

Vplyv fyzikálnych vlastností na rýchlosť prechodu seizmických vln horninami

Radoslav Schügerl

Katedra inžinierskej geológie, Prírodovedecká fakulta, Univerzita Komenského v Bratislave, Mlynská dolina G, 842 15 Bratislava; schugerl@fns.uniba.sk

AGEOS The influence of physical properties on propagation velocity of seismic waves of the rocks

Abstract: Dynamic load are very important for determination physical properties of the rocks. Dynamic load propagates in the rocks by seismic waves (subsurface waves – longitudinal and transverse, and surface – Rayleigh's waves). Laboratory (ultrasound machine and hydraulic jack) and field methods (cross – hole, down – hole and up – hole) on the determination to propagation velocity of seismic waves of the rocks can be used. This article presents selected problems of the research of the influence of physical properties (bulk density, porosity, change of temperature, stage of saturation) on propagation velocity of seismic waves of the rocks and compares the values of dynamic modulus of elasticity E_{dyn} obtain by means of ultrasound machine and by hydraulic jack. These parameters were obtained by laboratory testing of sandstone samples from locality of Jánovce – Jablonov (Šibenik tunnel).

Key words: velocity of seismic waves, ultrasound, hydraulic jack, dynamic modulus of elasticity, bulk density, porosity, temperature, saturation

1. ÚVOD

V súčasnosti prevláda trend skúmania skalných hornín prevažne pri statickom zaťažení, kedy sú horniny vystavené v podstate stálemu silovému poľu určitej zaťažovacej hodnoty. Z toho vyplýva oveľa menšia miera výskumu skalných hornín podrobných zmenám silového poľa vyvolanými dynamickými účinkami, ako sú napríklad seizmické účinky zemetrasenia alebo odstrelov, či dynamické účinky z prevádzky rôznych strojov a zariadení. V neposlednom rade sú to aj dynamické vplyvy od cestnej a železničnej dopravy.

Na správnu interpretáciu výsledkov správania hornín pri dynamickom zaťažení je nevyhnutné poznať rýchlosť prechodu seizmických vln horninami. Úlohou výskumu bolo stanoviť vplyv zmeny hodnôt fyzikálnych parametrov (objemová hmotnosť, priebeh času nasýtenia a vplyv teploty, pórovitosť) na rýchlosť prechodu pozdĺžnych (ultrazvukových) vln skalnými horninami. Druhou, nemenej dôležitou časťou výskumu bolo stanovenie dynamického modulu pružnosti E_{dyn} získaného na základe zmerania rýchlosti prechodu pozdĺžnych vln skalnými horninami (nepriama metóda) a jeho porovnanie s dynamickým modulom pružnosti E_{dyn} získaného meraniami za pomoci lisu (priama metóda). Laboratórne skúšky boli vykonané na 15 vzorkách valcového tvaru. Išlo o pieskovce z lokality Jánovce – Jablonov (Tunel Šibenik).

2. TEÓRIA ELASTICKÝCH VLN

Zdroje dynamických síl pôsobiacich na horninu v čase a meniacie svoju veľkosť a polohu sa nazývajú budiacimi silami. Tieto

sily prenášajúce energiu, ktorá spôsobuje vibráciu hornín, sa šíria vo forme rôznych typov elastických (seizmických) vln.

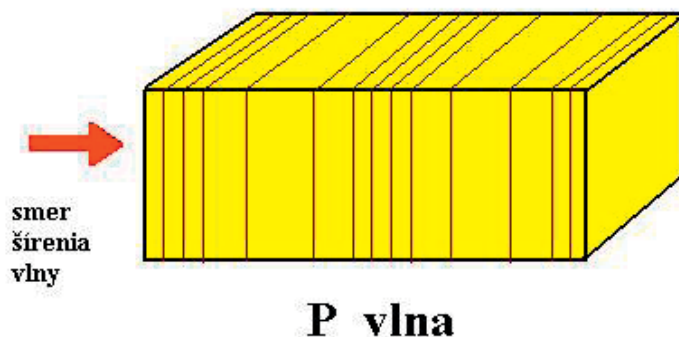
Zákonitosti šírenia elastických vln v reálnych podmienkach sa značne blížia vlastnostiam šírenia elastických vln v absolútne pružnom prostredí. Elastické vlastnosti izotropného prostredia sú všeobecne určené tromi elastickými parametrami: Youngovým modulom pružnosti E , Poissonovým číslom ν a šmykovým modulom pružnosti G . Vzájomný vzťah týchto parametrov sa dá vyjadriť nasledovne (Mareš et al., 1990):

$$G = \frac{1}{2(1+\nu)} E \quad (1)$$

Vo všeobecnosti rozoznávame 3 typy seizmických vln šíriacich sa v horninách (Pirner et al., 1989). Sú to:

a) *Pozdĺžne vlny, resp. longitudinálne, objemové* (Obr. 1a) – pohyb prebieha v smere osi ležiacej v rovine rovnobežnej na smer šírenia vlny. Pri vzniku vlny sa v smere kladnej časti osi X šíri vlna rýchlosťou c_1 . Nastáva *rozťahnutie* alebo *dilatácia*. Z bodu vzniku vlny sa však šíri aj ďalšia vlna c_2 , avšak opačným smerom ako v prvom prípade. Nastáva *stlačenie* alebo *kompresia*. Mení sa objem časti pružného prostredia, aj keď nenastala deformácia od šmyku či krútenia (otáčania). Na seizmogramoch sú označované písmenom P (lat. undae primae).

b) *Priečne vlny, resp. transversálne, ekvivoluminálne* (Obr. 1b) – pohyb sa deje v smere niektorej z osí ležiacich v rovine kolmej na smer šírenia pozdĺžnej vlny. Rýchlosť priečných vln je nižšia ako rýchlosť pozdĺžnych vln. Pri priečných vlnách nastávajú výchylky v smere kolmom na šírenie vlny, a preto sa v tomto prípade nemení objem. Nastáva *šmyková* deformácia.



Obr. 1. Ultrazvukové vlny.

Fig. 1. Longitudinal waves.

c) *Povrchové, resp. Rayleighove vlny* (Obr. 1c) – vznikajú vzájomným pôsobením pružných a zotrvačných síl. Rýchlosť šírenia povrchových vln je o niečo menšia než je rýchlosť šírenia priečných vln.

Vlny sa teda šíria z miesta zdroja všetkými smermi určitou rýchlosťou, ktorá závisí na fyzikálnych vlastnostiach prostredia a typoch vln. Na rýchlosť však vplyvajú aj podmienky vzniku, vývoja a uloženia hornín. Litologický charakter hornín ovplyvňuje elastické parametre hornín, na ktorých je rýchlosť závislá.

Rýchlosť šírenia seizmických vln v horninách závisí od rýchlosti šírenia seizmických vln v ich pevnej časti (skelete), od pórovitosti (percentuálneho objemu pórov v objeme horniny) a od rýchlosti šírenia seizmických vln vo výplni pórov. Všeobecne platí, že rýchlosť seizmických vln v horninách s vysokou pórovitosťou je nižšia ako v horninách s nízkou pórovitosťou, a že vo zvodnených horninách je rýchlosť šírenia vln väčšia než v rovnakých ale nezvodnených horninách (Lama & Vutukuri, 1978; Barton, 2007).

Rýchlosť šírenia seizmických vln v skelete je závislá od jeho minerálneho zloženia, rýchlosť vo výplni pórov je daná charakterom tejto výplne (vzduch, voda) a všeobecne je nižšia než rýchlosť v skelete horniny. Veľký význam má tlak, ktorému horniny sú alebo boli vystavené. Zväčšenie tlaku spôsobí zmenšenie pórovitosti a tým i zväčšenie Youngovho modulu E a rýchlosti. Pri povrchu Zeme, kde má tlak v súčasnosti takmer nulovú hodnotu a horniny sú vystavené intenzívnemu zvetrávaniu, rýchlosť šírenia seizmických vln je podstatne nižšia než v rovnakých horninách uložených v značnej hĺbke. Spolu s tlakom spolupôsobia na rýchlosť šírenia seizmických vln aj ďalšie vplyvy, napr. cementácia alebo metamorfne procesy, ktoré rovnako zvyšujú Youngov modul pružnosti E , a tým aj rýchlosť (Mareš et al., 1990).

Rýchlosť šírenia seizmických vln a elastických parametrov všeobecne klesá s rastom teploty. Vplyv teploty na rýchlosť šírenia vln je menší pri vysokom tlaku než pri nízkom tlaku (Lama & Vutukuri, 1978).

Naopak, vplyvom intenzívneho tektonického porušenia horninových masív Západných Karpát dochádza v týchto horninách k zníženiu rýchlosti prechodu pozdĺžnych vln, čo má za následok zníženie hodnoty dynamických parametrov hornín (dynamický modul pružnosti). Porušenie hornín zapríčiňuje zvýšenie pórovitosti aj zníženie hodnoty objemovej hmotnosti hornín.

3. METÓDY URČOVANIA DYNAMICKÝCH VLASTNOSTÍ HORNÍN

Vo všeobecnosti sa jedná o princíp zmerania a vyhodnotenia rýchlosti prechodu seizmických (pozdĺžnych, resp. ultrazvukových) vln cez určitú vzorku horniny s rovnobežnými plochami.

3.1. Poľné metódy

Medzi *poľné* alebo *in situ* metódy zaraďujeme *seizmické metódy* (Mareš et al., 1990). Pri seizmických metódach sa používajú *seizmické aparatúry*. Pod seizmickými aparatúrami rozumieme súbor zariadení, slúžiacich na úpravu a registráciu seizmického signálu. Hlavnou časťou seizmickej aparatúry je geofón a jeho úlohou je previesť mechanické kmitanie častíc zemského povrchu vyvolané príchodom seizmickej vlny od budiaceho bodu na elektrický signál. Podľa rozmiestnenia budiaceho bodu a geofónov poznáme plošné a líniové rozmiestnenie geofónov. V zahraničnej literatúre (Barton, 2007) sa často spomínajú metódy rozmiestnenia geofónov, ako napr. *cross – hole*, *down – hole*, *up – hole*. Pri prvej menovanej metóde sa do jedného vrtného náložu a v druhom vrte je registračné zariadenie. Vzdialenosť vrtných je okolo 40 až 50 metrov. V ďalších dvoch metódach sa meria seizmický impulz len za použitia jedného vrtného. Pri *down – hole* metóde je budiaci bod na povrchu a registračné zariadenie vo vrte, zatiaľ čo pri metóde *up – hole* je budiaci bod vo vrte a registračné zariadenie na povrchu.

3.2. Laboratórne metódy

Dynamické vlastnosti horninového materiálu možno najvýhodnejšie vyjadriť pomocou modulu pružnosti. Najjednoduchšou metódou merania modulu pružnosti je vystavenie vzorky skúmanej horniny zvolenému premennému napätiu σ a zmeranie rozptylu deformácie ε . Tento postup sa nazýva *priamou metódou merania* elastických vlastností horninového materiálu. Medzi tieto metódy patrí aj experimentálna metóda merania dynamických parametrov za pomoci využitia hydraulického lisu (Schügerl, 2009). Existujú i *nepriame metódy*, ktoré sa experimentálne uskutočňujú pomerne jednoducho, avšak pri ktorých sa ťažšie interpretujú výsledky v tvare zložiek komplexného modulu. Nepriame metódy sa rozdeľujú nasledovne:

1. Metódy založené na meraní kmitov:
 - a) metódy vlastných kmitov;
 - b) metódy vynútených kmitov (rezonančné a nerezonančné metódy).
2. Metódy založené na meraní šírenia vĺn (akustické metódy):
 - a) metódy šírenia spojitých vĺn;
 - b) impulzové dynamické metódy (ultrazvukové metódy).

4. METODIKA MERANIA

Na základe zmerania rýchlosti pozdĺžnych vĺn môžeme stanoviť najdôležitejšiu dynamickú charakteristiku hornín (dynamický modul pružnosti E_{dyn}).

Použitá ultrazvuková metóda je založená na meraní času potrebného k prechodu vĺn horninovým materiálom. Stanovenie dynamického modulu pružnosti pomocou ultrazvuku opisuje norma STN EN 14 579, ktorá nahradila normu STN 72 1166.

Postup pri meraní je nasledovný. Vzorka presného geometrického tvaru (kváder, kocka, v tomto prípade valček) sa očistila od nečistôt a nechala vysušiť v sušičke pri teplote 105 °C po dobu 24 hodín. Všetky vzorky boli podrobené po vytiahnutí zo sušičky zväženiu a zaznamenaniu priemeru a výšky. Zo zmeraných parametrov sa vypočítala objemová hmotnosť. Následne sa po ochladení vzoriek na laboratórnu teplotu (+20 °C) naniesla na dve protilahlé strany vrstva gélu, ku ktorým sa priložil vysilač a snímač z ultrazvukového prístroja. Pre vykonanie skúšky bol použitý ultrazvukový prístroj UPV E 49 (Obr. 2).

Pred meraním treba na prístroji nastaviť konkrétnu dĺžku (výšku) dvoch protilahlých strán vzorky cez ktorú pozdĺžna (ultrazvuková) vlna bude prechádzať. Na displeji prístroja sa následne objavila rýchlosť v_p ($m.s^{-1}$) prechodu ultrazvukových vĺn medzi dvoma protilahlými stranami. Výsledkom merania je rýchlosť ultrazvukových vĺn v $m.s^{-1}$. Dynamický modul pružnosti E_{dyn} vypočítame zo vzťahu (Hyánková et al., 1985):

$$E_{dyn} = \rho v_p^2 (Pa) \quad (2)$$



Obr. 2. Ultrazvukový prístroj.
Fig. 2. Ultrasound machine.

kde ρ je objemová hmotnosť horniny po vysušení ($kg.m^{-3}$), v_p je rýchlosť šírenia pozdĺžnych ultrazvukových (pozdĺžnych) vĺn ($m.s^{-1}$).

Ultrazvuková metóda (nepriama metóda) určenia dynamického modulu pružnosti sa následne porovnáva s metódou stanovenia dynamického modulu pružnosti pomocou hydraulického lisu (priama metóda).

Pri priamej metóde (deformačná skúška) sa sleduje vzťah napätia a deformácie horninového telieska. Na meranie dynamických parametrov bol použitý hydraulický lis VEB Werkstoffprüfmaschine Leipzig (Obr. 3) umožňujúci vyvodenie maximálnej statickej sily do 1000 kN (100 t) a dynamického – cyklického zaťaženia taktiež do 1000 kN, s rôznou amplitúdou a rôznou frekvenciou zaťaženia. Na rozdiel od statických skúšok, kedy na lise stúpa sila až do zvolenej hodnoty zaťažujúcej sily, pri dynamických skúškach je vzorka horniny zaťažovaná odlišným spôsobom. Rozdiel spočíva predovšetkým v tzv. cyklovaní zaťaženia (frekvencia pôsobenia sily) pri určitom meniteľnom rozsahu pôsobiacej sily (amplitúda sily). Pod pojmom frekvencia sily (f) sa rozumie počet zaťažovacích cyklov sily určitej veľkosti počas pevne stanovenej doby. Použitý lis umožňuje zaťažovať vzorku v rozsahu 250 až 700 kmitov / minútu (cca 4 až 12 Hz).

Vzorky hornín boli v laboratóriu zaťažované frekvenciou 10 Hz, vzhľadom na prevládajúce frekvencie v doprave (cestná 10 až 80 Hz; železničná 5 až 400 Hz). Frekvencia zaťaženia pôsobí v určitom silovom rozsahu (2 až 20 kN, tzn. amplitúda 18 kN), čo zodpovedá premene veľkosti vyvodzovaného napätia približne 10 MPa. Dĺžka zaťažovacieho cyklu bola stanovená na 15 minút, tzn. že dynamická sila bola na vzorke aplikovaná 9000 krát (Schügerl, 2009).

Ďalšia časť výskumu sa zaoberala stanovením vplyvu zmeny teploty, vplyvu zmeny času nasýtenia a pórovitosti na rýchlosť prechodu pozdĺžnych vĺn vzorkami hornín.

Pokiaľ sa jedná o teplotu, vzorky hornín boli vystavené rozličným hodnotám teploty, pri ktorých sa zmerala rýchlosť prechodu ultrazvukových vĺn horninami. Rýchlosť sa zmerala pri nasledovných teplotách: -20 °C, +20 °C, +60 °C a +100 °C.



Obr. 3. Hydraulický lis.
Fig. 3. Hydraulic jack.

Pri rôznych zmenách času nasýtenia vzoriek sa taktiež zme-rala rýchlosť pozdĺžnych vln. Rýchlosť sa zme-rala pri suchých vzorkách (vysušených pri teplote 40 °C po dobu 24 hodín), a následne po rôznom čase ponorených vo vode (po 15 min., 30 min., 1 hod., 2 hod., 4 hod. a 24 hodinách).

Pórovitosť jednotlivých vzoriek takisto vplýva na rýchlosť prechodu pozdĺžnych vln horninami. Údaje o pórovitosti boli využité z práce Durmeková et al. (2006) Výsledky z namera-ných údajov sú vyhodnotené v tabuľkách a grafoch.

Skúšky sa vykonávali na skúšobných vzorkách tvaru valček-ov, ktoré mali priemer cca 5 cm a výšku 10 cm. Podľa normy STN EN 72 1001 sa jedná o svetlé hnedasto – sivé pieskovce so stredne psamitickou zrnitosťou, rovnomerne zrnité, s obsa-

hom makropórov. Hornina je zdravá a má homogénnu textúru. Priemerná pevnosť v prostom tlaku je 141 MPa, čo zodpovedá zatriedeniu do triedy R 2. Všetky vzorky sú tvorené takmer rov-nakou minerálnou asociáciou (Durmeková et al., 2006), ktorá je tvorená kremeňom, karbonátmi (kalcit a dolomit) a vrstev-natými minerálmi (chlorit, kaolinit, illit). Prítomnosť pyritu vo vzorkách je rozdielna.

5. VÝSLEDKY A DISKUSIA

V odborných publikáciách (Lama & Vutukuri, 1978; Barton, 2007) sa uvádza nárast hodnoty dynamických parametrov

Tab. 1. Objemová hmotnosť, pórovitosť, zmena teploty, dynamický modul pružnosti (stanovený ultrazvukovým prístrojom a hydraulickým lisom) a rýchlosť ultrazvukových vln.

Tab. 1. Bulk density, porosity, temperature changes, dynamic modulus of elasticity (obtain by ultrasound machine and hydraulic jack) and velocity of longi-tudinal waves.

Vzorka	Rýchlosť UZ vln v_p (m.s ⁻¹)	Objem. hmot. ρ (kg.m ⁻³)	Pórovit. n (%)	Teplota				E_{dyn} (GPa) ultrazvuk	E_{dyn} (GPa) lis
				-20 °C	+20 °C	+60 °C	+100 °C		
				v_p (m.s ⁻¹)	v_p (m.s ⁻¹)	v_p (m.s ⁻¹)	v_p (m.s ⁻¹)		
T 2/1	3556	2551,58	7,22	3928	3556	2911	2805	32,265	202,36
T 2/2	3277	2518,32	7,22	3445	3277	2869	2622	27,043	148,95
T 3/1	3242	2604,00	5,46	3324	3242	2959	2928	27,369	132,81
T 3/3	3335	2590,69	5,46	3355	3335	3114	2805	20,969	197,92
T 7/1	2907	2531,26	7,70	2975	2907	2684	2622	21,39	139,19
T 7/2	2733	2498,44	7,70	2717	2733	2489	2301	18,661	112,35
T 8/1	2754	2530,13	6,72	2875	2754	2675	2425	19,189	107,18
T 8/2	2875	2519,50	6,72	2959	2875	2810	2535	20,825	115,83
T 13/3	2775	2510,66	7,67	2801	2775	2646	2320	19,333	162,91
T 22/1	2646	2498,01	7,46	2711	2646	2508	2358	17,489	171,11
T 22/2	2752	2519,12	7,46	2808	2752	2508	2300	19,078	458,90
T 22/3	3665	2593,86	7,46	3678	3665	3207	2572	34,841	403,56
T 25/3	3653	2601,80	4,67	3765	3653	3491	3007	34,719	393,88
T 26/1	3789	2620,90	4,43	3816	3789	3625	3590	37,627	479,95
T 25/1	3871	2603,88	4,67	3940	3871	3804	3335	39,011	458,90
Priemer	3239	2554,34	6,534	3273	3239	2953	2701	26,198	245,72

Tab. 2. Priebeh času sýtenia vzoriek a rýchlosť ultrazvukových vĺn.

Tab. 2. Saturation time progress and velocity of longitudinal waves.

Vzorka	Priebeh času sýtenia vodou						
	Suchá 40 °C	15 min.	30 min.	1 hod.	2 hod.	4 hod.	24 hod.
	v_p (m.s ⁻¹)	v_p (m.s ⁻¹)	v_p (m.s ⁻¹)	v_p (m.s ⁻¹)	v_p (m.s ⁻¹)	v_p (m.s ⁻¹)	v_p (m.s ⁻¹)
T 2/1	3385	3416	3426	3458	3672	3821	4175
T 2/2	3077	3089	3138	3203	3306	3616	3914
T 3/1	3092	3132	3149	3185	3277	3416	4144
T 3/3	3245	3296	3335	3355	3437	3479	4206
T 7/1	2900	2906	2983	3014	3055	3221	3636
T 7/2	2653	2684	2763	2805	2861	2876	3416
T 8/1	2754	2838	2912	2951	3039	3090	3693
T 8/2	2695	2734	2779	2951	3090	3310	3598
T 13/3	2765	2772	2815	2911	2998	3207	3678
T 22/1	2626	2640	2685	2745	2844	3091	3364
T 22/2	2718	2738	2748	2759	2801	2904	3384
T 22/3	3525	3559	3569	3594	3640	3765	3926
T 25/3	3653	3817	3835	3898	3898	3997	4132
T 26/1	3719	3727	3831	3844	3844	3912	4147
T 25/1	3871	3983	3997	3997	4041	4056	4276
Priemer	3112	3155	3198	3245	3320	3450	3846

s rastúcou rýchlosťou prechodu ultrazvukových vĺn telesami vzoriek skalných hornín. Z uvedeného výskumu vyplynula zhoda s údajmi publikovanými v literatúre.

V tab. 1 je zaznamenaná rýchlosť ultrazvukových vĺn na vzorkách po vysušení (24 hod.) a ochladení na teplotu 20 °C, vypočítaná objemová hmotnosť z nameraných geometrických údajov a hmotnosti, vplyv zmeny teploty na rýchlosť šírenia ultrazvukových vĺn, vplyv pórovitosti na rýchlosť šírenia ultrazvukových vĺn a dynamický modul pružnosti stanovený pomocou ultrazvukového prístroja, resp. pomocou hydraulického lisu. V tab. 2 je zaznamenaný vplyv času sýtenia vzoriek vodou na rýchlosť šírenia vĺn v testovaných horninách.

Zmeraná rýchlosť ultrazvukových vĺn (Tab. 1) pomocou ultrazvukového prístroja sa pri teplote 20 °C pohybuje v diapazóne 2646 m.s⁻¹ (vz. T 22/1) až 3871 m.s⁻¹ (vz. T 25/1). Rozdiel rýchlostí ultrazvukových vĺn je 1225 m.s⁻¹. Priemerná rýchlosť ultrazvukových vĺn na zmeraných vzorkách má hodnotu 3239 m.s⁻¹.

Pokiaľ sa jedná o objemovú hmotnosť (Tab. 1), tak hodnoty jednotlivých vzoriek stúpajú so zvyšujúcou sa rýchlosťou prechodu ultrazvukových vĺn vzorkami, ako naznačuje aj tren-

dová čiara (Obr. 4). Najnižšiu hodnotu objemovej hmotnosti (2498,018 kg.m⁻³) má vzorka T 22/1 ($v_p = 2646$ m.s⁻¹), najvyššiu hodnotu objemovej hmotnosti (2620,907 kg.m⁻³, tj. nárast o 4,91 %) má vzorka T 26/1 ($v_p = 3789$ m.s⁻¹, tj. nárast o 43,19 %). Rozdiel objemovej hmotnosti medzi testovanými vzorkami je 122,889 kg.m⁻³. Priemerná hodnota objemovej hmotnosti testovaných vzoriek sa pohybuje na úrovni 2554,343 kg.m⁻³. Keď sa zoberie do úvahy najvyššia zmeraná rýchlosť ultrazvukových vĺn ($v_p = 3871$ m.s⁻¹) jedná sa o vzorku T 25/1 ktorá má hodnotu objemovej hmotnosti 2603,884 kg.m⁻³.

Z obr. 5 vyplýva nepriama závislosť rýchlosti ultrazvukových vĺn s nárastom pórovitosti vzoriek. Najvyššia pórovitosť (7,7 %) bola zaznamenaná u vzoriek T 7/1 a T 7/2, naopak najnižšia (4,43 %) u vzorky T 26/1. Diapazón hodnôt pórovitosti je stanovený na 3,27 % a priemerná hodnota pórovitosti na hodnotu 6,534 % (Durmeková et al., 2006).

Rýchlosť ultrazvukových vĺn bola sledovaná aj pri pôsobení zmeny teploty na skúšaných vzorkách. Ako vyplýva z tab. 1 a obr. 6, nárast teploty od záporných do kladných hodnôt má za následok zníženie rýchlosti prechodu ultrazvukových vĺn horninami. Rýchlosť ultrazvukových vĺn klesla z teploty - 20 °C na teplotu

+100 °C o 226 m.s⁻¹ (tj. pokles o 5,92 %) pri vzorke T 26/1, až 1123 m.s⁻¹ (tj. pokles o 28,58 %) pri vzorke T 2/1. Priemerný pokles rýchlosti vln bol o 573 m.s⁻¹ (tj. pokles o 17,5 %).

Nasledujúce údaje sa týkajú pôsobenia zmeny času (15 min., 30 min., 1 hod., 2 hod., 4 hod. a 24 hod.) sýtenia vzoriek vodou na rýchlosť prechodu ultrazvukových vln (Tab. 2). Ako vyplýva z obr. 7, rýchlosť prechodu ultrazvukových vln testovanými vzorkami hornín stúpa s dobou sýtenia týchto vzoriek. Najväčší nárast rýchlosti ultrazvukových vln (1052 m.s⁻¹, tj. nárast o 34,02 %) bol zaznamenaný u vzorky T 3/1, najmenší (401 m.s⁻¹, tj. nárast o 11,37 %) u vzorky T 22/3 a priemerná hodnota nárastu rýchlosti vplyvom sýtenia po dobu 24 hodín bola 734 m.s⁻¹ (tj. nárast o 23,58 %).

Ďalšou časťou bolo porovnanie hodnôt dynamického modulu pružnosti stanoveného pomocou ultrazvukového prístroja a hydraulického lisu. Najnižšia hodnota dynamického modulu pružnosti pri nepriamej metóde (pomocou ultrazvukového prístroja) je zaznamenaná u vzorky T 22/1 (17,489 GPa), najvyššia hodnota u vzorky T 25/1 (39,018 GPa). Tieto hodnoty E_{dyn} zodpovedali najnižšej a najvyššej rýchlosti prechodu ultrazvukových vln vzorkami. Priemerná hodnota E_{dyn} pomocou ultrazvuku je 26,198 GPa. Rozptyl zaznamenatej hodnoty dynamického modulu pružnosti je 21,529 GPa.

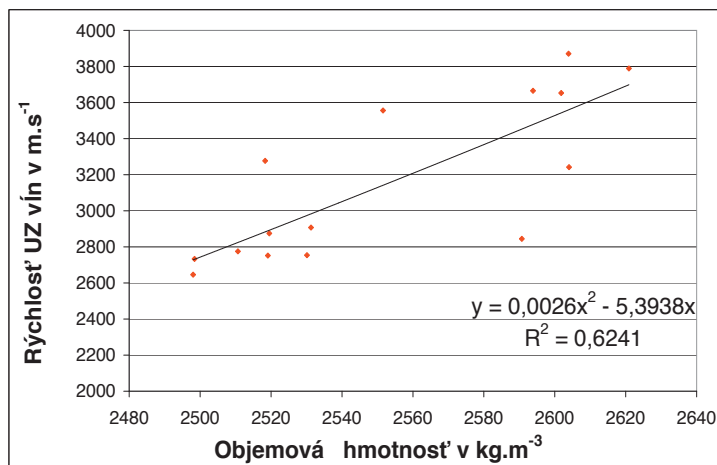
Dynamické moduly pružnosti získané priamou metódou (hydraulickým lisom) poskytli značne vyššie hodnoty ako

hodnoty dynamických modulov pružnosti stanovených pomocou ultrazvukového prístroja (Tab. 1). Najnižšia hodnota E_{dyn} je u vzorky T 8/1 (107,182 GPa) a najvyššia hodnota u vzorky T 26/1 (479,952 GPa). Rozdiel medzi hodnotami je 372,77 GPa, a priemerná hodnota dynamického modulu pružnosti je 245,72 GPa. Priemerný dynamický modul pružnosti získaný pomocou hydraulického lisu je približne o 11,4 krát väčší ako priemerný dynamický modul pružnosti stanovený pomocou ultrazvukového prístroja. Treba však podotknúť, že na výsledok dynamického modulu pružnosti stanoveného hydraulickým lisom má vplyv zvolená frekvencia zaťažovacej sily a doba trvania dynamickej skúšky.

6. ZÁVER

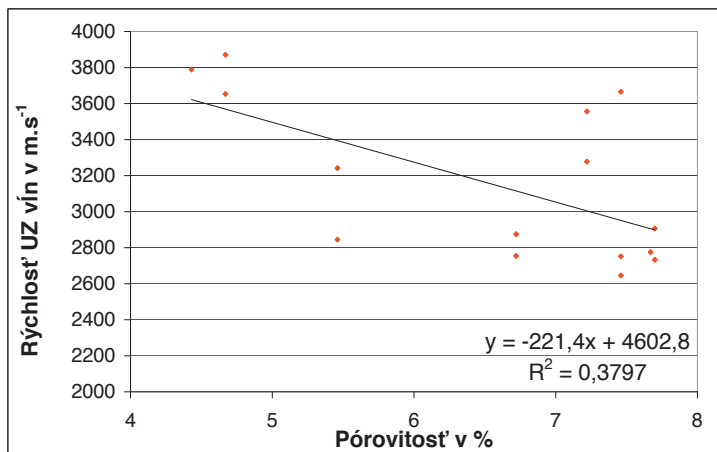
Z uskutočnených skúšok vyplynuli pre skúmané pieskovce nasledujúce závery:

- ▶ z výsledkov vyplýva fakt, že s rastom hodnôt objemovej hmotnosti o 4,91 % rastie aj hodnota rýchlosti prechodu ultrazvukových vln testovanými vzorkami hornín o 43,19 % – príčinou je kompaktnejšia štruktúra (tj. vyššia objemová hmotnosť a s tým súvisiaca menšia pórovitosť);
- ▶ s rastom teploty zo záporných (-20 °C) do kladných (+100 °C) hodnôt klesá rýchlosť ultrazvukových vln o 5,92 až 28,58 %;



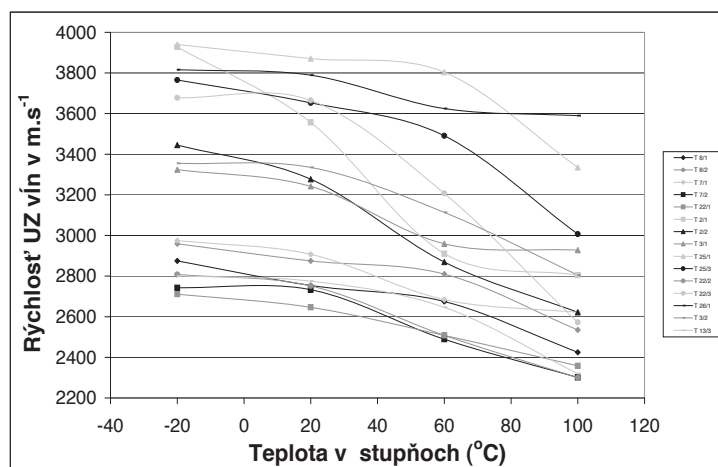
Obr. 4. Závislosť objemovej hmotnosti a rýchlosti ultrazvukových vln.

Fig. 4. Dependence of the bulk density and velocity of longitudinal waves.



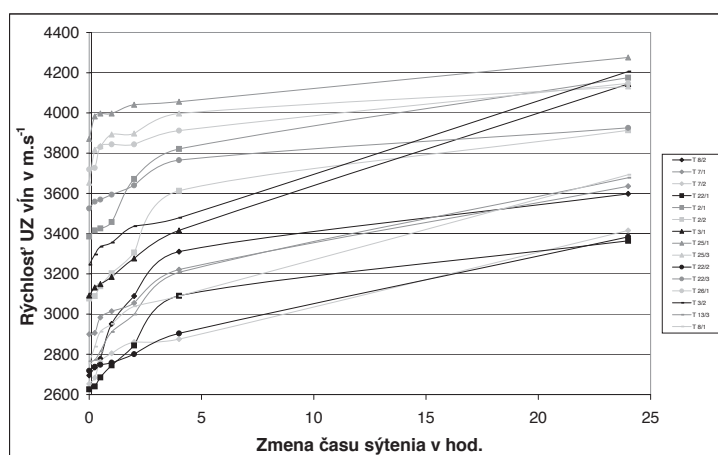
Obr. 5. Závislosť pórovitosti a rýchlosti ultrazvukových vln.

Fig. 5. Dependence of porosity and velocity of longitudinal waves.



Obr. 6. Závislosť zmeny teploty a rýchlosti ultrazvukových vln.

Fig. 6. Dependence change of temperature and velocity of longitudinal waves.



Obr. 7. Závislosť rýchlosti ultrazvukových vln od času sýtenia.

Fig. 7. Dependence velocity of longitudinal waves by time of saturation.

- ▶ s priebehom času sýtenia vzoriek vodou stúpa rýchlosť prechodu ultrazvukových vln vzorkami hornín o 11,37 až 34,02%, príčinou je vyplňanie pórov horniny vodou, ktorou sa šíria ultrazvukové vlny rýchlejšie ako vo vzduchu;
- ▶ hodnota dynamického modulu pružnosti – získaného pomocou ultrazvukového prístroja – je menšia o 11,4 násobok ako hodnota dynamického modulu pružnosti získaná hydraulickým lisom, pri stanovenej frekvencii 10 Hz a doby trvania skúšky 15 minút.

Skúšky na vzorkách hornín sa vykonávali v laboratóriu, tzn. že rýchlosti ultrazvukových vln by pri terénnych skúškach mali nižšiu hodnotu ako v laboratóriu v dôsledku výskytu puklín, zlomov v masíve atď. Výskum sa bude v budúcnosti realizovať aj na iných litologických typoch hornín, nielen na testovaných pieskovochoch. Zaujímavé výsledky by mohli poskytnúť napr. ílovcé, vápence a pod.

References

- Barton A, 2007: Rock quality, seismic velocity, attenuation and anisotropy. Balkema, Taylor & Francis, London, 735 s. ISBN 10: 0-415-39441-4.
- Durmeková T., Maas P. & Gregor M., 2006: Laboratórne práce – skúšky na zistenie základných fyzikálnych a mechanických vlastností hornín.

Úloha: D1 Jánovce – Jablonov, tunel Šibenik. Katedra inžinierskej geológie, Prírodovedecká fakulta, Univerzity Komenského, Bratislava, 20 s.

Hyánková A., Modlitba I. & Letko V., 1985: Laboratórny výskum vlastností hornín. Prírodovedecká fakulta Univerzity Komenského, Bratislava, 245 s.

Lama R.D. & Vutukuri V.S., 1978: Handbook on mechanical properties of rocks – Testing techniques and results – Volume II. Trans Tech Publications, Clausthal, 470 s.

Mareš S., Gruntorád J., Hrach S., Karous M., Marek F., Matolín M. & Skopec J., 1990: Úvod do užité geofyziky. SNTL, Praha, 680 s. ISBN 80-03-00427-6.

Pirner M., Baťa M., Fischer O., Frýba L., Hořejší J. & Novák P., 1989: Dynamika stavebních konstrukcí. Technický průvodce, svazek 33, SNTL, Praha, 488 s. ISBN 04-716-89.

Schügerl R., 2009: Dynamické charakteristiky hornín a spôsoby ich zisťovania. Acta Geologica Slovaca, 1, 1, 15 – 24.

STN EN 14 579 Stanovenie rýchlosti šírenia ultrazvukových vln v prírodnom stavebnom kameni. SÚTN, Bratislava, 2005.

STN EN 72 1001 Pomenovanie a opis hornín v inžinierskej geológii. SÚTN, Bratislava, 2004.

Summary: Dynamic load propagates in the rocks by seismic waves (sub-surface waves – longitudinal and transverse, and surface – Rayleigh's waves). These waves will incur vibration of the Earth's surface and underground. Laboratory (ultrasound machine and hydraulic jack) and field methods (cross – hole, down – hole and up – hole) on the determina-

tion to propagation velocity of seismic waves of the rocks can be used. This article presents selected problems of the research of the influence of physical properties (bulk density, porosity, change of temperature, stage of saturation) on propagation velocity of seismic waves of the rocks and compares the values of dynamic modulus of elasticity E_{dyn} obtain by means of ultrasound machine and by hydraulic jack. These parameters were obtained by laboratory testing of sandstone samples from locality of Jánovce – Jablonov (Šibenik tunnel).

The value of bulk density was increased by rising of velocity of longitudinal waves (Tab. 1, Fig. 4). This parameter had values from 2498.018 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ for sample *T 22/1* to 2620.907 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ for sample *T 26/1* (i. e. accrual 4.91 %). Velocity of longitudinal waves had value from 2646 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ for sample *T 22/1* to 3871 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ for sample *T 25/1* (i. e. accrual 43.19 %).

The average value of porosity was 6.534 % (Tab. 1, Fig. 5). The diapason values range from 4.43 % (sample *T 26/1*) to 7.70 % (samples *T 7/1* and *T 7/2*).

The value of velocity of longitudinal waves decreased with progress temperature from $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Tab. 1, Fig. 6). Velocity of longitudinal waves decreased from 226 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ for sample *T 26/1* to 1123 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ for sample *T 2/1* (i. e. from 5.92 % till 28.58 %). Average value was 573 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

During saturation time progress (15 minutes, 30 minutes, 1 hour, 2 hour, 4 hour, 24 hour) individual samples of the velocity of longitudinal waves increased with spin out of time of saturation (Tab. 2, Fig. 7). The highest value was determined by sample *T 3/1* (1052 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) and lowest by sample *T 22/3* (401 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$). The value grew up from 11.37 % till 34.02 %. Average value was 734 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Dynamic modulus of elasticity was determined to using by ultrasound machine and by hydraulic jack in the laboratory of Department of Engineering Geology. The average values of dynamic modulus of elasticity determined by hydraulic jack was bigger by 11.4 time than the average value of dynamic modulus of elasticity determined by ultrasound machine (Tab. 1, Fig. 8). The value of dynamic modulus of elasticity determined by hydraulic jack was from 107.182 GPa (sample *T 8/1*) to 479.952 GPa (sample *T 26/1*) and those, determined by ultrasound machine was from 17.489 GPa (sample *T 22/1*) to 39.011 GPa (sample *T 25/1*).