

Dynamické charakteristiky hornín a spôsoby ich zisťovania

Radoslav Schügerl

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

AGEOS Dynamic characteristics of rocks and method of their determination

Abstract: This paper presents selected problems of the research of the influence of technical vibrations on rocks. The vibrations are the products of the technological procedure, such as mining blasting, ramming of the piles, using of the drilling-equipment or vibration machines. The vibrations could be also evocated by road or train traffic. The most important dynamic characteristics of rocks are dynamic modulus of elasticity E_{dyn} , dynamic modulus of deformation $E_{def, dyn}$, dynamic shear-modulus G_{dyn} , and especially dynamic Poisson's ratio ν_{dyn} . These parameters were obtained by laboratory testing of conglomerate samples.

Keywords: amplitude, dynamic Poisson's ratio, dynamic deformation modulus, dynamic elastic modulus, frequency, hydraulic jack

1. ÚVOD

V súčasnosti je správanie sa skalných hornín v rámci inžiniersko-geologického výskumu posudzované výlučne pri statickom zaťažení, keď sú horniny vystavené v podstate stálemu silovému poľu nemenného charakteru. V oveľa menšej miere sa skúmajú skalné horniny v prostredí zmien silového poľa vyvolaných premennými – dynamickými účinkami. Stanovenie dynamických charakteristík hornín nadobúda v dnešnej dobe značný význam v súvislosti s budovaním veľkých stavebných diel, ako sú napríklad továrne, diaľnice a pod. v blízkosti ľudských obydľí, ale aj pri stanovení stability horninových masívov a horninových konštrukcií. Uvedená stavebná činnosť môže vyvolávať vibrácie, ktoré sa prenášajú k týmto obydľiam.

Analýza správania hornín pod dynamickým zaťažením vychádza z poznania nasledujúcich parametrov: dynamického Poissonovho čísla ν_{dyn} , dynamického pretvárneho modulu $E_{def, dyn}$, dynamického modulu pružnosti E_{dyn} , a dynamického šmykového modulu G_{dyn} .

2. VPLYV DYNAMICKÝCH ÚČINKOV NA HORNINY

S realizáciou plytkých podzemných diel súvisí výstavba komunikácií, komunikačných sietí, kolektorov atď. Vedenie podzemných diel v malých hĺbkach je spojené okrem iného s vyvolávaním vibrácií v okolí stavby. Vibrácie, ktoré súhrnne nazývame technická seizmicita, sú spravidla vyvolávané aktivitami, ktoré sú súčasťou technologických postupov. Pod technickou seizmicitou rozumieme seizmické otrasy vyvolané umelým zdrojom alebo indukovanú seizmicitu. Ide vlastne o rýchlo sa tlmiaci seizmický impulz alebo o dlhšie trvajúci rázový prejav. K aktivitám vyvolávajúcim seizmické vlnenie patria predovšetkým odstrely trhavín, baranenie pilôt, používanie vŕtacích zariadení, vibračných strojov, atď. Nemenej dôležité vibračné účinky však vyvodzuje aj cestná či železničná dopra-

va a mohutné stroje uložené v budovách, z ktorých sa vibrácie šíria do podlažia a susedných objektov (Kaláb, 2007).

2.1. Vplyv dopravy

Dynamické účinky dopravných prostriedkov sú spôsobené pohybom cestných a železničných vozidiel, lietadiel, prípadne prepravovanou hmotou, ktorá sa pohybuje po dopravných stavbách. Hmotnosť vozidiel (cestných alebo železničných) sa prenáša prostredníctvom jednotlivých náprav a kolies na povrch vozovky (kolajnice). Vo všeobecnosti možno konštatovať, že pri prejazde vozidla pôsobia na povrch zvislé, vodorovné a dynamické sily, a vibrácie. Dynamický modul pružnosti jednotlivých vrstiev vozovky je v porovnaní so statickým modulom pružnosti vyšší v dôsledku kratšej doby pôsobenia sily a tým aj menšej deformácie (Čorej et al., 2001).

Časovo premenná zvislá dynamická sila medzi kolesom a vozovkou je považovaná za významný zdroj energie. Sila pôsobí na vozovku prostredníctvom kontaktnej plochy pneumatiky s vozovkou. Zvislý silový účinok medzi kolesom a vozovkou $F_k(t)$ pri pohybe pozostáva z dvoch zložiek, zo statickej sily F_{stat} úmernej statickému zaťaženiu kolesa, a z časovo premennej dynamickej sily $F_{dyn}(t)$ medzi kolesom a vozovkou

$$F_k(t) = F_{stat} \pm F_{dyn}(t)$$

Časovo premenná zložka zvislého zaťaženia kolesa $F_{dyn}(t)$ vzniká z dôvodu kmitania pohybujúceho sa vozidla kinematicky buďdeného nerovnosťami povrchu vozovky.

V prípade železničnej dopravy sú sily pôsobiace na povrch kolajnic sú približne dvojnásobne vyššie, ako pri cestnej doprave. Dynamické zaťaženie železničných tratí spôsobujú nerovnosť povrchu kolajnice, nerovnomernú tuhosť podlažia a kolajnicových podpier, akceleračné a brzdné účinky trakčných vozidiel, mechanické spoje kolajnicových pásov alebo nekvalitne zvárané styky kolajnicových pásov, nerovnosť kolies vozidiel a umelé stavby.

2.2. Vplyv strojov

Stroje vyvolávajú okrem statických aj dynamické sily, ktoré vznikajú v dôsledku nerovnomerného a krivočiareho pohybu hmoty. Sú to pohyblivé sily zapríčiňujúce kmitanie vlastných strojov. Tieto následne pôsobia na základy, na ktorých sú stroje umiestnené a prenášajú vibrácie do okolitého prostredia (podložia). Dynamické sily môžu pôsobiť na susedné budovy a spôsobovať ich vibrácie.

2.3. Vplyv seizmických účinkov

Seizmické zaťaženie je, podľa normy STN 73 0036, zaťaženie spôsobené pohybom podložia zapríčineným prírodou alebo ľudskou činnosťou; pôsobí buď ako kinematické budenie nadzemných konštrukcií alebo ako priame dynamické zaťaženie podzemných konštrukcií a horninového prostredia. Medzi seizmické zaťaženie vyvolané prírodou patrí zemetrasenie a medzi seizmické zaťaženie vyvolané ľudskou činnosťou patria vplyvy od tlakových vln pri rôznych výbuchoch, vznietení rozličných výbušnín, materiálov a pod.

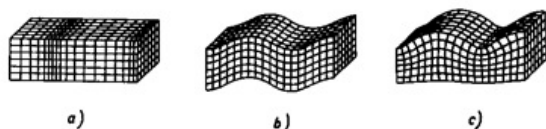
2.4. Vplyv baranenia pilót

V praxi sa často vyskytuje otázka, či pri baraní pilót alebo štetovnic môžu vzniknúť škody na susedných objektoch. Dynamický účinok pri dopade barana na pilótu je obdobný ako pri buchare, ale s tým rozdielom, že votknutie telesa je hlbšie a spolupôsobiacia hornina má v pomere k prierezu väčší objem. Prejavuje sa i účinok odporu na plášti pilóty.

Ako vyplýva z uvedeného prehľadu, zdrojov dynamických síl môže byť niekoľko druhov. Zdroje síl pôsobiacich na horninu v čase a meniace svoju veľkosť a polohu sa nazývajú budiacimi silami. Sily prenášajúce energiu, ktorá spôsobujú vibráciu hornín, sa šíria vo forme rôznych typov vln.

Medzi základné typy vln šíriacich sa v pružnom polpriestore patria:

- ▶ *pozdĺžne* (tiež *longitudinálne* alebo *objemové*), označované ako *P-vlny*, v prostredí sa šíria najrýchlejšie (Obr. 1a);
- ▶ *priečne* (tiež *transverzálne*, *ekvivoluminálne* alebo *šmykové*), označované ako *S-vlny*, sa šíria v prostredí pomalšie ako pozdĺžne vlny (Obr. 1b);
- ▶ *povrchové* (tiež *Rayleighove*), tieto vlny sa šíria ešte pomalšie ako priečne vlny, vyskytujú sa iba na povrchu zemského telesa (Obr. 1c).



Obr. 1. Schematické znázornenie seizmických vln: a) pozdĺžne; b) priečne; c) povrchové (Pirner et al., 1989).

Fig. 1. Schematic image of seismic waves: a) longitudinal waves; b) transverse waves; c) Rayleigh's waves (Pirner et al., 1989).

3. METODIKA MERANIA DYNAMICKÝCH PARAMETROV

Najdôležitejšími dynamickými parametrami hornín sú dynamické Poissonove číslo ν_{dyn} , dynamický pretvárný modul E_{def} , dynamický modul pružnosti E_{dyn} a dynamický šmykový modul G_{dyn} .

Dynamické vlastnosti horninového materiálu možno najvýhodnejšie vyjadriť pomocou modulu pružnosti. Najjednoduchšou metódou merania modulu pružnosti je vystavenie vzorky zo skúmanej horniny známemu premennému napätiu a merať rozptyl deformácie ε v závislosti od známeho premenného napätia σ . Tento postup sa nazýva *priamou metódou merania* elastických vlastností materiálu. Existujú i *nepriame metódy*, ktoré sa experimentálne uskutočňujú pomerne jednoducho, avšak pri ktorých sa ťažšie interpretujú výsledky v tvare zložiek komplexného modulu. Nepriame metódy merania sa rozdeľujú na dve hlavné skupiny (Plander & Tomáš, 1964):

- ▶ metódy založené na meraní kmitov: metódy vlastných kmitov a metódy vynútených kmitov;
- ▶ metódy založené na meraní šírenia vln (akustické metódy): metódy šírenia spojitých vln a metódy šírenia impulzov.

Z charakteristiky týchto faktov vyplýva, že všetky nepriame metódy sú založené na meraní času prechodu vln horninovým telesom. Možno konštatovať, že na rýchlosť vln v horninách vplyva horninový typ, hustota, pórovitosť, anizotropia, vplyv napätia, obsah vody a teplota (Lama & Vutukuri, 1978; Barton, 2007).

Dynamické parametre sa najlepšie určujú pomocou deformačných skúšok. Sleduje sa vzťah napätia a deformácie horninového telieska. Podľa podielu pružných a plastických deformácií, ktoré sa prejavujú v priebehu deformácie hornín, majú tieto krivky rôzny tvar.

Na účely výskumu bola použitá priama metóda merania dynamických parametrov za pomoci hydraulického lisu. Na meranie dynamických parametrov bol použitý hydraulický lis VEB Werkstoffprüfmaschine Leipzig umožňujúci vyvedenie 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 za minútu (cca 4 až 12 Hz). Uvedený rozsah kmitov možno porovnať s reálnymi hodnotami pri rôznych účinkoch:

- ▶ vplyvy od dopravy – cestná ($f = 10$ až 80 Hz), železničná ($f = 5$ až 400 Hz);
- ▶ vplyvy od strojov (frekvencia závisí od otáčok daného typu stroja);
- ▶ vplyvy od seizmických účinkov ($f = 1$ až 10 Hz);

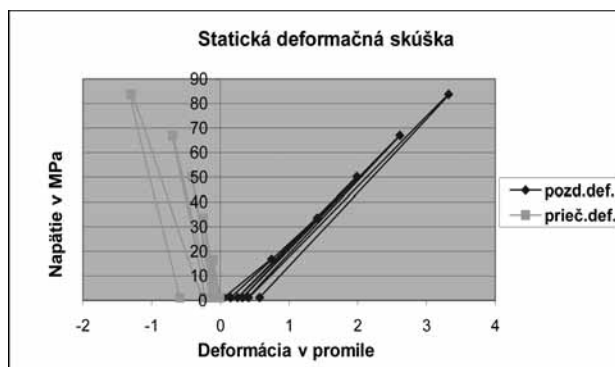
- ▶ vplyvy od tlakových vln ($f = 1$ až 100 Hz);
- ▶ vplyvy od baranenia pilót ($f = 30$ až 50 Hz).

Vzorky hornín boli v laboratóriu zaťažované frekvenciou 5 a 10 Hz, a to hlavne vzhľadom na prevládajúce frekvencie v doprave. Vyššie hodnoty frekvencií na danom type lisu nie je technicky možné simulovať. Vyvodzovaná frekvencia by pri dynamických skúškach nemala veľký zmysel, ak by pôsobila len pri konštantnom napätí. Preto frekvencia zaťaženia pôsobí v určitom silovom rozsahu.

Deformačné skúšky na stanovenie dynamických parametrov sa vykonávali na skúšobných vzorkách tvaru valčekov, ktoré mali priemer cca 5 cm a výšku 10 cm. Na každej vzorke bola pred deformačnou skúškou zistená objemová hmotnosť a dynamický modul pružnosti, stanovený z rýchlosti ultrazvuku (tab. 1).

Podľa normy STN EN 72 1001 sa jedná o svetlé sivasto-hnedé zlepenec s drobnopsefitickou zrnitosťou, nerovnomerne zrnité, s obsahom makropórov. Hornina je navetraná, má nehomogénnu textúru. Pevnosť v prostom tlaku je 131 kN, čo zodpovedá zatriedeniu do triedy R2. Pokiaľ sa jedná o slienité vápence, majú svetlú sivasto-bielu farbu, sú veľmi jemnozrnité, rovnomerne zrnité s obsahom mikropórov. Hornina je zdravá, má homogénnu textúru. Pevnosť v prostom tlaku je 184 kN, čo zodpovedá zatriedeniu do triedy R1.

Pred samotnou skúškou bolo nevyhnutné z povrchu vzorky odstrániť nečistoty. Na tento účel sa použil brúsny papier a lieh. Následne sa na vzorku nalepili 4 kusy tenzometrických snímačov na zmeranie pozdĺžnej a priečnej deformácie (2 snímače na pozdĺžnu a 2 na priečnu deformáciu). Po takejto príprave bola na vzorke horniny vykonaná statická deformačná skúška a následne dynamická deformačná skúška. Počet zaťažovacích stupňov počas statickej deformačnej skúšky závisel od pevnosti horniny v jednoosovom tlaku a od homogenity samotnej vzorky. Obr. 2 ilustruje statickú deformačnú skúšku s piatimi zaťažovacími stupňami.



Obr. 2. Statická deformačná skúška.

Fig. 2. Static deformation test.

Počet nasledujúcich dynamických zaťažovacích stupňov sa zhodoval s počtom statických zaťažovacích stupňov. Ak sa vzorka neporušila počas statickej ani dynamickej deformačnej skúšky, nasledoval ďalší statický, resp. dynamický zaťažovací stupeň. Postup sa aplikoval až do porušenia vzorky. Rozsah jednotlivých zaťažovacích stupňov bol zhodný pri statickej, aj pri dynamickej skúške a pohyboval sa v nasledujúcich hodnotách:

1. stupeň - rozsah 2 až 30 kN = amplitúda (A) je 28 kN;
2. stupeň - rozsah 2 až 60 kN = A je 58 kN;
3. stupeň - rozsah 2 až 90 kN = A je 88 kN;
4. stupeň - rozsah 2 až 120 kN = A je 118 kN;
5. stupeň - rozsah 2 až 150 kN = A je 148 kN.

Dĺžka zaťažovacieho cyklu v jednotlivých stupňoch bola stanovená na 15 minút, tzn., že na vzorke bola aplikovaná dynamická sila cca 4500 krát pri frekvencii 5 Hz a 9000 krát pri frekvencii 10 Hz. Päť zaťažovacích stupňov nebolo aplikovaných na všetkých vzorkách, pretože niektoré z nich sa porušili už pri treťom zaťažovacom stupni.

Tab. 1. Objemová hmotnosť vzoriek a ich E_{dyn} určený ultrazvukom porovnaný priamou metódou (pomocou hydraulického lisu).

Tab. 1. Bulk density of samples and their E_{dyn} determined by the ultrasound test compared with the direct method (by means of hydraulic jack).

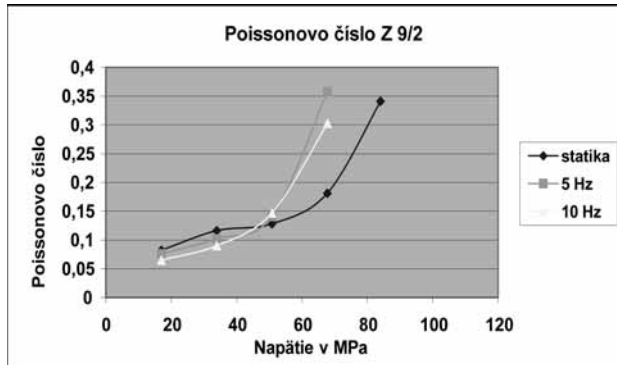
Vzorka	ς [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	$E_{dyn, ULTRAZV.}$ [MPa]	$E_{dyn, 5 \text{ Hz}}$ [MPa]	$E_{dyn, 10 \text{ Hz}}$ [MPa]
Z 9 / 2	2523,039	24,215	49,035	57,304
Z 9 / 3	2515,349	25,228	36,778	37,197
Z 23 / 2	2538,43	32,715	59,283	56,113
Z 23 / 3	2567,224	31,61	49,581	47,738
Z 24 / 2	2513,214	48,921	41,803	47,701
SV 25	2689,925	61,322	107,334	147,796
SV 85 b	2733,377	87,516	162,606	226,658

4. VÝSLEDKY A DISKUSIA

Deformačné skúšky boli vykonané na 7 vzorkách valcového tvaru. Išlo o 5 vzoriek zlepenecov z lokality Jablonica a 2 slienité vápence z lokality Hubová. Úlohou výskumu bolo určiť dynamické parametre (ν_{dyn} , $E_{def, dyn}$, E_{dyn} , G_{dyn}). Rôzne zdroje udávajú 100 až 350%-ný nárast hodnôt dynamických parametrov oproti hodnotám získaným pri statickom zaťažení (Lama & Vutukuri, 1978). Z celkového počtu 7 vzoriek, boli na jednej vzorke (zlepenec) nefunkčné priečne tenzometre, v dôsledku

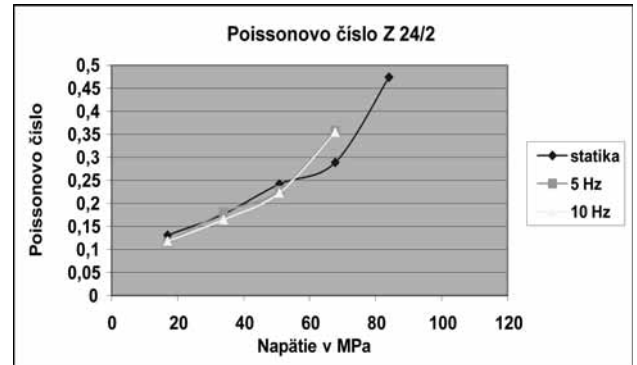
čoho nebolo možné na vzorke vyhodnotiť Poissonovo číslo a dynamický šmykový modul.

Na ostatných štyroch zlepencoch, napriek údajom v literatúre (Lama & Vutukuri 1978; Barton 2007) bolo však dynamické Poissonovo číslo pri niektorých dynamických zaťažovacích stupňoch menšie ako pri statických zaťažovacích stupňoch (Obr. 3a až d). Poissonovo číslo pri zväčšujúcich sa statických aj dynamických zaťažovacích stupňoch vo všeobecnosti rástlo. Pokiaľ sa jedná o slienité vápence, možno tu potvrdiť podobný jav v sledovaní hodnôt dynamického



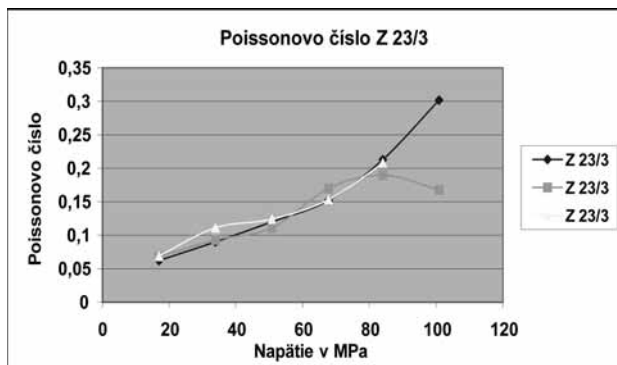
Obr. 3a. Závislosť Poissonovho čísla od zaťaženia - Z 9/2

Fig. 3a. Dependence between the Poisson's ratio and the load - Z 9/2



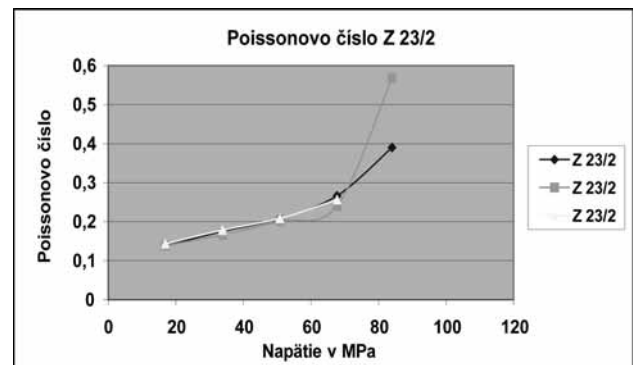
Obr. 3b. Závislosť Poissonovho čísla od zaťaženia - Z 24/2

Fig. 3b. Dependence between the Poisson's ratio and the load - Z 24/2



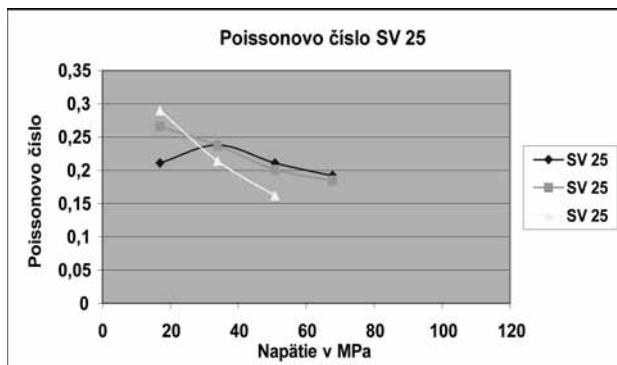
Obr. 3c. Závislosť Poissonovho čísla od zaťaženia - Z 23/3

Fig. 3c. Dependence between the Poisson's ratio and the load - Z 23/3



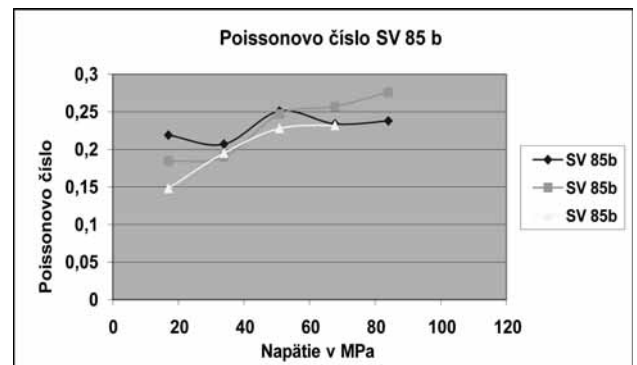
Obr. 3d. Závislosť Poissonovho čísla od zaťaženia - Z 23/2

Fig. 3d. Dependence between the Poisson's ratio and the load - Z 23/2



Obr. 3e. Závislosť Poissonovho čísla od zaťaženia - SV 25

Fig. 3e. Dependence between the Poisson's ratio and the load - SV 25

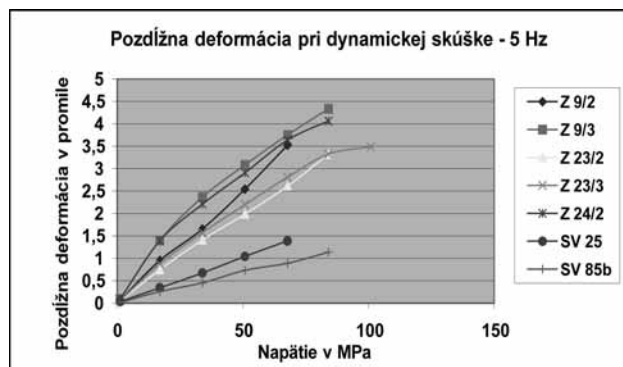


Obr. 3f. Závislosť Poissonovho čísla od zaťaženia - SV 85 b

Fig. 3f. Dependence between the Poisson's ratio and the load - SV 85 b

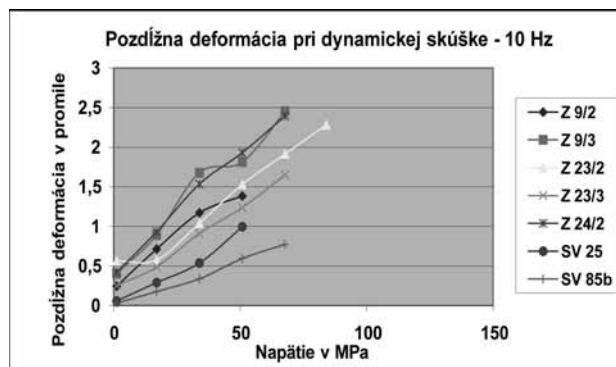
a statického Poissonovho čísla. V prípade SV 25 sa však hodnota statického aj dynamického Poissonovho čísla zmešovala pri zvyšujúcom sa zaťažení na rozdiel od ostatných vzoriek (Obr. 3e, f).

Dynamický modul pružnosti bol vždy väčší ako statický modul pružnosti, taktiež dynamický modul pretvárnosti a dynamický šmykový modul boli väčšie ako pri statickej deformačnej skúške. Celková dynamická pozdĺžna deformačia sa pri zvyšujúcom sa napätí zväčšovala (Obr. 4a, b).



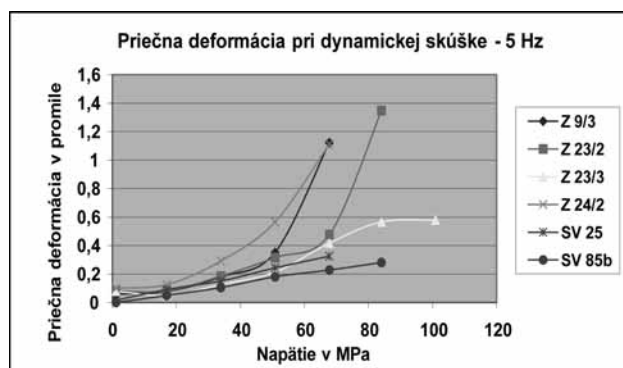
Obr. 4a. Pozdĺžna deformačia pri dynamickom zaťažení – 5 Hz

Fig. 4a. Longitudinal deformation under dynamic load – 5 Hz



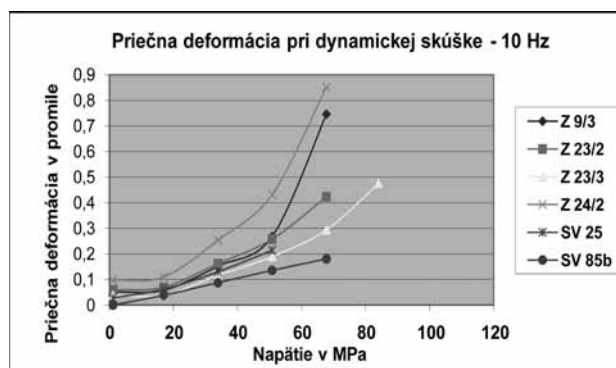
Obr. 4b. Pozdĺžna deformačia pri dynamickom zaťažení – 10 Hz

Fig. 4b. Longitudinal deformation under dynamic load – 10 Hz



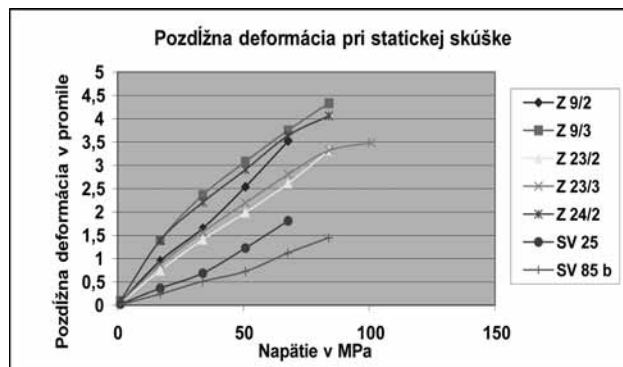
Obr. 5a. Priečna deformačia pri dynamickom zaťažení – 5 Hz

Fig. 5a. Transverse deformation under dynamic load – 5 Hz



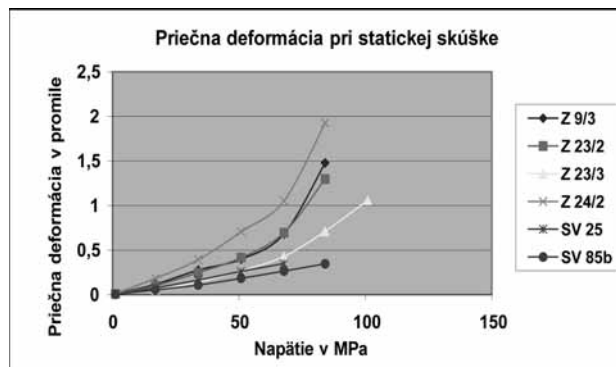
Obr. 5b. Priečna deformačia pri dynamickom zaťažení – 10 Hz

Fig. 5b. Transverse deformation under dynamic load – 10 Hz



Obr. 6a. Pozdĺžna deformačia pri statickej deformačnej skúške.

Fig. 6a. Longitudinal deformation during static deformation test.



Obr. 6b. Priečna deformačia pri statickej deformačnej skúške.

Fig. 6b. Transverse deformation during static deformation test.

Podobné výsledky sa dosiahli aj pri meraní priečnej dynamicko deformačie. Priečna deformačia rástla pri zvyšujúcom sa napätí (Obr. 5a, b).

Deformačia pri statickej skúške taktiež rástla pri zvyšujúcom sa napätí (Obr. 6a, b).

V tab. 2 sú prezentované priemerné hodnoty jednotlivých statických aj dynamických parametrov hornín (ν_{dyn} , $E_{def, dyn}$, E_{dyn} , G_{dyn}) a priemerných pozdĺžnych a priečných deformačii pre zlepenec, v tab. 3 pre slienité vápence.

Tab. 2. Priemerné hodnoty statických a dynamických parametrov zlepcov.

Tab. 2. Average values of static and dynamic characteristics of conglomerates.

	Vzorka č.	ν	E [MPa]	E_{def} [MPa]	G [MPa]	ϵ [‰]	μ [‰]	
Z 9 / 2	Statické parametre	X	22,815	22,443	X	2,167	X	
	Dyn. param.	5 Hz	49,035	38,271	X	1,354	X	
		10 Hz	X	57,304	39,103	X	1,089	X
Z 9 / 3	Statické parametre	0,169	18,602	18,044	7,898	2,986	0,589	
	Dyn. param.	5 Hz	0,169	36,778	31,778	15,683	2,081	0,433
		10 Hz	0,151	37,197	34,534	16,270	1,709	0,306
Z 23 / 2	Statické parametre	0,235	28,709	26,713	11,641	2,015	0,551	
	Dyn. param.	5 Hz	0,262	59,283	54,221	24,965	1,532	0,482
		10 Hz	0,196	56,113	58,647	23,520	1,071	0,228
Z 23 / 3	Statické parametre	0,156	25,103	24,545	10,793	2,852	0,442	
	Dyn. param.	5 Hz	0,133	49,581	49,467	21,926	2,142	0,325
		10 Hz	0,133	47,738	44,189	21,115	1,468	0,223
Z 24 / 2	Statické parametre	0,262	19,487	19,452	7,640	2,842	0,852	
	Dyn. param.	5 Hz	0,220	41,803	35,756	17,075	2,058	0,524
		10 Hz	0,215	47,701	36,944	19,865	1,697	0,412

Tab. 3. Priemerné hodnoty statických a dynamických parametrov slienitých vápencov.

Tab. 3. Average values of static and dynamic characteristics of marly limestones.

	Vzorka č.	ν	E [MPa]	E_{def} [MPa]	G [MPa]	ϵ [‰]	μ [‰]	
Z 9 / 2	Statické parametre	X	22,815	22,443	X	2,167	X	
	Dyn. param.	5 Hz	49,035	38,271	X	1,354	X	
		10 Hz	X	57,304	39,103	X	1,089	X
Z 9 / 3	Statické parametre	0,169	18,602	18,044	7,898	2,986	0,589	
	Dyn. param.	5 Hz	0,169	36,778	31,778	15,683	2,081	0,433
		10 Hz	0,151	37,197	34,534	16,270	1,709	0,306

Tab. 4. Hodnoty pozdĺžnej deformácie pri statickej skúške (‰).**Tab. 4. Values of longitudinal deformation under static test (‰).**

Napätie [Mpa]	Z 9/2 [‰]	Z 9/3 [‰]	Z 23/2 [‰]	Z 23/3 [‰]	Z 24/2 [‰]	SV 25 [‰]	SV 85b [‰]
1,129	0,063	0,093	0,05	0,058	0,093	0,024	0,016
16,939	0,951	1,397	0,745	0,876	1,393	0,364	0,242
33,879	1,653	2,365	1,41	1,573	2,208	0,689	0,515
50,818	2,541	3,082	1,988	2,197	2,909	1,228	0,729
67,758	3,523	3,753	2,612	2,808	3,641	1,812	1,125
84,033		4,335	3,322	3,323	4,063		1,453
100,896				3,486			

Tab. 5. Hodnoty pozdĺžnej deformácie pri dynamickej skúške – 5 Hz (‰).**Tab. 5. Values of longitudinal deformation under dynamic test – 5Hz (‰).**

Napätie [Mpa]	Z 9/2 [‰]	Z 9/3 [‰]	Z 23/2 [‰]	Z 23/3 [‰]	Z 24/2 [‰]	SV 25 [‰]	SV 85b [‰]
1,129	0,186	0,318	0,558	0,234	0,365	0,035	0,014
16,939	0,71	1,022	0,612	0,728	1,094	0,342	0,258
33,879	1,316	1,754	1,12	1,348	1,608	0,674	0,453
50,818	2,096	2,414	1,57	1,92	2,432	1,042	0,73
67,758		3,134	1,99	2,45	3,1	1,388	0,889
84,033			2,372	2,97			1,134
100,896				3,436			

Tab. 6. Hodnoty pozdĺžnej deformácie pri dynamickej skúške – 10 Hz (‰).**Tab. 6. Values of longitudinal deformation under dynamic test – 10Hz (‰).**

Napätie [Mpa]	Z 9/2 [‰]	Z 9/3 [‰]	Z 23/2 [‰]	Z 23/3 [‰]	Z 24/2 [‰]	SV 25 [‰]	SV 85b [‰]
1,129	0,244	0,402	0,564	0,25	0,419	0,058	0,03
16,939	0,714	0,892	0,576	0,488	0,932	0,29	0,177
33,879	1,172	1,678	1,04	0,91	1,534	0,538	0,338
50,818	1,383	1,812	1,53	1,236	1,93	0,996	0,593
67,758		2,454	1,914	1,65	2,394		0,771
84,033			2,282				
100,896							

Tab. 7. Hodnoty priecnej deformácie pri statickej skúške (‰).**Tab. 7. Values of transverse deformation under static test (‰).**

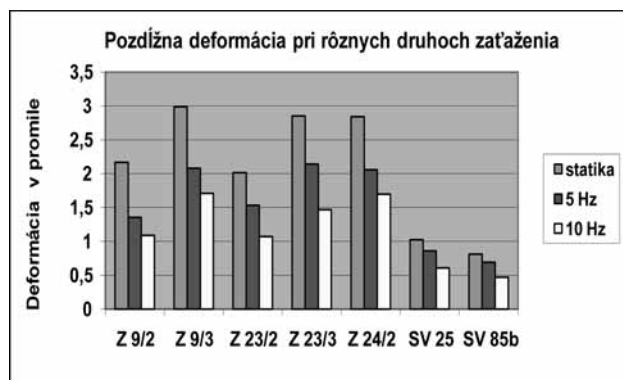
Napätie [Mpa]	Z 9/2 [‰]	Z 9/3 [‰]	Z 23/2 [‰]	Z 23/3 [‰]	Z 24/2 [‰]	SV 25 [‰]	SV 85b [‰]
1,129	X	0,008	0,007	0,004	0,012	0,005	0,0035
16,939	X	0,115	0,103	0,055	0,183	0,077	0,053
33,879	X	0,275	0,248	0,143	0,393	0,164	0,107
50,818	X	0,397	0,415	0,265	0,706	0,26	0,183
67,758	X	0,681	0,695	0,429	1,053	0,348	0,264
84,033	X	1,479	1,298	0,709	1,928		0,346
100,896	X			1,056			

Tab. 8. Hodnoty priecnej deformácie pri dynamickej skúške - 5 Hz (‰).**Tab. 8. Values of transverse deformation under dynamic test - 5Hz (‰).**

Napätie [Mpa]	Z 9/2 [‰]	Z 9/3 [‰]	Z 23/2 [‰]	Z 23/3 [‰]	Z 24/2 [‰]	SV 25 [‰]	SV 85b [‰]
1,129	X	0,059	0,081	0,08	0,1	0,017	0,0005
16,939	X	0,078	0,082	0,05	0,126	0,092	0,05
33,879	X	0,18	0,186	0,126	0,292	0,152	0,106
50,818	X	0,352	0,316	0,214	0,566	0,244	0,182
67,758	X	1,124	0,478	0,418	1,112	0,326	0,229
84,033	X		1,348	0,566			0,282
100,896	X			0,58			

Tab. 9. Hodnoty priecnej deformácie pri dynamickej skúške - 10 Hz (‰).**Tab. 9. Values of transverse deformation under dynamic test - 10Hz (‰).**

Napätie [Mpa]	Z 9/2 [‰]	Z 9/3 [‰]	Z 23/2 [‰]	Z 23/3 [‰]	Z 24/2 [‰]	SV 25 [‰]	SV 85b [‰]
1,129	X	0,051	0,059	0,038	0,097	0,028	0,0005
16,939	X	0,058	0,07	0,04	0,11	0,062	0,039
33,879	X	0,152	0,162	0,116	0,254	0,13	0,088
50,818	X	0,268	0,258	0,19	0,432	0,214	0,136
67,758	X	0,746	0,424	0,294	0,852		0,181
84,033	X			0,476			
100,896	X						



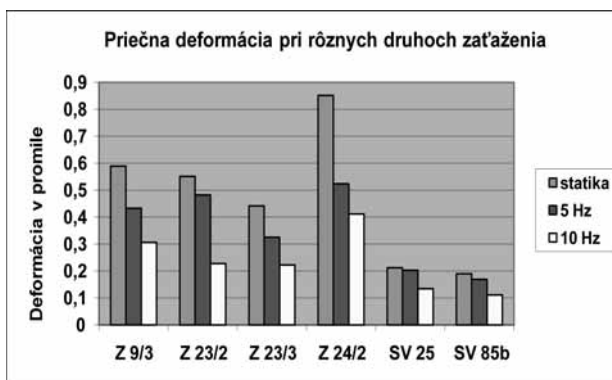
Obr. 7. Hodnoty maximálnej pozdĺžnej deformácie pri statickom a dynamickom namáhaní.

Fig. 7. Values of maximum longitudinal deformation under static and dynamic load.

5. ZÁVER

Z doteraz realizovaných statických, a dynamických deformačných skúšok zlepcov a slienitých vápencov vyplynuli nasledovné závery:

- ▶ dynamický modul pružnosti určený z rýchlosti ultrazvuku bol menší o 44 až 159% ako dynamický modul pružnosti určený priamou metódou – lisom (pri frekvencii 5 a 10 Hz), okrem vzorky Z 24/2, pri ktorej bol väčší o 2 až 17 % (tab. 1);
- ▶ vo všeobecnosti bol dynamický modul pružnosti, dynamický pretvárnny modul a dynamický šmykový modul väčší ako statický modul pružnosti, statický pretvárnny modul a statický šmykový modul o 72 až 159%;
- ▶ dynamické Poissonovo číslo bolo menšie o 11 až 21 % ako statické Poissonovo číslo, okrem vzoriek Z 23/2 a SV25, pri ktorých bolo väčšie o 0,5 až 11 % (tab. 2, 3);
- ▶ dynamické Poissonovo číslo bolo pri frekvencii 5 Hz vyššie ako pri frekvencii 10 Hz o 2 až 33 % (tab. 2, 3);
- ▶ dynamický modul pružnosti bol vyšší pri frekvencii 10 Hz ako pri frekvencii 5 Hz o 2 až 39 %, okrem vzoriek Z 23/2 a Z 23/3, pri ktorých bol nižší o 4 až 5 % (tab. 2, 3);
- ▶ dynamický pretvárnny modul bol vyšší pri frekvencii 10 Hz ako pri frekvencii 5 Hz o 2 až 9 %, okrem vzoriek Z 23/3 a SV 25, pri ktorých bol nižší o 11 až 42 % (tab. 2, 3);
- ▶ dynamický šmykový modul bol vyšší pri frekvencii 10 Hz ako pri frekvencii 5 Hz o 6 až 36 %, okrem vzoriek Z 23/2 a Z 23/3, pri ktorých bol nižší o 3 až 4 % (tab. 2, 3);
- ▶ celková pozdĺžna deformácia počas statickej deformačnej skúšky rástla pri zvyšujúcom sa napätí (vzorka sa stláčala), avšak čiastková deformácia medzi jednotlivými zaťažovacími stupňami sa v niektorých prípadoch zväčšovala (vz. Z 9/2, Z 23/2, SV 25, SV 85b), v iných sa zmenšovala (vz. Z 9/3, Z 23/3, Z 24/2) (tab. 4);
- ▶ čiastkové pozdĺžne deformácie medzi jednotlivými zaťažovacími stupňami pri frekvencii 5 Hz stúpali pri vzorkách Z 9/3, Z 23/3, Z 24/2 a SV 85b, a klesali pri vzorkách Z 9/2, Z 23/2 a SV 25 (tab. 5);
- ▶ čiastkové pozdĺžne deformácie medzi jednotlivými zaťažovacími stupňami pri frekvencii 10 Hz stúpali pri vzorkách SV 25



Obr. 8. Hodnoty maximálnej priečnej deformácie pri statickom a dynamickom namáhaní.

Fig. 8. Values of maximum transverse deformation under static and dynamic load.

a SV 85b, a klesali pri vzorkách Z 9/2, Z 9/3, Z 23/2, Z 23/3 a Z 24/2 (tab. 6);

- ▶ celková priečna deformácia počas statickej deformačnej skúšky rástla pri zvyšujúcom sa napätí (vzorka sa stláčala), avšak čiastková deformácia medzi jednotlivými zaťažovacími stupňami sa v niektorých prípadoch zväčšovala (vz. Z 9/3, Z 23/2, Z 23/3, Z 24/2 a SV 85b), v iných sa zmenšovala (vz. SV 25) (tab. 7);
- ▶ čiastkové priečne deformácie medzi jednotlivými zaťažovacími stupňami pri frekvencii 5 Hz stúpali pri vzorkách Z 9/3, Z 23/2 a Z 24/2, a klesali pri vzorkách Z 23/2, SV 25 a SV 85b (tab. 8);
- ▶ čiastkové priečne deformácie medzi jednotlivými zaťažovacími stupňami pri frekvencii 10 Hz stúpali pri vzorkách Z 9/3, Z 23/2, Z 23/3, Z 24/2 a SV 25 a klesali pri vzorkách SV 85b (tab. 9).

Najvyššie hodnoty pozdĺžnej a priečnej deformácie boli zaznamenané pri statickej zaťažovacej skúške (Obr. 7, 8), menšie hodnoty pri dynamickej zaťažovacej skúške pri frekvencii 5 Hz a najmenšie hodnoty pri frekvencii 10 Hz (tab. 2, 3)

Z doterajšieho výskumu sa nedajú jednoznačne vyvodit' závery z dôvodu malého počtu odskúšaných vzoriek. Doteraz realizované skúšky slúžili hlavne na vytvorenie optimálnej metodiky stanovenia dynamických parametrov hornín. Predpokladám, že v budúcnosti by sa skúšky mohli vykonávať na rôznych litologických typoch hornín, napríklad z pripravovaného inžinierskogeologického atlasu hornín Slovenska a štatisticky by bolo možné spracovať hodnoty dynamických parametrov hornín. Riešenie tejto úlohy má i praktický význam, pretože šírenie dynamických účinkov v podloží môže mať nepriaznivý vplyv na neďaleké stavebné objekty, a porovnanie dynamických vlastností horninového prostredia umožní navrhovať optimálne opatrenia na ich ochranu.

Literatúra

- Barton A, 2007: Rock quality, seismic velocity, attenuation and anisotropy. Balkema, Taylor & Francis, London, 735 s.
- Čorej J., Decký M., Komačka J., Schlosser F., Remišová E., Valuch M., Gavulová A. & Mučka P., 2001: Mechanika vozoviek. Navrhovanie vozoviek a spevnených plôch. ŽU/EDIS, Žilina, 350 s.

- Kaláb Z., 2007: Mělká podzemní díla a vibrace. *Tunel*, 16, 2, 12-20.
- 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.
- Pirner M., Baťa M., Fischer O., Frýba L., Hořejší J. & Novák P., 1989: Dynamika stavebních konstrukcí. Technický průvodce, svazek 33. SNTL, Praha, 488 s.
- Plander I. & Tomáš J., 1964: Dynamické vlastnosti viskoelastických materiálů a ich meranie. SAV, Bratislava, 116 s.
- STN EN 72 1001 Pomenovanie a opis hornín v inžinierskej geológii. SÚTN, Bratislava.

Summary: This paper presents the research of the influence of technical vibrations on the rocks properties. Impact of loading on the rocks can be static or dynamic. Dynamic load propagates in the rocks by seismic waves. We distinguish subsurface waves (longitudinal and transverse) and surface waves (Rayleigh's and Love's waves). These waves will incur vibration of the Earth's surface and underground. The vibrations or technical seismicity are the products of the technological procedures, such as mining blasting, ramming of the piles, using of the drilling-equipment or vibration machines. The vibrations could be also evocated by road or train traffics.

The most important dynamic elastic constant are dynamic modulus of elasticity E_{dyn} ; dynamic modulus of deformation E_{def} , dyn; dynamic shear-modulus G_{dyn} ; and especially dynamic Poisson's ratio ν_{dyn} . These parameters can be obtained by laboratory testing using conglomerate and marly limestones samples (nesprávna formulácia, platí pre všetky horniny). Significant parameters of dynamic laboratory test measuring by hydraulic jack are frequency of force and amplitude of force. The frequency of 5 and 10 Hz were used with amplitudes 28 kN (for example extent of force is 2 – 30 kN), 58 kN, 88 kN, 118 kN and 148 kN. Every deformational degree by dynamic test took 15 minutes. Every specimen contained 2 longitudinal and 2 transverse tensometric sensors.

The value of the dynamic Poisson's ratio was increased by rising of pressure. This parameter had not bigger value under dynamic deformation test than under static deformation test except for sample Z 23 / 2 at 5 Hz, SV 25 at 5 and 10 Hz, and SV 85 b at 5 Hz. The dynamic Poisson's ratio value was bigger by frequency 5 Hz than by 10 Hz frequency. Other values of the dynamic elastic modulus, dynamic deformation modulus and dynamic shear modulus were bigger than the values of static elastic modulus, static deformation modulus and static shear modulus. The value of the dynamic elastic modulus was bigger by frequency 10 Hz than frequency 5 Hz (except for samples Z 23/2 and Z 23/3). The value of the dynamic deformation modulus was bigger by frequency 10 Hz than frequency 5 Hz (except for samples Z 23/3 and SV 25). The value of the dynamic shear modulus was bigger by frequency 10 Hz than frequency 5 Hz (except for samples Z 23/2 and Z 23/3). The value of the dynamic elastic modulus determined by hydraulic jack was bigger than the value of the dynamic elastic modulus determined by ultrasound method (except for sample Z 24/2). Longitudinal and transverse deformations under the dynamic load increase. The biggest value had the static deformation, smaller value had the dynamic deformation by 5 Hz, and the smallest value had the dynamic deformation by 10 Hz.