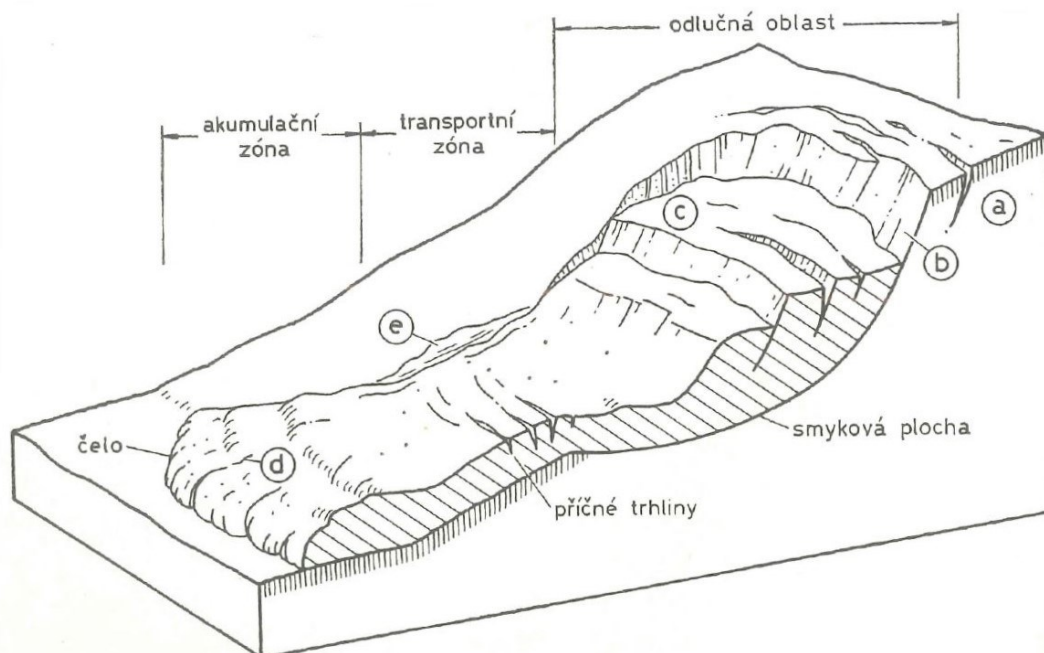
Ploužení je pomalý a dlouhodobý pohyb hmot, kdy dochází pouze k malému posunutí. To a fakt, že jeho hranice s podložím nebývá příliš zřetelná, z něj činí obtížně vymežitelný jev. Záruba a Mencl (1987) dále tento typ svahového pohybu rozdělují na plouživý pohyb sutí a zvětralin, soliflukci, hlubinné plouživé pohyby, gravitační vrásnění, pomalé pohyby horninových bloků po měkkém podloží a vytlačování měkkých hornin na dně údolí.

Sesouvání je relativně rychlý pohyb hornin po svahu, při němž se utváří zřetelná smyková plocha (či v případě složeného sesuvu ploch několik). V typickém případě část hmot na čele sesuvu překryje terén v předpolí sesuvu (tzv. akumulační zóna - viz obrázek č. 3). Další dělení je na sesouvání zemin podél rovinných nebo mírně zvlněných ploch; sesouvání pelitických hornin podél zakřivených, zpravidla válcových ploch; sesouvání skalních hornin podél rovinných, zpravidla předurčených ploch a sesouvání podél složených smykových ploch.

Stékání nastává v případě, kdy pohybující se hmoty obsahují takové množství vody, že pohyb získává charakter tečení. Uvolněné hmoty se přemístí poměrně rychle po povrchu terénu, a to i do značných vzdáleností, a ukládají se na úpatí svahu. Proud tekoucích hmot často sleduje již existující říční koryto či erozní rýhu. Tento druh pohybu se dále rozlišuje na skupiny: zemní proudy, přívalové sutě a bahnité proudy, svahové poruchy vznikající vyplavováním písku, sesuvy citlivých jíílů a subakvatické skluzy.

Skalním řícením označujeme náhlé krátkodobé pohyby bloků (od velikosti jednotlivých kamenů až po celé skalní komplexy) ze strmých skalních stěn, pokud platí, že při pohybu převládá volný pád. Z toho

také vyplývá, že pohybující se hmoty nabírají poměrně vysokou rychlost a kinetickou energii. Dále zde můžeme vydělit skupiny: sesypávání, odpadávání úlomků, odvalové říčení a planární říčení.



Obr. 3: Schéma sesuvu podle válcové smykové plochy. a – tahové trhliny nad odlučnou částí, b – odlučná stěna, c – příčné trhliny, d – radiální trhliny, e – boční valy. Převzato od Záruba, Mencl (1987)

3.2 Příčiny svahových pohybů

Svahové pohyby mohou vzniknout, pokud pro ně existují příhodné podmínky. Ty jsou dány zejména geologickou strukturou, fyzikálními vlastnostmi hornin, hydrogeologickými poměry, klimatem a morfologií daného území. Z těchto se nejvýznamněji uplatňují klimatické podmínky na daném území. Čím je klima vlhčí, tím rychleji probíhají degradační procesy hornin a více se mohou projevit účinky podzemních vod (Malgot, Klepsatel, Trávníček, 1992). Nemčok, 1982 popisuje tři typy geologických struktur běžných pro

naše podmínky, které jsou příznivé pro vznik svahových pohybů. Jsou to:

1) Situace, kdy svah tvoří horniny, u kterých klesají pevnostní parametry směrem do podloží. To je také známkou nerovnoměrné eroze, kdy se měkčí horniny rozkládají rychleji než tvrdší nadloží a tím na svahu vzniká nerovnováha. Puklinami v nadloží proniká voda k měkkým horninám a rozmáčí je.

2) Příklad, kdy se ve svahu opakovaně střídají polohy pevnějších a méně pevných hornin (např. flyše). K pohybům pak dochází zejména tam, kde údolí protínají čela vrstev.

3) Když jsou svahy intenzivně tektonicky porušené.

Samotné pohyby jsou spouštěny rozličnými faktory, které poruší rovnováhu sil a bezprostředně vedou ke svahovým deformacím. Ty hlavní z nich jsou následující (podle Paseka, 2014):

- *Změna sklonu svahu* – zvýšení sklonu (způsobené např. odebráním materiálu od paty svahu) způsobuje v horninách přírůstek smykového napětí. Zvětšení výšky svahu (např. prohlubováním údolí) vede k uvolňování bočních napětí ve svazích. Pak se tvoří horizontální trhliny, kterými se dovnitř dostává voda (Záruba, Mencl, 1987).
- *Přetížení náspu* způsobuje nárůst smykových napětí a napětí vody v pórovém prostoru jílovitých zemin, kterým pak zmenšuje smykovou pevnost. Na rychlosti přetížení také záleží – rychlejší přetížení znamená větší riziko.
- *Otřesy a vibrace* vyvolávají v horninovém prostředí kmity o různých frekvencích. Ty způsobují dočasné změny napětí v prostředí a mohou mít za důsledek porušení rovnováhy svahu. U málo zpevněných sedimentárních hornin může dojít k porušení intergranulárních vazeb a poklesu soudržnosti. U velmi jemných sedimentů, které jsou navíc zvodnělé, může vlivem otřesů dojít k posunu či rotaci zm, což může vyvolat náhlé ztekucení zeminy. Zdrojem otřesů mohou být zemětřesení, výbuchy, ale i vibrace od těžkých strojů.

- *Změna obsahu vody* vzniká buďto přítokem srážkových vod (nebo vod z odtávání sněhu) vsakováním nebo skrze pukliny. Zvýšením hydrostatického tlaku vzroste i tlak v pórovém prostoru a tím pak klesá smyková pevnost zemin. Při nedostatku vody mohou zase jílovité horniny vysychat a smršťovat se. Vznikají tak trhliny, které narušují soudržnost svahu.
- *Působení podzemní vody* se může projevit čtyřmi způsoby:
 - Za prvé: když proudící podzemní voda působí na částice zeminy tlakem, začne se zhoršovat stabilita svahu. Náhlé výkyvy hladiny podzemních vod (zejména v okolí břehů, kde je časté kolísání hladiny povrchových vod) způsobují přírůstek pórového tlaku, což může vést k ztekucení písčitých a jílovitých zemin.
 - Za druhé: podzemní voda může způsobit vyplavování rozpustného tmelu. To pak vede k snížení soudržnosti zeslabením intergranulárních vazeb a snížení smykové pevnosti.
 - Za třetí: pohyb podzemní vody může v jemných zeminách vyplavit částičky zeminy ze svahu. Takovýto úbytek materiálu může být dostatečný k vytvoření dutin, a tedy k snížení celkové stability svahu.
 - A za čtvrté: napjatá hladina podzemní vody působí na nepropustné nadložní vrstvy jako vztlak. Při změně piezometrické výšky napjaté hladiny dojde i ke změně vztlaku a na svahu může nastat pohyb.
- *Činnost mrazu* vede k tomu, že se zvětšuje objem vody v trhlinách, které se pak rozšiřují a tvoří se trhliny nové. Takové rozpukání pak snižuje soudržnost hornin. V zeminách s obsahem jílu se v přípovrchové vrstvě tvoří led. Při tání se potom zvětšuje obsah vody u povrchu a ten rozbředá.
- *Zvětrávání* (mechanické i chemické) postupně porušuje soudržnost hornin. Působením prosakující vody může docházet k chemickým změnám minerálů hornin.
- *Změny ve vegetačním porostu* mají za následek změny vodního režimu v podpovrchových vrstvách. Kořeny stromů zlepšují stabilitu svahu tím, že jej mechanicky drží pohromadě a spotřebováváním vody jej udržují částečně vysušený.

3.3 Změny fyzikálních parametrů

Při vzniku svahového pohybu dochází na smykové ploše ve větší či menší míře k porušení původní struktury hornin a následnému promísení hmot. To může vést ke změně některých fyzikálních parametrů, kterou pak můžeme měřit. U plouživých svahových pohybů však může být hranice tak nejasná, že tyto změny jsou prakticky neměřitelné.

Při nasunutí svahových hmot na jiné, geologicky rozdílné hmoty (sesuv po předurčené smykové ploše), můžeme měřit velice rychlý přechod ve fyzikálních vlastnostech. To se týká zejména objemové hmotnosti, měrného elektrického odporu, úhrnné gama aktivity, změn v magnetické permeabilitě a susceptibilitě a mnoha dalších.

V případě, že sesuv tvoří jeden typ hmot (asekventní sesuvy), projeví se smyková plocha jako vrstva s anomálními vlastnostmi. Hmoty na smykové ploše bývají silně rekonstituovány. To má mimo jiné za následek změny v jejich pórovitosti (nárůst) a schopnosti propouštět vodu (Yang et al., 2011). Veder (1981) popisuje měření rozdílů elektrického potenciálu, pH hodnot vody v pórech a rozdílů v redoxně-oxidačních potenciálech mezi vrstvami jílovitých zemin. Ty mohou kolísat v závislosti na změnách hladiny podzemní vody. Měrný elektrický odpor rozrušených hornin bude nižší než u zdravé horniny. Bláha (2017) také uvádí že existuje vztah mezi zdánlivým odporem hornin a horizontálním napětím. Dále lze očekávat na smykové ploše pokles rychlosti šíření seismických vln. Jelikož na napětí v tlaku závisí i rychlosti šíření podélných seismických vln (s rostoucím napětím úměrně roste i rychlost), lze očekávat pozvolný nárůst rychlosti šíření vln s hloubkou. Ta ale závisí také na vlhkosti zeminy, kdy s nárůstem vlhkosti rychlost klesá. Také dochází k poklesu objemové hmotnosti, až v řádu desetin gramu na krychlový centimetr (Bláha, 2017). Magnetická susceptibilita běžných slínovců v oblasti Českém středohoří je obvykle velmi nízká. Pokud však došlo k promísení hmot s terciárními vulkanity, hodnoty magnetické susceptibility rychle stoupají.

Zajímavé pozorování bylo uveřejněno na konferenci Svahové deformace a pseudokras 2018, kde byly prezentovány výsledky měření pomocí termokamery na oblasti sesuvu. Toto měření ukázalo, že v období na konci podzimu z puklin na sesuvu uniká teplý vzduch, který se v nich nahromadil během letních měsíců. Tento jev lze využít k lepšímu vymezení rozlohy sesuvu. Tato metoda se pro svou nenáročnost v kombinaci s bezpilotními létajícími prostředky nejspíše dočká budoucího rozšíření v praxi (Frodella et al., 2017).

4. Stručný popis použitých karotážních metod

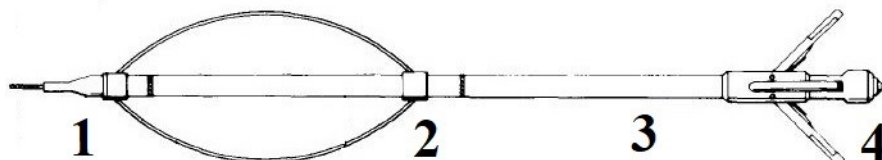
4.1 Kavernometrie

Kavernometrie je metoda měřící průměr vrtu. Existují různá konstrukční řešení, princip je však vždy obdobný. Sonda má jedno či několik mechanických ramen (bod 4 na obrázku č. 4), které se v požadované hloubce otevře a zůstane rozevřené díky přitlačné pružině. Dále se zapře o stěnu vrtu a sonda je tažena vzhůru. Změny ve výchylce ramen jsou měřeny potenciometrem spojeným s rameny (Mareš, 1990). Znalost hodnoty průměru vrtu v dané hloubce je důležitá mimo jiné pro výpočty a opravy veličin vypočtených z dalších karotážních metod, jako je například hustotní karotáž gama-gama. Proto se vyrábí i kombinované sondy, kde kavernometr plní třeba také funkci přitlačování sondy ke stěně vrtu.

Varianta kavernometru s více nezávislými rameny umožní vyhodnocovat i odchylky od ideálního kruhového tvaru a nazývá se profilometrie. Více ramen rovněž znamená větší šanci zastihnoutí kaverny a možnost popsání jejího tvaru. Za tímto účelem byla vyvinuta metoda ultrazvukové profilometrie, která je popsána níže v odstavci věnovaném akustickému televizoru.

Výsledky kavernometrických měření mohou poukázat na úseky ve vrtu, kde jsou méně soudržné horniny či výraznější tektonické porušení. Využívá se také ke kontrole technického vstrojení vrtu, kdy může odhalit např. akumulace na stěně vrtu, přetržené pažení či

přechody v průměrech vrtání – protože zejména u starších vrtů se lze setkat s tím, že se zachovala nekompletní dokumentace, či chybí úplně.



Obr. 4: Schéma kavernometru. 1 – spojka s karotážním kabelem, 2-odnímatelná pružina centrující sondu ve vrtu, 3 – tělo sondy, 4-ramena kavernometru. Převzato ze Serra, 1984, upraveno.

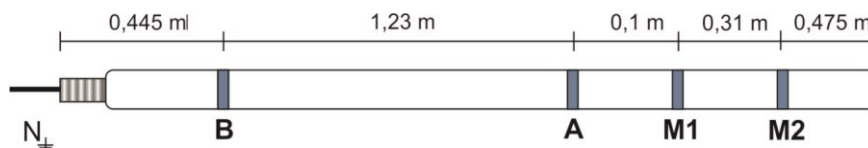
4.2 Inklinometrie

Metoda popisující prostorový průběh vrtu se nazývá inklinometrií. Principem metody je (obvykle spojitě) měření prostorové orientace sondy v dané hloubce. Toho se docílí měřením úklonu sondy společně s měřením směru úklonu sondy (obvykle vzhledem k severu).

Měření orientace ve vrtu se dá realizovat mnoha způsoby. Mareš (1990) popisuje použití kyvného závaží spojeného s potenciometrem. Dále je možností použít tříoskový akcelerometr nebo zařízení na principu fotoinklinometru. Také se objevují zařízení vybavené gyroskopy, magnetometry či lze použít elektronické čipy typu MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems). Z praxe se ukazuje, že s magnetometrickým měřením jsou problémy v úsecích zapažených kovovou pažnicí a při použití gyroskopů je problémem jejich mechanická náchylnost k poškození od nárazů a vibrací. Při interpretaci naměřených výsledků by náhlé změny v úklonu vrtu měly podnítit detailnější průzkum daného úseku, jelikož mohou ukazovat na změnu v litologii či tektonice.

4.3 Odporová karotáž

Odporová karotáž je obdobou odporových měření v povrchové geofyzice uzpůsobenou pro podmínky měření ve vrtu. Měříme zde měrný odpor hornin podél vrtu. Při námi provedených měřeních byla použita varianta odporové karotáže jednoduchou sondou Ra_p , kde do vrtu spouštíme 3 elektrody a poslední čtvrtá je umístěna na povrchu ve vhodné vzdálenosti od zhlaví vrtu (cca 5 m) ve formě zemního kolíku (viz obrázek č. 5).



Obr. 5: Rozložení elektrod na sondě Ra_p . Dvě elektrody M umožňují současně měřit na dvou kanálech s různou konstantou uspořádání (vzdálenost \overline{AM} je buďto 0,1 nebo 0,41 m)

Zdánlivý měrný odpor Ra se vypočte podle vzorečku $Ra = k \frac{\Delta V}{I}$, kde ΔV je napětí mezi elektrodami M a N , I je konstantní proud elektrodami A a B a k vyjadřuje konstantu uspořádání elektrod (která je neměnná pro danou sondu) a můžeme ji vypočítat jako $k = 4\pi \overline{AM} \cdot \overline{BM} / \overline{AB}$ (Mareš, 1990).

Co se týká hloubkového dosahu metody, Pirson, 1966 uvádí, že rádius hypotetické koule, která má na křivku stejný vliv jako zbylé hmoty vně koule, je přibližně roven dvojnásobku rozestupu elektrod (elektrod \overline{AM}). Použití metody je podmíněno schopností zavést galvanicky proud do horninového prostředí – to znamená přítomnost výplachu a vrt nesmí být zapažen kovovým či plným plastovým pažením. Dále mohou měření rušit vnější jevy, které vedou ke vzniku dostatečně silných bludných proudů v zemi. Pirson (1966) zmiňuje

magnetické bouře v severských oblastech a možné projevy lidské činnosti.

4.4 Fotometrie

Fotometrie slouží k měření míry zákalu kapaliny. Princip měření spočívá ve využití sondy osazené zdrojem světla a naproti kterému je umístěna fotodioda. V prostoru mezi zdrojem světla a fotodiodou volně proudí kapalina vyplňující vrt. Intenzita světelného toku dopadajícího na fotodiodu je závislá na průzračnosti kapaliny. Zjištění této závislosti se provede kalibrací v roztocích o různých koncentracích zakalující látky či barviva (Mareš, 1990). Touto metodou se obvykle zahajuje měření, protože každý průchod sondy zvrší nějaký sediment usazený na stěnách vrtu. Fotometrie může ukázat na zonalitu vod ve vrtu, nebo být použita pro metodu ředění označené kapaliny.

4.5 Termometrie

Termometrie je metoda měřící teplotu kapaliny ve vrtu s cílem odhalit anomálie způsobené litologií, přítoky a prouděním kapalin a plynů do vrtu, cementem v zapažnicovém prostoru atd. Údaje o teplotě výplachu ve vrtu jsou důležité také pro opravy měření některých teplotně závislých metod. Metodou se měří buďto přímo teplota kapaliny (termometrem), nebo se měří přírůstek teploty na určité vzdálenosti (diferenciálním termometrem). Principem metody je měření změn elektrického odporu na teplotně citlivé součástce – termistoru zapojeného do tzv. Wheatstonova můstku (Pirson, 1966). Vhodný termistor musí splňovat požadavky na dostatečnou přesnost měření a dostatečně rychlou odezvu na teplotní změny.

4.6 Rezistivimetrie

Tato metoda má velký význam při zjišťování hydrodynamiky podzemních vod. Zde měřený parametr je měrný elektrický odpor kapaliny vyplňující vrt. Princip metody je obdobný jako u odporové karotáže – na těle sondy jsou umístěny proudové a měřící elektrody ve vhodném uspořádání, pouze s tím rozdílem, že rozstup elektrod je natolik krátký, aby byl vyloučen vliv okolních hornin. V našem případě se jednalo o čtyři elektrody v uspořádání A-M-N-B (tedy proud je zaváděn do krajních dvou elektrod) s rovnoměrnými rozestupy cca 1 cm. Elektrody jsou také umístěny v kovovém ochranném koši, který musí umožnit volné proudění kapaliny kolem elektrod a zároveň odstínit jakýkoliv případný vliv hornin. Další jeho funkcí je mechanická ochrana elektrod, které jsou často z drahých kovů (např. platiny). Měrný odpor kapaliny se spočte stejně jako u odporové karotáže vzorcem $R = k \frac{\Delta V}{I}$, kde konstanta uspořádání k je stanovena kalibrací v roztocích o známém měrném odporu (Mareš, 1990).

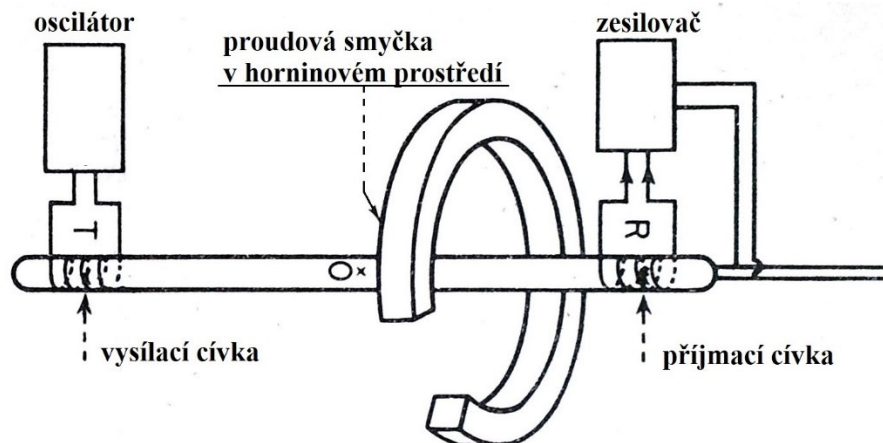
4.7 Metoda ředění označené kapaliny a metoda konstantního čerpání označené kapaliny

K posouzení hydrodynamiky ve vrtu se používá sledování pohybu označené kapaliny. K označení se používá nejčastěji rozpuštění soli do kapaliny ve vrtu, čímž se zvýší konduktivita. Sůl volíme proto, že ji lze relativně snadno aplikovat do vrtu, lze ji pořídit za poměrně nízké ceny a je v obvykle používaných množstvích prakticky neškodná vůči životnímu prostředí. Spotřebované množství závisí na délce vrtu, jeho průměru a množství rozpuštěných látek ve vodě vyplňující vrt (dle mého odhadu činí spotřeba soli obecně první jednotky kg na 10 m vodního sloupce ve vrtu o průměru kolem 100 mm). Pohyb vody se pak sleduje opakovaným proměřením vodního sloupce konduktometrem. Zvýšení musí být natolik výrazné, aby byl jasný a měřitelný kontrast mezi kapalinou v přírodním stavu a kapalinou po osolení (měrný elektrický odpor kapaliny by měl poklesnout zhruba na $\frac{1}{4}$ původní hodnoty). Někdy je ovšem v přírodním stavu kapalina

již natolik vodivá, že další nasolování je neefektivní. Potom je možností provést nálev méně vodivé kapaliny (kterou však může být v terénu obtížné zajistit v dostatečném množství), nebo lze použít k označení vhodné barvivo a sledovat pohyb fotometrickou sondou. Jakmile je kapalina ve vrtu označená, provádí se ve vhodně zvolených časových intervalech záměry a sleduje se rychlost a směr pohybu proudění za přírodních podmínek. To se nazývá metodou ředění označené kapaliny. V případě, že se ve vrtu uměle sníží či zvýší hladina, tak hydrostatický tlak v horninovém prostředí bude rozdílný od toho ve vrtu a vznikne proudění ve směru od oblasti vyššího tlaku k nižšímu. Opět se sleduje rychlost a směr pohybu označené kapaliny pomocí opakovaných měření rezistivimetrem. V případě čerpání vody z vrtu se v něm sníží hladina, hydrostatický tlak v horninovém prostředí převáží nad tím ve vrtu a přítoky se zvýrazní. To je nazýváno metodou čerpání označené kapaliny. Těmito metodami lze posoudit místa a vydatnosti přítoků do vrtu, směr a rychlost proudění v něm, propustnost horninového prostředí v místě daného přítoku a také salinitu vody z daného přítoku (Tsang a Doughty, 2003).

4.8 Indukční karotáž

V případě, že nelze ve vrtu použít odporovou karotáž (tedy není možné zavést galvanicky proud do horninového prostředí), stále lze stanovit měrný odpor hornin ρ pomocí indukčního měření. Metoda se od odporové karotáže odlišuje mimo jiné rozsahem hodnot, v kterých měří (indukční karotáž je vhodná zejména pro nízko odporové horniny). Principem metody je ve vrtu umístěná sonda se dvěma cívkami (viz obrázek č. 6). Jedna z cívek je napájena střídavým proudem a vytváří magnetický dipól (frekvence napájecího proudu je v řádu prvních desítek kHz). V horninovém prostředí vznikají vířivé elektrické proudy, jejichž osa je rovnoběžná s osou magnetického dipólu. Dále v sondě je měřicí cívka, na které vzniká napětí indukované sekundárním magnetickým polem, jehož zdrojem jsou vířivé proudy v horninovém prostředí. To je pak zesíleno a registrováno aparaturou na povrchu. Pirson (1966). Hloubkový dosah metody je závislý od vzdálenosti budící a měřicí cívky.



Obr. 6: Znárodnění sondy pro indukční karotáž s vyznačenou pozicí cívek. Převezato z Pirson (1966). Upraveno

4.9 Magnetická karotáž

Pojmem magnetická karotáž se označují dvě varianty: měření magnetické susceptibility hornin nebo měření velikosti složek zemského magnetického pole. Zde se jedná o měření magnetické susceptibility χ . Principem tohoto měření je cívka umístěná ve střídavém můstku, který je na jedné diagonále napájen střídavým proudem a na druhé je registrováno napětí. Přítomnost hmot v blízkosti cívky ovlivňuje její indukčnost a vyvolává nerovnováhu na střídavém můstku. Tato nerovnováha se projeví jako napětí na druhé diagonále. Indukčnost cívky ovlivňuje krom magnetické susceptibility také elektrická vodivost hornin, ale tyto dvě příčiny lze rozlišit, jelikož jsou vůči sobě fázově posunuty (Mareš 1990). Existuje také varianta se dvěma cívkami, ale i zde principem zůstává změna indukčnosti cívky v závislosti na magnetické susceptibilitě okolních hmot. Použití metody je omezeno pouze na vrty s nemagnetickou výstrojí.

4.10 Gama karotáž

Gama karotáž spadá pod metody jaderné karotáže a jejím účelem je měření úhrnné gama aktivity ve vrtu. Měří se přirozené pole pocházející zejména od radioaktivních izotopů prvků K, U, Th a jejich

produktů přeměn, a to jak v suché části vrtu, tak i pod hladinou kapaliny vyplňující vrt. Ani výstroj vrtu obvykle není na obtíž: Pirson (1966) uvádí, že přítomnost pažení pouze snižuje intenzitu gama záření o 30 %. Dále uvádí, že přibližně 50 % příchozího záření lze přisuzovat hornině vzdálené do cca 13 cm (5 palců), 75 % pak do 23 cm (9 palců) a 90 % přichází ze vzdálenosti do 33 cm (13 palců).

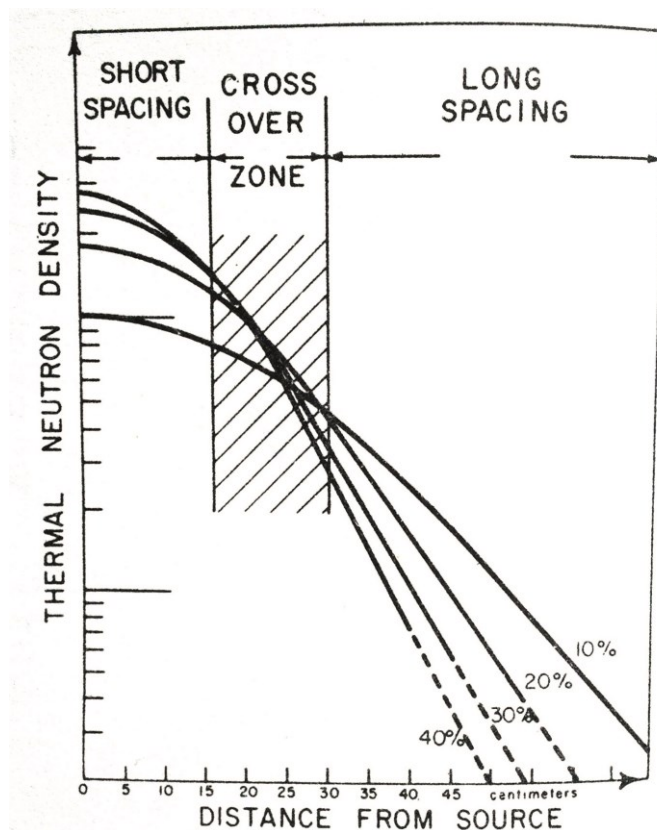
V samotné sondě najdeme některý z typů detektorů gama záření, schopný přeměnit příchozí gama kvantum na zaznamatelný elektrický impulz, se kterými se setkáváme v povrchovém radiometrickém měření, zmenšený tak, aby se vešel do sondy (často se jedná o GM trubice či scintilační krystaly). A stejně tak i v tomto případě musí být kalibrovány vhodným standardem, aby bylo možno změřený počet impulzů za čas převést na jednotky dávkového příkonu pomocí kalibračních konstant (Mareš, 1990). Metoda se hodí, mimo jiné, pro litologické vyčleňování vrstev a stanovení jílovitosti ve vrtu.

4.11 Hustotní karotáž

Metoda gama gama karotáže v hustotní variantě (GGK-H) slouží jednak ke stanovení měrné objemové hmotnosti hornin a jednak jako metoda k výpočtu porozity. Princip měření, jak jej popisuje Pirson (1966), je ten, že v sondě je umístěn zdroj gama kvant (v případě našeho měření se jedná o uzavřený radioaktivní zářič obsahující ^{137}Cs s aktivitou 3,7 GBq), který otvorem ve stínění vyzařuje na stěnu vrtu kolimovaný paprsek gama kvant. V hornině poté dochází k interakci s hmotou (především ke Comptonovu rozptylu) a zpět je vysíláno měřitelné odražené záření. Intenzita odraženého záření odpovídá exponenciální funkci hustoty dané horniny. Samotné měření odraženého záření je obdobné jako v případě gama karotáže. Maximální hloubkový dosah odraženého záření je udáván 15,2 cm (6 palců), s tím že většina odraženého záření přichází ze vzdálenosti 7,5 cm (3 palce). Pro zlepšení geometrie zdroj - detektor bývá sonda vybavena přítlačným ramenem, které po rozevření tiskne sondu ke stěně vrtu, a často zároveň měří průměr vrtu, který je třeba znát při výpočtu samotné hustoty hornin z naměřených impulzů. Maximální rozlišovací schopnost metody stanovuje Mareš (1990), na $10^{-2} \text{ g cm}^{-3}$.

4.12 Neutronová karotáž

Metoda byla použita ve variantě NNK-T, tedy neutron neutron karotáž při měření hustoty toku tepelných neutronů. Principem metody je, že máme zdroj rychlých neutronů (zde použit uzavřený radioaktivní zářič obsahující $^{241}\text{Am-Be}$ o aktivitě 111 GBq) a v dané vzdálenosti (v tomto případě cca 40 cm) od zdroje se nachází detektor pro měření hustoty zpomalených neutronů (Mareš, 1990). Tato hustota je úměrná vlastnostem prostředí – hlavně obsahu prvků s vysokým účinným průřezem pro zpomalení neutronů, z nichž nejvýznamnější je vodík. Nejsou-li v daném místě ve vrtu přítomny jiné prvky s vysokým účinným průřezem pohlcení, lze přisuzovat za hlavní pokles hustoty tepelných neutronů přítomnost vodíku obsaženého v kapalině vyplňující pórový prostor nebo prostor vrtu. Pokud ale hornina obsahuje minerály s vázanou vodou v krystalové mřížce (jako například jíl nebo sádrovec), je třeba toto zohlednit a spočítat opravu na jílovitost. Teprve po případné opravě je možno vypočítat pórovitost vrstev, jinak by vypočtené hodnoty byly silně nadhodnocené. Hloubkový dosah v hornině je v řádu desítek centimetrů - závisí totiž na průměru vrtu a pórovitosti dané vrstvy (viz obrázek 7).



Obr. 7: Graf popisující pokles hustoty tepelných neutronů (na ose y) se vzdáleností od zdroje (na ose x) pro případy prostředí s rozdílnou porozitou. Převzato z Pirson (1966).

4.13 Akustický televizor

Tato metoda je v podstatě modernizovaná verze metody ultrazvukové profilometrie, jak ji popisuje Mareš (1990), a slouží k měření tvaru vrtu v řezu kolmém na osu vrtu zároveň s měřením amplitudy odrazu. Principem je vysílání elastických kmitů z otočné hlavičky sondy, směřovaných ke stěně vrtu. Zároveň se měří čas od vyslání kmitu do okamžiku zaznamenání odraženého kmitu od stěny vrtu. Pokud známe s dostatečnou přesností rychlost šíření elastických kmitů v kapalině vyplňující vrt, lze vypočítat dle vzorečku $dráha = rychlost \times čas$ vzdálenost mezi stěnou vrtu a snímačem sondy. A díky otáčení zdroje kmitů s přijímačem, získáváme informaci o tvaru vrtu v dané hloubce ve 360°. Přístroje jsou zároveň schopny zaznamenávat amplitudu

přicházejících odrazů, což poskytuje informaci o útlumu elastických vln v daném místě. Tato metoda je schopná zaznamenat rozpukání hornin a velmi se hodí k posouzení převládajícího směru a úklonu puklin, jejich rozevření a četnosti. Teoreticky je také možné z tvaru kaveren posoudit směry hlavních a vedlejších napětí v horninovém masivu (S_{Hmax} a S_{Hmin}).

Při měření lze nastavit, že za příchod odražené vlny bude považován až odraz druhý a odraz od pažnice bude ignorován. Tím je sonda schopná i měření v zapažnicovém prostoru (ovšem jen při použití PVC pažnic, které nepůsobí takový útlum amplitudy jako kovové a nevadí při měření orientace sondy pomocí magnetometru). Použití metody je podmíněno přítomností kapaliny ve vrtu. Zákal kapaliny a částice ve vznosu nejsou překážkou při měření, vzduchové kapsy a bublinky plynu však ano.

V případě provedeného měření byl použit akustický televizor lucemburské firmy ALT nesoucí označení ABI40. Rychlost měření deklarovaná výrobcem je až 8 m/min (Advanced Logic Technology official website). Akustický senzor pracuje na frekvenci 1.2 MHz v hlavici rotující rychlostí 35 otáček za sekundu. Rozlišovací schopnost dle technických specifikací je 1.5 mm horizontálně a 4 mm vertikálně. Orientace sondy se zjišťuje třísložkovým magnetometrem a třísložkovým akcelerometrem, které měří s přesností 0.5° pro inklinaci a 1.2° pro azimut.

4.14 Vlnová akustická karotáž

Metoda označovaná zkratkou FWS (Full Waveform Sonic) je další akustickou metodou. Používá se zejména k zjištění geomechanických parametrů horniny in situ. Také zde platí, že použití metody je podmíněno přítomností kapaliny ve vrtu.

Na samotné sondě je umístěn jeden piezoelektrický vysílač akustického signálu a tři přijímače (zde ve vzdálenostech 0,6, 0,8 a 1,0 m od vysílače). Na všech třech přijímačích se během krátkého časového okna (řádově první ms od vyslání signálu z vysílače) zaznamenává úplný vlnový obraz. Celé měření je digitálně

zaznamenáváno do počítače ve formě souboru s příponou .TFD. Již při měření je automaticky vyhledáváno první nasazení příchozí podélné vlny a vypočítáváno zpomalení akustického signálu vzájemně mezi přijímači. Popis dalších kroků zpracování (které již probíhají v příslušném softwaru) je v následující kapitole, nicméně finálním výstupem jsou vypočtené křivky rychlosti šíření příčných a podélných vln horninovým prostředím a křivky geomechanických parametrů – Poissonovo číslo, Youngův modul a smykový modul. K výpočtu těchto modulů je nutná znalost měrné objemové hmotnosti hornin v daném úseku.

Námi použitá sonda je typ FWS50 od výrobce ALT. Propagační materiál k sondě uvádí (AEGIS Instruments, 2013), že vysílač akustického signálu sondy pracuje na frekvenci 20 kHz. Minimální délka časového okna pro záznam je 2,0 μ s, maximální délka okna se odvíjí od nastavené vzorkovací frekvence – zaznamenává se totiž max. 1024 datových bodů v každém okně.

5. Interpretace karotážních měření

5.1 Kalibrace a výpočet odvozených veličin

Po naměření dat se – je-li to možné – přímo změřené hodnoty přepočítají pomocí kalibračních koeficientů na hodnoty dané fyzikální veličiny. Kalibrační koeficienty se liší pro každou sondu, protože i drobná změna v konstrukci nebo v napájení vnitřních součástek může mít vliv na velikost výstupních hodnot. Koeficienty jsou obvykle stanovovány experimentálně na vhodném modelu nebo je při měření použito vhodný kalibrační nástroj, který umožní několika bodům v záznamu přiřadit skutečnou hodnotu fyzikální veličiny. Kalibrace změřených dat byla u provedených měření z lokalit D8 a Děčín provedena u následujících metod: Gama karotáž – zaznamenaná četnost impulzů (x) je přepočtena na hodnoty přirozené gama aktivity (y) podle vzorce $y = ax^2 + bx$, kde a a b jsou kalibrační koeficienty určené kalibrací sondy etalonem

radia. Vypočtená gama aktivita je vztažena k nulovému průměru vrtu a je vyjádřena v $\mu\text{R/h}$.

Gama gama karotáž – četnost měřených impulzů (x) je přepočtena na hodnoty měrné objemové hmotnosti hornin (y) vyjádřené v g/cm^3 za použití vzorce

$$y = \left(\frac{a}{d} + b\right) \cdot \log\left(\frac{x}{x_w}\right) + c$$
. Ve vzorci je zahrnuta oprava na skutečný průměr vrtu (d). Proměnné a , b a c jsou zde příslušné kalibrační konstanty, které byly zjištěny kalibrací sondy v horninových etalonech o známé měrné objemové hmotnosti na kalibrační základně firmy Aquatest. Ta se nachází v Nučicích u Prahy. Proměnná x_w je průměrná hodnota četnosti impulzů získaná pro danou sondu z několika měření ve vodě.

Magnetická karotáž – metoda je kalibrována v terénu za použití dvou etalonů, které vyvolají výchylku odpovídající velikostem 2 a 5 bezrozměrných jednotek magnetické susceptibility. Podle nich lze měřené křivce přiřadit správný rozsah hodnot. V přílohách je u křivek napsána jednotka V (volt), jelikož je přímo zaznamenávanou veličinou výchylka napětí na měřícím obvodu s cívkou uvnitř sondy.

Kavernometrie – metoda se kalibruje v terénu pomocí speciálních kalibrátorů dodaných výrobcem, nebo vložením kavernometru do kousku pažnice o známém vnitřním průměru – je-li k dispozici. Novější kavernometry od výrobce ALT mají kalibraci uloženou v nastavení ovládacího softwaru v připojeném počítači, a proto není nutné kalibrovat před každým měřením v terénu.

Odporová karotáž – při použití vzorce $Ra = k \frac{\Delta V}{I}$ popsaného v předchozí kapitole je vidět, že pro konstantní proud I (v případě provedených měření je proud $I = 2 \text{ mA}$) bude tvar křivky zaznamenaného napětí ΔV totožný s tvarem vypočtené křivky Ra , která bude pouze násobena konstantou. Toho lze využít již při měření, kdy se pomocí vhodně umístěného předřadného odporu v měřící aparatuře uměle vytvoří výchylka odpovídající hodnotě tohoto odporu. Takto lze snadno najít měřítko pro osu hodnot již při měření.

Rezistivimetrie – k nalezení měřítka pro osu hodnot lze použít stejný postup jako u odporové karotáže. K nalezení absolutní hodnoty pro

elektrický odpor kapaliny ve vrtu se pak u hladiny odebere vzorek kalovkou a ten se přeměří digitálním laboratorním konduktometrem.

U metody *neutron neutron karotáže* není v současnosti k dispozici kalibrační model, a tudíž nejsou aktuální kalibrační koeficienty. Proto jsou provedená měření v přílohách vynesena v jednotkách cpm (tedy počtu registrovaných impulzů za minutu). Proto také nebyly provedeny výpočty pórovitostí z NNK. Nicméně z tvaru naměřené křivky stále lze vyhodnotit, kde začíná hladina podzemní vody a některé lokální anomálie.

5.2 Popis provozně používaného postupu zpracování a interpretace metod ABI a FWS

Data změřená metodami ABI a FWS se již během měření ukládají do počítače ve formě binárního souboru s příponou .TFD. Ten se poté musí otevřít a zpracovat v placeném programu WellCAD (doposud jsem k němu nenalezl funkční alternativu).

Postup zpracování dat pro metody ABI a FWS v programu WellCAD je zde popsán ve zkrácené formě a vychází z provozně používaného manuálu společnosti AQUATEST a.s. sepsaného M. Pitrákem (2011).

Metoda ABI:

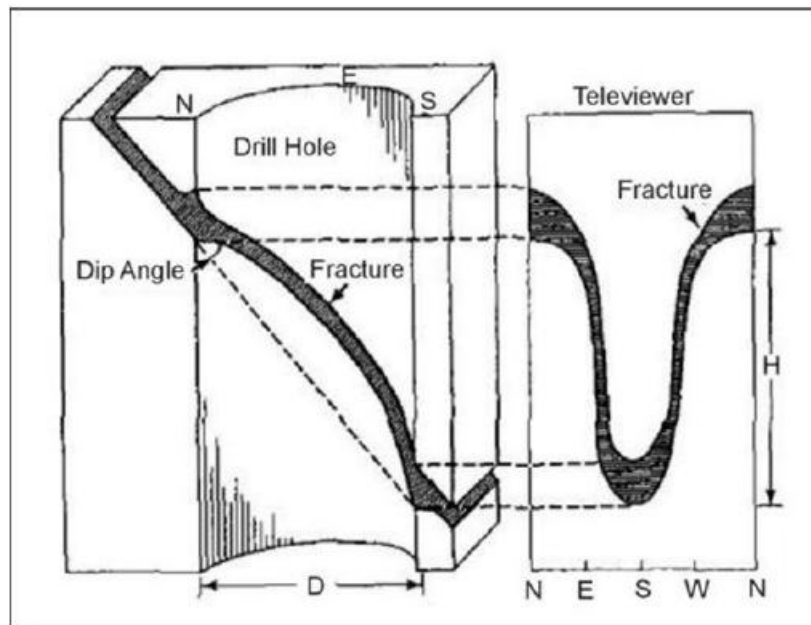
- 1) import souboru se surovými daty (ve formátu .TFD) do programu WellCAD. Po importu dat je dále nutné nastavit parametry týkající se vzhledu dokumentu (rozměry stránky, okraje, hlavička dokumentu, rozložení dokumentu atd). Také se případně volí jiná barevná škála pro zobrazení dat.
- 2) importovaný soubor .TFD obsahuje jednak samotná data měření, ale také celou řadu údajů o stavu sondy během měření. Ty jsou při základním nastavení před uživatelem skryté (lze je v případě potřeby zobrazit), avšak některé z nich vstupují do pozdějšího zpracování některých křivek. Pokud se výsledek takového výpočtu zjevně dostává mimo reálné hodnoty, je vhodné začít pátrání po příčině chyby právě u těchto parametrů.
- 3) smazání nepotřebných křivek (křivky Gravity, Magnetic Field), které jsou pro malé rozlišení prakticky neinterpretovatelné. Promazávání nepotřebných křivek je nutné provádět průběžně

během celého procesu zpracovávání dat, protože jinak jsou výsledné soubory (formátu .WCL) nepřiměřeně objemné.

- 4) interpolování chybějících datových bodů. Pokud se z jakéhokoliv důvodu neuloží data pro daný hloubkový bod, ve výsledném souboru se pak objeví bílý řádek pixelů. Tomu se předejde interpolací chybějících dat.
- 5) výpočet křivky nazvané Rock hardness. Ta byla vypočtena jako průměrná hodnota amplitud zaznamenaného odraženého signálu v každém bodě hloubky (tedy se zprůměrují řádky na záznamu amplitudy signálu). Za předpokladu, že měkčí horniny poskytují slabší odrazy než horniny tvrdší, pak lze z vypočtené křivky Rock hardness usuzovat na místa s možným porušením hornin.
- 6) opravení dat o vliv decentralizace sondy ve vrtu. Tento krok je často vhodné přeskočit, protože někdy spíše zhoršuje kvalitu záznamu. Výrobce také neuvádí, jakým přepočtem je oprava prováděna.
- 7) odstranění šumu filtrací dat. Nejvíce se osvědčila varianta filtrace High Pass filtrem s velikostí okna 0,1m x 30°. Ale obdobně jako u opravy na decentralizaci dat i tento krok je někdy vhodné přeskočit (když obrazu spíše škodí, než aby jej vylepšil).
- 8) určení průběhu rychlosti signálu ve vodě v daném vrtu. Při známém průměru vrtu v nejméně dvou místech vrtu mohou přepočíst návratový čas odraženého akustického signálu na rychlost tohoto signálu ve vodě vyplňující vrt. Pokud ji není z nějakého důvodu možné stanovit, lze nastavit pro celý vrt libovolnou konstantní hodnotu.
- 9) výpočet orientovaného poloměru vrtu. K němu je třeba znát průběh rychlosti signálu ve vodě vypočítanou v předchozím kroku.
- 10) vytvoření 3D modelu vrtného jádra, kdy se za jeho tvar bere orientovaný poloměr vrtu a ten se pak spojí s amplitudovým obrazem.
- 11) vyhledávání nehomogenit. Vytvoří se objekt Structure Log, který se překryje přes okno amplitudového obrazu. Pak je

třeba ručně vyznačit všechny nehomogenity a případně je rozřídít do několika kategorií (například podle jejich příčiny nebo toho, jak moc jsou výrazné).

- 12) opravit zdánlivou orientaci nehomogenit na skutečnou. Zdánlivá orientace nehomogenit je vztažena k ose vrtu, kdežto skutečná orientace nehomogenit je opravena tak, aby se vztahovala k vertikále.
- 13) posledním krokem je statistika nehomogenit, kdy vhodně zvoleným zobrazením dat (např. histogramy, růžicové diagramy, polární diagramy) mohou spatřit skupiny nehomogenit odpovídající různým puklinovým systémům.



Obr. 8: Příklad pukliny protínající vrt pod daným úhlem (vlevo) a její zobrazení na záznamu metody ABI (vpravo). Převzato z *Application of Geophysical Methods to Highway Related Problems* (2003).

Metoda FWS:

- 1) Prvním krokem je opět import dat do programu WellCAD a následná úprava rozložení, rozměrů a použitých barevných škál v daném dokumentu.
Po načtení se objeví data odpovídající jednotlivým přijímačům

na sondě (3 přijímače – RX1, RX2 a RX3). Data pro každý přijímač jsou rozdělena na 2 části. První obsahuje záznam signálu v čase 0 – 1200 μ s, druhý pak 1200 až 2750 μ s. Prakticky veškerý užitečný signál se nachází v prvním časovém úseku 0-1200 μ s.

- 2) Dále se provede koherenční analýza obrazů ze všech tří přijímačů. Ta je v programu prováděna procesem nazvaným *Semblance*. Jde de facto o hledání hodochrony registrované vlny (je jedno, jaký je její původ). Kvůli relativně malé vzdálenosti přijímačů (jsou rozmístěny 20 cm od sebe) se veškeré hodochrony považují za přímky a získané zdánlivé rychlosti za rychlosti velmi blízké skutečným. Výsledkem tohoto kroku je graf nazvaný *Velocity Analysis*.
- 3) Po provedení koherenční analýzy se ve výsledku této operace hledají křivky po příčné a podélné vlny. To je prováděno automaticky pomocí algoritmu *Standard Treshold Method*, nebo *Advanced Treshold Method*. Po provedení tohoto kroku je však ještě nutno provést opravu, aby byly křivky vztaženy k maximu (peaku) dané vlny. Tím získáme hledané křivky pomalosti vln (námi označované jako *dt_shear-max* a *dt_comp-max*). Někdy je také nutno u výsledných křivek ručně opravit místa, kde vyhledávací algoritmus přskočil fázi.
- 4) Posledním krokem je přepočítání křivek pomalosti na křivky rychlosti šíření vln. Také se provádí výpočet geomechanických parametrů – Poissonova čísla, smykového modulu a Youngova modulu. Pro tento výpočet je nutné do programu importovat křivku měrné objemové hmotnosti hornin. Geomechanické parametry jsou vypočítávány pomocí následujících vzorců:

$$\nu = \frac{1}{2} \left(\frac{\left(\frac{dts}{dtp}\right)^2 - 2}{\left(\frac{dts}{dtp}\right)^2 - 1} \right) = \frac{Vp^2 - 2Vs^2}{2(Vp^2 - Vs^2)}$$

kde ν = Poissonovo číslo; Vp = rychlost šíření podélných vln; Vs = rychlost šíření příčných vln; dtp = pomalost podélných vln; dts = pomalost příčných vln (Bláha, Müller a Horský, 2009)

$$G = \frac{\sigma}{dts^2}$$

kde G = smykový modul; σ = měrná objemová hmotnost a dts = pomalost příčných vln (Ellis, 2007)

$$E = 2 G * (\nu + 1)$$

kde E = Youngův modul pružnosti; G = smykový modul a ν = Poissonovo číslo

5.3 Vliv vrtu a jeho konstrukce na karotážní měření

Samotná přítomnost vrtu je pro karotáž stěžejní, avšak svými vlastnostmi vrt někdy může zásadně ovlivnit měřené hodnoty u některých metod. Je proto třeba určit, kterých parametrů se to konkrétně týká, a pokud lze, tak podniknout řádné opravy.

V případě **odporové karotáže** klesá schopnost rozlišení anomálií s větším průměrem (jsou „zhlazovány“). Oprava na průměr vrtu se dá provést pomocí nomogramu. Podobný vliv má salinita výplachu (kdy vysoká salinita znamená i vysokou vodivost), která může anomálie zhladit natolik, že se ztrácí veškerá užitečná informace. Dále, když sonda přijde do kontaktu s kalem na dně vrtu, můžeme registrovat na křivce anomálii: vodivý kal způsobí vysoké čtení, a obráceně (Pirson, 1966). Metodu nelze použít v suché části vrtu a v části vystrojeném kovovým pažením. Pro ostatní materiály výstroje (plast, překližka, kamenina) ji lze použít v perforovaných úsecích (nemá však smysl v úsecích kameninového pažení, kdy kapalina do vrtu přitéká pouze dilatačními spárami mezi jednotlivými kusy pažnic).

Pro **kavernometrii** může být někdy limitující úklon vrtu, kdy se v příliš ukloněném vrtu sonda začne pokládat a měřící rameno je tak stlačováno navíc vlastní vahou sondy (tento jev je výraznější při použití delších ramen, které mají lepší páku). To pak vede k nesprávným výsledkům. Při měření v zapažených vrtech, kde byly jednotlivé pažnice svařovány dohromady, lze často pozorovat sváry vystupující dovnitř vrtu.

U **indukční karotáže** je snaha řešit vliv vrtu fokusací dalšími cívkami (parametry vrtu ovlivňující měření jsou zde zejména průměr vrtu a mocnost litologických vrstev). To také pomáhá snížit vliv sousedních vrstev a vliv kapaliny s výrazně jinou salinitou přitékající do vrtu (Pirson, 1966). Nad hladinou podzemní vody lze často pozorovat změnu v průběhu křivky. Ta je dána rozdílnou měrnou elektrickou vodivostí suché horniny oproti hornině nasycené. U měření **magnetické susceptibility** je také přítomen jistý vliv průměru vrtu a mocností vrstev. Obě metody nelze použít v kovové výstroji vrtu (která může za jistých podmínek dokonce trvale poškodit cívku indukční sondy). Přítomnost perforace zde nemá vliv na použití metod.

U **radiometrických** metod je měření obecně ovlivněno průměrem vrtu a částečně také jakýmkoliv materiálem, který je mezi zdrojem záření a detektorem (zejména pažení a obsyp), ve kterém se část záření pohltí. Samotná přítomnost pažení (z jakéhokoliv materiálu) není překážkou pro měření. Je nutné ho však zohlednit během interpretace (včetně materiálu použitého k výrobě pažení). Přítomnost perforace zde nehraje roli. Schlumberger (1989), uvádí, že v některých případech, kdy je příliš vysoká objemová hmotnost výplachu, je nutné zavádět korekce pomocí nomogramů. Dále zmiňuje, že pro velké průměry vrtů (nad 10 palců, tj. cca 25 cm) by se měla zavádět oprava pro výpočet správné objemové hmotnosti hornin.

Akustické metody jsou také závislé na průměru vrtu (zejména metody ABI a FWS, které je nutno ve vrtu vycentrovat), na typu kapaliny vyplňující vrt (resp. na rychlosti šíření akustických vln v ní) a na výstroji vrtu. Nejlepší výsledky z měření jsou v nezapaženém vrtu. PVC pažení kvalitu měření mírně zhoršuje, přítomnost obsypu pak toto zhoršení ještě umocňuje. Měření (za účelem stanovení puklin) přes pažnice zhotovené z dalších materiálů (kovu a kameniny) nelze provést. Kameninové pažení pohltí veškerý akustický signál, kovové pažení zas znemožní orientaci vrtného jádra. Pažení zhotovené z překližky se dnes již nepoužívá, jeho fyzikální vlastnosti se však velmi podobají PVC. Proto v něm měření realizovat lze. V případě

suchého vrtu lze měření realizovat po nálevu kapaliny do vrtu. Při tom je však nutné počítat s tím, že horninové prostředí není nasyceno a kvalita měření bude zhoršena.

6. Interpretace metod

K interpretaci výsledků ze získaných měření je nutno přistupovat uceleně. Zkoumat detaily jednotlivých měření, hledat shody u jiných metod a zároveň si udržovat povědomí o celkové situaci pro daný vrt (místní geologie, technická výstroj vrtu atd.).

Na tentýž jev bude každá metoda reagovat s jinou citlivostí, a proto je nutné přizpůsobit předpokládané situaci (a samozřejmě také cíli průzkumu) sadu použitých metod. Pokud by se vyhodnocování jednotlivých metod provádělo odděleně, výsledný zisk užitečných informací by byl mnohem nižší než u vzájemného porovnávání více metod. Například kombinací akustického televizoru, klasické karotáže a popisu jader lze sestavit vysoce přesný litologický profil a lze ji využít k rozlišení indukovaných puklin a puklin přírodního původu. Xin et al. (2013), zmiňuje, že právě puklinové systémy vytvořené tektonickými procesy nesou záznam o směrech hlavních napětí, která vedly k jejich vzniku.

Dále je (zejména u akustických metod) nutné zvážit původ zaznamenaných jevů. Například u měření metodou ABI ve vrtu HV-L66 (příloha č. 17) je ve spodní části vrtu poměrně zřetelně patrná perforace (střídání 4 úzkých sloupců světlejšího odstínu a 4 širokých tmavších). Je zajímavé, že část signálu odraženého od pažení se dostala do záznamu, přestože bylo nastaveno při měření, že má být tento časový úsek ignorován. Také jsou zde vidět (například v úseku 12,4 m – 14,2) podlouhlé vertikálně orientované „stíny“ nejasného původu. Možnou příčinou je decentralizace sondy vůči stěně vrtu (nikoliv však nutně vůči pažnici) nebo sevření stěn vrtu kolem pažení v daném místě. Každopádně je nutné rozpoznat, že nejde přímo o geologickou příčinu a takové jevy z dalšího zpracování vynechat. Posouzení kvality záznamu akustického televizoru je poměrně obtížné, protože závisí na kombinaci vrtného procesu, použitého

záznamového vybavení a geologické situace (Massiot, McNamara, Lewis, 2014). U měření ve vrtu HV-L66 byly zaznamenané pukliny rozděleny (dle subjektivního vjemu interpretující osoby) do tří skupin (jsou barevně odlišeny). Tyto skupiny vyjadřují především intenzitu registrovaných puklin, ale lze je také považovat za indikaci spolehlivosti. U tenkých a málo zřetelných puklin je někdy jejich část doslova nedohledatelná v šumu, a i přese všechnu snahu je tu stále možnost, že puklina nebyla vyznačena přesně. Proto skutečný tvar a rozměry se mohou od skutečnosti nějak lišit.

6.1 Stanovení litologického profilu

Pro další interpretaci změřených dat je stěžejní znalost litologického profilu ve vrtu. K jeho sestavení je velmi nápomocný popis vrtných jader od geologa (je-li k dispozici). Dále je nutné dohledat v příslušné literatuře, jaké horniny lze v daném místě očekávat a jaký rozsah hodnot u fyzikálních parametrů je pro ně typický.

Například pro oblast Českého středohoří u lokality D8 lze očekávat výskyt slínovců, kamenito hlinitých sutí a vulkanitů. Dále zjistíme, že slínovce mají nižší hodnoty na indukční karotáži, vyšší hodnoty přirozené gama aktivity, nízkou magnetickou susceptibilitu a hustota se pohybuje kolem 2.2–2.3 g/cm³. Dále kamenito hlinité sutě mají nízkou gama aktivitu, vyšší hodnoty na křivce NNK (mají menší schopnost zadržovat vodu), vysokou magnetickou susceptibilitu (obsah vulkanitů) a nízké hodnoty na indukční karotáži. Hustota by měla být o něco málo vyšší – kolem 2,3 g/cm³. Vulkanity by měly mít vyšší gama aktivitu, vysokou magnetickou susceptibilitu, nízké hodnoty na indukční karotáži. Jíly provázejí vysoké hodnoty na indukční karotáži, vysoká gama aktivita a nižší magnetická susceptibilita.

Dopředu nelze jednoznačně říci, jak budou vypadat fyzikální parametry vrstev vzniklých promísením dvou různých horninových typů (a jejich poměru). Například na téže lokalitě u D8 je hojný výskyt jílu s příměsí vulkanitů.

Při interpretaci litologie byly využívány především metody gama karotáže, neutron-neutron karotáže, odporové karotáže (v případě lokality Děčín) a indukční karotáže. Velmi důležitá byla v těchto horninách magnetická karotáž.

Litologický profil byl sestaven i se zřetelem na geologický popis vrtného jádra poskytnutý geologem.

Další možností sestavení litologického profilu vrtu by bylo použití k tomu určeného softwaru, využívajícího vhodnou metodu pro daný typ vrtu.

Možnosti automatizace procesu hledání litologických vrstev jsou při dnešní úrovni výpočetní techniky poměrně hojné. Za zmínku stojí třeba použití metody neuronových sítí k identifikování litologie (Maiti, Tiwari, Kümpel, 2007), metoda fraktálové analýzy (Aliouane, Ouadfeul a Boudell, 2012) nebo vzájemné korelace s využitím dat ze sousedních vrtů (Partovi, Sadeghnejad, 2017). Takové metody mají jistě nesmírný potenciál, jsou poměrně robustní, ale také poměrně obtížné na implementování. A při uvážení faktu, že výsledky automatického procesu stejně budou muset být ověřeny porovnáním s interpretací klasickým způsobem, se v současnosti zdají být (vzhledem k získaným výsledkům) neúměrně náročné. Do budoucna by však bylo jistě přínosné ověřit jejich možnosti při využití v českých podmínkách s rozmanitou geologickou stavbou.

6.2 Vyhodnocení hydrogeologických parametrů

Rezistivimetrická měření metodou ředění označené kapaliny (pro sledování přírodního proudění vody ve vrtu) a metodou konstantního čerpání mohou určit propustné polohy (pukliny) a objasnit hydrogeologický režim ve vrtu. Rovněž mohou určit smykové plochy, na které bývá vázáno zvodnění. Ze změn na rezistivimetrických křivkách registrovaných během čerpání (či nálevu) lze přesně zjistit všechny propustné polohy ve vrtu, i pokud se za přírodních podmínek neprojeví. Pro další vyhodnocování případných smykových ploch není vydatnost přítoků stěžejní.

6.3 Určení smykových ploch

Kromě akustického televizoru (a jemu podobných specializovaných metod) není prakticky žádná metoda schopná detekovat puklinu jako takovou z jediné křivky. Vždy je zapotřebí kombinace alespoň několika metod nebo v čase opakovaných měření. Pokud se bude za horninové prostředí uvažovat homogenní formace s konstantním průměrem vrtu, místo porušené puklinami se projeví jako anomálie na zaznamenaných křivkách. Otevřené pukliny se projevují v záznamech měření mnohem větší anomálií než pukliny vyplněné, které mohou být i nerozlišitelné v rámci šumu. Pokud je puklina zvodnělá, je její nalezení snazší. Golf-Racht (1982), uvádí, že karotážní metody jsou obecně citlivé na přítomnost vysoce propustného místa (tvořeného puklinami) v hornině s nízkou propustností. Také data o průběhu vrtání mohou ukázat na přítomnost puklin. Náhlé zvýšení rychlosti vrtání, ztráta výplachu, špatný výnos jádra a kavernování stěn vrtu indikují přítomnost porušených zón. Také přítomnost drobných lokálních minim na křivce hustotní karotáže, které se zároveň neprojeví na křivce neutronové karotáže, často ukazují na pukliny či kaverny (Laongsakul, Dürrast, 2011).

Vymezení smykových ploch vyžaduje vyhodnocení celého komplexu metod. Je také vhodné konzultovat všechna zjištění s geologem. A není nikterak vyloučené, že se výsledky z karotáže dostanou do rozporu ze závěry geologa. Také částečně proto, že stanovení místa předpokládané smykové plochy není nutně důkazem o její přítomnosti. Smykovou plochu lze předpokládat například na rozhraní sutí a jílu, které bývá provázeno zvodněním. Další indikací je nález starších hornin nasunutých na mladší vrstvy. Rizikové jsou také zóny rozpukání, zóny rozměklých hornin s vysokým útlumem akustického signálu, nebo zóny provázené zvodněním. Samozřejmě se mohou objevit další důvody k vyhodnocení konkrétního místa jako smykové plochy nebo často kombinace vícero rizik naráz. Proto je nutný co možná nejširší pohled na situaci za využití co nejvíce metod. Zkušenost ukazuje, že existují i takové smykové plochy, které se prakticky neodlišují svými fyzikálními parametry a měřením se je

nepodařilo odhalit. Stanoveny byly až z laboratorního rozboru vrtného jádra. Výsledky laboratorních zkoušek však také jednoznačně neprokáží, zda jde skutečně o smykovou plochu, nebo zda se jedná o porušení horniny z jiných příčin. Další možností je sledovat případné změny fyzikálních parametrů v čase. Bláha (2017), uvádí, že vlhkost na smykové ploše může kolísat v čase a tím se mění odezva neutron neutron karotáže. A pro situace, kdy je svahový pohyb stále aktivní, je poměrně cenným zdrojem informací dlouhodobé detailní sledování pomocí inklinovrtů.

Pro další geotechnické práce je také třeba provést posouzení stupně porušení horniny. V našem případě bylo provedeno na základě karotážních metod hustotní karotáže, neutronové karotáže, odporové karotáže a akustické karotáže.

Pro další posouzení stupně porušení horniny je možností vypočítat RQD index za použití informací o hloubce a rozevření puklin získaných akustickým televizorem.

Výpočet RQD indexu se provádí jako:
$$\frac{\text{suma délky jader nad 10cm}}{\text{celková délka jádrového úseku vrtu}} * 100$$

Kategorie porušení horniny dle RQD jsou tyto: výborná (100-90 %), dobrá (90-75 %), střední (75-50 %), nízká (50-25 %) a velmi nízká (25-0 %)

7. Výsledky měření

Všechny vrty z oblasti D8 jsou zapaženy a mají totožný průměr 56 mm, proto v těchto vrtech nebylo třeba provádět kavernometrii. Materiál použitý k výstrojení vrtu je plast. Pažnice jsou plné, bez perforací, spojené nýty. Pro takovou konstrukci vrtu nemá smysl použití metod odporové karotáže, termometrie, fotometrie a rezistivimetrie. Všechny hloubky jsou počítány od povrchu terénu v místě vrtu.

Při měření jsou sondy GK, IK, GKG, MK a NNK napájeny z impulzního zdroje. Přímo registrujeme zase jenom počet impulzů, který je úměrný hledané veličině. Přepočítání se provádí buďto přes

převodní koeficient získaný kalibrací (případ GK a GGK) nebo použitím kalibračního nástroje přímo v terénu (případ MK a kavernometrie). Některé křivky však je obtížné přepočítat přímo na absolutní hodnoty dané fyzikální veličiny, a proto jsou většinou ponechány v impulzech a vyhodnocovány jako relativní (případ IK a NNK). Protože v oblasti dálnice D8 jsou hojně rozšířeny jíly a jílovité horniny, správně by měla být provedena oprava na jílovitost. Zde se však objevil problém s konstrukcí vrtů. Ty jsou uzavřené, bez perforace a v podstatě izolovány od podzemní vody v prostředí. Je tedy možné, že někde je hladina ve vrtu na rozdílné úrovni od hladiny v prostředí (příkladem je vrt IN23p). Dalším rušivým elementem může být, že vrty byly utěsněny jílovito-cementovou směsí, která nemusela dokonale přilnout v celé délce vrtu.

Struktura grafických příloh k měřením ve vrtech je následující:

- Přílohy 2 až 14 popisují měření v inklinovrtech. Obsahují osu hloubek (1. sloupec), grafické znázornění stanoveného litologického profilu (2. sloupec), slovní popis stanoveného litologického profilu (3. sloupec), křivky samotných karotážních měření - gama karotáž, neutron neutron karotáž, indukční karotáž (se vzdáleností cívek 50 a 80 cm), magnetická karotáž (v bezrozměrných jednotkách magnetické susceptibility), gama gama karotáž a (bylo-li možno provést) hodnoty měrné objemové hmotnosti vypočtené z gama gama karotáže v g/cm^3 .
- Příloha 15 popisuje měření ve vrtu HV-L66. Obsahuje litologický profil podle karotáže s přihlédnutím na geologický popis vrtného jádra, profil vrtu podle stupně porušení horniny, hodnoty měrné objemové hmotnosti vypočtené z gama gama karotáže, rychlosti šíření seismických vln (vypočtené z metody FWS), základní karotážní křivky a křivky "hydrokarotáže" - rezistivimetrie v aplikaci metody ředění a metody čerpání. Vyznačeny jsou přítoky a pohyb vody ve vrtu.
- Příloha 16 popisuje měření vlnové akustické karotáže ve vrtu HV-L66. Obrázek obsahuje křivky geomechanických parametrů, křivky průběhu vypočtených rychlostí podélné a

příčné vlny, kompletní vlnový obraz (v časovém okně 0-1198 μ s), a výsledek koherenční analýzy s vyznačeným příchodem podélné a příčné vlny

- Příloha 17 popisující měření akustickým televizorem ve vrtu HV-L66 má strukturu obrázku tuto:
 1. sloupec: vypočtené průměry vrtu (min, max, průměr). Na pozadí je rozvinutý, orientovaný obraz stěny vrtu (poloměru). Barevně odlišená místa jsou kaverny či nárůsty na stěně vrtu.
 2. sloupec: virtuální vrtné jádro.
 3. sloupec: rozvinutý, orientovaný obraz amplituda odrazu seismické vlny od stěny vrtu.
 4. sloupec: vyznačení puklin a jiných nehomogenit (na pozadí kopie 3. sloupce). Úklony puklin počítány vůči ose vrtu.
 5. sloupec: interpretované pukliny, úklony puklin počítány vůči vertikále. Sklon pukliny je dán pozicí značky na škále 0 až 90°, azimut sklonu je dán směrem úsečky vycházející z tohoto bodu. Ve sloupci je také křivka "rock hardness", jež nese informaci o tvrdosti horniny.
 6. sloupec: záznam o prostorové orientaci sondy (totožný s inklinometrií).
- Přílohy 18 až 20 popisují statistiku registrovaných puklin z měření akustickým televizorem za účelem odhalit dominantní směry puklinových systémů.
- Přílohy 21 a 22 zobrazují horizontální a vertikální projekci prostorového průběhu vrtu HV-L66

Ve vrtu **IN3p-B** je v hloubce 6,2 m znatelný přechod z kamenitých sutí do relativně homogenních slínovců (viz příloha č. 2). Nejlépe tento přechod popisuje křivka magnetické karotáže, která zaznamenala skokový pokles hodnot magnetické susceptibility. Je to dáno obsahem vulkanických klastů v nadložní vrstvě sutí, v kterých je vyšší obsah magnetických minerálů. Ve spodní vrstvě slínovců je patrný nárůst hodnot přirozené radioaktivity, který je způsoben jílovými minerály s obsahem draslíku. Nárůst hodnot přirozené radioaktivity je patrný už od hloubky 5 m, což je zřejmě dáno promísením rozrušených slínovců a kamenitých sutí v hloubce 5 – 6,2 m. Na obou dvou křivkách indukční karotáže je patrný jistý rozkmit hodnot ve vrstvě kamenitých

sutí, který je zřejmě způsoben registrováním jednotlivých větších balvanů vulkanitů ve vrstvě. Ve vrstvě slínovců tento rozkmit prakticky ustává a je zde téměř hladký průběh až ke dnu vrtu. Předpokládaný průběh smykové plochy v tomto vrtu je tedy v hloubce 6,2 metru, kde probíhá hranice mezi kamenitými sutěmi a vrstvou slínovců. Navíc je tento úsek zřejmě pod hladinou podzemní vody, jak je patrné z křivky NNK.

V hloubce 24,5 m je také patrná jistá anomálie, která je zřetelná zejména na křivkách magnetické karotáže a indukční karotáže. Také je v tomto místě zaznamenán drobný nárůst objemové hmotnosti hmot. To vše nasvědčuje na přítomnost kovového materiálu, zřejmě použitého při vystrojování vrtu.

Ve vrtu **IN14p** je poměrně mocná vrstva kamenohlinitých sutí s obsahem úlomků vulkanitu (viz příloha č. 3) sahající do hloubky 13,3 metru. Pod těmito sutěmi je přibližně metr mocná vrstva jílu a pak začínají opět kamenohlinité sutě. V jílech je pozorována nižší hodnota u magnetické karotáže a naopak zvýšení hodnot u indukční a gama karotáže. Kamenohlinité sutě jsou v hloubce 19,3 až 19,9 proloženy vrstvou sprašových hlín. Pod sutěmi je opět vrstva jílu. Toto opakování sutí a jílu svědčí o tom, že sem byl materiál přemístěn svahovými pohyby. Lze proto s velkou pravděpodobností říci, že ve 14,3 metrech probíhá hranice mezi hmotami akumulovanými fosilním sesuvem a jeho podložím. Na spodní hranici vrstvy jílu v hloubce 24,3 metrů je také zaznamenán pokles měrné objemové hmotnosti hornin. Ten je zřejmě způsoben malou soudržností jílu. To ale znamená, že i zde jde pravděpodobně o plochu náchylnou ke svahovým deformacím. Hluběji jsou uloženy poměrně kompaktní jílovité slínovce, u kterých pozorujeme vyšší hodnoty gama karotáže, indukční karotáže, a nižší hodnoty magnetické a neutron neutron karotáže.

Ve vrtu **IN15p** žádná smyková plocha vymezena nebyla. Do hloubky 12 m od zhlaví vrtu sahá násep provedený při stavbě tělesa dálnice. Ten se na křivce magnetické karotáže projevuje vyššími hodnotami než slínovcové podloží (příloha č. 4). Ve slínovcích je registrována o něco vyšší hodnota přirozené radioaktivity. Tyto slínovce se vyskytují

od tohoto rozhraní až ke dnu vrtu. Průběh indukční karotáže je interpretovatelný pouze na jednom z kanálů, jelikož druhý vykazoval prakticky v celém profilu vrtu hodnoty za měřitelným rozsahem. Tato interpretovatelná křivka IK80 ukazuje nižší hodnoty elektrické vodivosti ve vrstvě náspu než ve slínovcích. Pod hladinou podzemní vody se pak objevuje až ke dnu vrtu poměrně výrazné rozkmitání hodnot.

Ve vrtu **IN17p** je ve svrchní části vrtu vrstva kamenohlinitých sutí sahající až do hloubky 3,8 metru. Tyto sutě vykazují nižší hodnoty přirozené radioaktivity a vyšší hodnoty magnetické karotáže. Pod sutěmi leží mocná vrstva slínovců, opět s nižšími hodnotami na magnetické karotáži. Zajímavý je zde pokles měrné objemové hmotnosti v intervalu cca 8 až 29 metrů. Pro něj není jasné geologické vysvětlení, takže se zdá, že jeho příčina je spojená s vystrojením vrtu. Na křivce neutron neutron karotáže se ukazuje hladina podzemní vody přibližně v 11,5 metrech. Také je na ní vidět jistá anomálie na rozhraní sutí a slínovců ve 3,8 metrech. Na tomto rozhraní lze také předpokládat smykovou plochu svahového pohybu. Ve vrstvě slínovců jsou na křivkách indukční karotáže vidět jisté fluktuace od 12 do 22 metrů. Ty poměrně dobře kopírují fluktuace na křivce magnetické karotáže. Zdá se tedy, že jsou zde přítomné tenké vodivé polohy. Vysvětlením by mohly být pukliny vyplněné minerály se sloučeninami železa. Blíže dnu vrtu se nalézají ještě vrstva vulkanitů (34,2 – 34,7 metrů), které jsou velmi dobře vidět na křivce magnetické karotáže (příloha č. 5).

Vrt **IN18p** zastihnul krátce pod povrchem vrstvu spraší. Ty se projeví zejména zvýšenými hodnotami na křivkách indukční karotáže (příloha č. 6). V hloubce 2,7 metru končí spraše a začínají kamenohlinité sutě s příměsí vulkanitů. Ty pokračují až do 10,8 metrů. Projevují se nízkými hodnotami přirozené radioaktivity, nízkým čtením na indukční karotáži a vyšší hodnotou u magnetické karotáže. Na spodní hranici vrstvy začíná hladina podzemní vody. Od 10,8 metrů až ke dnu vrtu jsou jednolitě kompaktní slínovce. Ty mají klasicky snížené hodnoty na křivce magnetické karotáže, vyšší

přirozenou radioaktivitu a vyšší hodnoty na křivce indukční karotáže. Průběh smykové plochy lze předpokládat na rozhraní sutí a slínovců v hloubce 10,8 m, čemuž napovídá i zjištěné zvodnění tohoto rozhraní.

Ve vrtu **IN19p** je opět poměrně jednoduchý geologický profil (příloha č. 7). Do hloubky 2,5 m jsou zde kamenohlinité sutě, ve svrchní části vrstvy navíc s příměsí jílu. Proto má tato část zvýšené hodnoty přirozené radioaktivity. Vrstva sutí má také vyšší hodnoty magnetické karotáže a neutron neutron karotáže, takže na jejím spodním okraji je zřejmě hladina podzemní vody. Hluběji jsou až ke dnu vrtu již jen slínovce. V hloubce 2,5 až 4,2 m jsou zřejmě podrcené a zvětralé, odlišují se totiž nižšími hodnotami přirozené radioaktivity. U rozhraní slínovců a sutí lze zřejmě očekávat průběh smykové plochy. Ve vrstvě slínovců jsou místa s poměrně velkou fluktuací na indukční karotáži, a zároveň maximům těchto fluktuací odpovídají zákmity na křivce magnetické karotáže. Toto se velice výrazně objevuje v úseku 14–16 metrů, kde se magnetická karotáž dostává za měřitelný rozsah. Ale výraznou anomálii zde zaznamenala i hustotní, indukční a gama karotáž. Nebýt náhlého poklesu přirozené radioaktivity, bylo by nejjednodušší vysvětlení přítomnost utrženého vrtného nářadí. Ale takto se zdá, že příčinou je přítomnost oxidů železa na puklinách ve slínovcích.

Ve vrtu **IN20p** (příloha č. 8) byla při měření průchodnost pouze do 20 metrů. Do hloubky 5,4 metru sahá těleso náspu. Tento násep má podobné vlastnosti jako pod ním ležící vrstva kamenohlinitých sutí, liší se však vyšším čtením indukční karotáže v tělese náspu a nižšími hodnotami neutron neutron karotáže. V obou dvou vrstvách jsou však relativně vysoké hodnoty magnetické karotáže a nižší hodnoty přirozené radioaktivity. Od hloubky 12,7 metru jsou ve vrtu slínovce s nízkými hodnotami magnetické karotáže a vyšší přirozenou radioaktivitou. Mezi těmito slínovci se v hloubce 13,3 až 14,6 m objevuje vrstva jílu s příměsí vulkanického materiálu, která se projevuje zvýšením na křivce magnetické karotáže, snížením měrné objemové hmotnosti a nárůstem přirozené radioaktivity. Také jí

odpovídá kladná anomálie na křivce neutron neutron karotáže. Smykovou plochu zde lze předpokládat v hloubce 12,7 metrů na hranici kamenohlinitých sutí a slínovců.

Vrt **IN21p** (příloha č. 9) začíná vrstvou kamenohlinitých sutí s obsahem vulkanitů (1,8 – 8,4 metrů) následovaných vrstvou jílu – rovněž s příměsí vulkanitů (8,4 – 9,1 m). Tato dvojice vrstev se vzápětí znovu opakuje, což ukazuje na přítomnost smykové plochy na rozhraní v 9,1 metrech. Na spodní hranici spodní vrstvy jílu v hloubce 12,5 m lze zřejmě předpokládat ještě jednu starší smykovou plochu. Pod ní je tenká vrstva žilných vulkanitů (12,5 – 13,1 m) a hladina podzemní vody patrná z neutron neutron karotáže. Vulkanity jsou patrné podle vyšších hodnot na gama karotáži a lehce snížených hodnot indukční karotáže. Pod žilnými vulkanity je vrstva slínovců až do hloubky 15,5 metrů. Tato vrstva je následována asi metr mocnou vrstvou jílu s obsahem vulkanitů. Ta se projevuje na magnetické karotáži a drobným nárůstem přirozené radioaktivity. Jíly jsou následovány vrstvou rozložených čedičů, kde je patrný jistý pokles přirozené radioaktivity. V hloubce 17,6 – 19 metrů je nárůst hodnot na magnetické karotáži a přírodní radioaktivity, který odpovídá vrstvě alterovaných vulkanitů. Rovněž je zde zaznamenán jistý nárůst objemové hmotnosti hornin. Od hloubky 19 m až do 38,6 m leží mocná vrstva slínovců s občasnými proplásky vodivějších vrstev. U samého dna vrtu byly zastíženy vulkanity trachytového typu s nízkou vodivostí a vysokou přirozenou radioaktivitou.

Ve vrtu **IN22p** (příloha č. 10) je v úvodu vrstva vodivých jílu s příměsí vulkanitů a pod nimi jsou méně vodivé rozložené vulkanity. Od 2,3 do 7,4 metrů je ve vrtu vrstva rozdrčených slínovců, které leží nad vrstvou jílu s příměsí vulkanitů. V těch jsou změřeny vyšší hodnoty magnetické susceptibility a pokles na křivce NNK, který nasvědčuje tomu, že zde začíná hladina podzemní vody. Jíly končí v hloubce 9,4 m a pak začínají poměrně kompaktní slínovce. V těch je krom drobné anomálie ve 14 metrech poměrně klidný průběh všech měřených parametrů. Je zde vidět jisté kolísání hodnot přirozené radioaktivity, které je způsobeno změnami příměsí ve slínovcích –

některé vrstvy jsou více jílovité než jiné, některé jsou spíše prachovité. V hloubce 27,9 jsou slínovce střídány vrstvou jílu s příměsí vulkanitů, které se projeví drobným snížením měrné elektrické vodivosti a vyššími hodnotami magnetické susceptibility. Od hloubky 33,0 je až ke dnu vrtu vrstva kompaktních slínovců, které jsou však v úseku 33–35 metrů zřejmě zvětralé a podrcené. V tomto úseku totiž vidíme zvýšenou přirozenou radioaktivitu, nárůst na křivce magnetické karotáže a výrazné maximum u indukční karotáže. Proto v této porušené zóně lze očekávat smykovou plochu.

Ve vrtu **IN23p** (příloha č. 11) je do hloubky 7,2 metru vrstva kamenohlinitých sutí s nízkou gama aktivitou, nízkou elektrickou vodivostí a vysokými hodnotami u magnetické karotáže. Také u ní vychází o něco zvýšená měrná objemová hmotnost. Pod těmito sutěmi leží v hloubce 7,2 – 9,8 podrcené slínovce, které vykazují silně anomální hodnoty na metodě NNK, zvýšené hodnoty na indukční karotáži u krajů vrstvy, zvýšenou přirozenou gama aktivitu, a o něco nižší hodnoty u magnetické karotáže. Na svrchní hranici této vrstvy lze očekávat smykovou plochu. Od 9,8 metrů až na dno vrtu jsou již pouze slínovce. Ve 12 metrech je stanovena hladina podzemní vody. Občasné výkyvy na křivce gama karotáže svědčí o střídavé přítomnosti jílovité a prachovité složky ve slínovcích. Ve svrchní části této vrstvy, u hranice se zvětralou zónou, je až neobvykle vysoká hodnota magnetické susceptibility. Ta postupně do hloubky klesá.

Vrt **IN24p** (příloha č. 12) je dalším z vrtů, kde nebyla určena žádná smyková plocha. Vrt je veden skrz uměle vytvořený násep dálničního tělesa, který je ve vrtu zastížen až do hloubky 11,2 metru. Zdá se, že tento násep byl zhotoven ze dvou rozdílných materiálů, jelikož do hloubky přibližně 5 metrů se od spodní části liší prakticky ve všech sledovaných parametrech. Spodní část náspu je vlastnostmi velmi podobná vrstvě žilných vulkanitů, které je objevují níže od 11,2 m do 19,2. pod nimi leží tenčí vrstva slínovců, které od 20,0 m střídá opět žilný vulkanit s téměř totožnými vlastnostmi jako již popsany v úseku 11,2 – 19,2 m. Ten je opět střídán slínovci s tenkými vložkami vulkanitů. Profil vrtu je uzavírán vrstvou žilných vulkanitů, od

hloubky 37,5 m až ke dnu. Ve 25 metrech je zaznamenána hladina podzemní vody, od které se ve slínovcích znatelně zvyšuje elektrická vodivost, až k hranici poslední vrstvy vulkanitů. V tom samém úseku je zaznamenán pokles přirozené radioaktivity, pokles měrné objemové hmotnosti a magnetické susceptibility.

Vrt **IN25p** (příloha č. 13) je veden skrz násep dálničního tělesa, který zaznamenává až do hloubky 7,6 metru. V tomto náspu jsou mírně zvýšeny hodnoty indukční karotáže, které směrem do hloubky klesají. V podloží náspu jsou kamenohlinité sutě s příměsí kamenů vulkanitů, které sutím dávají vyšší hodnoty magnetické susceptibility. Na rozhraní těchto dvou vrstev je jistá anomálie zaznamenaná křivkami hustotní karotáže a neutron neutron karotáže, která je zřejmě negeologického původu. Ve spodní části vrstvy sutí je tenká vrstva, která má zvýšený obsah jílu. Sutě končí v hloubce 14,1 metru a přechází ve slínovce. Tento přechod je provázen razantním zvýšením elektrické vodivosti, poklesem na křivce magnetické karotáže a pozvolným nárůstem přirozené gama aktivity. Rovněž na tomto rozhraní předpokládáme smykovou plochu. V hloubce 20,0 metru jsou slínovce vystřídány vrstvou alterovaných vulkanitů, u kterých je anomální nárůst gama aktivity, magnetické susceptibility, hodnot neutron neutron karotáže a také razantní pokles na indukční karotáži a měrné objemové hmotnosti hornin. Amplituda těchto anomálií opět nasvědčuje, že příčina není geologického rázu. Od hloubky 24,6 m do 25,8 m je vrstva čedičů rozložených na charakter jílu. V nich se opět zvyšuje elektrická vodivost a objemová hmotnost hornin. Čediče jsou nahrazeny vrstvou jílu, ve kterých je vysoká elektrická vodivost, nízká magnetická susceptibilita a mírně zvýšená gama aktivita. Od hloubky 30,6 m do 39,5 m jsou ve vrtu rozložené vulkanity, které se projevují vysokou magnetickou susceptibilitou, nízkou elektrickou vodivostí a mírně sníženými hodnotami přirozené radioaktivity. Těsně nade dnem byly zřejmě zastiženy opět jíly, neboť je vidět počínající nárůst hodnot na indukční karotáži, na gama karotáži, a pokles na hodnotách magnetické karotáže.

Profil vrtu **IN26p** je geologicky rozmanitý, nicméně jej nebylo možné změřit v celé hloubce. Při měření totiž docházelo k zasekávání sond ve vrtu, a to vždy v hloubce kolem 13 m (viz příloha č. 14). Příčinou bylo buďto technické provedení, kdy zhotovitelská firma zřejmě provedla spoje pažení nesprávným způsobem a tím se v daném místě zúžil průměr vrtu, anebo zde došlo po zhotovení vrtu ke svahovému pohybu a vrt se v daném místě ohnul. Toto vysvětlení se zdá pravděpodobnější proto, že sondy indukční karotáže a magnetické karotáže, které jsou mnohem kratší než sondy ostatní, i přes mechanický odpor prošly kritickým místem a bylo jimi možné změřit vrt v celé délce.

Ve vrtu byl zastižen blízko povrchu krátký úsek spraší (mocnost zhruba 1 m), který se projevil na křivce magnetické karotáže mírným zvýšením hodnot. Pod sprašemi je vrstva kamenitých sutí s obsahem vulkanitů (1,8 až 8,1 m), která je patrná rovněž na křivce magnetické karotáže. Hluběji jsou uloženy rozložené čediče, které se projevují vyšším čtením na gama karotáži a o něco nižšími hodnotami magnetické karotáže než vrstva sutí. Na rozhraní čedičů a sutí v hloubce 8,1 m je předpokládán průběh smykové plochy. Napovídá tomu i lokální anomálie na křivkách neutron neutron karotáže a hustotní karotáže. Pod vrstvou rozložených čedičů je několik tenkých vrstev vulkanitů, které se střídají s vrstvami slínovců. Jejich rozdělení je patrné z křivek indukční karotáže, magnetické karotáže a částečně také gama karotáže. V tomto souvrství slínovců a vulkanitů leží ono kritické místo bránící průchodu sond. Zbytek vrtu byl tedy interpretován pouze podle geologického popisu vrtných jader a křivek magnetické a indukční karotáže. Ty obě ukazují poměrně hladký průběh bez větších anomálií až do hloubky 34 metrů, kde má začínat vrstva čedičů. Ta se projevuje jistým poklesem měrné elektrické vodivosti a nárůstem magnetické susceptibility. Na svrchní hranici těchto čedičů jsou zřejmě podmínky vhodné pro vznik svahových nestabilit, ale k jejich určení nejsou dostatečně průkazná data.

Děčín – vrt HV-L66

Vrt byl proveden skrze říční dno řeky Labe, od kterého se také počítají všechny hloubky. Vrt byl do hloubky 5,5 m opatřen ocelovou

ochrannou pažnicí (viz příloha č. 15). Vnitřní pažnice z PVC je do hloubky 12,3 plná, odtud až ke dnu vrtu v hloubce 19,8 m je perforována. Z toho také vyplývá, že odporová karotáž mohla být realizována jen v úseku 12,0 až 19,8 m. Vnější prostor za plnou pažnicí byl vyplněn cementací.

Do hloubky 5,1 metru byly zastiženy vrstvy říčních sedimentů (štěrky a písky s občasným výskytem kamenů). Pod tím jsou do hloubky 6,4 eluvia fylitických břidlic. A odtud až ke dnu vrtu v hloubce 20 metrů jsou již jen fylitické břidlice s různým stupněm porušení. V hloubce 10,4 m se zřejmě mění typ fylitu, jak je vidět na křivkách gama karotáže a hustotní karotáže. Typ s vyšším obsahem jílovité složky přechází na typ s vyšším obsahem vápnité složky.

Na základě metod hustotní, neutronové, odporové a akustické karotáže byl určen relativní stupeň porušení hornin (ve stupních: hornina tektonicky neporušená, hornina tektonicky slabě porušená, hornina tektonicky porušená, hornina tektonicky silně porušená a zcela rozložená hornina).

Teplota vody ve vrtu byla u říčního dna změřena na 17,0 °C, směrem ke dnu vrtu pak klesala až na 12,5 °C. Výrazná zonalita vody nebyla nalezena. Konduktivita vody u perforované části vrtu byla přibližně 360 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Po prosolení vody pomocí NaCl bylo 4 hodiny sledováno postupné ředění označené kapaliny. Ukázalo se, že ve vrtu je velmi pomalé proudění ode dna směrem vzhůru až do hloubky kolem 15 m s vydatností v řádu desítek litrů za den.

Poté bylo zahájeno čerpání označené kapaliny, s vydatností 0,36 l/s. Po ustálení hladiny byl změřen její pokles o 3,57 metru. Jako hlavní přítoky se projeví pukliny v hloubce 14,7-15 metru, další přítoky také z pukliny v hloubce 19,5 metru a v hloubce 12,85 metru. Těmito puklinami proudí prakticky veškerá voda ve vrtu. Také byl vypočten koeficient filtrace pro celý vodní sloupec ve vrtu, který činil $5,0 \cdot 10^{-6}$ m/s.

Mechanické vlastnosti hornin byly počítány z křivky gama gama karotáže (měrná objemová hmotnost hornin), a z měření akustické karotáže s plným vlnovým obrazem (rychlosti šíření podélné a příčné vlny). Nesoudržné říční štěrky mají velmi nízkou objemovou

hmotnost (u dna cca 1,4 g/cm³), která směrem do hloubky narůstá. Jistý pokles byl zaznamenán v úseku 7 až 10,4 metrů, kde se vyskytují fylity se zvýšeným obsahem jílovité složky o hmotnosti 1,75 až 1,95 g/cm³. Ale je nutné uvážit vliv cementace na vypočtené hodnoty, kdy u cementu je o něco nižší objemová hmotnost než u kompaktních hornin (když počítáme za průměrnou objemovou hmotnost zemské kůry 2,6 g/cm³) a tím pádem jsou výsledky ovlivněné. Zdravé a navětralé fylity s obsahem vápnité složky dosahují hodnot 2,4-2,65 g/cm³.

Z metody měření úplného vlnového obrazu sondou ALT FWS50 byly vypočteny rychlosti šíření podélných seismických vln v říčních sedimentech a eluviu fylitů na hodnotu přibližně 1800-1900 m/s (viz příloha č. 16). Pro zvětralé fylity rychlosti podélné vlny dosahují hodnot kolem 1900-2400 m/s, ve zdravých horninách až 4000-5100 m/s. Směrem do podloží je patrný trend nárůstu rychlostí vln s přibývajícím hloubkou. U některých puklin (např. v hloubce 12,85 m) je patrné drobné snížení vypočtených rychlostí v jejich bezprostředním okolí, zřejmě způsobené vlivem navětrání hornin v okolí pukliny. Ze zjištěných rychlostí vln a objemové hmotnosti hornin byly vypočteny následující mechanické parametry: Poissonovo číslo, Youngův modul pružnosti a smykový modul. Z nich je také patrný trend zvyšování pevnosti hornin směrem do hloubky.

Tektonické porušení hornin bylo posouzeno na základě měření akustickým televizorem (viz příloha č. 17). Záznam měření v části s kovovou pažnicí byl odstraněn. Rovněž měření v cementovaném úseku plných pažnic přineslo velmi málo informací o puklinách (cementová směs vyplnila a utěsnila otevřené pukliny). Převážná většina nalezených nehomogenit je tedy z hloubek od 12 m níže. Celkově bylo ve vrtu nalezeno 47 nehomogenit, z kterých 27 přísluší málo výrazným nehomogenitám: tenké pukliny a foliace horniny. Ta upadá směrem na SSV pod úhlem přibližně 80°. Celkem 12 případů patří středně výrazným nehomogenitám a také bylo nalezeno 8 případů velmi výrazných nehomogenit (zejména otevřených puklin). Zjištěné polohy přítoků do vrtu skrze pukliny se nachází v hloubkách 12,85 m, 15,0 m.

Některé nalezené pukliny se zdají být rozevřené, ale zřejmě jde jen o důsledek vypadání nestabilních úlomků hornin z těsného okolí puklin (jde o pukliny v hloubce 12,28 m, 12,38 m, 12,49 m, 14,7 m a 15,97 m).

Z množiny nalezených puklin byl pomocí statistiky zjištěn azimut, ke kterému pukliny nejčastěji upadají (viz příloha č. 18) a nejčastěji se vyskytující úhel, pod kterým upadají (viz příloha č. 19). Dále byly nalezené pukliny vyneseny do stereografické úhlojevné Wulfovy projekce v pólové projekci, což umožní posouzení hlavních puklinových směrů (viz příloha č. 20). Zde se ukazují dvě základní skupiny puklin – jedna skupina upadající pod úhlem cca 80° ve směru SSV (většinu této skupiny zřejmě tvoří foliace) a druhá skupina upadající pod úhlem cca 45° ve směru JV. Několik dalších puklin má směr obecného charakteru a nelze je jednoznačně zařadit. Ze seznamu hloubek stanovených puklin jsem ručně vypočetl RQD index, který ve spodním úseku vrtu (11,7 – 18,9 m) vyšel na 85,4 %, což by horninu řadilo do kategorie “dobrá“. Lze však předpokládat, že RQD index vypočtený z měření in situ bude nadhodnocovat kvalitu horniny oproti klasickému výpočtu z vrtných jader. Úklon vrtu, jak byl změřen sondou ABI40, je přibližně 3° upadající ve směru na jih (viz příloha č. 21 a 22).

8. Závěr

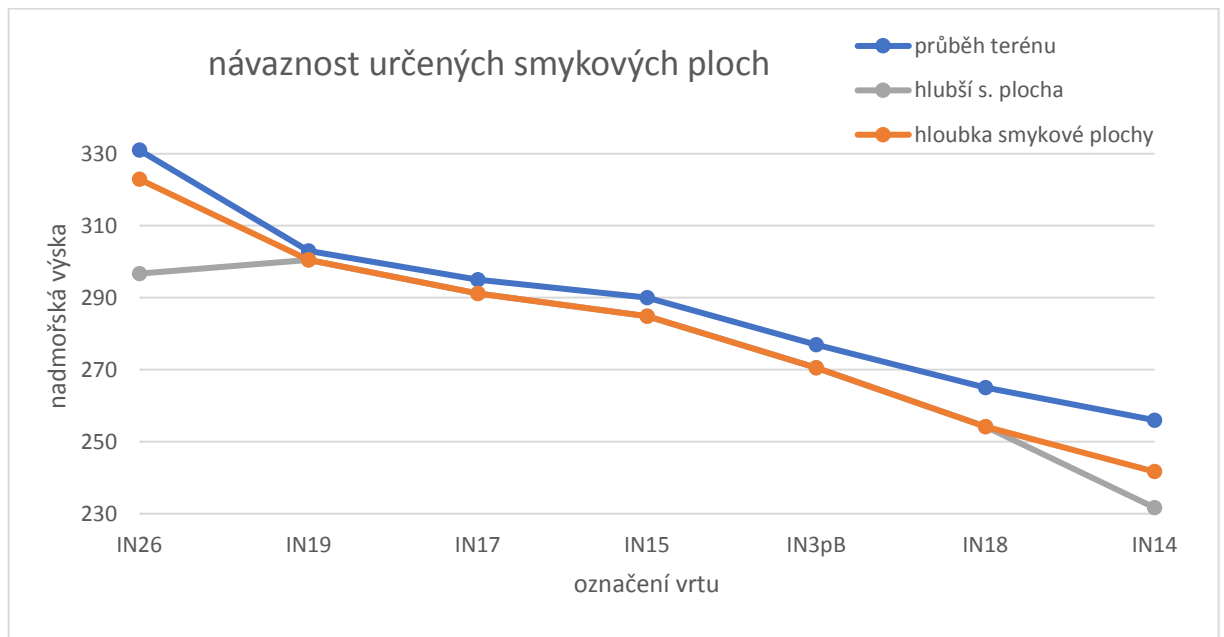
8.1 Diskuze výsledků z D8

Po provedení měření na lokalitě u dálnice D8 se v 11 z 13 zkoumaných vrtů podařilo nalézt úseky, které svými fyzikálními parametry či umístěním ve vrstevním sledu hornin nasvědčují, že jde o smykovou plochu, byť dnes již uklidněného sesuvu. Ve třech případech byla dokonce vymezena dvě místa. Jak bylo zmíněno výše, měření byla provedena v inklinometrických vrtech. Pokud v současnosti dochází k pomalým svahovým pohybům, přesná inklinometrická měření by je měla odhalit (bohužel výsledky těchto

měření pro porovnání s výsledky karotážních měření se nepodařilo získat). Pokud však v současnosti k žádným pohybům nedochází, ověření výsledků je o něco složitější. Aby se s naprostou spolehlivostí dalo říci, že jde opravdu o smykovou plochu, musela by se zřejmě pro každý sesuv ověřit kopanou sondou. Na zkoumaných vrtných jádrech jsou totiž vždy zanechány nějaké stopy po vrtání. A z porušené zóny ve vrtu je častokrát výnos jádra neúplný, či dokonce nulový. Přitom jde z hlediska pevnosti o nejslabší místa celého masivu a je nutné jej zohlednit při geotechnických výpočtech a stavebních pracích.

Po revizi výsledků v oněch 11 vrtech, kde byla vymezena pravděpodobná smyková plocha, se ukazuje, že téměř ve všech případech jde o konsekventní sesuvy – tedy sesuvy po předurčené smykové ploše. Výjimkou je pouze vrt IN22p, kde by smyková plocha odpovídala sesuvu asekventnímu. K orientačnímu posouzení toho, zda nedošlo v případě některého vrtu k chybné interpretaci, byl použit předpoklad, že při proložení smykových ploch sousedících vrtů bude chybně interpretovaná smyková plocha vybočovat. Na proložení všech bodů jedinou plochou je jich příliš málo a jsou nevhodně umístěny. Proto jsem proložil pouze 7 vrtů, které leží přibližně v linii v západových směrech do jednoho spojnicového grafu (obr. 9). Uprostřed linie je situován vrt IN15p, ve kterém nebyla stanovena smyková plocha, proto byl do grafu tento bod interpolován z hloubek smykových ploch v sousedních vrtech. Vzdálenosti na ose x neodpovídají skutečnosti. Pokud bylo stanoveno více smykových ploch v jednom vrtu, body jsou u daného vrtu dva. Výška zhlaví vrtů byla odečtena z mapy. Jak je z grafu patrné, mezi hloubkami určených smykových ploch nejsou žádné zásadní skokové rozdíly. Co se týká metod k vymezení smykových ploch, nejvíce se na této lokalitě osvědčila kombinace magnetické karotáže, gama karotáže a indukční karotáže, pro svoji schopnost vymežit poměrně jednoznačně zdejší litologické vrstvy. Hustotní karotáž a neutron-neutron karotáž se v některých případech osvědčily také, ale spíše k posouzení sporných případů. Po sestavení litologického profilu kombinací popisu z vrtných jader a karotážních měření, byly hledány úseky s vlastnostmi odpovídajícími

teoretickým požadavkům na smykovou plochu. V několika vrtech jsou výsledky poměrně jednoznačné: například ve vrtech IN14p a IN21p je vidět zřetelně se opakující vrstevní sled sutí a jílu, kdy svrchní dvojice musela být nasunuta přes spodní. Dále jsou zde vrty IN3p-B; IN18p; IN20p; IN25p a IN26p, kde jsou nesoudržné produkty zvětrávání (již jednou gravitačně přemístěné) uloženy na plastickém podloží, často v dosahu podzemní vody. A zbylé vrty IN17p; IN19p; IN22p a IN23p mají případnou smykovou plochu umístěnou na hranici zvětralé vrstvy dotované vodou (svrchní či spodní), kde také jsou ostré změny některých fyzikálních parametrů.



Obr. 9: Ná vaznost určených smykových ploch na linii vrtů v západ – východním směru. oranžově: stanovené hloubky svrchních smykových ploch; modře: nadmořská výška zhlaví vrtu; šedě: hloubka druhé stanovené smykové plochy

8.2 Diskuze výsledků z lokality Děčín:

Měření ve vrtu HV-L66 odhalily četné tektonické porušení hornin s několika přítoky do vrtu. Byl určen převládající směr a sklon puklin, což může poskytnout informaci o směru hlavních napětí v horninovém prostředí. Byly vypočteny některé geotechnické parametry, které mohou poukázat na místa s nižší pevností, a tudíž náchylnější k deformacím. Dále se ukázalo, že měření v perforovaných úsecích nemagnetického pažení není překážkou pro prakticky žádnou z použitých metod.

V profilu vrtu HV-L66 nebyla zjištěna žádná svahová deformace. Což odpovídá tomu, že vrt se nachází v nejnižším bodě údolí kudy vede řeka, a tedy by se zde dala předpokládat spíše jen akumulace hmot ze svahových deformací vzniklých výše na svahu. Dále lze předpokládat, že pokud by případná akumulace hmot dosáhla až k vrtu HV-L66, byly by hmoty poměrně brzy přepracovány říční činností a stopy o proběhlé svahové deformaci by byly ztraceny. Byl však nalezen systém puklin o úklonu přibližně 75° upadající směrem na SSV. Byly také nalezeny přítoky do vrtu skrze rozpukání horniny.

8.3 Shrnutí:

Z provedených měření se ukazuje, že karotážní měření i s omezenou metodikou (která byla použita na lokalitě Dobkovičky) lze použít k vyhledávání svahových deformací a lokálních porušení horninového prostředí s poměrně dobrými výsledky. Jako limitujícími faktory se ukázalo použité vstrojení vrtu a do jisté míry i samotná geologie prostředí. Dále se ukazuje, že některé typy svahových deformací se dají odhalit hůře než jiné. Sesuvy podle předurčené smykové plochy bylo možno nalézt poměrně spolehlivě podle změn v litologickém profilu vrtu. Oproti tomu sesuvy asekventní (tedy bez předurčené smykové plochy) se ukazují jako více problematické, protože jimi vyvolané anomálie mají malé amplitudy a samotné smykové plochy nejsou obvykle příliš mocné. Také na zvolených lokalitách nebylo

možno plně ověřit, jak se projevují smykové plochy asekventního sesuvu na záznamu metod odporové karotáže, akustické karotáže a metod ke sledování hydrodynamiky ve vrtu. Avšak pro akustickou karotáž lze usuzovat, že pokud smykové plochy asekventního sesuvu vznikají zejména v zeminách, výsledky nebudou pro vyšší útlum signálu nikdy vysoké kvality.

Proto zkoumání průběhu smykových ploch karotážními metodami by jistě mělo být předmětem dalšího výzkumu, který by mohl přinést některá zjednodušení do dnes zažité inženýrskogeologické praxe.

9. Použitá literatura

AEGIS Instruments: official website [online]. 2013 [cit. 2018-08-08].

Dostupné z: [http://www.aegis-](http://www.aegis-instruments.com/products/borehole/pdf/FWS%2050_68.pdf)

[instruments.com/products/borehole/pdf/FWS%2050_68.pdf](http://www.aegis-instruments.com/products/borehole/pdf/FWS%2050_68.pdf)

ALIOUANE, L., OUADFEUL, S. a BOUDELLE, A. (2012). Well-Logs Data Processing Using the Fractal Analysis and Neural Network.

OUADFEUL, Sid-Ali, ed. *Fractal Analysis and Chaos in*

Geosciences[online]. InTech, 2012-11-14 [cit. 2018-08-12]. DOI:

10.5772/51875. ISBN 978-953-51-0729-3.

Advanced Logic Technology: official website [online]. [cit. 2018-08-

08]. Dostupné z: <https://www.alt.lu/wp-content/uploads/ABI40.pdf>

BAROŇ, I. a SUPPER, R. (2013). Application and reliability of techniques for landslide site investigation, monitoring and early warning – outcomes from a questionnaire study. *Natural Hazards and Earth System Science* [online]. 13(12), 3157-3168 [cit. 2018-05-04].

BLÁHA, P. (2017). *Geofyzika a svahové deformace*. Geotest a. s., Brno.

BLÁHA, P., MÜLLER, K. a HORSKÝ, O. (2009). Geofyzikální vlastnosti pro geotechnické výpočty. *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava*. 2009, IX(2). ISSN 1213-1962.

CAJZ, V. (1996). *České středohoří*. Geologická a přírodovědná mapa 1:100000, ČGÚ, Praha.

DEMEK, J. (1987). *Zeměpisný lexikon ČSR: Hory a nížiny*. Praha: Academia.

- ELLIS, D.V. (2007). *Well logging for earth scientists*. 2nd ed. Dordrecht, The Netherlands: Springer. ISBN 978-1-4020-4602-5.
- FRODELLA, W., GIGLI, G., MORELLI, S., LOMBARDI, L. a CASAGLI, N. (2017). Landslide Mapping and Characterization through Infrared Thermography (IRT): Suggestions for a Methodological Approach from Some Case Studies. *Remote sensing*, 2017(12), 1281.
- GOLF-RACHT, T. D. (1982). *Fundamentals of fractured reservoir engineering*. New York: Elsevier. ISBN 04-444-2046-0.
- LAONGSAKUL, P. a DÜRRAST, H. (2011). Characterization of reservoir fractures using conventional geophysical logging. *Songklanakarin journal of science and technology*, **33**(2), 237-246.
- MAITI, S., KRISHNA TIWARI, R. a KÜMPEL, H. (2007). Neural network modelling and classification of lithofacies using well log data: a case study from KTB borehole site. *Geophysical Journal International*. 169(2), 733-746. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2007.03342.x. ISSN 0956540X.
- MALGOT, J., KLEPSATEL, F., TRÁVNÍČEK, I. (1992). *Mechanika hornín a inžinierska geológia*. Bratislava: Alfa.
- MAREŠ, S. (1990). *Úvod do užité geofyziky*. Nakladatelství technické literatury, Praha.
- MASSIOT, C., MCNAMARA, D. a LEWIS, B. (2014). Processing and analysis of high temperature geothermal acoustic borehole image logs in the Taupo Volcanic Zone, New Zealand. *Geothermics*. 2015(53), 190 - 201.
- NEMČOK, A. (1982). *Zosuvy v slovenských Karpatoch*. Bratislava: Veda.

PASEKA, A. (2014). Svahové pohyby. Brno: Litera Brno.

PARTOVI, S. a SADEGHNEJAD, S. (2017). Fractal parameters and well-logs investigation using automated well-to-well correlation. *Computers & Geosciences*. 2017(103), 59-69.

PIRSON, S. J. (1966). Handbook of well log analysis: for oil and gas formation evaluation. Habana: Inst. del Libro.

PITRÁK, M. (2011). Manuál pro interpretaci ABI40 pomocí WellCAD 4. Dokument firmy Aquatest a.s., divize 32. Praha. Nепublikováno.

SERRA, O. (1984). Fundamentals of well-log interpretation. Pau: Elf Aquitaine.

SCHLUMBERGER (1989). *Cased Hole Log Interpretation Principles/Applications*. 4th ed. Texas: Schlumberger Educational Services. SMP-7025.

SCHLUMBERGER (1989). *Log Interpretation Principles/Applications*. 3rd ed. Texas: Schlumberger Educational Services. SMP-7017.

SANG, C. a DOUGHTY, C. (2003). Multirate flowing fluid electric conductivity logging method. *Water Resources Research* [online]. 39(12), - [cit. 2018-07-25]. DOI: 10.1029/2003WR002308. ISSN 00431397. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1029/2003WR002308>

VEDER, C. (1981). Landslides and their stabilization. New York: Springer.

XIN, N., CHANGCHUN, Z., ZHAOHUI, P. a DONGMING, L. (2013). Fracture analysis and determination of in-situ stress direction

from resistivity and acoustic image logs and core data in the Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Borehole-2 (50–1370 m). *Tectonophysics*. 2013(593), 161-171.

YANG, G., CHENG, S., YU, H., ZHANG, L. a GAO, Y. (2011). Changes in Soil Physical Properties of Forest Floors in the Wenchuan Earthquake-Induced Landslides. 5th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, [online]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5781592/>

ZÁRUBA, Q., a MENCL, V. (1987). Sesuvy a zabezpečování svahů. 2., přeprac. a doplň. vyd. Praha: Academia.