

VYHODNOCENÍ LABORATORNÍCH ZKOUŠEK

Deformace elastomerových ložisek při zatížení

Z hodnot naměřených deformací elastomerových ložisek v jednotlivých měřicích místech (jednotlivé snímače deformace) byly spočteny průměrné hodnoty svislé deformace celého ložiska a také poměrné deformace ložiska jako celku (viz. Tab.3). Poměrné deformace byly vypočteny s uvážením skutečné tloušťky elastomeru v ložisku, která byla získána odečtením tloušťky ocelových výztužných plechů (6x2mm) od celkové výšky ložiska získané měřením.

Ložisko	24739				24737				24735			
F [kN]	Svislá Deformace [mm]	Poměr.přetvoření			Svislá Deformace [mm]	Poměr.přetvoření			Svislá Deformace [mm]	Poměr.přetvoření		
		Celkem	Úprava k nulové hodnotě			Celkem	Úprava k nulové hodnotě			Celkem	Úprava k nulové hodnotě	
0	0,000	0,000	-	-	0,001	0,000	-	-	0,000	0,000	-	-
100	1,998	0,068	-	-	2,313	0,079	-	-	2,138	0,073	-	-
0	0,087	0,003	-	-	0,389	0,013	-	-	0,219	0,008	-	-
100	2,068	0,071	-	-	2,391	0,082	-	-	2,186	0,075	-	-
0	0,092	0,003	-	-	0,386	0,013	-	-	0,263	0,009	-	-
0 (2')	0,041	0,001	0,000	-	0,270	0,009	0,000	-	0,212	0,007	0,000	-
30	0,715	0,025	0,023	-	1,073	0,037	0,028	-	-	-	-	-
30 (2')	0,773	0,026	0,025	-	1,137	0,039	0,030	-	0,949	0,033	0,025	-
40	0,993	0,034	0,033	-	1,333	0,046	0,036	-	-	-	-	-
40 (2')	1,046	0,036	0,034	-	1,383	0,047	0,038	-	1,191	0,041	0,034	-
50	1,255	0,043	0,042	-	1,584	0,054	0,045	-	-	-	-	-
50 (2')	1,313	0,045	0,044	-	1,666	0,057	0,048	-	1,432	0,049	0,042	-
60	1,485	0,051	0,049	-	1,801	0,062	0,052	-	-	-	-	-
60 (2')	1,543	0,053	0,051	-	1,849	0,063	0,054	-	1,573	0,054	0,047	-
70	1,695	0,058	0,057	-	1,989	0,068	0,059	-	-	-	-	-
70 (2')	1,761	0,060	0,059	-	2,036	0,070	0,061	-	1,829	0,063	0,056	-
80	1,860	0,064	0,062	-	2,154	0,074	0,065	-	-	-	-	-
80 (2')	1,897	0,065	0,064	-	2,195	0,075	0,066	-	1,971	0,068	0,060	-
90	1,988	0,068	0,067	-	2,288	0,078	0,069	-	-	-	-	-
90 (2')	2,032	0,070	0,068	-	2,321	0,080	0,070	-	2,100	0,072	0,065	-
100	2,115	0,072	0,071	-	2,398	0,082	0,073	-	-	-	-	-
100 (2')	2,153	0,074	0,072	-	2,432	0,083	0,074	-	2,203	0,076	0,068	-
100 (4')	2,175	0,075	0,073	-	2,443	0,084	0,074	-	2,214	0,076	0,069	-
100 (6')	2,180	0,075	0,073	-	2,457	0,084	0,075	-	2,226	0,076	0,069	-
100 (8')	2,188	0,075	0,074	-	2,474	0,085	0,076	-	2,233	0,077	0,069	-
100 (10')	2,198	0,075	0,074	-	2,479	0,085	0,076	-	2,236	0,077	0,070	-
0	0,190	0,007	-	-	0,469	0,016	-	-	0,418	0,014	0,007	-
0 (2')	0,060	0,002	-	0,000	0,365	0,013	-	0,000	0,313	0,011	-	0,000
100	2,115	0,072	-	0,070	2,435	0,083	-	0,071	2,211	0,076	-	0,065
200	3,170	0,109	-	0,107	3,455	0,118	-	0,106	3,313	0,114	-	0,103
300	3,883	0,133	-	0,131	4,140	0,142	-	0,129	3,894	0,134	-	0,123
400	4,425	0,152	-	0,150	4,693	0,161	-	0,148	4,408	0,151	-	0,141
400 (2')	4,543	0,156	-	0,154	4,793	0,164	-	0,152	4,514	0,155	-	0,144
0	0,250	0,009	-	0,007	-	-	-	-	-	-	-	-
0 (2')	0,110	0,004	-	0,002	-	-	-	-	-	-	-	-

Tab.3 – Hodnoty průměrných svislých deformací a poměrných přetvoření získaných z hodnot naměřených v průběhu experimentu

Hodnoty přetvoření pro jednotlivá ložiska byly získány ze vztahu :

$$\varepsilon_c = \frac{w_z}{T_0},$$

kde w_z – průměrná zaznamenaná deformace (ze skupiny 4 měřidel)
 T_0 – průměrná celková tloušťka pryže se zanedbáním horní a dolní krycí vrstvy určená jako :

$$T_0 = H_{Lož.} - t_{Pl} \cdot n,$$

kde $H_{Lož.}$ – průměrná výška ložiska
 t_{Pl} – tloušťka ocelového výztužného plechu (v našem případě $t_{Pl} = 2$ mm)
 n – počet ocelových výztužných plechů (v našem případě $n = 6$)

Napětí v ložisku

Výpočet napětí od zatížení v ložisku jako takový není v našem případě nikterak složitý. Otázkou však zůstává, jakou plochu ložiska pro výpočet napětí uvažovat. Jak je patrné z Obr.7, nepůsobí ani při centrickém zatížení celá plocha ložiska ale jen její část.

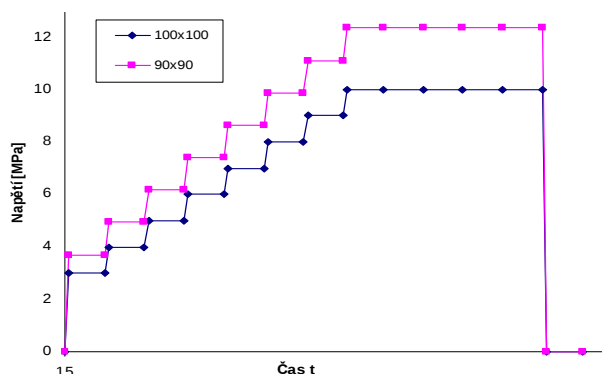
Návrh EN 1337-3 udává jako účinnou plochu elastomerového ložiska plochu výztužných plechů v tomto ložisku. V našem případě se jedná o 81% celkové plochy ložiska (výztužné plechy mají rozměr 90x90mm). Při porovnání s přenosovou plochou napětí na lícni (stykové) ploše ložiska se zkušebním lisem je patrné, že styčná plocha je menší než plocha výztužných plechů, a to o cca 5÷10% (tvoří tak 70÷75% celkové plochy ložiska).

Zmenšení přenosové plochy zatížení v ložisku je způsobeno tím, že elastomer ložiska není pevně spojen s čelistí zkušebního lisu, a tak dojde vlivem příčné deformace ložiska k vyloučení této části z tlakového působení ložiska jako celku. Vzhledem k relativně malému rozdílu skutečné přenosové plochy zatížení a plochy výztužných plechů lze předpokládat, že tuhost výztužných plechů a jejich dokonalé spojení s elastomerem vulkanizací zajistí ve vnitřních částech ložiska mezi výztužnými plechy rovnoměrný průběh napětí v elastomeru. Účinnou plochu ložiska tak budeme předpokládat v souladu s návrhem EN 1337-3.

Z hlediska výpočtu vnitřních sil jsou ale důležité jen hodnoty modulu pružnosti v tlaku a plocha ložiska, jež se v souladu s kap.3 přepočtou na tuhost podepření. V tomto případě je nutné jen zavést do výpočtu odpovídající si hodnoty příslušných parametrů, tj. příslušnou plochu ložiska A a modul pružnosti v tlaku E odpovídající této ploše.

Z tohoto hlediska je tedy vhodnější, z důvodu vzniku numerické chyby, volit jako základní plochu ložiska jeho půdorysné rozměry a modul pružnosti vztáhnout k této ploše. Naopak z hlediska výšky ložiska ponecháme jeho základní výšku rovnou tloušťce vrstvy elastomeru. Je totiž patrné, že ve svislém směru je deformace jednotlivých částí ložiska úměrná jejich modulu pružnosti v tlaku a ten je u oceli řádově větší (cca tisíckrát) než u elastomeru. Taktéž v ostatních výpočtech (např. při výpočtech vodorovné deformace) je běžné počítat s výškou elastomeru, a ne s výškou celého ložiska.

Průběh napětí v ložiscích při laboratorní zkoušce je znázorněn na Obr.8. V grafu jsou vyznačeny dva průběhy napětí v závislosti na čase, jeden odpovídající ploše celého ložiska a druhý potom rozměru výztužných plechů. Napětí je zobrazeno v úseku hlavního zatěžovacího procesu.



Obr.8 – Napětí v ložisku při zatížení 0÷100% únosnosti pro různou účinnou plochu

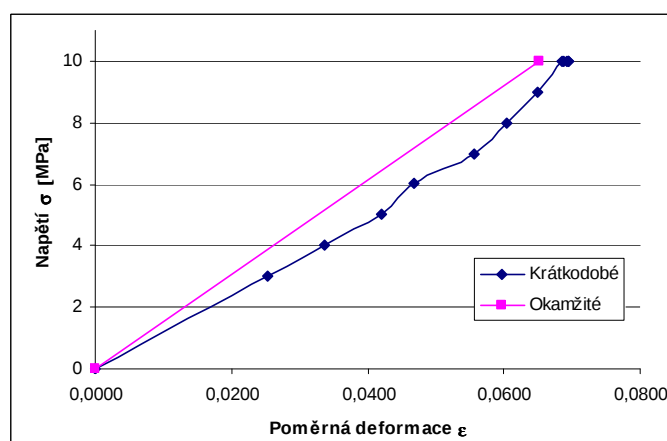
Pracovní diagram elastomerových ložisek

Pracovní diagram ložiska jest závislostí poměrného přetvoření ložiska na působícím napětí, resp. síle. Poměrné deformace jsme určili z výšky elastomeru ložiska a jeho jednotlivých svislých deformací od zatížení v 4.3.1. Napětí v ložisku budeme uvažovat v souladu s 4.3.2 na celou půdorysnou plochu ložiska, tedy jako podíl působící svislé síly a plochy ložiska :

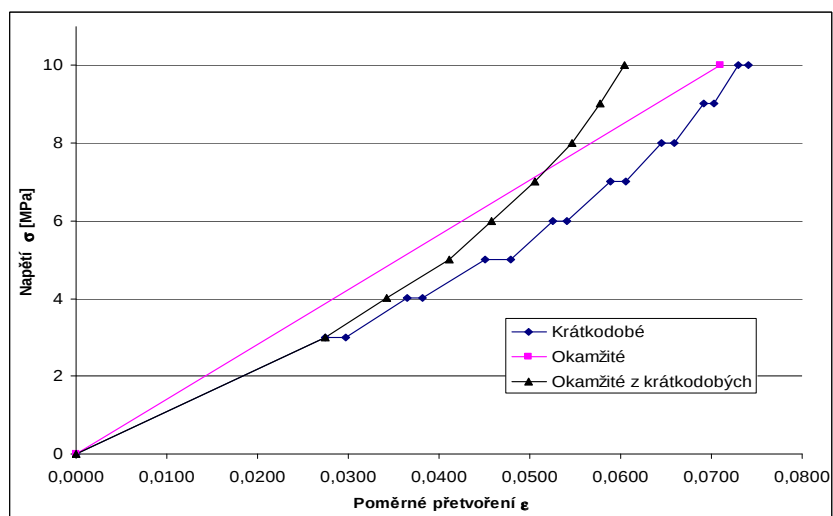
$$\sigma = \frac{F_z}{A}$$

Do pracovního diagramu vyneseme několik závislostí poměrné deformace a napětí viz. Obr.9 – 4.11). První z nich bude pracovní diagram ložiska pro krátkodobé zatížení, tedy zatížení řádově deset minut. Toto zatížení je v experimentu reprezentováno postupným zatěžováním ložiska z nulového zatížení na hodnotu maximální únosnosti ložiska v intervalech 2 minut (celková délka trvání zatížení 16 minut). V praxi by bylo možné toto zatížení přirovnat k přejezdu zvláštní soupravy po mostě. Dalším pracovním diagramem bude diagram zatížení okamžitého, získaný ze závěrečné zkoušky ložiska s postupným zatěžováním po 100 kN. Z tohoto diagramu bude použita jen první větev zatížení (100kN). Toto zatížení odpovídá klasickému zatížení dopravou. Posledním dílčím diagramem bude diagram okamžitého zatížení získaný z diagramu krátkodobého vynecháním úseků plastické deformace.

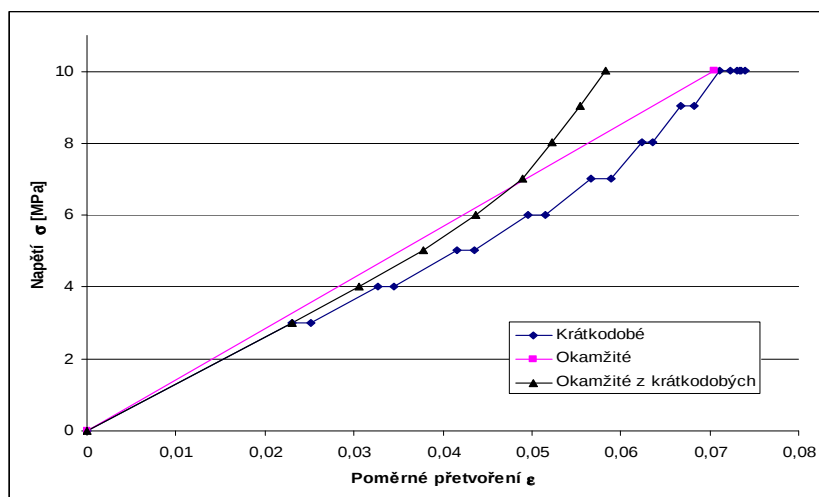
Výjimku k předchozímu odstavci bude tvořit ložisko 24735 (viz. Obr.9), u kterého nebyly odečteny hodnoty deformace na počátcích zatěžovacích kroků hlavního zatěžovacího sledu. U tohoto ložiska není na diagramu krátkodobého zatížení patrná plastická část deformace, která proběhne v čase dvou minut, kdy je zatížení ložiska konstantní.



Obr. 4.9 – Pracovní diagram ložiska 24735



Obr. 4.10 – Pracovní diagram ložiska 24737



Obr. 4.11 – Pracovní diagram ložiska 24739

Modul pružnosti v tlaku elastomerových ložisek

Modul pružnosti ložiska se určí jako tangenta příslušného pracovního diagramu ložiska. V našem případě, kdy je pracovní diagram nelineární, je třeba zvolit metodu výpočtu modulu pružnosti E . Modul pružnosti můžeme určit jako sečnový nebo tečnový. S ohledem na tvar pracovního diagramu (viz. Obr.9 – 4.11) a potřebu co nejlepší aproximace v daném intervalu zatížení (resp. napětí) je patrné, že vhodnější variantou je modul sečnový. Sečnový modul pružnosti E_{cs} určíme pro různé druhy zatížení v různých intervalech F_{Max} . Sečnový modul pružnosti E_{cs} elastomerového ložiska běžně určíme ze vztahu :

$$E_{cs} = \frac{\sigma_{c2} - \sigma_{c1}}{\varepsilon_{c2} - \varepsilon_{c1}},$$

kde σ_{c1} – napětí při 1/3 maximálního namáhání
 σ_{c2} – napětí při maximálním namáhání
 ε_{c1} – přetvoření při 1/3 maximálního namáhání
 ε_{c2} – přetvoření při maximálním namáhání

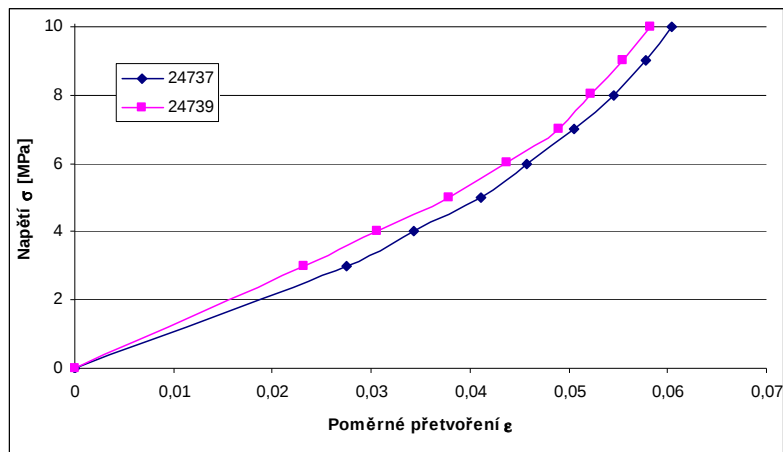
S ohledem na potřebu převedení nelineárního pracovního diagramu ložiska na lineární – zavedením modulu konstantního pružnosti pro ložisko převedeme úlohu na lineární – je vhodné neurčovat konečnou hodnotu dle výše uvedeného vztahu. Vhodné je v tomto případě aplikovat lineární regresi (metodu nejmenších čtverců) na naměřené hodnoty pracovního diagramu a vypočítat tak ideální hodnotu modulu pružnosti elastomeru v tlaku.

Z důvodu různé doby působení a charakteru zatížení je třeba uvažovat pro jednotlivé druhy zatížení různé moduly pružnosti E_{cs} , resp. zahrnout či nezahrnout do nich plastické deformace elastomeru ložiska.

1. Okamžité zatížení

Jako modul pružnosti ložiska se v případě okamžitých zatížení použije sečnový modul pružnosti $E_{cs,i}$ určený z pracovního diagramu okamžitého zatížení ze zatížení krátkodobých (viz. Obr.9 – 4.11 Okamžité z krátkodobých). Tento pracovní diagram nejlépe vystihuje náhle působící břemeno při náhlém zatížení konstrukce (např. dopravou na krajních opěrách mostu), a zároveň představuje nejužší možné chování ložiska při zatížení. Vlivem plastických deformací se totiž při delší době trvání zatížení snižuje celkový modul pružnosti ložiska.

Zároveň se pro výpočet modulu pružnosti $E_{cs,i}$ okamžitého zatížení použijí pouze hodnoty napětí v intervalu $(1/3 \div 1)\sigma_{max}$ a deformace ε jim odpovídající (podle EN 1337-3). Tím se do výpočtu zavede počáteční napětí v ložisku rovné 30% únosnosti, představující zatížení stálé, resp. zatížení vlastní tíhou.



Obr.12 – Pracovní diagram ložisek pro zatížení okamžité

Z Obr.12 je patrné, že bylo vynecháno ložisko s označením 24735. U tohoto ložiska byly v každém zatěžovacím kroku měřeny pouze konečné deformace se zahrnutým vlivem plastického přetvoření. Proto nebylo možné stanovit okamžité hodnoty modulu pružnosti v každém dílčím kroku.

V Tab.4 jsou uvedeny vypočtené hodnoty okamžitých sečnových modulů pružnosti $E_{cs,i}$ pro sledovaná ložiska.

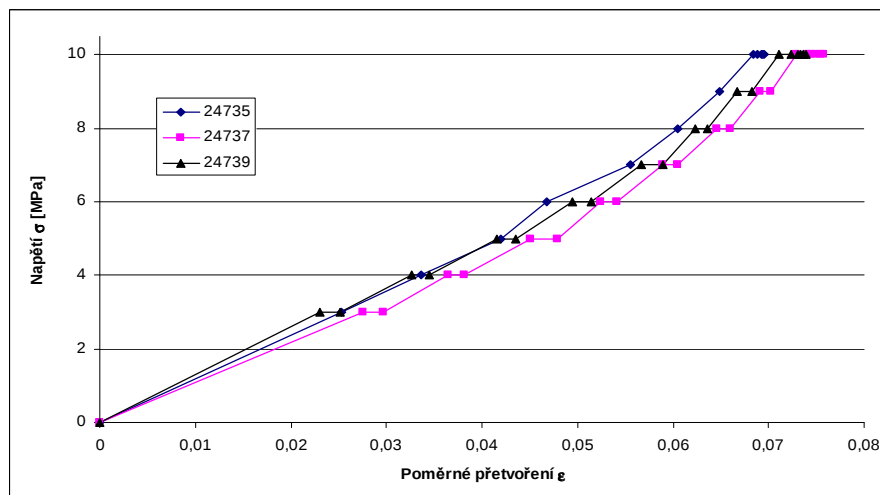
Ložisko	E [MPa]
24737	213,8
24739	201,2

Tab.4 - Hodnoty sečnových modulů pružnosti jednotlivých ložisek pro okamžité zatížení

2. Krátkodobé

Pro výpočet účinků krátkodobého zatížení se použije modul pružnosti $E_{cs,s}$, který se určí z krátkodobého pracovního diagramu ložiska. Při porovnání pracovního diagramu ložiska pro okamžité zatížení, vyneseno pro poslední zkoušku ložisek (4-násobné přetížení), a pracovního diagramu pro krátkodobé zatížení, je patrné, že konečné deformace při dosažení únosnosti ložiska jsou téměř shodné.

Pro výpočet $E_{cs,s}$ tak použijeme opět lineární regresi aplikovanou na interval $(1/3 \div 1)\sigma_{max}$ pracovního diagramu ložiska pro krátkodobé zatížení včetně plastických deformací ložiska v oblasti před dosažením maximální únosnosti. Ve výpočtu znovu předpokládáme, že zatížení stálé, resp. vlastní tíhou, tvoří cca 30 % celkového zatížení ložiska.



Obr.13 – Pracovní diagram ložisek pro zatížení krátkodobé

Typickým příkladem krátkodobé zatížení je například zatížení dopravou na vnitřním pilíři spojitě mostní konstrukce. Průběh napětí v takovémto ložisku tak není skokový, nýbrž narůstá postupně do maximální hodnoty a poté opět postupně klesá k nule.

Na Obr.13 je pracovní diagram elastomerového ložiska při zatížení krátkodobém, aplikovaném po krocích velikosti 1 Mpa a podrženém vždy po dobu 2 minut. Pokud aplikujeme výše uvedenou metodu lineární regrese na výpočet modulu pružnosti v tlaku, obdržíme pro jednotlivá ložiska následující hodnoty :

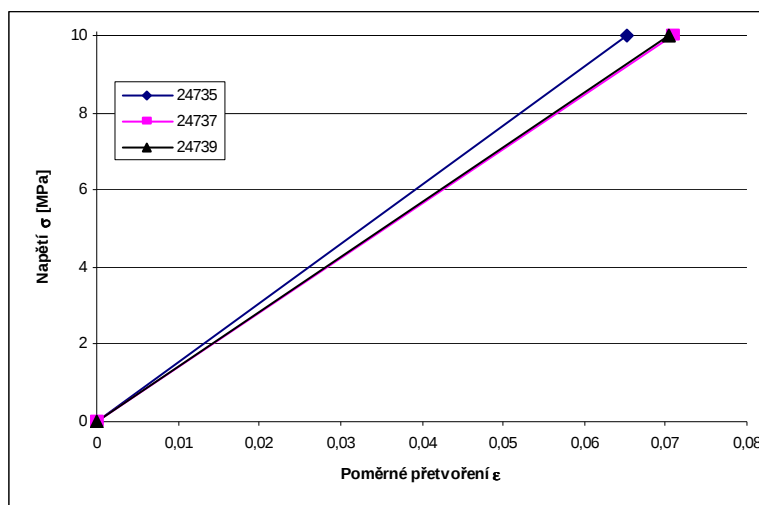
Ložisko	E [MPa]
24735	168
24737	164,2
24739	160,3

Tab.5 – Hodnoty sečnových modulů pružnosti jednotlivých ložisek pro krátkodobé zatížení

3. Dlouhodobé a stálé zatížení

Pro výpočet účinků zatížení dlouhodobého a stálého se použije modul pružnosti $E_{cs,g}$ určený z pracovního diagramu posledního zatížení ložiska na 4-násobek jeho únosnosti, resp. jeho první část odpovídající zatížení 0-100 kN. Tento modul zahrnuje všechny vlivy dotvarování ložiska v průběhu působení zatížení. V době podržení zatížení na maximální únosnosti ložiska je navíc jasně patrná tendence k ustálení plastických deformací.

Použitý pracovní diagram odpovídá nejnepříznivějšímu možnému průběhu stálého zatížení, tedy rychlému spuštění konstrukce na ložiska. Jedná se tak o nejtuzší možné chování ložiska při daném způsobu zatížení.



Obr.14 – Pracovní diagram ložisek pro zatížení dlouhodobé a stálé

Na Obr.14 jsou pracovní diagramy jednotlivých elastomerových ložisek při zatížení dlouhodobém a stálém. Zatížení je na ložisko aplikováno najednou, v jednom zatěžovacím kroku. Čtení deformací potom proběhlo zároveň s ukončením zatížení. V Tab.6 jsou uvedeny příslušné moduly pružnosti pro jednotlivá ložiska.

Ložisko	E [MPa]
24735	153,5
24737	141,1
24739	142,1

Tab.6 – Hodnoty modulů pružnosti jednotlivých ložisek pro dlouhodobé a stálé zatížení

4. Hodnoty modulů pružnosti pro jednotlivá ložiska

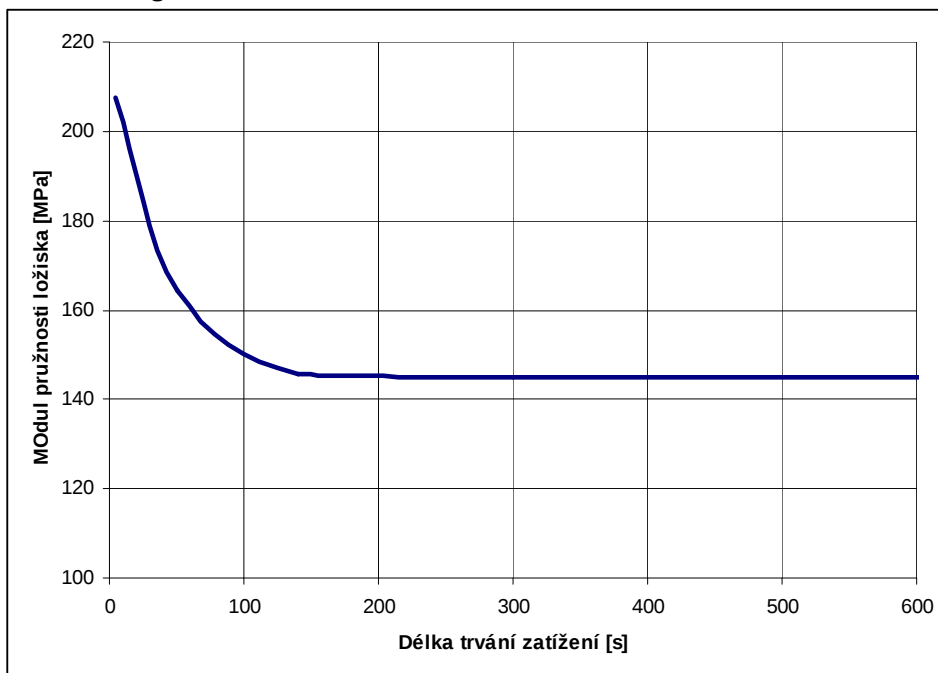
Z výsledků experimentálních zkoušek je patrné, že ložisko 24735 má odlišné deformační vlastnosti od ostatních dvou ložisek. Toto je zejména patrné z pracovního diagramu ložiska pro zatížení dlouhodobé a stálé. Méně potom z pracovního diagramu ložiska pro zatížení krátkodobé. Pokud porovnáme moduly pružnosti jednotlivých ložisek, nalezneme výraznější rozdíl jen v modulu pro dlouhodobé a stálé zatížení. Průměrný sklon pracovního diagramu v oblasti $(0,3 \div 1)\sigma_{max}$, je pro všechny pracovní diagramy obdobný.

Vyhodnotíme nyní výsledky experimentálního měření jako soubor tří nezávislých měření, tj. vypočteme aritmetický průměr z vypočtených výsledků (viz. Tab.7). Získáme tak hodnoty jednotlivých modulů pružnosti ložisek, které následně porovnáme s hodnotami získanými od výrobce ložisek.

Zatížení	Ložisko			Průměr
	24735	24737	24739	
Okamžité	-	213,8	201,2	207,5
Krátkodobé	168,0	164,2	160,3	164,2
Stálé a dlouhodobé	153,5	141,1	142,1	145,6

Tab.7 – Hodnoty modulů pružnosti E v MPa pro jednotlivá ložiska a příslušná zatížení

Z průměrných hodnot modulů pružnosti vypočtených v Tab.7 je patrná stoupající tendence tuhosti ložisek se zkracující se dobou zatížení. Vyneseme-li závislost modulu pružnosti ložisek na délce trvání zatížení do grafu, dostaneme závislost zobrazenou na Obr. 4.15.



Obr. 4.15 – Závislost modulu pružnosti ložiska na délce trvání zatížení

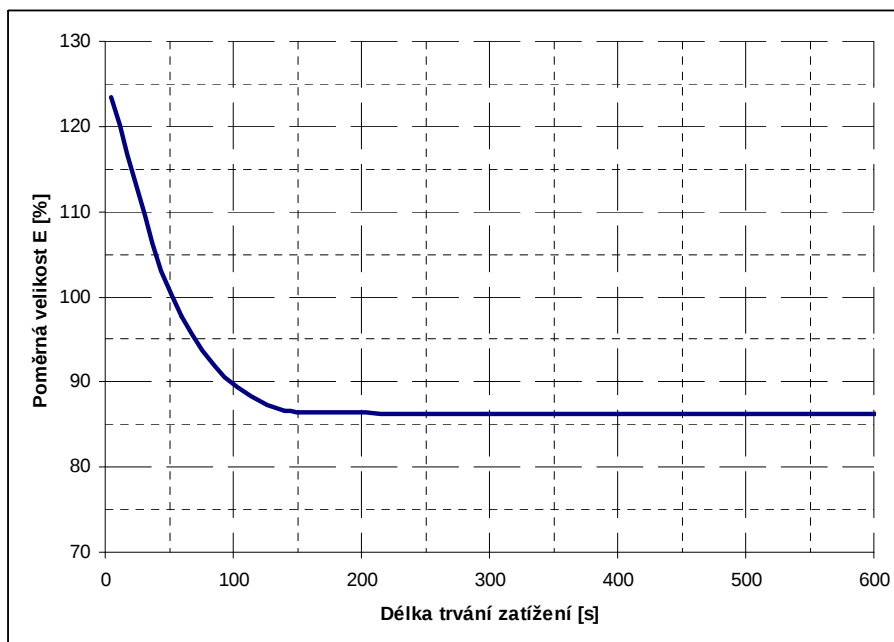
Při porovnání výsledků experimentálního měření a výsledků získaných od výrobce (ELA PRODUCT, resp. SOK Třebestovice s.r.o.), zjistíme, že hodnoty modulu pružnosti ložisek udané výrobcem se pro zkoušená ložiska téměř shodují s hodnotami modulu pružnosti pro krátkodobé zatížení (výrobce udává pro ložiska 100x100mm modul pružnosti $E = 168$ MPa). Uvažujeme tedy hodnotu modulu pružnosti pro krátkodobé zatížení za základní a vyčíslíme rozdíly v jednotlivých modulech pružnosti ložisek (viz. Tab.8).

Okamžité	Krátkodobé	Stálé a dlouhodobé
126,4	100	88,7

Tab. 4.8 – Poměr jednotlivých modulů pružnosti k modulu pružnosti pro krátkodobé zatížení

Z výsledků experimentálních zkoušek tedy, na základě porovnání v Tab.8, plyne, že moduly pružnosti elastomerových ložisek 100x100 mm, je třeba v případech namáhání okamžitým nebo stálým zatížením třeba upravit. V případě okamžitého zatížení jsou hodnoty vnitřních sil určených s uvažováním modulu pružnosti dle doporučení výrobce podhodnoceny, v případě zatížení stálého a dlouhodobého potom nadhodnoceny.

Lze předpokládat, že chování ložisek větších rozměrů bude analogické chování odzkoušených ložisek. Tedy, že nárůst modulu pružnosti pro okamžité zatížení bude činit cca 25 % a pokles modulu pružnosti pro zatížení stálé a dlouhodobé cca 10%. Vyneseme-li závislost procentuální velikosti modulu pružnosti na délce trvání zatížení dostaneme nomogram použitelný pro odečtení velikosti úpravy modulu pružnosti zvoleného ložiska oproti hodnotě udané výrobcem (viz. Obr.16).



Obr.16 – Poměrná velikost modulu pružnosti elastomerového ložiska v závislosti na době trvání zatížení oproti údajům od výrobce

V Tab.9 jsou uvedeny hodnoty modulů pružnosti E v závislosti na typu zatížení pro nejčastěji používané rozměry obdélníkových elastomerových ložisek. Základní hodnoty modulů pružnosti E jednotlivých typů ložisek byly převzaty z dokumentace elastomerových ložisek dle katalogu SOK Třebestovice.

Rozměr ložiska [mm]	Dle SOK Třebestovice	Okamžité	Krátkodobé	Dlouhodobé a stálé
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
100 x 100	168	210	168	151,2
100 x 150	235	293,75	235	211,5
150 x 200	480	600	480	432
200 x 300	355	443,75	355	319,5
200 x 250	315	393,75	315	283,5
200 x 400	430	537,5	430	387
250 x 400	610	762,5	610	549
300 x 400	630	787,5	630	567
350 x 450	520	650	520	468
500 x 600	1000	1250	1000	900
600 x 700	760	950	760	684
700 x 800	1000	1250	1000	900
800 x 800	829	1036,25	829	746,1
900 x 900	1050	1312,5	1050	945

Tab.9 – Hodnoty modulů pružnosti E v závislosti na typu zatížení pro nejčastěji používaná obdélníková elastomerová ložiska