

Vliv přejezdů těžkých vozidel přes zakopané potrubí na jeho napjatost

Effect of Heavy-duty Vehicles Riding over Buried Pipes on Stress in the Pipes

Ing. Lubomír Gajdoš, CSc.¹⁾, Ing. Martin Šperl, Ph.D.¹⁾, Ing. Stanislav Hračov, Ph.D.¹⁾,
Ing. Petr Crha, CSc.²⁾

¹⁾ Ústav teoretické a aplikované mechaniky AVČR, v.v.i.

²⁾ CEPS a.s.

Email: gajdos@itam.cas.cz, petr.crha@ceps-as.cz

SOUHRN:

V článku jsou uvedeny a diskutovány výsledky teoretického i experimentálního výzkumu deformačních a napěťových změn ve stěně zakopaného plynovodního potrubí způsobených přejezdy těžkého vozidla, a to zejména z hlediska vhodnosti používání ochranných trubek na vysokotlakých plynovodech. Po celém obvodu trubního tělesa DN 500 z oceli L360NE, konkrétně v pozicích 12 h, 3 h, 6 h a 9 h, byly tenzometricky měřeny poměrné deformace v obvodovém a podélném směru, a to od stavu jeho uložení do vykopané rýhy a zasypu až do přejezdů vozidla při prázdném tělese a při jeho natlakování na 5,5 MPa, resp. 5,2 MPa. Z naměřených deformací byly určeny hodnoty obvodových i podélných napětí po obvodu tělesa a z nich byl určen čistý vliv přejezdů. Pokud uvažujeme obvodové napětí v poloze 12 h, pak napětí od přejezdu vozidla přes prázdné potrubí je podle tenzometrických měření necelých -5 MPa a dle přibližných výpočtů -9,4 MPa. U natlakovaného tělesa je tento vliv ještě menší. Získaný výsledek ukazuje, že vliv vnějších zatížení od přejíždějících vozidel nepředstavuje z hlediska celkové napjatosti potrubí žádnou mimořádnou hrozbu.

KLÍČOVÁ SLOVA:

Tenzometrické měření, napjatost potrubí, přejezdy vozidla

SUMMARY:

The contribution describes and discusses the results of theoretical and experimental research into the changes in the deformation and stress in the walls of a buried gas pipeline caused by heavy-duty vehicles riding over it, in particular as regards the use of casing on high-pressure gas pipelines. Over the entire circumference of a DN 500 pipe of L360NE steel, specifically in the 12, 3, 6 and 9 o'clock positions, relative deformations were strain gauged in the circumferential and longitudinal directions; the measurements covered a range from the condition of the pipe when buried in the excavation and backfilled until the riding of a vehicle over the pipe when empty and then when pressured up to 5.5 MPa and 5.2 MPa. The measured deformations served as input data for calculating the values of hoop and longitudinal stress over the circumference of the pipe, and the net effect of vehicle rides was determined from them. Considering the hoop stress in the 12 o'clock position, the stress caused by the vehicle riding over the empty pipe is less than -5 MPa based on the strain gauge measurements, and it is -9.4 MPa based on approximate calculations. This effect is even weaker for the pipe under pressure. The results show that the effect of external load caused by vehicles does not constitute any extreme risk in terms of overall stress in the pipeline.

KEY WORDS:

Strain gauge measurements, pipe stress, vehicle riding

1. Úvod

Již dlouhou řadou let se táhne plynárenstvím diskuse o potřebě instalace ochranných trubek (včetně jejich specifické kategorie chrániček) na vysokotlakých plynovodech. Na jedné straně se uvádějí jejich přínosy, na straně druhé se zdůrazňuje jejich negativní vliv na korozní situaci potrubí.

Podrobně zbilancovat pozitiva a negativa chrániček by vyžadovalo značný prostor, pro který je rozhodně vhodnějším fórem odborná konference než jediný článek v časopisu Plyn. Navíc bilanční články nutně odrážejí stanovisko autora, což pro tak závažnou otázku není právě nejvhodnější, protože tady je potřeba spíše neutrálního moderátora. Nicméně snad lze oprávněně konstatovat, že současné (nejen české) plynárenství se snaží instalaci chrániček co nejvíce omezit na opravdu

nezbytné případy. Většinou jsou chráničky považovány spíše za nutné zlo než za bezpečnostní přínos.

Požadavek na instalaci chrániček má řadu aspektů, které lze rozdělit do tří základních skupin:

- Legislativní a normativní důvody
- Ochrana bezprostředního okolí proti šíření plynu z eventuálního úniku na potrubí
- Ochrana potrubí proti vnějším vlivům.

Tento příspěvek se vědomě nezabývá diskusí ochrany proti šíření plynu, kterou autoři nechávají pro jiné fórum.

Legislativní a normativní důvody instalace chrániček jsou závislé na důvodech technických. To nakonec ukázala i dlouhá diskuse při schvalování novely TPG 702 04 [1], jejímž výstupem bylo

rozhodnutí prozatím v předpisu použití chrániček ponechat, nicméně současně s návrhem, aby bylo Technické koordinační komisi ČPS doporučeno zpracování změny, která by potřebovala chrániček řešila na základě zhodnocení konkrétních podmínek. Důvodem tohoto poněkud šalamounského řešení je fakt, že prastará vyhláška č. 48/1982 Sb. stále ještě stanoví ve svém § 185 Zařízení pro rozvod plynů v odst. (3) – „Pokud rozvody plynů křížují komunikace nebo prostory, které by mohly být naplněny unikajícím plynem, musí být uloženy do ochranné trubky, ve které nesmí být rozebíratelné spoje.“ Důvody, proč tomu tak je, jsou mlhavé. O tom, co je zde míněno komunikací, se vedly vášnivé diskuse, nicméně výsledkem je stav, kdy se osazují chráničky na plynovody v místě křížení s kdekou polní nebo lesní cestou.

Přitom je otázkou, kdy dojde k novelizaci legislativního systému v této oblasti – předpokládá se zrušení této vyhlášky, která je legislativně na hraně ústavního rámce, neboť ukládá povinnosti, což je u podzákoného předpisu v současné době nezákonné. Ještě větší otázkou však je, zda se do nového předpisu (nejspíše nařízení vlády) stejný požadavek znovu nedostane.

Jedním z důvodů, který uvádějí zastánci chrániček pro ponechání této povinnosti, je ochrana potrubí proti vlivu vnějšího zatížení. Přitom tato otázka je řešena spíše pocitově, v lepším případě modelováním. Ovšem každý model je jen tak realistický, jak realisticky jsou popsány procesy, které na systému probíhají.

Aby však byla získána technická jistota, je třeba vycházet z tvrdých dat, získaných měřeními na reálném systému. Teprve tak lze věrohodně diskutovat o tom, zda je potřeba chránit potrubí proti vlivu vnějšího zatížení, jak je takové namáhání velké a jaký je jeho příspěvek k celkové napjatosti ve stěně potrubí.

V rámci jiného experimentálního programu při řešení projektu Centra kompetence CAMPT (TAČR TE02000162) provedli pracovníci Ústavu teoretické a aplikované mechaniky Akademie věd ČR (ÚTAM) společně s firmou CEPS a.s. konkrétní detailní měření, která na tuto otázku přináší alespoň částečnou odpověď.

2. Experimentální část

Experimentální práce byly uskutečněny v roce 2019 v areálu Poličských strojírny [2]. Sem bylo převezeno experimentální trubní těleso s navařenými dny, které bylo připravené na tlakování vzduchem pomocí mobilního výkonného kompresoru LMF s maximální tlakovou kapacitou až 60 bar. Na potrubí byly již v laboratoři přilepeny tenzometry pro měření deformací na vnějším povrchu stěny v obvodovém i podélném směru (směr osy potrubí).

2.1 Charakteristika zkušebního tělesa

Jednalo se o novou trubku z produkce Salzgitter Mannesmann Line Pipe, která měla následující parametry:

vnější průměr	D = 508 mm
tloušťka stěny	t = 6,3 mm
délka	l = 6,0 m

materiál	ocel tř. L360NE (nelegovaná, pro bezešvé a svařované trubky)
typ	podélně svařovaná
izolace	neizolovaná
tlaková dna	ano (délka se dny cca 6,5 m)

Toto trubní těleso bylo položeno s krytím podle čl. 6.3.5 TPG 702 04 [1] pro citlivé úseky plynovodu a během experimentů bylo tlakováno vzduchem na tlak 5,5 MPa. Mechanické vlastnosti dle Inspekčního certifikátu byly: $R_{\sigma,0.5} = 400$ MPa a $R_m = 587$ MPa a vrubová houževnatost KV při 0 °C = 72 J. Detailní popis experimentů je uveden níže.

2.2 Umístění tenzometrů

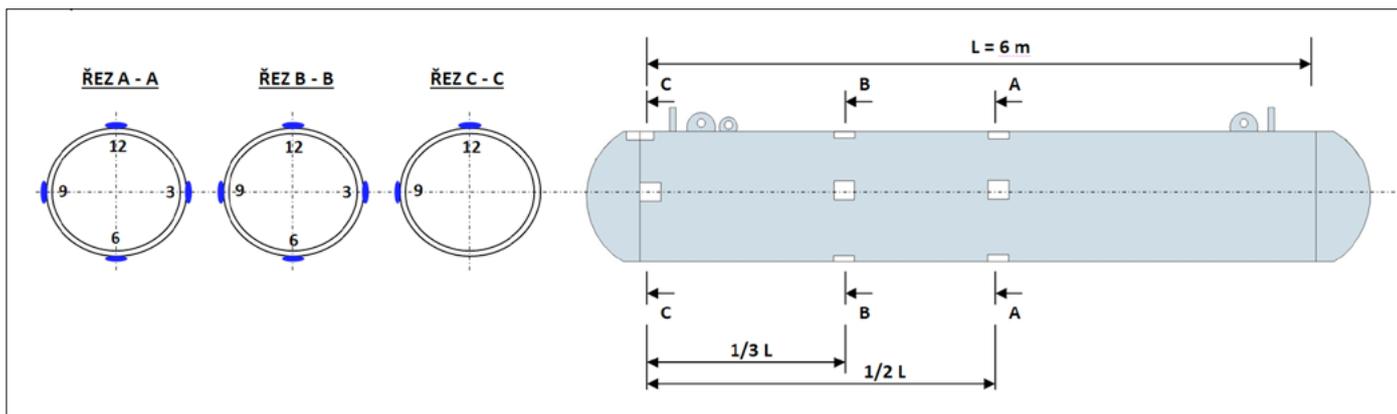
Pro stanovení deformačního vlivu tlakování na zakopaném trubním tělese a vlivu přejezdu těžkého vozidla nad takto krytým potrubím byly nejdříve v laboratoři přilepeny na vnější stěnu trubního segmentu tenzometrické kříže (umožnily měření deformací v osovém a obvodovém směru potrubí). Poloha tenzometrů ve dvou řezech (polovina a třetina délky segmentu) potrubí odpovídala šesté, dvanácté, třetí a deváté hodině. Dále byl vnější povrch potrubí osazen příložným teplotním čidlem, které bylo teplotně odizolováno od okolí.

Pro snazší orientaci uvádíme níže na obr. 1 schematický náčrtek. Na zakopaném tělese byl aktivní pouze řez A a B. Z toho pro kontinuální měření během všech experimentů byl vybrán řez B. Měření deformací na řezu A se spouštělo pouze pro specifické části experimentu z důvodu použití klasické tenzometrické ústředny a omezené kapacity napájecího zdroje (v místě experimentů nebylo běžné síťové napájení). Vzhledem k rozsahu článku se zabýváme v této práci pouze hodnotami deformací z řezu B. Lze však konstatovat, že naměřené hodnoty a trendy jsou velice podobné pro oba dva řezy (A i B). Řez C byl použitý pro předchozí laboratorní experiment, který měl za cíl stanovit vliv přivařených dnů na průběh napjatosti v místech přechodu z povrchu potrubí směrem k ohybu dna včetně obvodového přivaření. Použité tenzometrické kříže byly produkce Vishay s hodnotou odporu 350 ohm.

2.3 Popis zkoušek

Díky v ÚTAM vyvinutému speciálnímu lokálnímu měřicímu systému pro tenzometrii (funkční vzorek FVZ-2019-TE02000162), bylo možné sledovat v řezu B deformace po celý proces experimentálních prací. To znamená, že se zaznamenávaly deformace trubního segmentu již při vyložení potrubí z vozidla, jeho uložení do výkopu, v celém procesu zahrabání s postupným hutněním vrstev, prvním přejezdu nad nenatlakovaným zakopaným potrubím, tlakování a nakonec i deformační vliv dvou přejezdů nad zakopaným tělesem s vnitřním tlakem (max. 55 bar) s odstupem cca 15 hodin. Záznam byl vzorkován po celou dobu experimentu frekvencí 0,2 Hz v řezu B.

Měřená data z tenzometrických snímačů byla zaznamenávána pomocí dvojic ADC převodníků s precizním systémem měření pomalých, ale i rychlých dějů. Zařízení bylo vybaveno li-ion



Obr. 1 Schéma umístění tenzometrů ve třech řezech na zkušebním trubním segmentu (funkční pro tyto testy byly pouze řez A a B)



Obr. 2 a, b Sada snímků z užití unikátního lokálního měřicího systému pro tenzometrii (vlevo: umístění na trubce před zásypem, vpravo: detail provedení)

akumulátorem umožňujícím provoz až 72 h v terénu, Bluetooth modulem pro bezdrátovou diagnostiku a ovládání záznamu. Celé zařízení je řízeno mikrokontrolerem ARM7. Vlastní deska elektroniky byla zalita silikonovým kaučukem pro dokonalou ochranu před vnější vlhkostí. Celý tento elektronický systém byl z důvodu mechanické odolnosti vestavěn do masivního hliníkového profilu délky 182 mm o průřezu 60 x 25 mm s tloušťkou stěny 3 mm. Na sadě snímků v obr. 2 je názorně vidět umístění těchto dvoukanálových měřicích zařízení (4 systémy/krabičky pro tenzometrické křížce umístěné v pozicích 3, 6, 9, 12 hod.) na vnější povrch potrubí a také detail provedení záznamové elektroniky.

Jak již bylo zmíněno, celý proces deformačního chování trubního segmentu o délce 6 m a dimenze DN 500 byl zaznamenáván již při zavěšení potrubí na přivařená manipulační oka a vykládce z korby nákladního vozidla. Samotné uložení a zásyp proběhl do vykopané rýhy hluboké 2,2 m. Na obr. 3 je názorně vidět trubní těleso před zásypem.

Potrubí bylo zasypano dle čl. 6.3.5 TPG 702 04 (obr. 23) [1] pro citlivé úseky plynovodu. Během vrstvení samotného krytí nad potrubí byl materiál hutněn kompakterem vždy po cca 20 cm zásypu. Touto technologickou operací bylo částečně simulováno přirozené sedání (hutnění) zeminy v čase po zakopání potrubí. Po ukončení zakopání potrubí následoval první přejezd vozidla nad nenatlačenou trubkou (kolmo nad její osou). Poté bylo



Obr. 3 Potrubí DN 500 před zásypem v pískovém podsypu



Obr. 4 Pohled na vozidlo MAN použité při zkouškách

potrubí natlakováno a byly uskutečněny ještě dvě sady přejezdů. Detailní popis přejezdů je v následující kapitole.

2.4 Výsledky tenzometrických měření

Protože jedním z cílů výzkumu byl vliv přejezdů vozidla nad zakopaným potrubím na změnu napjatosti stěny potrubí, uvažovali jsme celkem tři přejezdy vozidla. K testování bylo použito nákladní vozidlo MAN, přičemž v důsledku nedostatečného prostoru v okolí zakopaného trubního tělesa byly aktuálně využity pouze první dvě nápravy (viz obr. 4).

Jak je na obr. 4 označeno, rozchod kol na obou nápravách byl 1,99 m a rozvor náprav byl 1,81 m. Zátěž první nápravy byla 6540 kg a druhé nápravy 7560 kg. U všech přejezdů bylo téměř kolmé najíždění vozidla na trubku vedeno tak, že jedna stopa vozidla probíhala v jedné třetině délky trubního tělesa, a tudíž nad umístěním tenzometrů (řez B – obr. 1). Nyní budeme charakterizovat jednotlivé přejezdy vozidla.

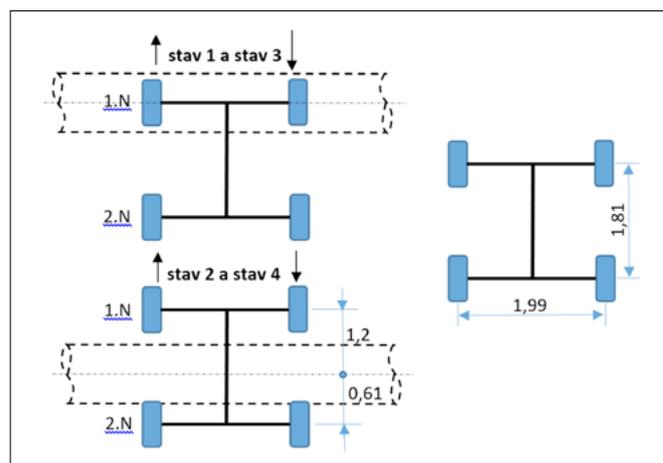
První přejezd

První přejezd byl charakterizován tím, že zakopané trubní těleso bylo bez vnitřního tlaku vzduchu. Nejdříve byly změřeny obvodové i podélné poměrné deformace ve čtyřech obvodových polohách, a to dle hodinových ručiček v poloze 12 h, 3 h, 6 h a 9 h. Poté začalo vozidlo najíždět v kolmém směru nad zakopané těleso. První stav zatížení nastal, když vozidlo najelo přední nápravou nad trubní těleso. Zde se vozidlo na několik sekund zastavilo (tento stav jsme označili jako stav 1); poté popojelo dopředu o zhruba 1,2 m, takže osa trubního tělesa byla pak vzdálena 1,2 m od první nápravy a asi 0,61 m od druhé nápravy; zde také vozidlo zastavilo na několik sekund (tento stav jsme označili jako stav 2). Dále následovalo couvání vozidla až do bodu, kdy se první náprava dostala nad trubní těleso a vozidlo krátce zastavilo (tento stav jsme označili jako stav 3). Je zřejmé, že deformační stav trubního tělesa ve stavu 3 bude velmi blízký stavu 1. Poslední krok spočíval v tom, že

vozidlo odcouvalo a rychleji popojelo dopředu, kde osa potrubí byla opět mezi nápravami; tento stav jsme označili jako stav 4. Po krátké výdrži vozidlo vycouvalo z aktivní oblasti. I zde lze předpokládat, že deformační stav trubního tělesa ve stavu 4 bude blízký stavu 2. Vzájemné polohy trubky a náprav u jednotlivých stavů jsou schematicky znázorněny na obr. 5.

Druhý přejezd

U druhého přejezdu již bylo trubní těleso natlakováno na tlak $p = 5,5$ MPa. Nejdříve byly změřeny obvodové i podélné poměrné deformace v polohách 12 h, 3 h, 6 h a 9 h. Poté bylo postupováno stejně jako u prvního přejezdu, tzn. byl postupně aplikován stav 1, stav 2, stav 3 a stav 4.



Obr. 5 Schematické znázornění zátěžových stavů na potrubí od vozidla

Třetí přejezd

U třetího přejezdu bylo postupováno jako u druhého přejezdu s tou výjimkou, že trubní těleso bylo natlakováno na tlak $p = 5,2$ MPa. To znamená, že nejdříve byly změřeny obvodové i podélné poměrné deformace v polohách 12 h, 3 h, 6 h a 9 h

a pak byly měřeny deformace odpovídající stavům 1, 2, a 3. U třetího přejezdu stav 4 nebyl aplikován.

Výsledky měření poměrných deformací v obvodovém směru (ϵ_φ) i v podélném směru (ϵ_x) v polohách po obvodu trubního tělesa odpovídajících údajům hodinových ručiček 12, 3, 6 a 9, jsou uvedeny v tab. 1 pro první přejezd, v tab. 2 pro druhý přejezd a v tab. 3 pro třetí přejezd, a to pro všechny zátěžné stavy (vyjma stavu 4 u třetího přejezdu). Hodnoty poměrných deformací v těchto tabulkách byly získány ze záznamů „poměrná deformace (ϵ) – čas (τ)“, které jsou uvedené na obr. 6–11. Odečtené hodnoty deformací bylo v některých případech obtížné přiřadit k uvedeným zátěžovým stavům, avšak nepřesnosti mohou být pouze v řádu několika jednotek 10^{-6} .

Tabulka 1 Poměrné deformace při prvním přejezdu vozidla ($p = 0$ MPa)

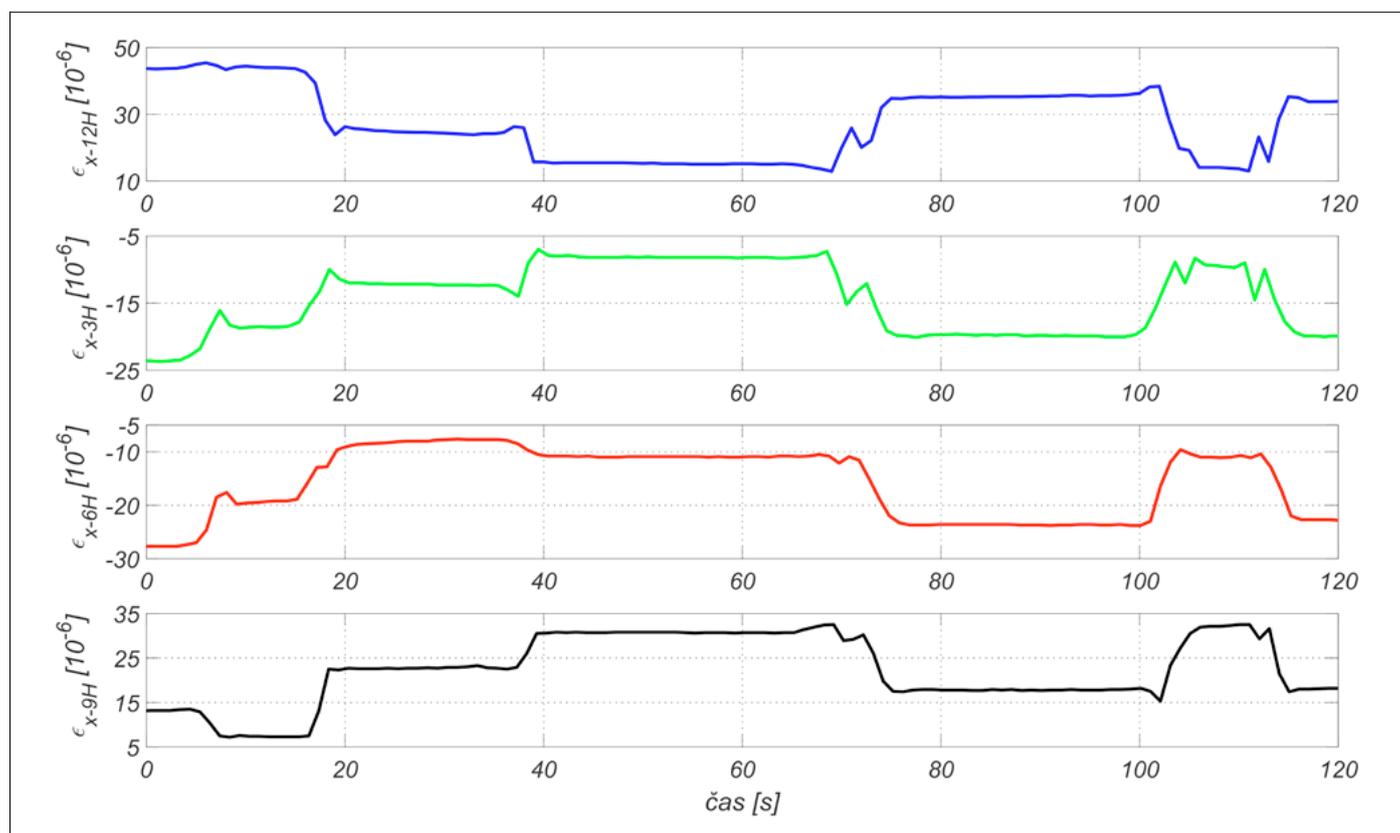
Poloha (h)	12		3		6		9	
	ϵ_φ	ϵ_x	ϵ_φ	ϵ_x	ϵ_φ	ϵ_x	ϵ_φ	ϵ_x
bez zátěže	-165	43	159	-22	-159	-27	141	11
stav 1	-173,4	26	179,4	-4,2	-174,7	-10	148	26,3
stav 2	-186,4	17	187,2	-0,2	-178,6	-7,5	167,4	32,3
stav 3	-173,4	26	169,7	-10,2	-165,8	-11	160,1	29,9
stav 4	-192	17,3	187,9	-1,2	-179	-10	169,5	33,0

Tabulka 2 Poměrné deformace při druhém přejezdu vozidla ($p = 5,5$ MPa)

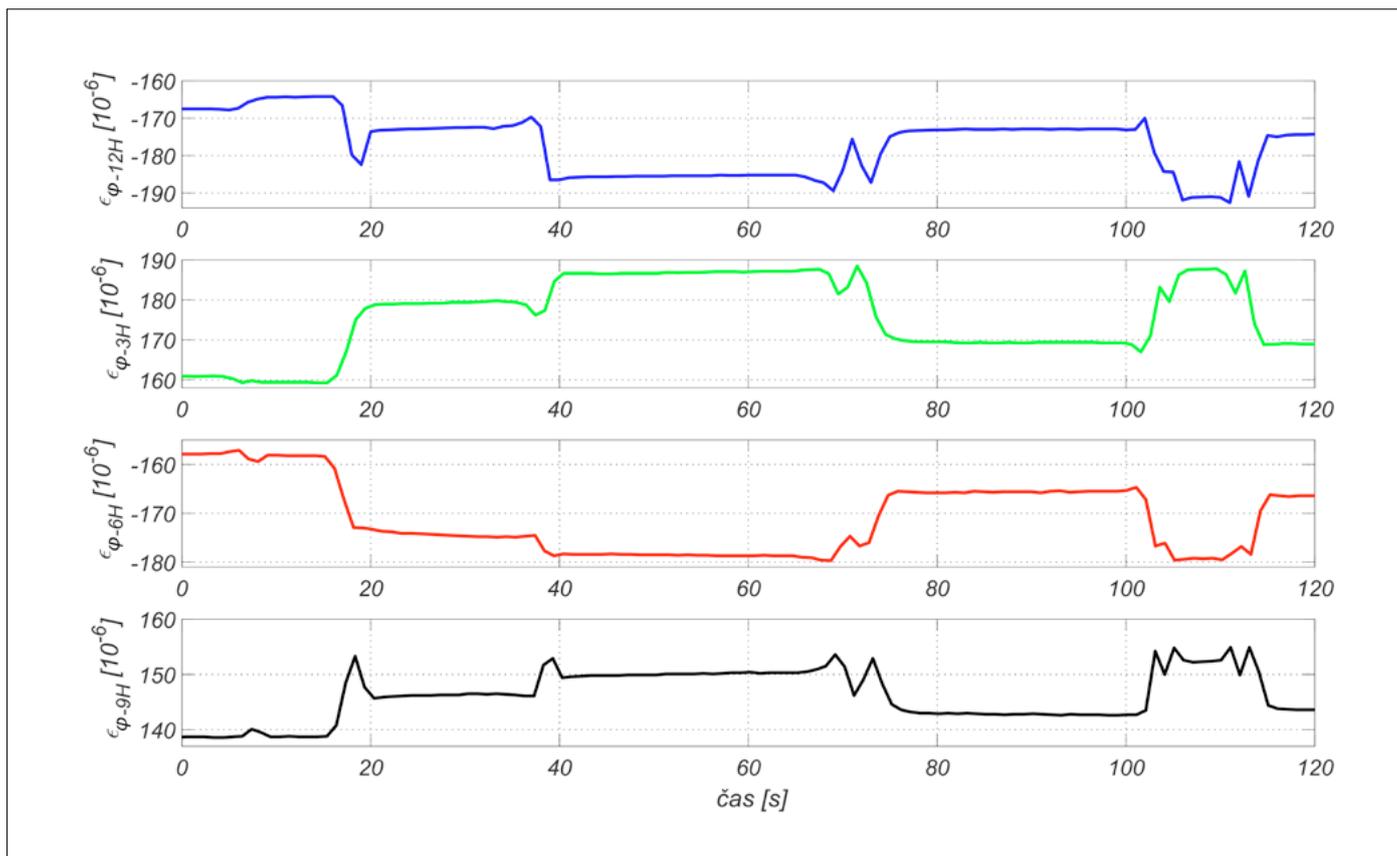
Poloha (h)	12		3		6		9	
	ϵ_φ	ϵ_x	ϵ_φ	ϵ_x	ϵ_φ	ϵ_x	ϵ_φ	ϵ_x
bez zátěže	890	308	829	215	1028	229	964	208
stav 1	895	295	832	217	1020	242	966	218
stav 2	893	314	835	218	1030	241	956	221
stav 3	897	298	832	213	1021	240	964	219
stav 4	911	313	829	218	1029	238	961	220

Tabulka 3 Poměrné deformace při třetím přejezdu vozidla ($p = 5,2$ MPa)

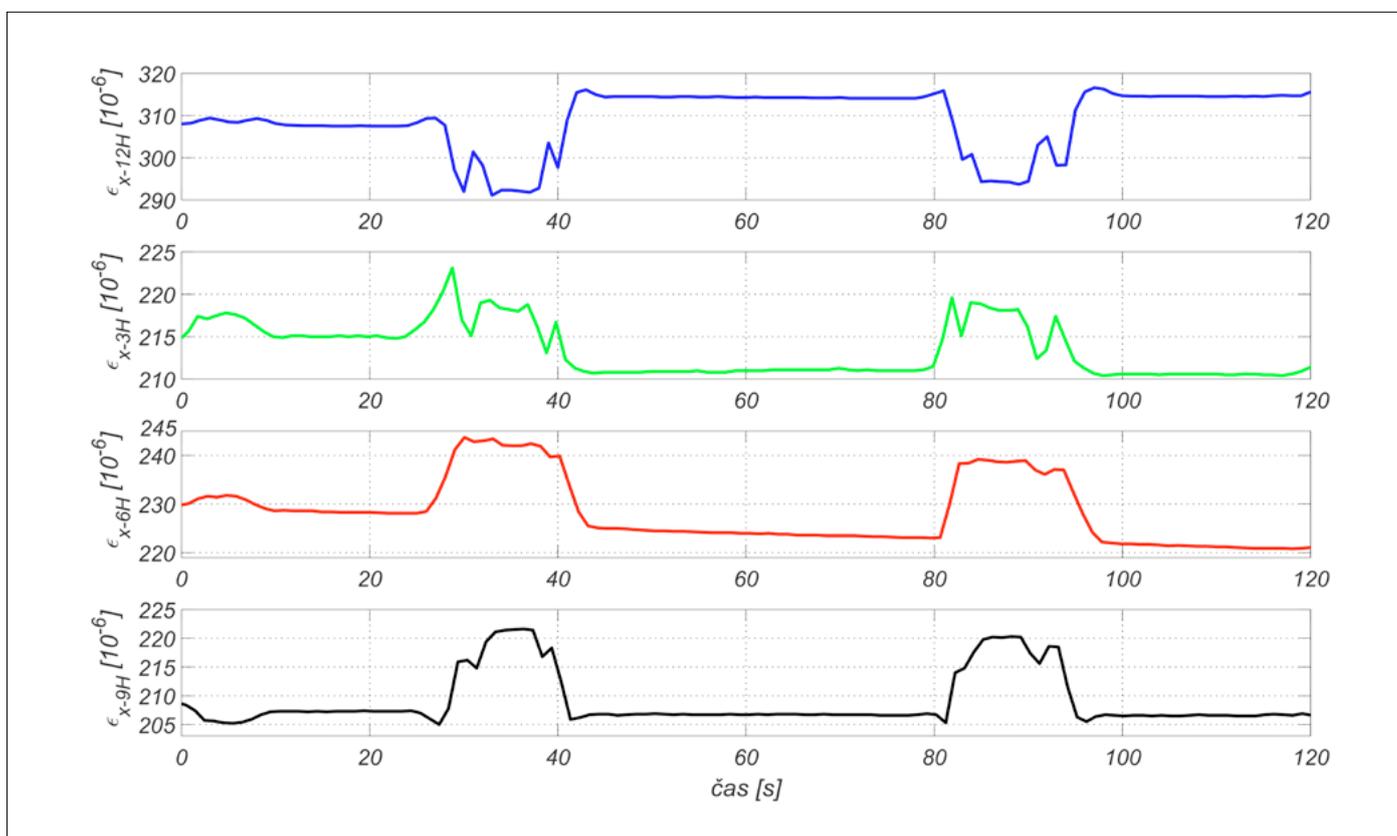
Poloha (h)	12		3		6		9	
	ϵ_φ	ϵ_x	ϵ_φ	ϵ_x	ϵ_φ	ϵ_x	ϵ_φ	ϵ_x
bez zátěže	843	278	688	183	988	186	876	181
stav 1	828	259	699	190	980	201	886	193
stav 2	837	266	696	184	981	201	883	191
stav 3	828	259	702	187	979	203	885	196



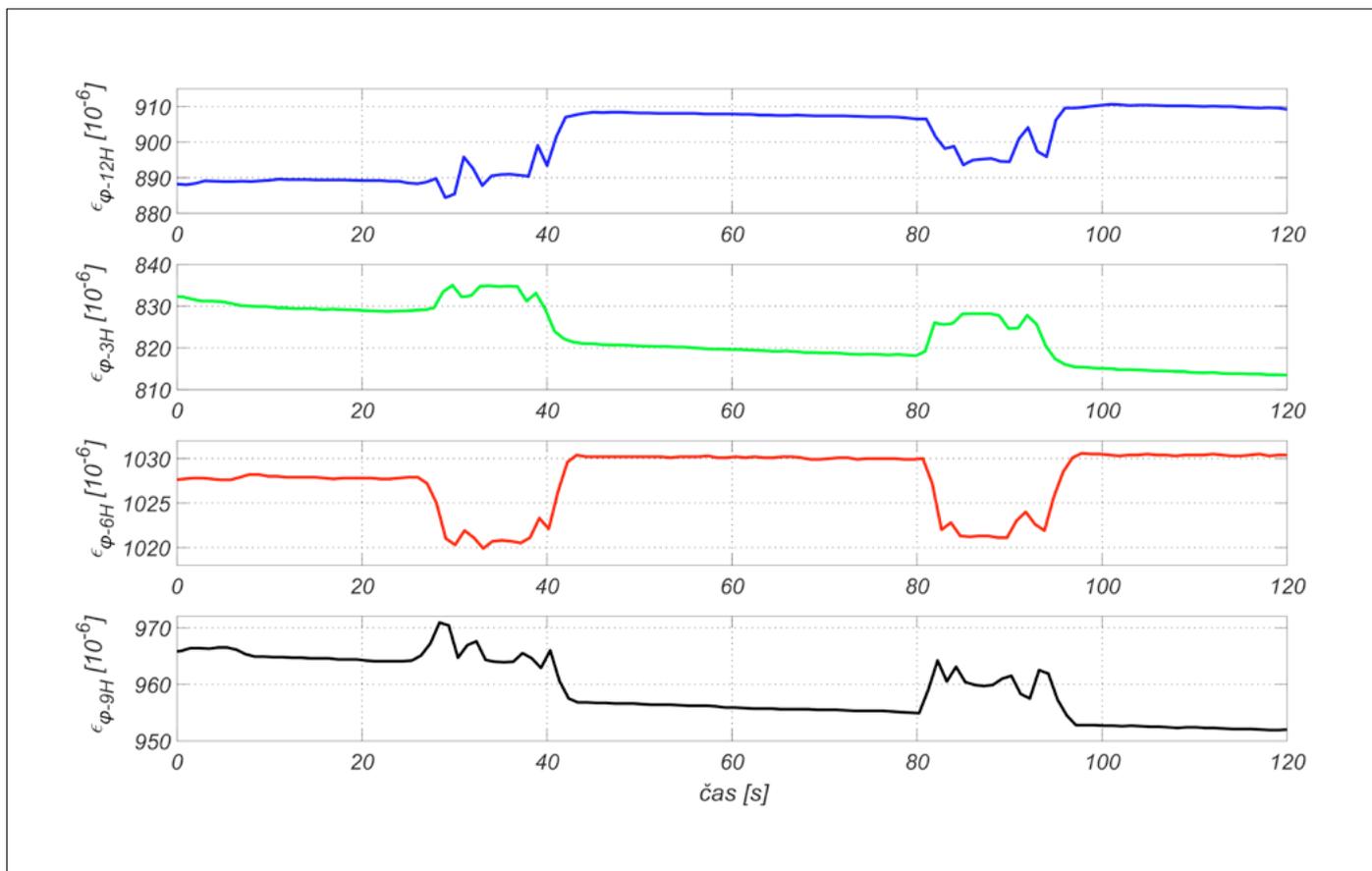
Obr. 6 Záznam podélných deformací v trubce při prvním přejezdu



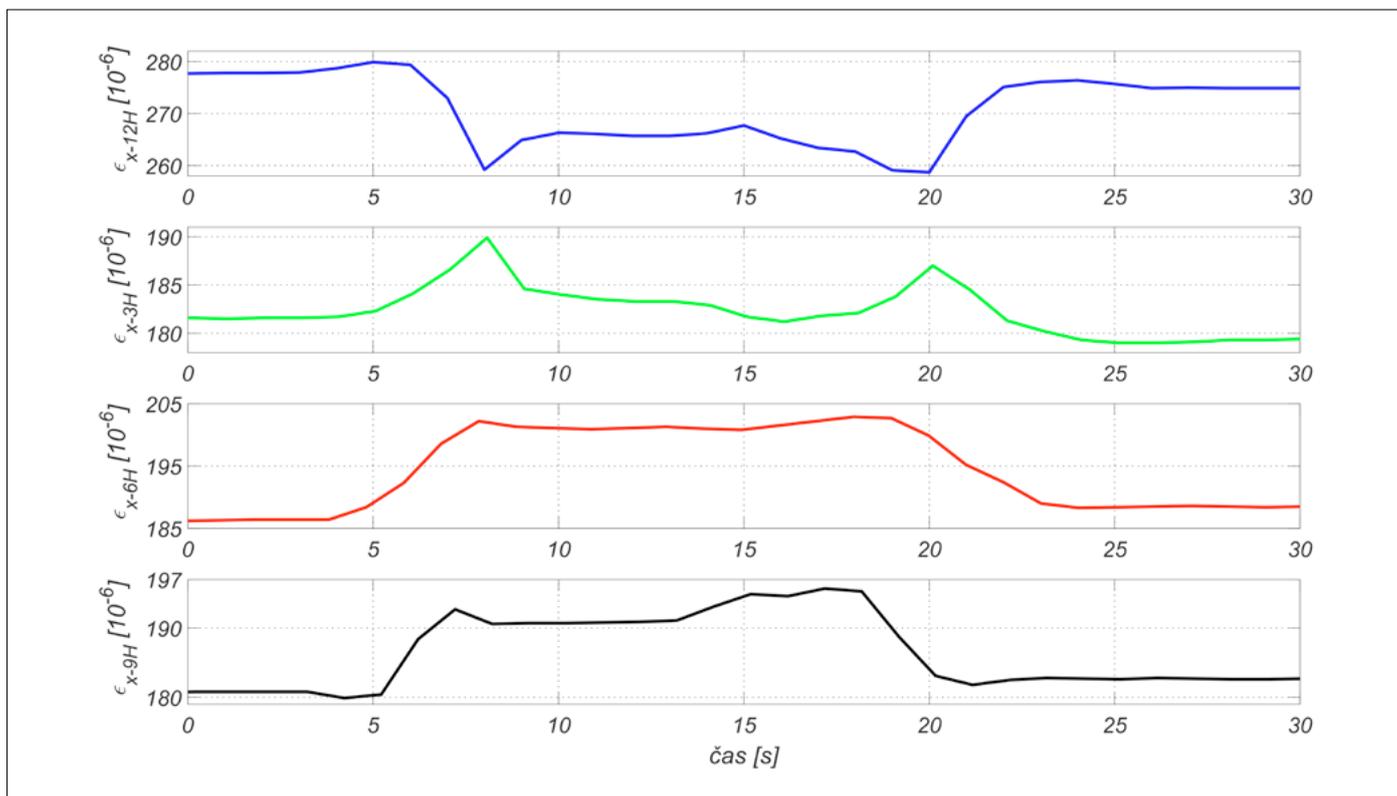
Obr. 7 Záznam obvodových deformací v trubce při prvním přejezdu



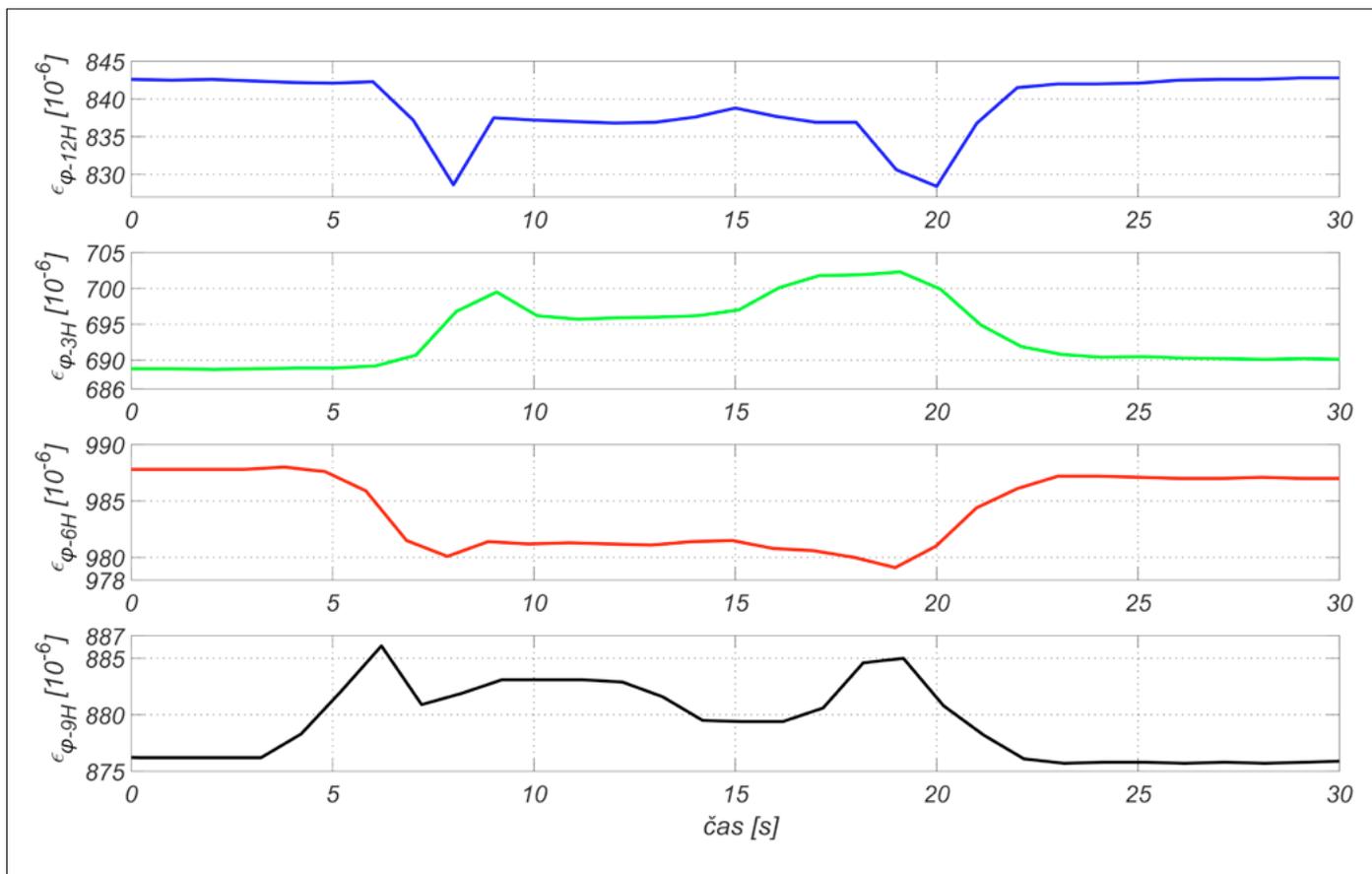
Obr. 8 Záznam podélných deformací v trubce při druhém přejezdu



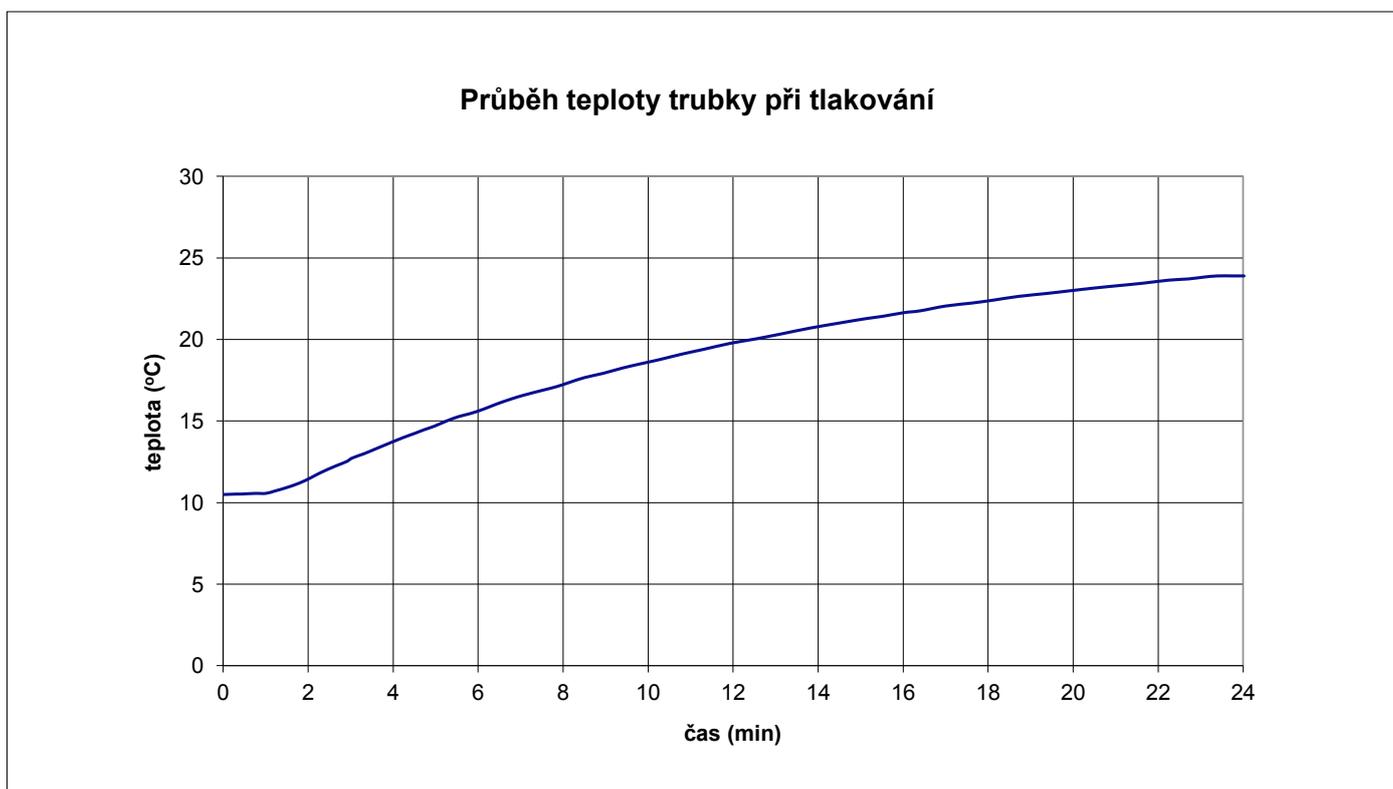
Obr. 9 Záznam obvodových deformací v trubce při druhém přejezdu



Obr. 10 Záznam podélných deformací v trubce při třetím přejezdu



Obr. 11 Záznam obvodových deformací v trubce při třetím přejezdu



Obr. 12 Závislost teploty trubky na čase během tlakování

3. Hodnocení výsledků

Je nutné připomenout, že hodnoty hlavních deformací ε_φ (obvodové) a ε_x (podélné), uvedených v prvním řádku tab. 1, odrážejí situaci, kdy byla trubka uložena do vykopané rýhy a zahrnuta zásypem (tzn. bez zátěže). V dalších čtyřech řádcích jsou uvedeny hodnoty hlavních deformací pro stavy 1 až 4 při prvním přejezdu vozidla. Údaje v tabulce nejsou ovlivněny teplotou. V tab. 2 se jedná o druhý přejezd, charakterizovaný tím, že trubka byla natlakována na tlak $p = 5,5$ MPa. Během tlakování se trubka ohřívala a její teplota na povrchu rostla dle obr. 12.

Jak z diagramu na tomto obrázku vyplývá, doba vzrůstu teploty z počáteční hodnoty $\sim 10,5$ °C na konečnou hodnotu ~ 24 °C činila zhruba 24 minut. Ačkoliv během zkoušky nebyla měřena závislost tlaku na čase, lze předpokládat, že celková doba tlakování byla přibližně stejná, tzn. asi 24 minut. Tab. 3 charakterizuje třetí přejezd. Údaje v tabulce nejsou ovlivněny teplotou, protože třetí přejezd byl uskutečněn po noční přestávce, během níž klesnul vnitřní tlak vzduchu na 5,2 MPa.

Za povšimnutí stojí otázka vlivu zvýšení teploty trubky během tlakování na obvodové i podélné poměrné deformace (viz tab. 2). Ačkoliv se tyto deformace podél obvodu trubky mění, lze je uvažovat integrálně jako průměrné hodnoty a porovnat je s ideálními hodnotami trubky namáhané vnitřním tlakem plynu. Vliv zásypu můžeme zanedbat, neboť jak ukazují data v tab. 1, je průměrná hodnota ze všech čtyř poloh tenzometru u obvodové deformace $\varepsilon_\varphi = (-6) \cdot 10^{-6}$ a u podélné deformace $\varepsilon_x = +1,2 \cdot 10^{-6}$. Porovnání průměrných hodnot deformací po obvodu trubky s teoretickými hodnotami je v tab. 4.

Tabulka 4 Porovnání průměrných deformací po obvodu trubky a teoretických deformací

p (MPa)	$\varepsilon_\varphi (10^{-6})$		$\varepsilon_x (10^{-6})$	
	průměr	teoreticky	průměr	teoreticky
5,5	928	915	240	215
5,2	849	865	207	203

Jak je z tabulky patrné, u druhého přejezdu, vážícího se ke tlaku 5,5 MPa, jsou průměrné hodnoty obvodové i osové deformace na trubce větší než teoretické, přičemž rozdíly jsou větší u osové deformace. Kvantitativní svázání těchto rozdílů se změřeným nárůstem teploty není možné, neboť stísněnost deformací od okolní zeminy způsobuje, že teplotní nárůsty deformací jsou menší než při volně položené trubce. Stísněnosti deformací od okolní zeminy neznáme. Můžeme jenom usoudit z výsledků v tab. 4, že stísněnost obvodových deformací od okolní zeminy je větší než stísněnost podélných deformací. Proto jsou rozdíly u obvodových deformací menší.

Ze změřených hodnot hlavních deformací ε_φ (obvodové) a ε_x (podélné), uvedených v tab. 1 až tab. 3, určíme hlavní napětí σ_φ (obvodové) dle vztahu (1) a hlavní napětí σ_x (podélné) dle vztahu (2)

$$\sigma_\varphi = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_\varphi + \nu\varepsilon_x) \quad (1)$$

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_x + \nu\varepsilon_\varphi) \quad (2)$$

Výsledky jsou přehledně uvedeny v tab. 5 pro první přejezd, v tab. 6 pro druhý přejezd a v tab. 7 pro třetí přejezd.

Tabulka 5 Hlavní napětí na vnějším povrchu trubního tělesa při prvním přejezdu vozidla ($p = 0$ MPa)

Poloha (h)	12 i 0		3		6		9	
	σ_φ	σ_x	σ_φ	σ_x	σ_φ	σ_x	σ_φ	σ_x
bez zátěže	-34,4	-1,5	34,5	5,8	-37,8	-16,9	32,7	12,1
stav 1	-37,5	-5,9	40,3	11,2	-40,2	-14,1	35,3	16,0
stav 2	-41,0	-8,8	42,4	12,7	-40,9	-13,8	40,1	18,7
stav 3	-37,5	-5,9	37,7	9,2	-38,3	-13,7	38,3	17,6
stav 4	-42,3	-9,1	42,5	12,5	-41,2	-14,4	40,6	19,0

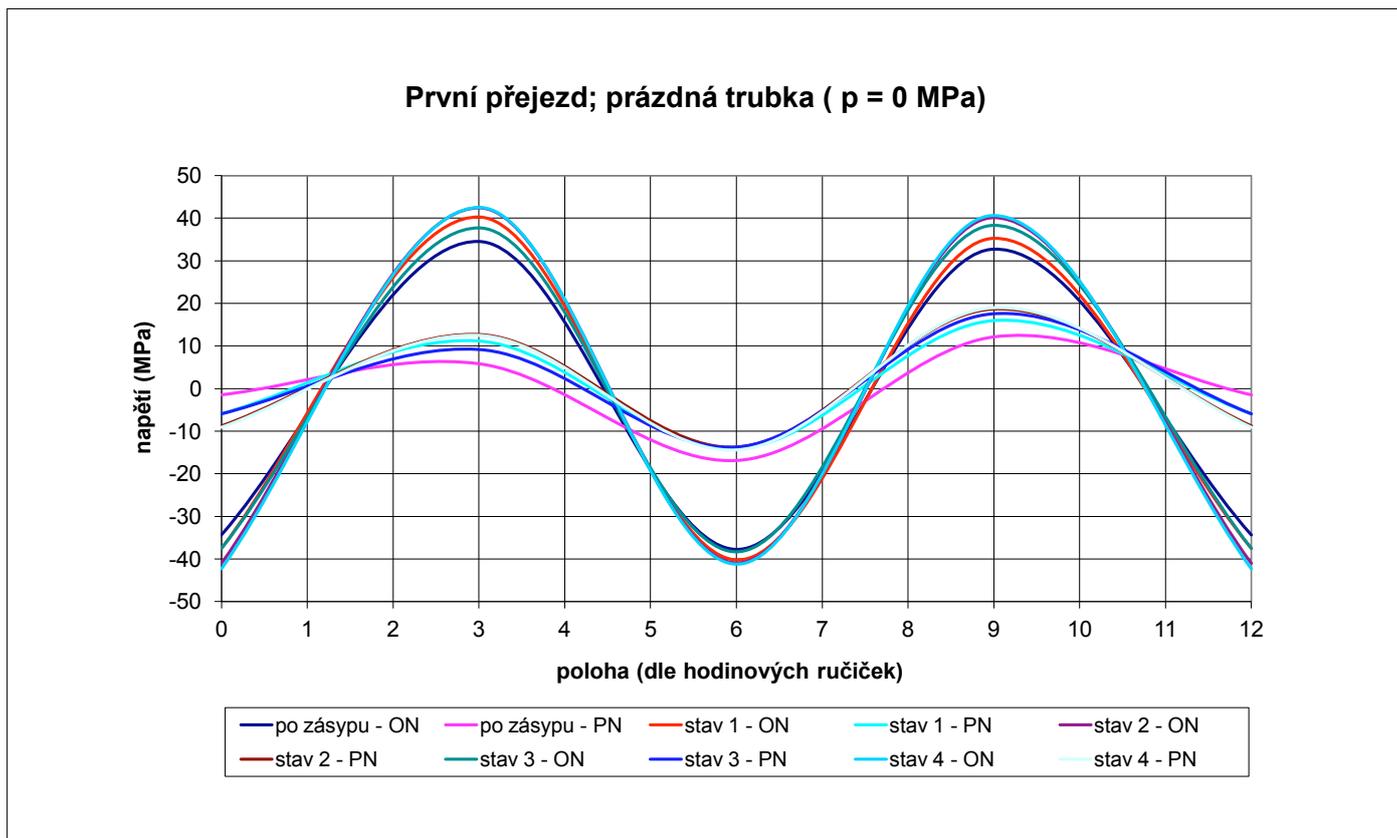
Tabulka 6 Hlavní napětí na vnějším povrchu trubního tělesa při druhém přejezdu vozidla ($p = 5,5$ MPa)

Poloha (h)	12 i 0		3		6		9	
	σ_φ	σ_x	σ_φ	σ_x	σ_φ	σ_x	σ_φ	σ_x
bez zátěže	222,4	130,2	202,3	105,0	248,3	121,7	232,3	112,6
stav 1	222,6	127,6	203,1	105,6	247,3	124,1	233,5	115,0
stav 2	223,5	131,7	203,8	106,1	249,5	124,5	231,4	115,0
stav 3	223,3	128,4	202,8	104,7	247,4	123,7	233,1	115,0
stav 4	227,5	132,7	202,5	105,6	249,1	123,8	232,5	115,1

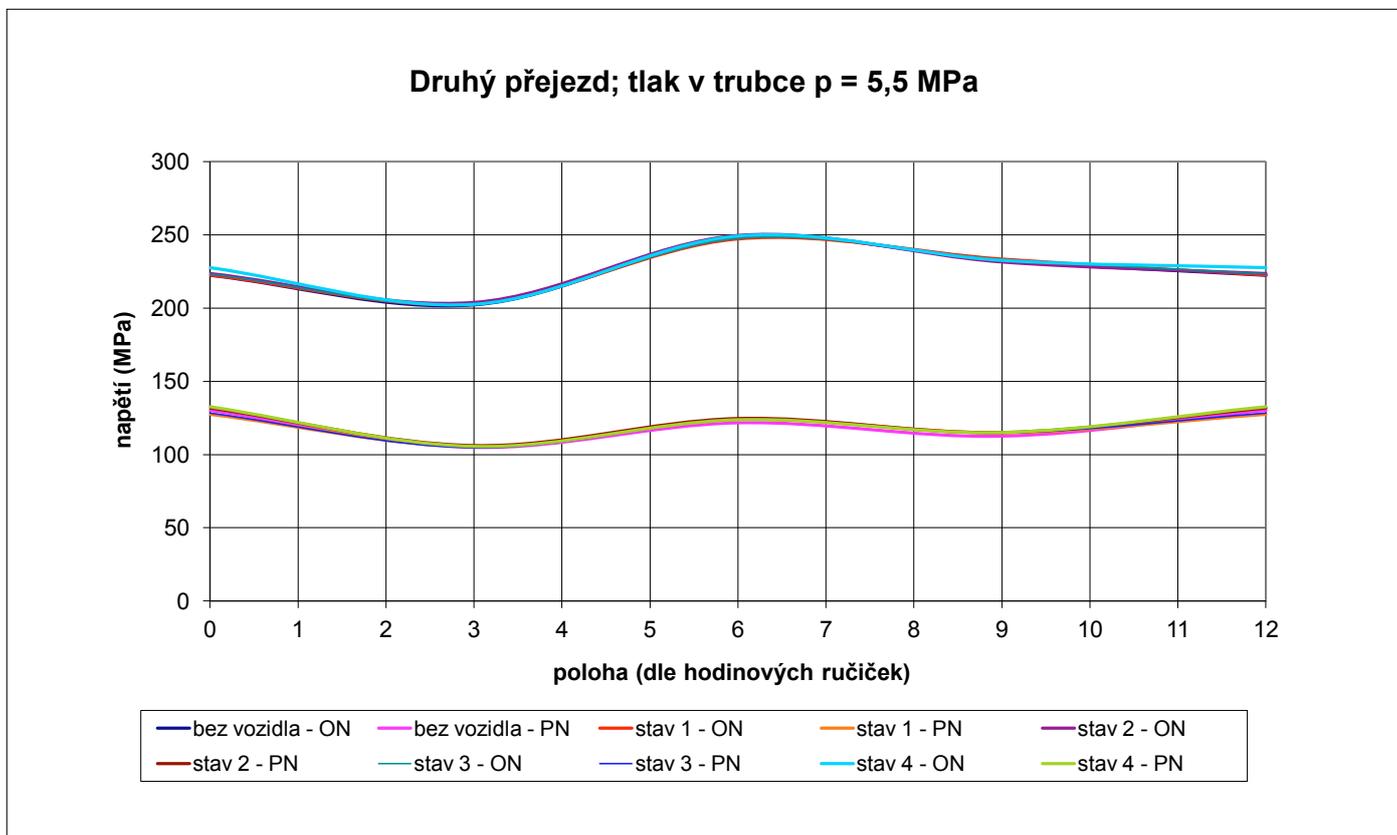
Tabulka 7 Hlavní napětí na vnějším povrchu trubního tělesa při třetím přejezdu vozidla ($p = 5,2$ MPa)

Poloha (h)	12 i 0		3		6		9	
	σ_φ	σ_x	σ_φ	σ_x	σ_φ	σ_x	σ_φ	σ_x
bez zátěže	209,7	120,2	168,2	88,1	236,3	109,2	210,6	100,5
stav 1	205	114,9	171,1	90,5	235,5	112,1	213,7	103,9
stav 2	207,5	117,1	170,1	88,9	235,7	112,1	212,9	103,2
stav 3	205	114,9	171,6	90	235,4	112,4	213,7	104,5

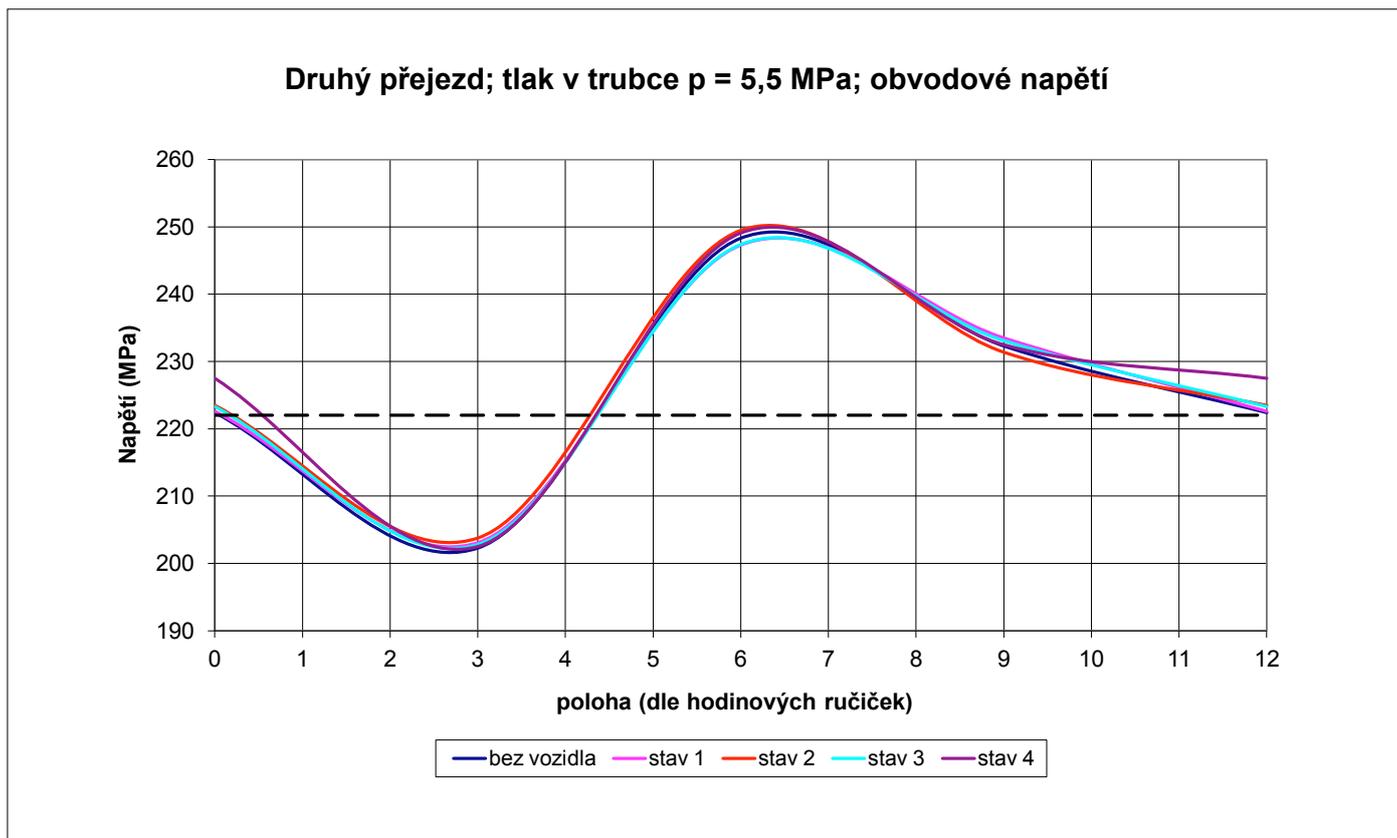
Hodnoty napětí podél obvodu trubního tělesa, určené na základě tenzometricky změřených povrchových deformací, jsou znázorněny graficky na obr. 13–19. Na těchto obrázcích znamená ON obvodové napětí a PN podélné napětí. Poloha 12 je totožná s polohou 0.



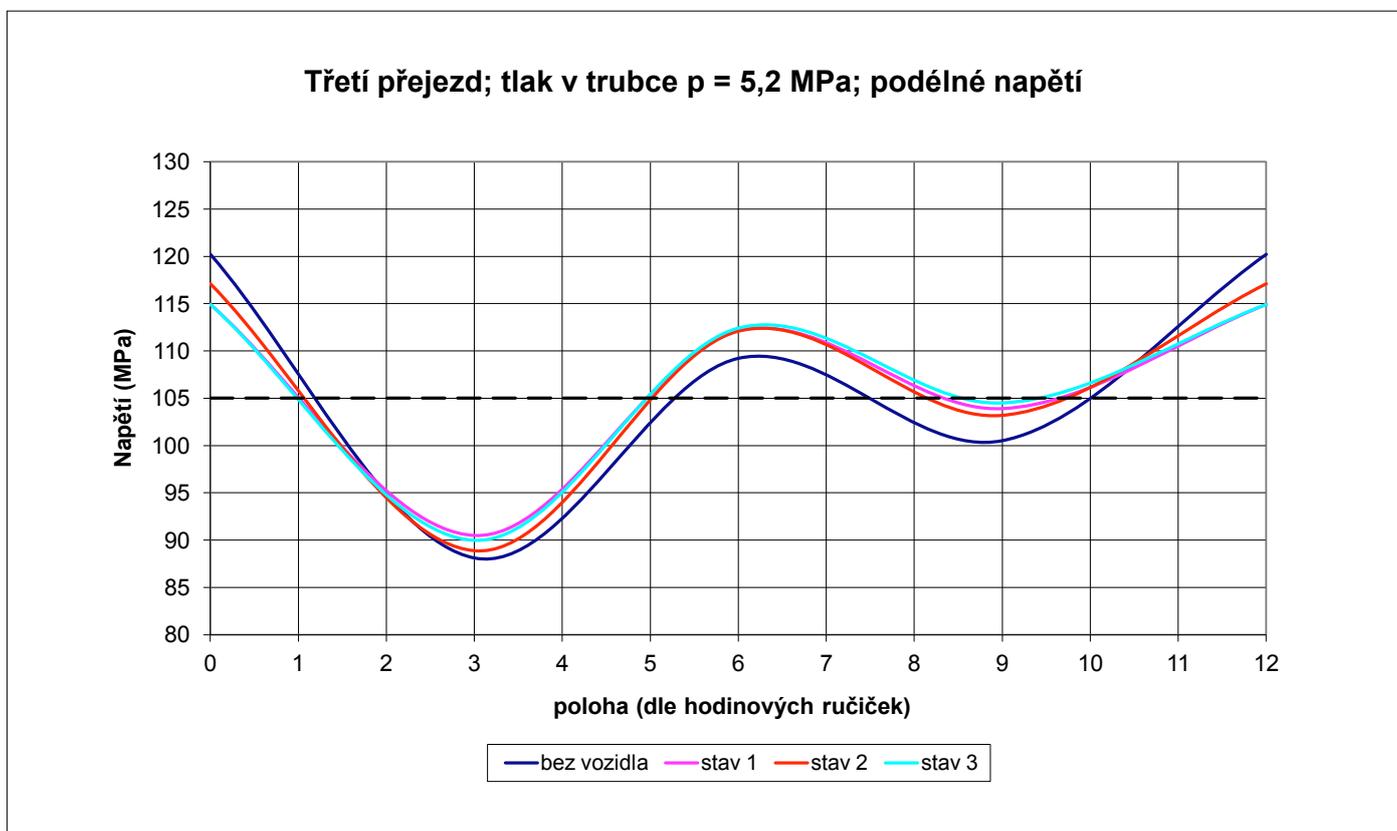
Obr. 13 Průběh obvodových i podélných napětí na vnějším povrchu trubního tělesa při prvním přejezdu vozidla



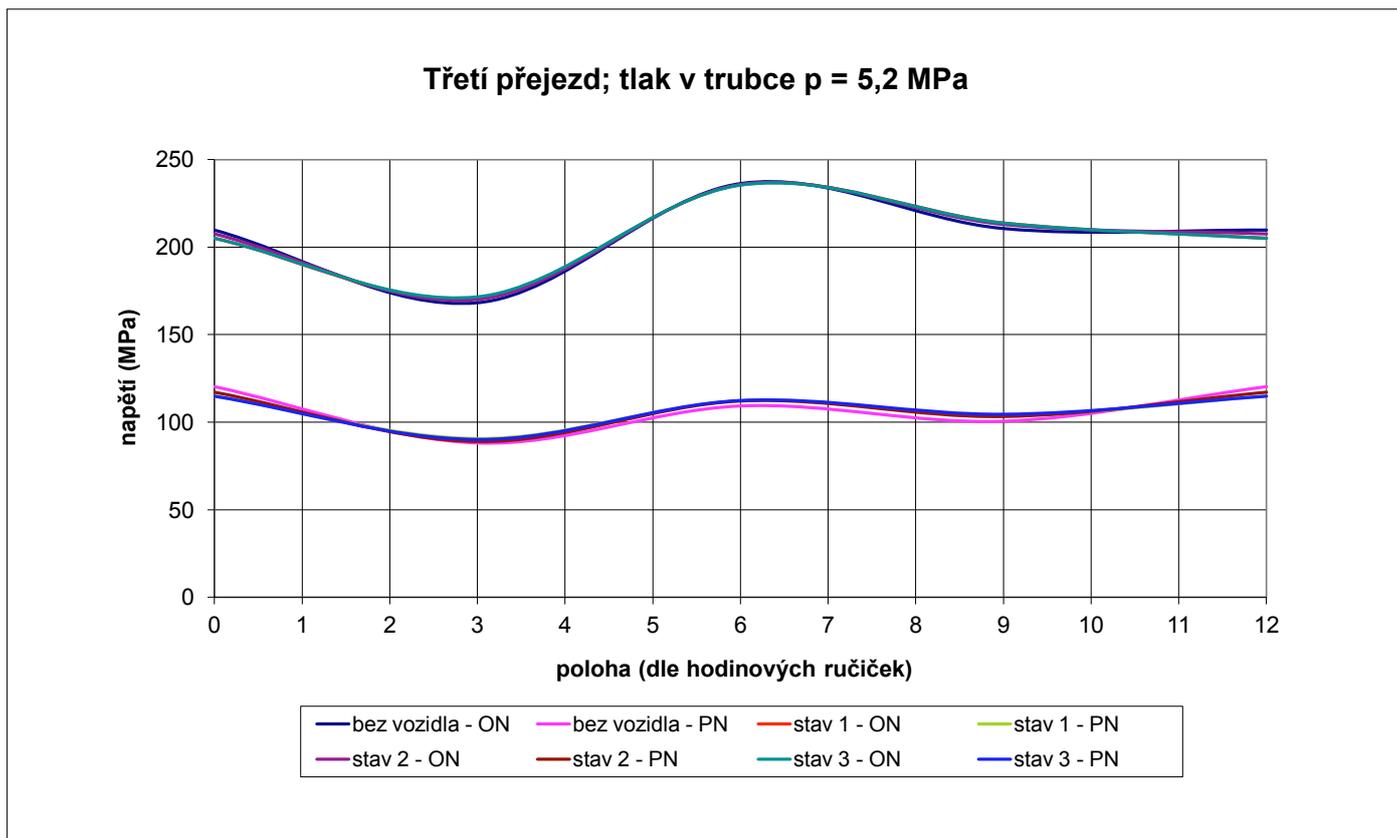
Obr. 14 Průběh obvodových i podélných napětí na vnějším povrchu trubního tělesa při druhém přejezdu vozidla



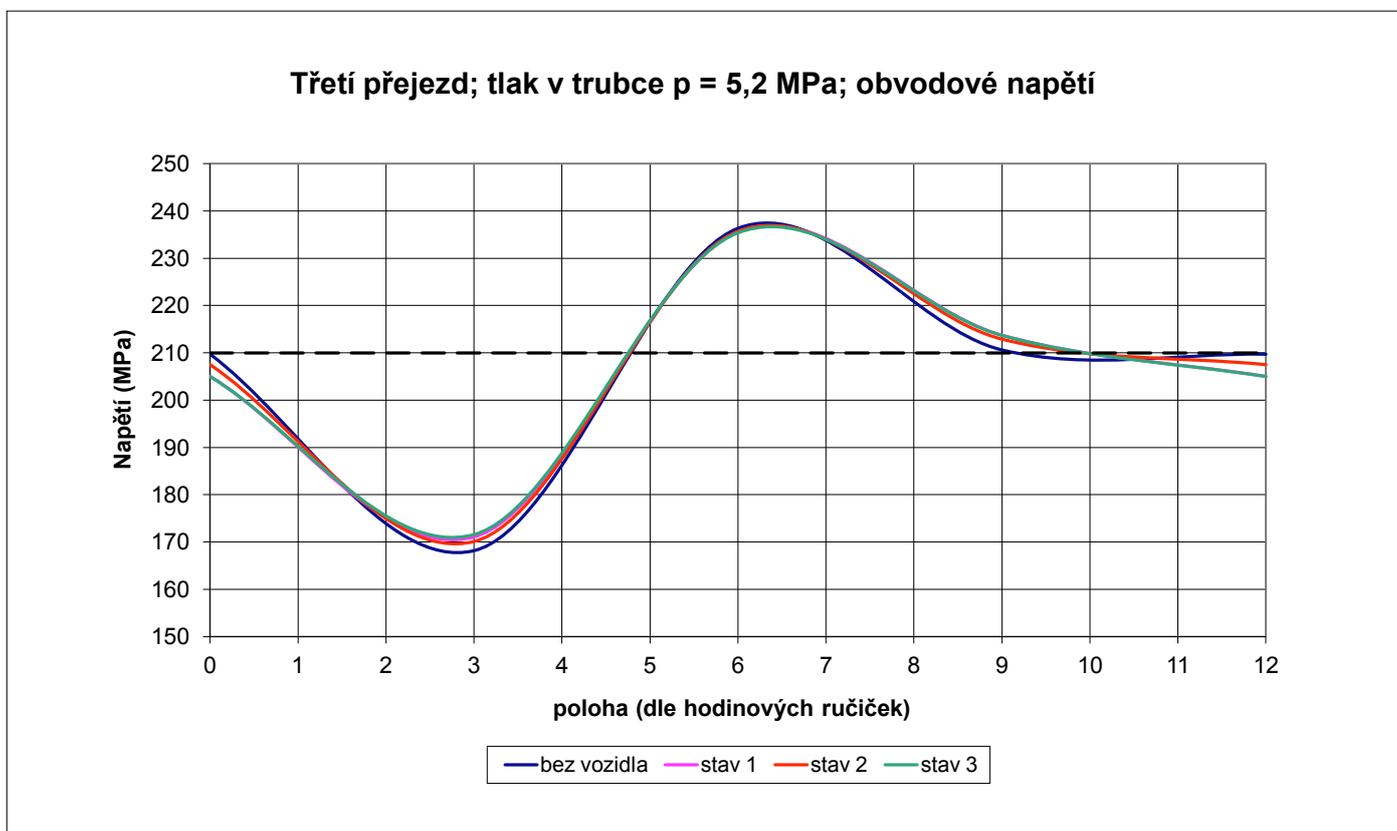
Obr. 15 Průběh obvodových napětí na vnějším povrchu trubního tělesa při druhém přejezdu vozidla



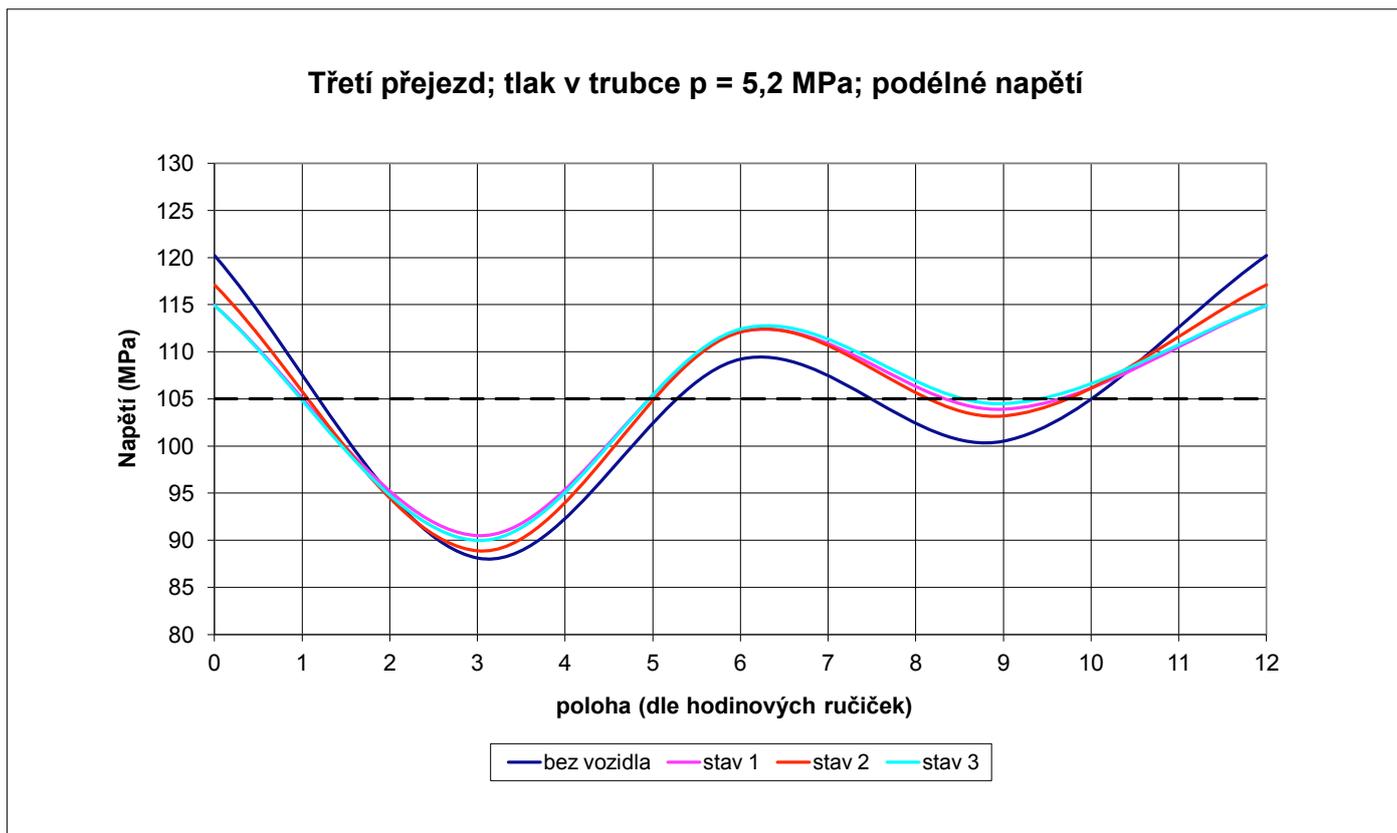
Obr. 16 Průběh podélných napětí na vnějším povrchu trubního tělesa při druhém přejezdu vozidla



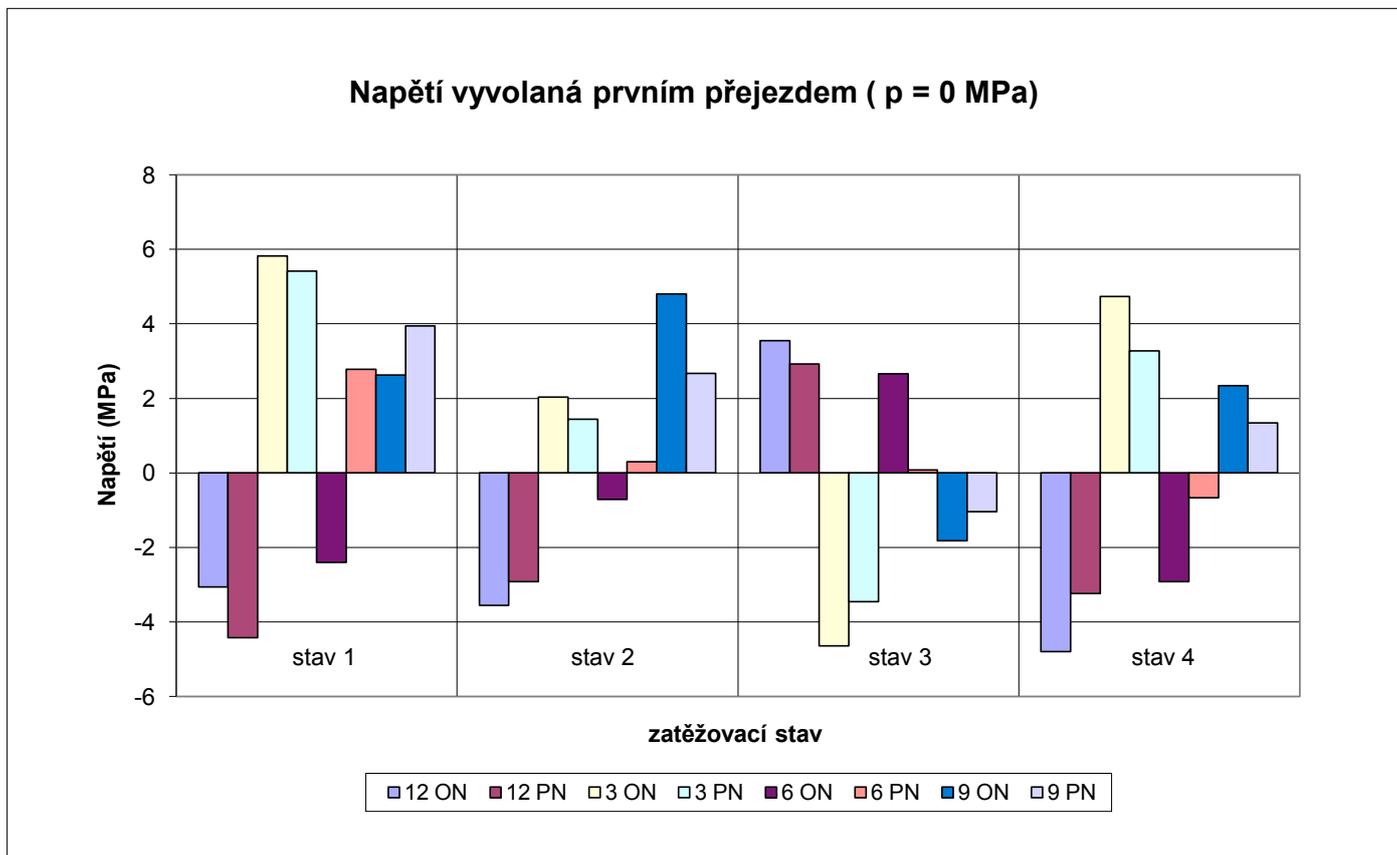
Obr. 17 Průběh obvodových a podélných napětí na vnějším povrchu trubního tělesa při třetím přejezdu vozidla



Obr. 18 Průběh obvodových napětí na vnějším povrchu trubního tělesa při třetím přejezdu vozidla



Obr. 19 Průběh podélných napětí na vnějším povrchu trubního tělesa při třetím přejezdu vozidla



Obr. 20 Napětí vyvolaná prvním přejezdem vozidla přes zakopanou prázdnou trubku

Na těchto diagramech jsou čárkovanou čarou znázorněny hodnoty příslušných napětí pro ideální geometrii nezakopané trubky.

Jak jsme již dříve uvedli, hlavním cílem této práce bylo určení vlivu přejezdů nákladního vozidla na napjatost zakopané trubky. Je zřejmé, že největší vliv bude u prázdné trubky, tzn. při nulovém vnitřním přetlaku. Abychom zjistili čistý vliv přejezdu vozidla na napjatost zakopané trubky, odečteme od napětí odpovídajících stavům 1, 2, 3 a 4 ta napětí, která jsou vyvolána pouze zásypem trubky. Jedná se tedy o hodnoty pro první přejezd, uvedené v tab. 5.

Čistý vliv přejezdu vozidla na napjatost zakopané trubky je uveden ve sloupcovém diagramu na obr. 20. Napětí vyvolaná druhým přejezdem vozidla přes zakopanou trubku s tlakem 5,5 MPa jsou znázorněna ve sloupcovém diagramu na obr. 21 a napětí způsobená třetím přejezdem vozidla přes zakopanou trubku jsou znázorněna ve sloupcovém diagramu na obr. 22. Jako u obrázků 13–19, tak i zde znamená ON obvodové napětí a PN podélné napětí.

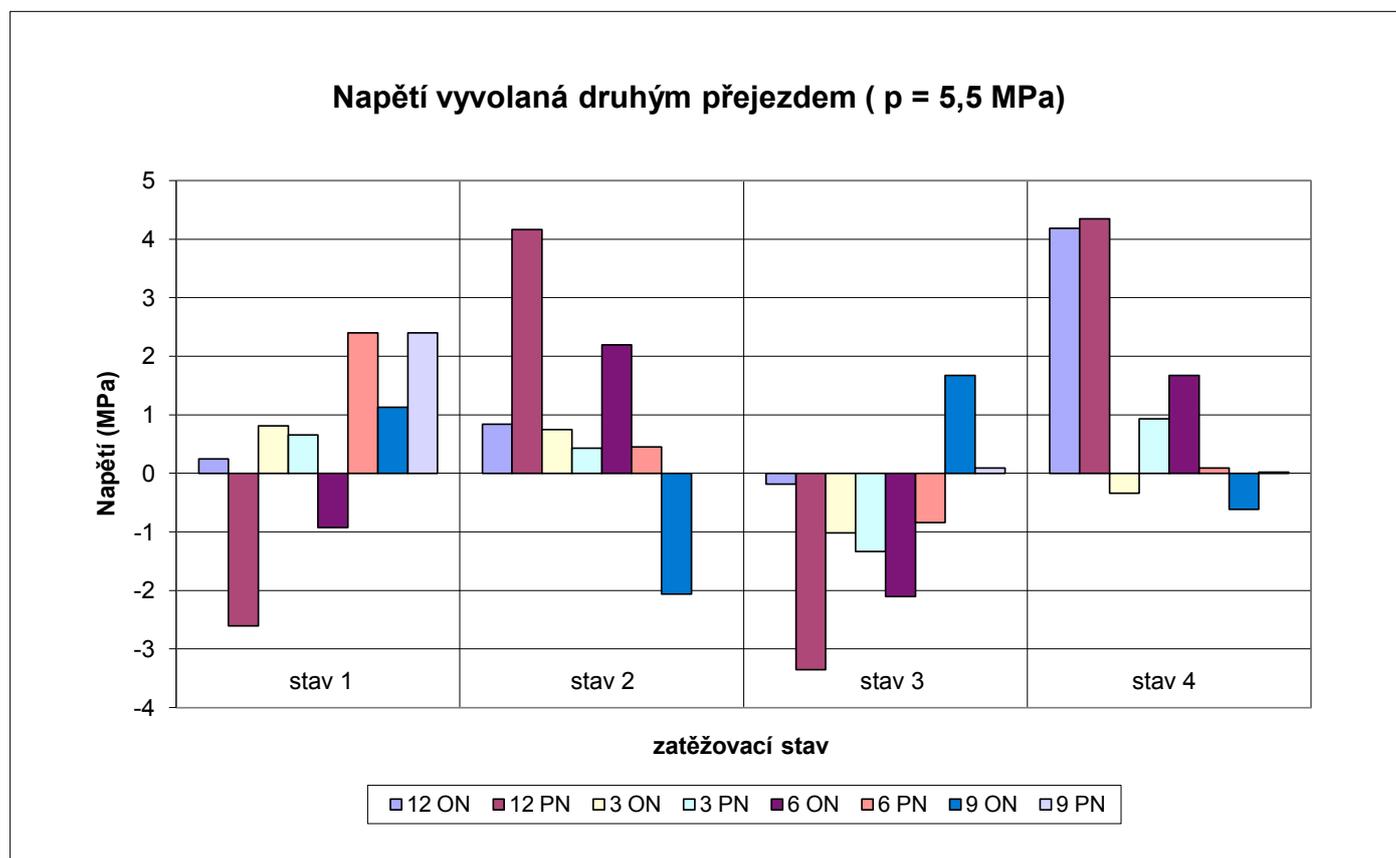
Z obr. 20 je patrné, že největší tlakové napětí odpovídá stavu 4 v poloze 12. V obvodovém směru toto napětí prakticky dosahuje hodnotu -5 MPa a v podélném směru přesahuje -3 MPa. Tahová povrchová napětí dosahují největších hodnot u stavu 1 (téměř 6 MPa).

Dá se očekávat, že u natlakované trubky bude vliv přejezdů menší. Pokud odečteme od změřených hodnot obvodového i podélného napětí hodnotu, odpovídající stavu bez zátěže od vozidla, dostaneme čistý vliv přejezdu. Výsledky tohoto postupu jsou uvedeny ve sloupcových diagramech na obr. 21 a obr. 22. I zde znamená ON obvodové napětí a PN podélné napětí. Pokud se soustředíme na obvodové napětí v poloze 12 h, kde je působení tíhy zeminy i hmotnosti vozidla primární, zjistíme, že maximální obvodové napětí na povrchu je při prvním přejezdu a stavu 4: $\sigma_{\phi} = -4,9$ MPa. Při druhém přejezdu a stavu 4 je maximální obvodové napětí $\sigma_{\phi} = +4,2$ MPa. U třetího přejezdu a stavu 1 je hodnota obvodového napětí $\sigma_{\phi} = -4,7$ MPa. Je vidět, že největší vliv přejezdu vozidla je pro trubku nezatiženou vnitřním tlakem (první přejezd). Dle experimentálních výsledků lze dále předpokládat, že s rostoucím vnitřním tlakem vzduchu v trubce klesá tlakové obvodové napětí v poloze 12 h od přejezdu vozidla a při určitém tlaku vzduchu v trubce přechází do tahové oblasti.

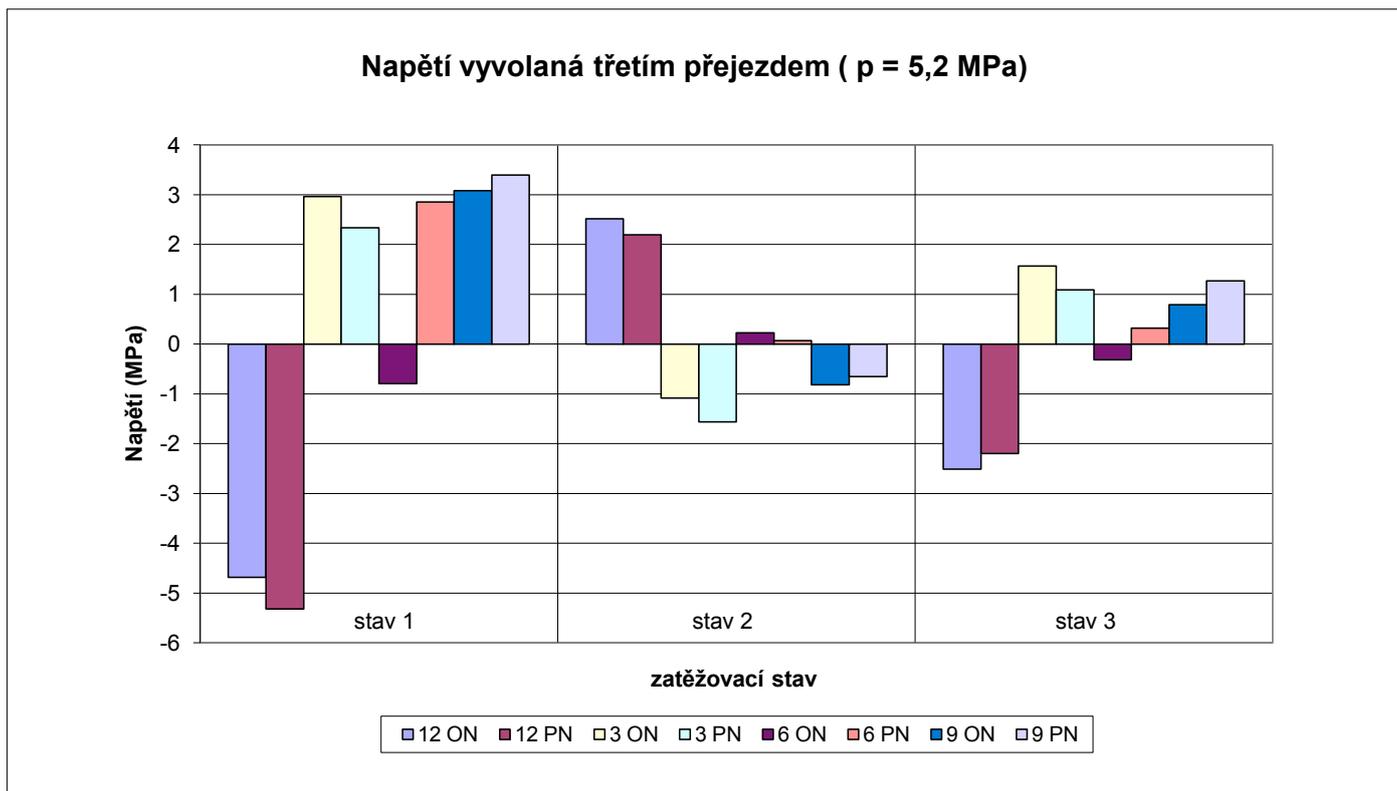
4. Inženýrský odhad napjatosti trubního tělesa

4.1 Zásyp zeminou

Nejdříve určíme namáhání trubního tělesa od zásypu zeminou. Na obr. 23 je znázorněn řez uložením trubního tělesa ve vykopané rýze.



Obr. 21 Napětí vyvolaná druhým přejezdem vozidla přes zakopanou trubku s tlakem 5,5 MPa



Obr. 22 Napětí vyvolaná třetím přejezdem vozidla přes zakopanou trubku s tlakem 5,2 MPa

Podobný případ jsme řešili v práci [3]. Určíme tlak krycí zeminy p_z na trubicí těleso podle vztahu:

$$p_z = g \sum_{i=1}^n \rho_i h_i \quad (3)$$

kde

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$ je gravitační zrychlení
 ρ_i je hustota i-té složky krytí [kg/m³]
 h_i je výška i-té složky krytí [m]

Budeme-li postupovat od povrchu krytí k trubce, budeme uvažovat tyto hodnoty hustoty [kg/m³] a výšky [m] složek krytí:
 zásyková zemina: 1730 – 0,6;
 kamenivo: 1900 – 0,5;
 zhutněná zemina: 2000 – 0,2;
 písek: 1900 – 0,2.

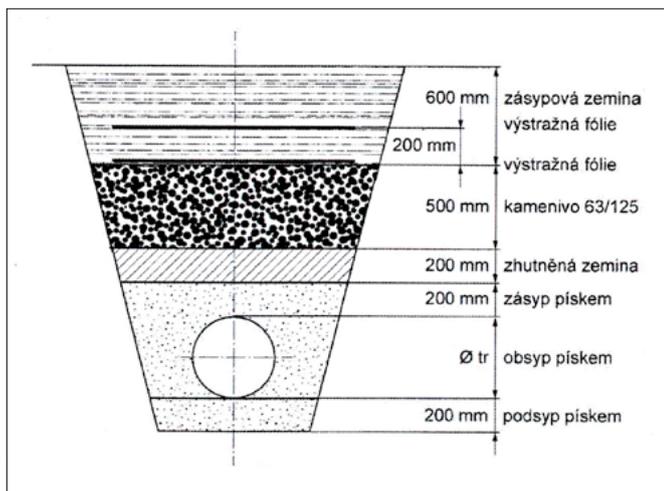
Po dosazení do rov. (3) dostaneme:
 $p_z = 27154 \text{ kg/m}^2 = 0,02715 \text{ MPa}$

Tento tlak platí v poloze 12 h. V poloze 6 h bude tlak větší o tíhu samotného trubicího tělesa. Krátkým výpočtem lze dospět k jeho hodnotě $p_G = 765 \text{ Pa}$. Takže celkový tlak v poloze 6 h bude $p'_z = p_z + p_G = 0,027915 \text{ MPa}$.

Na vertikálním tlaku závisí i boční (horizontální) tlak p_h , který zpravidla tvoří asi 0,4–0,5 násobku vertikálního tlaku. Pokud bychom uvažovali $p_h = 0,4 \cdot p_z$, dostali bychom $p_h = 0,01086 \text{ MPa}$.

Pod tlakem zeminy se kruhový tvar trubky stává oválným. V důsledku ovality průřezu trubky dojde ke vzniku ohybového napětí po tloušťce stěny, kde na vnějším povrchu trubky v poloze 12 h a 6 h je napětí tlakové a na vnitřním povrchu tahové. Naopak v pozicích 3 a 9 hodin bude ohybové napětí ve stěně rozloženo obráceně vůči polohám 12 a 6: na vnějším povrchu trubky bude napětí tahové a na vnitřním povrchu tlakové.

Jak jsme již uvedli v práci [3], dle Směrnic pro konstruování zakopaných ocelových trubek [4] závisí ohybové napětí v poloze 12 a 6 na poměrném zploštění trubky ($\Delta y/D$) podle vztahu (4):



Obr. 23 Schéma uložení trubicího tělesa do vykopané rýhy s krytím podle čl. 6. 3. 5 TPG 702 04 [1]

$$\sigma_b = \pm 4E \cdot \left(\frac{\Delta y}{D}\right) \cdot \left(\frac{t}{D}\right) \quad (4)$$

kde

Δy je celkové zmenšení průměru trubky ve svislém směru,

t je tloušťka stěny trubky,

D je průměr trubky.

Dle [4] lze určit poměr $\Delta y/D$ podle vztahu:

$$\frac{\Delta y}{D} = \frac{145 \cdot d_i d_b p_z}{\left(145 \frac{(EI)eq}{r^3} + 8,845 \cdot E'\right)} \quad (5)$$

Důležitými parametry ve vztahu (5) jsou: vertikální tlak zeminy p_z , ohybová tuhost trubky $EI = 1/12 \cdot r^3 \cdot E$, poloměr trubky $r = (D-t)/2$ a reakční modul zeminy E' . Pro uvažovanou trubku nabývají součinitelé d_i a d_b hodnoty: $d_i = 1$; $d_b = 0,102$.

Hodnotu reakčního modulu zeminy uvažujeme $E' = 9,4 \text{ MPa}$.

Po dosazení do rov. (5) dostaneme $\Delta y/D = 0,00328$. Pro zajímavost lze určit, že zploštění trubky od tlaku zeminy činí $\Delta y = 0,00328 \cdot 508 = 1,67 \text{ mm}$.

V poloze 6 bude poměr $\Delta y/D$ větší než v poloze 12, a to v poměru $p'_z/p_z = 0,027915/0,02715$. Výsledná hodnota bude $\Delta y/D = 0,00337$.

Velikost ohybového napětí podle vztahu (4) bude:

poloha 12:

$$\sigma_b = \pm 4E \cdot \left(\frac{\Delta y}{D}\right) \cdot \left(\frac{t}{D}\right) = \pm 4 \cdot 2,06 \cdot 10^5 \cdot 0,00328 \cdot \left(\frac{6,3}{508}\right) = \pm 33,5 \text{ MPa} \quad (6)$$

poloha 6:

$$\sigma_b = \pm 4E \cdot \left(\frac{\Delta y}{D}\right) \cdot \left(\frac{t}{D}\right) = \pm 4 \cdot 2,06 \cdot 10^5 \cdot 0,00337 \cdot \left(\frac{6,3}{508}\right) = \pm 34,4 \text{ MPa} \quad (7)$$

V horizontálním směru působí na trubku tlak $p_h = 0,01086 \text{ MPa}$. Tento tlak vyvodí podélné tlakové napětí

$$\sigma_x = -\frac{D}{4t} p_h = -\frac{508}{4 \cdot 6,3} \cdot 0,01086 = -0,219 \text{ MPa}$$

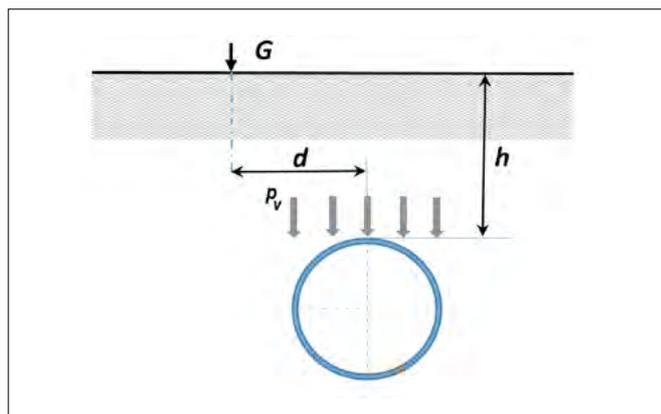
4.2 Přejezd vozidla

Prakticky se jedná o zatížení zakopaného potrubí koncentrovanou zátěží G na povrchu. Schematicky je situace znázorněna na obr. 24.

Význam symbolů na obr. 24:

p_v tlak přenesený na trubku

G koncentrovaná zátěž na povrchu



Obr. 24 Zatížení trubního tělesa koncentrovanou zátěží na povrchu

h výška krytí

d vzdálenost přímky působení koncentrované zátěže od svislé roviny souměrnosti trubky

Velikost tlaku p_v přeneseného na trubku je dle [4] dána vztahem:

$$p_v = \frac{3G}{2\pi h^2 \left[1 + \left(\frac{d}{h}\right)^2\right]^{2,5}} \quad (8)$$

Dle tohoto vztahu vypočteme tlaky přenesené na trubku při přejezdu použitého vozidla. Výpočet uskutečnime pro všechny napjatostní stavy.

Stav 1

Náprava 1 se nachází nad trubkou. Jedna stopa vozidla je nad místem umístění tenzometrů. Náprava 2 je 1,81 m za trubním tělesem (viz obr. 4). Zátěž na jedno kolo u nápravy 1:

$$G_1 = 6540/2 = 3270 \text{ kg} = 32079 \text{ N}$$

Zátěž na jedno kolo u nápravy 2:

$$G_2 = 7560/2 = 3780 \text{ kg} = 37082 \text{ N}$$

Vodorovná vzdálenost kola nápravy 1 od osy trubky je $d = 0 \text{ m}$, zatímco vzdálenost kola nápravy 2 od osy trubky je $d = 1,81 \text{ m}$. Sečteme účinek kola nápravy 1 a kola nápravy 2:

$$p_v = \frac{3G_1}{2\pi h^2} + \frac{3G_2}{2\pi h^2 \left[1 + \left(\frac{d}{h}\right)^2\right]^{2,5}} = \frac{3 \cdot 32079}{2\pi \cdot 1,5^2} + \frac{3 \cdot 37082}{2\pi \cdot 1,5^2 \left[1 + \left(\frac{1,81}{1,5}\right)^2\right]^{2,5}} = 6807 + 832 = 7639 \text{ N/m}^2 = 0,007639 \text{ MPa}$$

Stav 2

Dle obr. 4 je náprava 1 vzdálena od osy trubky o $d_1 = 1,2 \text{ m}$ a náprava 2 o $d_2 = 0,61 \text{ m}$.

Tlak přenesený na trubní těleso bude:

$$p_V = \frac{3 \cdot 32079}{2\pi \cdot 1,5^2 \left[1 + \left(\frac{1,2}{1,5} \right)^2 \right]^{2,5}} + \frac{3 \cdot 37082}{2\pi \cdot 1,5^2 \left[1 + \left(\frac{0,61}{1,5} \right)^2 \right]^{2,5}} =$$

$$= 1976 + 5367 = 7343 \text{ N/m}^2 = 0,007343 \text{ MPa}$$

Stav 3

Jako stav 1

Stav 4

Jako stav 2

Tlaky přenesené na trubku mají lokálně podobný účinek jako tlak od zeminy, tzn. že v poloze 12 a 6 bude na vnějším povrchu trubky tlak a na vnitřním povrchu tah. K jejich určení lze použít vztahy (4) a (5). K určení poměrného zploštění trubky v poloze 12 a 6 budeme ve vztahu (5) uvažovat následující hodnoty:

$$d_i = 1$$

$$d_b = 0,102$$

$$EI = 4,293 \cdot 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$r = 251 \text{ mm}$$

$$E' = 9,4 \text{ MPa}$$

U stavu 1 uvažujeme dále $p_V = 0,007639 \text{ MPa}$ a u stavu 2 $p_V = 0,007343 \text{ MPa}$. Pak dostaneme:

$$\frac{\Delta y}{D} = 0,000922 \quad \text{pro stav 1 a}$$

$$\frac{\Delta y}{D} = 0,0008865 \quad \text{pro stav 2.}$$

Podle vztahu (4) tomu odpovídají ohybová napětí:

$$\sigma_b = \pm 9,42 \text{ MPa} \quad \text{pro stav 1 a}$$

$$\sigma_b = \pm 9,06 \text{ MPa} \quad \text{pro stav 2.}$$

4.3 Shrnutí výsledků

Hlavní výsledky experimentálního určení napětí ve stěně trubního tělesa a jejich porovnání s výpočetními výsledky jsou přehledně uvedeny v tab. 8. Vzhledem k charakteru zatížení způsobeného zásypem a přejezdy vozidla, jsou v tabulce porovnány pouze obvodová napětí v poloze 12 h.

Tabulka 8 Porovnání vypočtených obvodových napětí s naměřenými v poloze 12 h

Zatížení	Výpočet σ_ϕ (MPa)	Tenzometricky σ_ϕ (MPa)
zásyp ($p = 0 \text{ MPa}$)	-33,5	-34,4
vozidlo ($p = 0 \text{ MPa}$)	-9,4 (stav 1)	-4,9 (stav 4)
vnitřní tlak ($p = 5,5 \text{ MPa}$)	221,7	222,4
vnitřní tlak ($p = 5,2 \text{ MPa}$)	209,7	209,7

U zatížení vozidlem jsou v tabulce uvedeny maximální hodnoty napětí. U výpočtu se jedná o zatěžovací stav 1 a u tenzometrického měření o zatěžovací stav 4. Jak je z této tabulky patrné, u zatížení od vozidla je tenzometricky určené obvodové napětí menší než vypočtené. Hodnoty obvodového napětí od zásypu i od obou tlaků, získané výpočtem, jsou si velmi blízké s hodnotami určenými na základě tenzometrického měření.

5. Závěry

Tenzometrické měření na zakopaném trubním tělese potvrdilo, že k prvním deformacím tělesa dochází již během zasypávání a hutnění zásypu. Jsou to v první řadě obvodové deformace, způsobené změnou kruhového průřezu na oválný v důsledku působení tíhy zásypu. Jedná se o ohybové namáhání stěny tělesa, kdy na vnějším povrchu v poloze 6 a 12 jsou tyto deformace tlakové a na vnitřním povrchu tahové. Při výšce krytí 1,5 m dosahuje příslušné ohybové napětí úrovně asi 34 MPa. Ve stěně trubního tělesa vznikají během zásypu i podélná tlaková napětí. Jsou to jednak ohybová napětí daná zvýšením podélné křivosti stěny trubního tělesa v místech změny ovality průřezu v důsledku interakce uložení trubního tělesa a zásypu a jednak osové tlakové napětí od působení bočních tlaků zeminy na dna tělesa. Při přejezdech vozidla přes zasypané potrubí přistupuje k ohybovému napětí od zásypu i ohybové napětí od působení koncentrované zátěže v místě kontaktu kola vozidla se zemí. Tato napětí závisí od úrovně koncentrované zátěže a pro podmínky uskutečněných experimentů nepřekročily 10 MPa. Po zahájení tlakování trubního tělesa vzduchem dochází postupně k narovnávání stěny z oválného tvaru na kruhový, což se projevuje jednak zmenšováním ohybových napětí v obvodovém směru a také zmenšováním tlakových podélných napětí. Po získání kruhovosti průřezu ohybová napětí stěny trubky v obvodovém i podélném směru vymizí a napjatost se stává membránovou. Výsledky měření a jejich vyhodnocení potvrdily stabilitu tenkostěnného potrubí při zásypu zeminou a přejezdech vozidla. Dále ukázaly, že vliv zásypu i přejezdů vozidla na napjatost plynovodního potrubí po natlakování je zanedbatelný. Tento poznatek je důležitý zejména z hlediska vlivu přejíždějících těžkých vozidel přes zakopané potrubí. Vzhledem k tomu, že uvedené výsledky byly získány v konkrétních podmínkách při jednom experimentu s poněkud atypickým zásypem a hloubkou uložení se třemi přejezdy, pro získání technické jistoty je nutné ověřit platnost závěrů i v jiných podmínkách, a to jak z hlediska charakteru uložení, tak i dimenze a jakosti materiálu zkoušených potrubí. Nicméně již nyní lze předběžně konstatovat, že vliv vnějších zatížení i poměrně značné velikosti nepředstavuje pro celkovou napjatost na potrubí žádnou mimořádnou hrozbu.

Poděkování

Práce vznikla s finanční podporou grantové agentury TAČR (projekt č. TE02000162) a s technologickou podporou firmy CEPS a.s. Autoři práce jim tímto vyjadřují poděkování.

Literatura

- [1] TPG 702 04 „Plynovody a přípojky z oceli s nejvyšším provozním tlakem do 100 bar včetně“ platnost od 1. 3. 2020, ČPS
- [2] Šperl, M. a kol.: Výzkumná zpráva č. TE02000162DV263 „Overall evaluation of key experiments“ ÚTAM AVČR, 2019
- [3] Gajdoš, L.; Šperl, M.; Hračov, S.: Deformační chování zakopaného potrubí. Plyn 1, 2017, pp. 15–22
- [4] Guidelines of the Design of Buried Steel Pipe. American Lifelines Alliance, ASCE, July 2001



Ing. Lubomír Gajdoš, CSc. (*1941)

Vystudoval ČVUT v Praze, Fakultu jadernou a fyzikálně inženýrskou. Postgraduální studium absolvoval na University College v Londýně. Praktické znalosti z oblasti únavového poškození a mechaniky materiálů získal ve SVÚM Praha a rozšířil je v oblasti lomové mechaniky v ÚTAM AVČR, kde se věnuje dlouhodobě problematice integrity tlakových systémů.



Ing. Martin Šperl, Ph.D. (*1975)

Vystudoval Technickou fakultu ČZU v Praze a Fakultu dopravní – Ústav mechaniky a materiálů ČVUT. Od r. 1999 pracuje v Ústavu teoretické a aplikované mechaniky Akademie věd ČR, kde získal znalosti z oboru lomové mechaniky a experimentální praxi. V současné době je postgraduálním pracovníkem oddělení tenkostěnných konstrukcí.



Ing. Stanislav Hračov, Ph.D. (*1980)

Vystudoval fakultu stavební na VŠB – Technická univerzita Ostrava, a na ČVUT v Praze. V ÚTAM AV ČR působí od roku 2003 jako vědecký pracovník, od roku 2017 zastává funkci vedoucího Oddělení dynamiky a aerodynamiky. Zabývá se dynamikou stavebních konstrukcí, aeroelasticitou a působením tlumících prvků v interakci s konstrukcí.



Ing. Petr Crha, CSc. (*1953)

Absolvoval Fakultu technologie paliv a vody VŠCHT v Praze. Od roku 1976 pracoval v Transgasu a následně v Plynprojektu Praha. Od roku 1995 působil jako výrobní ředitel v Českém plynárenském servisu, s. r. o. V roce 1999 nastoupil do společnosti CEPS a. s., kde nyní působí jako předseda představenstva.