

Mapování zvětrání hornin v historickém Dole Jeroným

Rock weathering mapping in historical Jeroným Mine (Czech Republic)

1.Úvod

Historický Důl Jeroným v Čisté (okr. Sokolov) představuje významnou památku středověkého hornictví (Beran et al, 1995, Kaláb et al., 2006, Žůrek et al., 2008). Nedílnou součástí historicko-montánních studií je i posuzování stability důlního díla jako celku a nalezení kritických míst, ať už z pohledu případné ztráty stability nebo z pohledu bezpečnosti pohybu osob v důlním díle. Proto je od roku 2001 realizován v důlním díle geomechanický monitoring vybraných parametrů (Kaláb et al., 2012, Kukutsch et al., 2011, Lednická et al., 2011). Všechny studie musí být realizovány tak, aby historické části byly dotčeny co nejméně. Během terénního měření se využívají především takzvané nedestruktivní metody zkoumání.

Jednou z nejrozsáhlejších prostor v Dole Jeroným, která zasahuje z úrovně štolového patra (cca 60 m pod povrchem) až téměř k povrchu, je ukloněná komora označená K3. Stejně jako v dalších částech díla i zde jsou pozůstatky ručních prací horníků a saze na stěnách a stropech po sázení ohněm, atd. V dolní polovině se komora dělí na dvě větve. V komoře je možné vizuálně pozorovat na stěnách a stropech různý stupeň zvětrání horninového masivu. K mapování zvětrání hornin v uvedené části dolu bylo použito měření rychlosti šíření ultrazvukových vln a měření hodnoty odrazu Schmidtova nárazového kladívka typu N. První výsledky při použití těchto metod zkoušení, které byly představeny dříve (Lednická, 2009, Lednická a Kaláb, 2012), ukazují závislost času průchodu ultrazvukových vln a odrazu Schmidtova nárazového kladívka na stanoveném stupni zvětrání horniny, přičemž hodnota rychlosti průchodu ultrazvukových vln a hodnota odrazu klesají se vzrůstajícím stupněm zvětrání. Proto byla provedena další měření, jehož výsledky jsou představeny v tomto příspěvku.

2. Nedestruktivní zkoušení hornin v Dole Jeroným

Nedestruktivní metody zkoumání jsou s ohledem na svoji šetrnost velice často využívány tam, kde je nutné získat informace o fyzikálně-mechanických vlastnostech hornin, resp. stavebních a jiných materiálů, nebo k diagnostice vnitřních vad konstrukcí a jejich součástí. Vlastní zkoumání musí být provedeno bez viditelného „poškození“ nebo tato poškození musí být „jednoduše opravitelná“. K takovýmto zkoumaným objektům patří například historická zdiva, dřevěné konstrukce, sochy, ozdoby na fasádách, ostění tunelů a další. Zřejmě nejvýznamnější skupinu nedestruktivních metod tvoří vybraná geofyzikální měření, založená na měření změny fyzikálních vlastností materiálu, např. změny hustoty, velikosti magnetizace, rychlosti průchodu seizmických vln, průchodu elektrického proudu. Zpravidla se jedná o nepřímé metody, tj. neměří se zkoumaná vlastnost, ale parametr, který charakterizuje danou vlastnost. Používá také řada metod spočívajících v měření mechanických vlastností materiálů, např. měření vrtného odporu či měření tlakové pevnosti pomocí Schmidtova nárazového kladívka. V Dole Jeroným jsme pro zkoumání stavu hornin použili měření rychlosti šíření ultrazvukových vln a měření odrazu Schmidtova kladívka.

Pro měření rychlosti šíření ultrazvukových (UZ) vln byla k dispozici nejdříve aparatura Pudít Plus, nyní modernější aparatura Pudít Lab⁺ (Obr. 1). K aparatuře se připojují dvě sondy - vysílač a přijímač. U staršího typu aparatury byly využívány především sondy s frekvencemi buzení UZ impulsu 54 kHz, u novější aparatury byly použity i další sondy (24 kHz, 150 kHz a 250 kHz). Aparatura měří dobu průchodu UZ impulsu mezi vysílačem a přijímačem, při znalosti vzdálenosti sond lze vypočítat rychlost průchodu UZ impulsu daným materiálem. Aparatura Pudít Lab⁺ umožňuje také pořizovat vlnový obraz přijímaného impulsu (viz. obr. 6), který lze dále zpracovávat specializovaným software. Přibližně platí, že hloubka dosahu při nepřímém měření odpovídá třetině až polovině vzdálenosti sond. Toto nám umožňuje získat informaci o stavu materiálu nejen v povrchové části (kterou lze hodnotit vizuálně), ale také v určité hloubce.

Oproti tomu měření Schmidtovým kladívkem podává informaci pouze o stavu povrchové vrstvy materiálu. V praxi slouží Schmidtovo nárazové kladívko pro orientační stanovení tlakové pevnosti betonů. Tlaková pevnost se hodnotí podle výšky odrazu závaží, kterou ukáže stupnice nárazového kladívka. Schmidtových kladívek je několik typů, liší se velikostí energie nárazu pružiny. Tlaková pevnost se přepočítává z naměřené

hodnoty odrazu na základě grafů udávaných výrobcem u příslušného typu kladívka. Do přepočtu je nutné zahrnout také korekci na polohu kladívka, tj. odklon osy kladívka během nárazu od vodorovné roviny. Pro měření v Dole Jeroným bylo použito kladívko typu N (Obr. 2), kterému odpovídá energie nárazu pružiny 2,207 Nm.

3. Experimentální měření v Dole Jeroným

Cílem prvních měření v Dole Jeroným bylo stanovení velikosti odrazu Schmidtova nárazového kladívka a hledání případné závislosti této hodnoty na stupni zvětrání horniny (v daném případě zvětrávání alterovaného granitu). Naměřené hodnoty odrazu nebyly přepočítávány na tlakovou pevnost, mimo jiné proto, že přepočet udaný výrobcem platí pro beton, ne pro horniny. Z důvodu vzájemného porovnávání hodnot odrazu byly pro měření vybrány vždy svislé plochy, čímž odpadla nutnost zavádět korekce na polohu kladívka. Velikost měřených ploch se pohybovala od 15 x 15 do 30 x 30 cm. Každé měření probíhalo ve 30-ti bodech víceméně rovnoměrně rozmístěných po dané ploše. Na každém měřeném bodě bylo provedeno jedno měření (Obr. 2). Plochy byly vybrány na základě vizuálního posouzení tak, aby horninový masiv vykazoval v celé měřené ploše stejný stupeň zvětrání. Stupeň zvětrání byl určen vizuálně podle klasifikace, kterou uvádí Hencher and Martin (in Vahed et al., 2009). Tato klasifikace stanovuje šest stupňů zvětrání granitů a dalších vulkanických hornin: I – zdravá hornina, II – slabě zvětralá hornina, III – středně zvětralá hornina, IV – silně zvětralá hornina, V – zcela zvětralá hornina a VI – rozložená hornina. Vizuální hodnocení vychází z barevných změn na povrchu horniny, stupně rozložení živců, nasákavosti, oddělitelnosti zrn horniny, apod.

Výsledky měření ukázaly sice volnější, ale použitelnou korelaci stupně zvětrání na velikosti odrazu Schmidtova kladívka. Výsledky tohoto prvního měření jsou uvedeny v grafu na obr. 3. Na vodorovné ose je pořadové číslo měření. Na svislé ose jsou vyneseny hodnoty odrazu Schmidtova kladívka. Tyto hodnoty jsou vynášeny pomocí krabicového grafu, který umožňuje (stručně řečeno) uvést nejen hodnotu mediánu zpracovávaného souboru dat naměřeného na dané ploše, ale také dolní a horní kvartil a minimální a maximální naměřenou hodnotu. V horní části grafu jsou uvedeny stupně zvětrání jednotlivých ploch podle výše uvedené vizuální metodiky; plochy byly dodatečně očíslovány podle stanoveného stupně zvětrání.

Nejvyšší hodnoty odrazu okolo 50 jednotek byly naměřeny na slabě zvětralých plochách masivu, na plochách zcela zvětralých nebyla hodnota odrazu naměřena vůbec. Je tedy zřejmé, že hodnota odrazu klesá se vzrůstajícím stupněm zvětrání. Přejít mezi jednotlivými stupni zvětrání není ostrý a naměřená data se vzájemně částečně překrývají. Toto je mj. důsledek nehomogenity masivu, jeho stavu zvětrání a též pozvolným přechodem stupňů zvětrání.

Rychlost šíření UZ vln je závislá na řadě parametrů hornin, jako je objemová hmotnost, pórovitost, vlhkost, modul pružnosti, apod. Během zvětrávání dochází ke změně těchto parametrů, a proto se mění také rychlost šíření UZ vln. V terénních podmínkách důlního díla nelze provádět přesná ultrazvuková měření (přímé uspořádání sond), geometrie důlních děl umožňuje pouze použití nepřímého měření na plochách stěn a stropů důlních děl. Jen ojediněle je možné použít přímé měření na pilířích do mocnosti cca 1,0 m. Cílem našeho měření nebylo stanovit přesné hodnoty rychlosti šíření, ale ověřit možnost využití tohoto měření pro rozlišení různých stupňů zvětrání povrchových vrstev horninového masivu v důlním díle.

Vypočtené hodnoty rychlosti šíření UZ vln získané z nepřímých měření na plochách s různým stupněm zvětrání (V – III) se pohybují v rozmezí 2500 – 4500 m.s⁻¹. S narůstáním stupně zvětrání se snižuje rychlost šíření a přechod mezi jednotlivými stupni zvětrání není ostrý (podle Lednická a Kaláb, 2012).

4. Detailní experimentální měření v komoře K3

V srpnu 2012 bylo provedeno detailní ultrazvukové prozařování vybraného pilíře v komoře K3 (Obr. 4) novou ultrazvukovou aparaturou Pundit Lab⁺ (Obr. 1). Vizuálně hodnocené plochy na prozařovaném pilíři v komoře K3 byly zařazeny do stupně zvětrání II, hodnoty odrazu Schmidtova kladívka se pohybovaly v rozmezí 27 až 50 (měření č. 2 a 4 v grafu na obr. 3). Na základě dříve provedených ultrazvukových měření na plochách se stupněm zvětrání III – V bylo zjištěno, že v těchto typech hornin dochází k rychlému útlumu UZ signálu a nepřímé měření je možné vyhodnotit pouze pro rozestupy sond od 0,1 do 0,3 m. Pro výše zmíněné měření v komoře K3 byla vybrána plocha s co možná nejmenším stupněm zvětrání, aby mohl být ověřen dosah UZ měření ve slabě zvětralé až zdravé hornině. Geometrie pilíře navíc umožnila kromě nepřímého měření na ploše také přímé měření při protilehlé poloze sond.

Pro měření byly využity dva typy sond – 24 kHz a 250 kHz. Jako vazebný prostředek byla použita tenká vrstvička plastelíny. Během měření byl pořizován vlnový obraz UZ signálu, což umožnilo okamžitou kontrolu správnosti měření přímo v terénu. Nejprve bylo provedeno nepřímé měření s postupným zvětšováním rozestupu sond od 0,1 m až po cca 1 m. Poté bylo provedeno také přímé prozařování pilíře při protilehlé poloze sond. Na každém měřeném místě bylo pořizeno celkem 10 záznamů.

Výsledné hodnoty rychlostí šíření UZ vln pro jednotlivé rozestupy sond během nepřímého měření jsou uvedeny v grafu na obr. 5. Při použití sond o frekvenci 250 kHz jsou uvedeny hodnoty rychlosti pro měření od rozestupu 0,1 m do 0,7 m. Při větším rozestupu již byl vlnový obraz UZ signálu špatně čitelný a nešel přesně vyhodnotit. Se sondami o frekvenci 24 kHz byly naměřeny kvalitní záznamy až do rozestupu sond cca 1 m, minimální rozestup je však 0,3 m (vyplývá z vlnové délky UZ signálu). Na základě výsledků lze říci, že rychlosti šíření UZ vln se pohybují ve vysokých hodnotách 5500 – 5800 m/s. U rozestupu sond 0,1 až 0,3 m vidíme postupný nárůst rychlostí od hodnoty 5000 m/s. Tento nárůst by mohl být způsoben vyšším stupněm zvětrání přípovrchové vrstvy než je stupeň zvětrání horniny ve větší hloubce pod povrchem, případně geometrií měření.

Přímé měření napříč pilířem se podařilo zrealizovat s kvalitním vlnovým obrazem až do vzdálenosti sond cca 1,3 m. Výsledné hodnoty rychlostí stanovené z přímého měření se pohybovaly opět přes 5000 m/s, v danou chvíli je však nelze určit přesně, neboť nebylo možné změřit skutečnou vzdálenost sond. Nicméně na základě těchto prvních výsledků lze říci, že vybraný pilíř v komoře K3 nevykazuje stupeň zvětrání větší jak II a z přímých měření plyne, že v trase prozařování se nevyskytuje pravděpodobně žádné porušení horninového masivu nebo plocha nespojitosti, což by se projevilo výrazným snížením rychlostí šíření UZ vln a útlumem UZ signálu.

5. Závěr

V příspěvku je popsáno využití vybraných nedestruktivních metod zkoušení pro zpřesnění informace o stanoveném stupni zvětrání horninového masivu v historickém Dole Jeroným. Během terénních měření byly prozatím vyzkoušeny dvě metody, měření hodnoty odrazu Schmidtova nárazového kladívka typu N a měření rychlosti šíření ultrazvukových vln pomocí ultrazvukové přenosné aparatury. Výsledky provedených měření na vybraných plochách horninového masivu v důlním díle ukazují závislost rychlosti průchodu ultrazvukových vln a odrazu Schmidtova nárazového kladívka na stanoveném stupni zvětrání horniny, přičemž hodnoty rychlosti a hodnoty odrazu klesají se vzrůstajícím

stupněm zvětrání. Zatímco měření Schmidovým kladívkem podává informaci o stavu masivu pouze v povrchové vrstvě, ultrazvukové měření při daném uspořádání sond může poskytnout informaci také o stavu masivu v dané hloubce pod povrchem, případně může detekovat porušení masivu například v podobě trhliny. Především v horninách zdravých a slabě zvětralých byla provedena nepřímá měření s rozestupem sond až 1 m, čemuž odpovídá hloubkový dosah měření cca 0,3 - 0,5 m. Na vybraném pilíři v komoře K3 se podařilo zrealizovat také přímé měření napříč pilířem až do vzdálenosti sond cca 1,3 m. V současné době představují provedená měření víceméně bodovou informaci o stavu horninového masivu v daném místě. Do budoucna se předpokládá další průzkum důlního díla uvedenými metodami, případně doplnění další nedestruktivní metodou.

Poděkování

Příspěvek byl zpracován za finanční podpory GAČR, projekt č. 105/09/0089 „Prognóza časoprostorových změn stability důlních prostor technické památky Důl Jeroným v Čisté“.

Literatura

- BERAN, P., JANGL, L., MAJER, J., SUČEK, P., OTFRIED, W. *1000 let hornictví cínu ve Slavkovském lese*. Okresní muzeum Sokolov, 1995. 195 s.
- KALÁB, Z., KNEJZLÍK, J., KOŘÍNEK, R., ŽŮREK, P. Cultural monument Jeroným Mine, Czech Republic – Contribution to the geomechanical stability assessment. *Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc.*, 2006, M-29(395), p. 137-146.
- KALÁB, Z., HRUBEŠOVÁ, E., KOŘÍNEK, R., ŽŮREK, P., KUKUTSCH, R.: Historical Jeroným Mine in Čistá – Underground Experimental Geotechnical Laboratory. *Tunnel – Magazine of the Czech Tunnelling Association and the Slovak Tunnelling Association ITA-AITES*, Vol. 21, No. 1/2012, s. 54-65. /Také česká verze Historický Důl Jeroným v Čisté – podzemní experimentální geotechnická laboratoř/
- KUKUTSCH, R., ŽŮREK, P., KOŘÍNEK, R., DANĚK, T., HUDEČEK, V., MICHALČÍK, P., GRMELA, A.: Monitoring geomechanické stability důlních prostor, léta 2001 – 2011. *International Journal of Exploration Geophysics, Remote Sensing and Environment (EGRSE)*, 2011, Vol. XVIII.1, s. 31-39.
- LEDNICKÁ, M. Využití ultrazvukového měření pro hodnocení degradace horninového materiálu. *Disertační práce, VŠB – TU Ostrava a Ústav geoniky AVČR, v.v.i.*, 2009. 95 s.
- LEDNICKÁ, M., KALÁB, Z.: Evaluation of granite weathering in the Jeroným Mine using non-destructive methods. *Acta Geodyn. Geomater.*, 2012, Vol. 9, No. 2(166), s. 211-220.

LEDNICKÁ, M., KALÁB, Z., KNEJZLÍK, J.: Kontinuální geomechanický monitoring v Dole Jeroným. *International Journal of Exploration Geophysics, Remote Sensing and Environment (EGRSE)*, 2011, Vol. XVIII.1, s. 62-72.

VAHED, G., HUSAINI, O. and BUJANG, K. H.: 2009, A study of the weathering of the Seremban granite. *EJGE, Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 14, bundle D, p. 1-9.

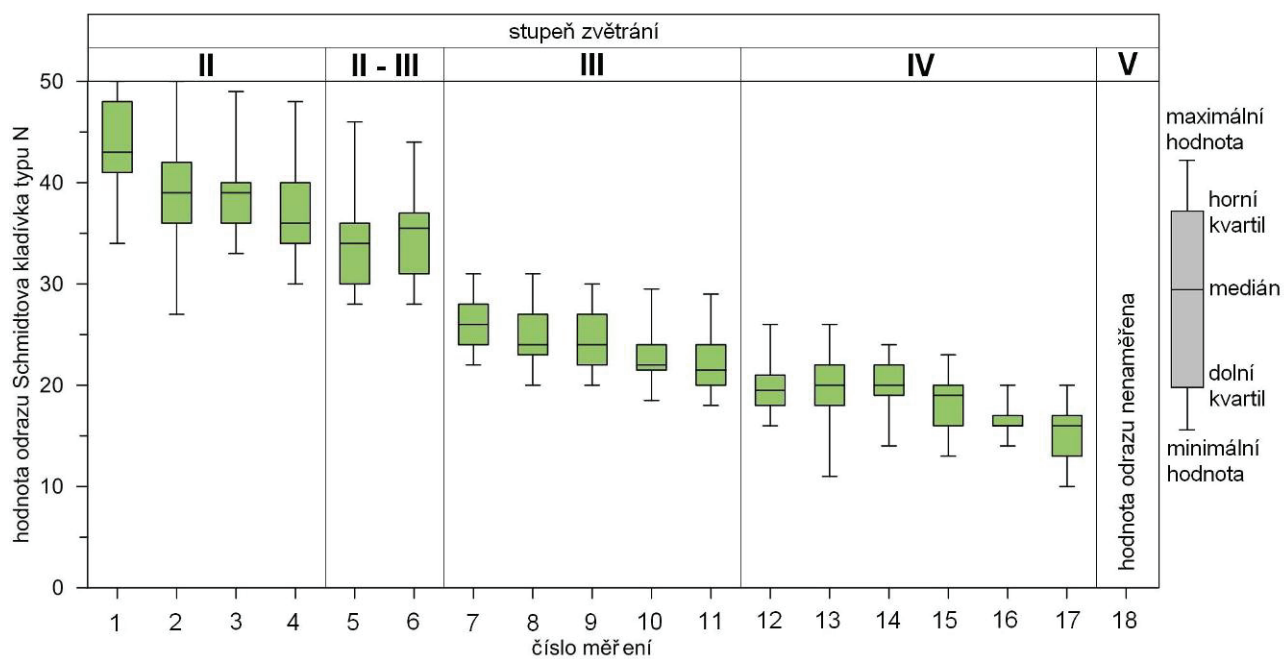
ŽŮREK, P., KOŘÍNEK, R., KALÁB, Z., HRUBEŠOVÁ, E., KNEJZLÍK, J., DANĚK, T., KUKUTSCH, R., MICHALČÍK, P., LEDNICKÁ, M., RAMBOUSKÝ, Z. *Historický Důl Jeroným v Čistě. Monografie*. 2008, VŠB – TU Ostrava a Ústav geoniky AVČR, v.v.i. Ostrava, 82 s.



Obr. 1 Aparatura Pudít Lab⁺ pro měření rychlosti šíření ultrazvukových vln (foto: Kaláb)



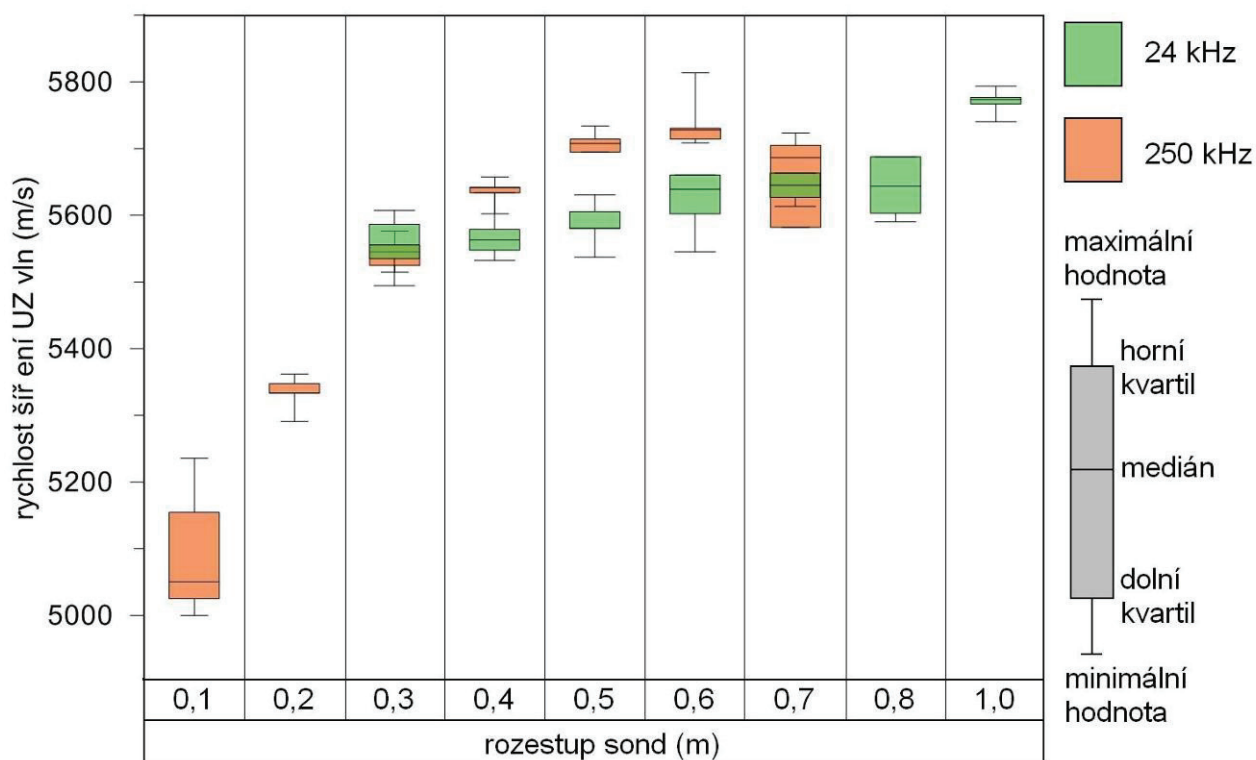
Obr. 2 Vlevo Schmidtovo nárazové kladívko typu N, vpravo měření odrazu Schmidtovým kladívkem v Dole Jeroným (foto: Lednická)



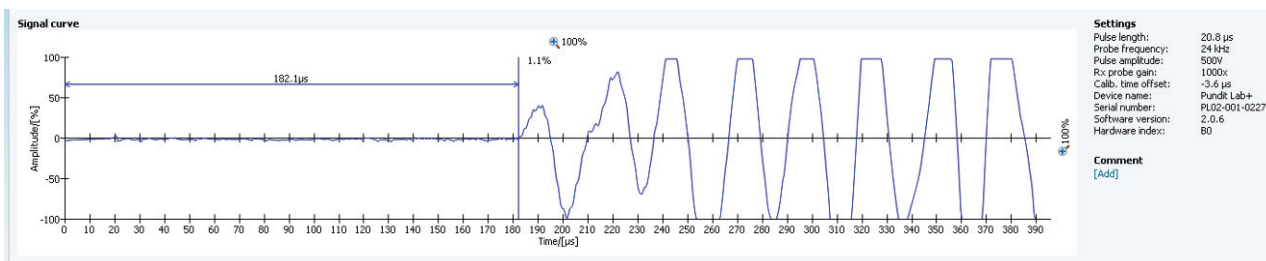
Obr. 3 Graf sestavený z měření odrazu Schmidtova kladívka typu N v Dole Jeroným



Obr. 4 Pilíř v komoře K3, na kterém bylo provedeno ultrazvukové prozařování (foto: Lednická)



Obr. 5 Rychlosti šíření UZ vln stanovené při nepřímém prozařování pilíře v komoře K3



Obr. 6 Ukázka vlnového obrazu UZ signálu pořízeného během terénního měření při prozařování pilíře v komoře K3