

Laboratoř kardiovaskulární biomechaniky  
Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky  
Fakulta strojní, ČVUT v Praze

**Bezkontaktní měření vzdálenosti  
optickými sondami  
MICRO-EPSILON**

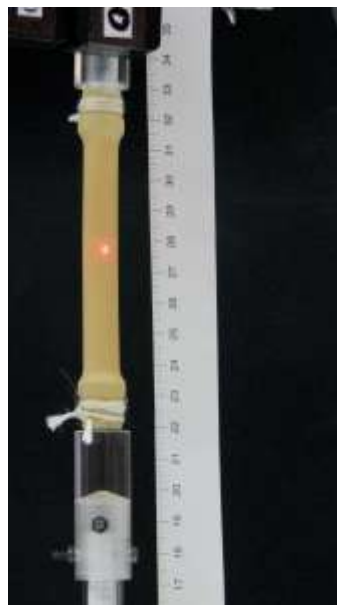
Měření:  
8. 4. 2008

Trubička: Latex – vnitřní průměr 10mm – tloušťka 0,8mm

### 1 Laserová sonda – NCDT 1401 - 200 - sonda 1



Obr. 1: Měřicí soustava (bez instalovaného pozadí) pro statické měření sondou 1.

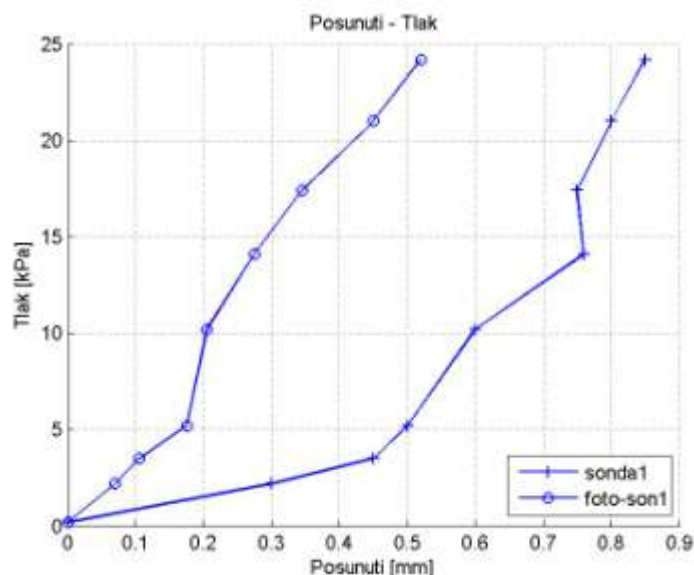


Obr. 2: Detail měřicí soustavy pro statické měření sondou 1 a fotoměření 1.

### 1.1 Měření posunutí stěny - statický inflační test

Tab. 1: Naměřená data – Stat1

měř.č.	tlak [kPa]	dif. Sonda1 [mm]	č. snimku Foto1	prum.tr. Foto1 [mm]
1	0,20	0,00	945	11,59
2	2,20	-0,30	946	11,73
3	3,50	-0,45	947	11,80
4	5,20	-0,50	948	11,94
5	10,20	-0,60	949	12,00
6	14,10	-0,76	950	12,14
7	17,40	-0,75	951	12,28
8	21,00	-0,80	952	12,49
9	24,20	-0,85	953	12,63

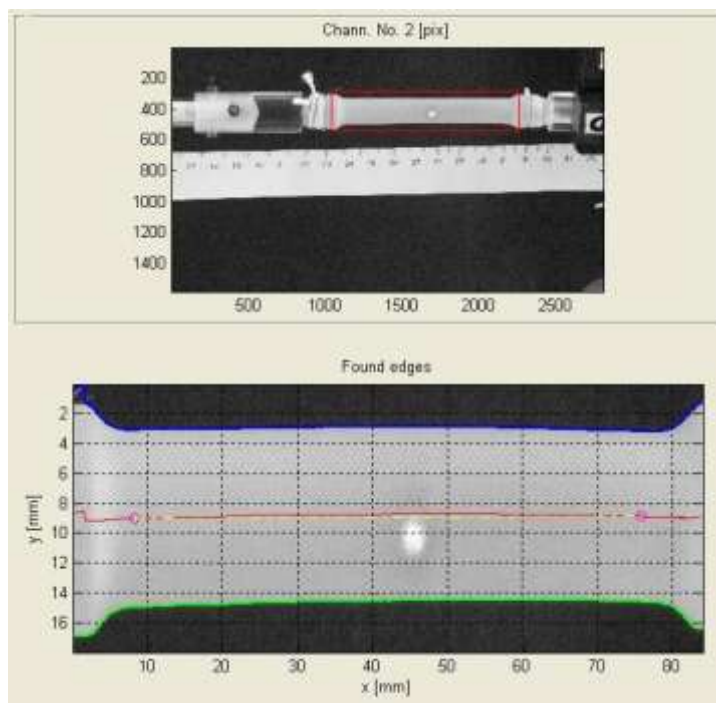


Obr. 3: Zatěžovací křivky pro měření sondou 1 a foto-měření 1.

Sonda měří přímo relativní posunutí stěny trubičky vzhledem k referenční poloze ve zvolené malé lokální oblasti o průměru cca 2 mm. Stěna trubičky se při tlakování posouvá směrem k sondě, proto měříme záporné hodnoty, které ale vynášíme jako kladné přírůstky poloměru trubice.

Sonda měří z přesností okolo  $\pm 50 \mu\text{m}$ . Data na displeji vyhodnocovací jednotky senzoru jsou sice v mm se dvěma desetinnými místy, ale dle tabulky 1 je nejmenší možný měřitelný přírůstek hodnoty okolo  $50 \mu\text{m}$ , výrobce udává rozlišení sondy při statickém měření  $20 \mu\text{m}$ . Je patrna odlišná tuhost oblastí na počátku zatěžování u obou křivek (obr. 3). To je zřejmě způsobeno mírně odlišným vyhodnocením na odlišných místech obvodu trubičky (poloha podél osy trubičky si odpovídá). Srovnáváme přímé posunutí u dat ze sondy a průměrné posunutí ze dvou protilehlých hran z jiného úhlu u foto-měření. Trubička se zpočátku nedeformuje přesně symetricky, podél povrchu trubičky kolísá její počáteční poloměr křivosti i tloušťka stěny. Na další zatěžování již radiálně předepnutá trubička vykazuje na křivkách zhruba všude shodnou tuhost a přibližně stejnou odezvu na přírůstek vnitřního tlaku.

Metoda foto-měření stanovuje změnu poloměru trubičky ze dvou protilehlých hran trubičky ze snímku měřené scény. Tyto hrany trubičky se však nacházejí v přibližně kolmém směru po obvodu na oblast povrchu osvětlenou laserem. Rozměry objektů na snímku jsou stanoveny lineárně z poměru mm/pix, délkové měřítko je součástí snímané měřicí scény, viz obr. 4.



Obr. 4: Vyhodnocení snímků z digitálního fotoaparátu. Odečet měřítka a převod do délkové míry. Odečet průměru trubičky probíhal v místě osvětlení laserem (světlá skvrna na trubičce). Pro foto-měření 1.

## **2 Konfokální sonda - NCDT 2400, IFS 2401-10 - sonda 2**



Obr. 5: Měřicí soustava pro statické měření sondou 2.

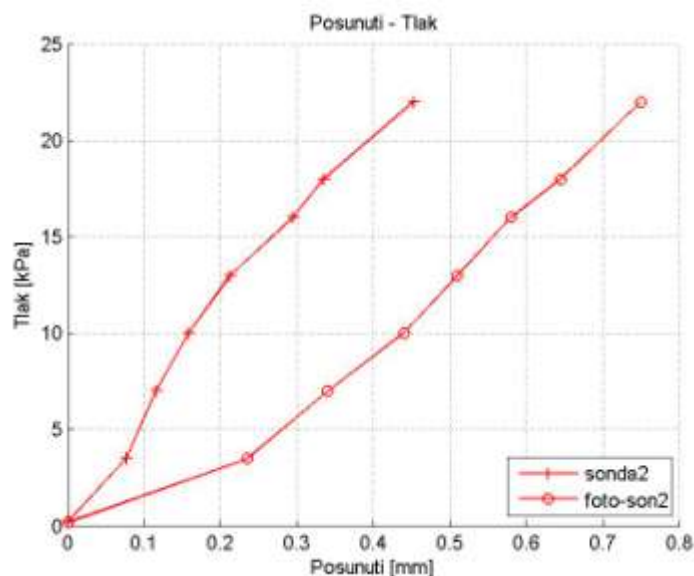


Obr. 6: Detail měřicí soustavy pro statické měření sondou 2.

## 2.1 Měření posunutí stěny - statický inflační test

Tab. 2: Naměřená data -Stat2

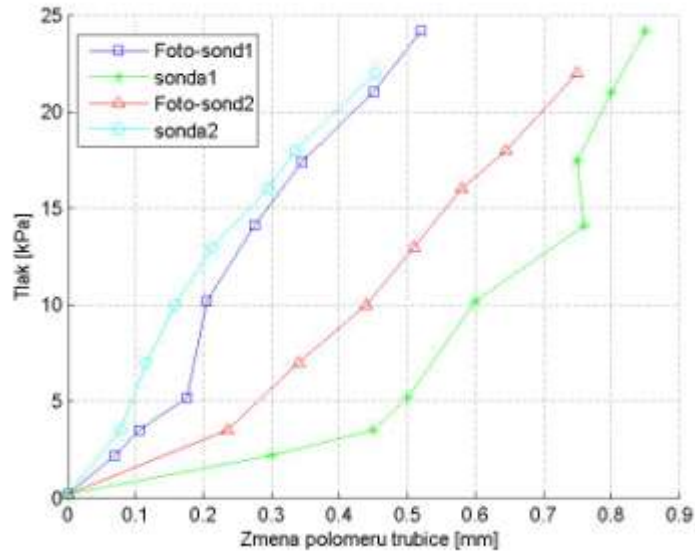
měř.č.	tlak [kPa]	data sonda2 [abs. $\mu\text{m}$ ]	dif. Sonda2 [mm]	č. snimku Foto2	prum.tr. Foto2 [mm]
1	0,20	6958	0,000	955	11,13
2	3,50	6881	0,077	956	11,6
3	7,00	6842	0,116	957	11,81
4	10,00	6800	0,158	958	12,01
5	13,00	6745	0,213	959	12,15
6	16,00	6663	0,295	960	12,29
7	18,00	6623	0,335	961	12,42
8	22,00	6505	0,453	962	12,63



Obr. 7: Zatěžovací křivky pro měření sondou 2 a foto-měření 2.

Konfokální sonda má vyšší přesnost než první sonda, v našem případě okolo 1  $\mu\text{m}$ , výrobce udává rozlišení sondy 0,4  $\mu\text{m}$ . Průměr osvětleného políčka sondy je dle výrobce 0,2 mm, ale závisí na poloze měřeného objektu v měřícím poli sondy. Měřená oblast stěny trubice je tedy u sondy 2 přibližně 10x menší než u sondy 1.

Vyhodnocené zatěžovací křivky ze sondy a foto-měření (obr. 7) se opět liší na počátku tlakování, to opět pravděpodobně odpovídá asymetrii trubičky a nejednoznačnému definování topologického místa na trubičce, pro něž byla měření provedena.



Obr. 8: Společný graf pro statická měření sondou1 a sondou2 a příslušné foto-měření 1 a 2.

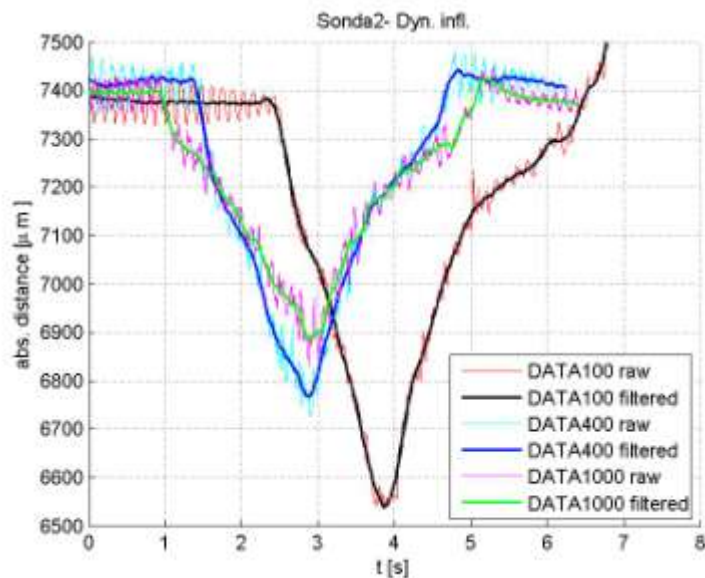
Místo měření na povrchu trubičky se liší pro obě použité sondy i pro obě foto-měření, viz obr. 8. Po určitém radiálním předepnutí trubičky, se tvar trubičky “vyrovná“ a posunutí bodů na povrchu trubičky již odpovídají elastické deformaci materiálu. Při dalším zatěžování již křivky mají podobný sklon.

## 2.2 Měření posunutí stěny - dynamický inflační test

Naměřená data:

Tři měření pro různé společné vzorkovací frekvence sondy 2 a tlakového čidla, viz obr. 9 a 10.

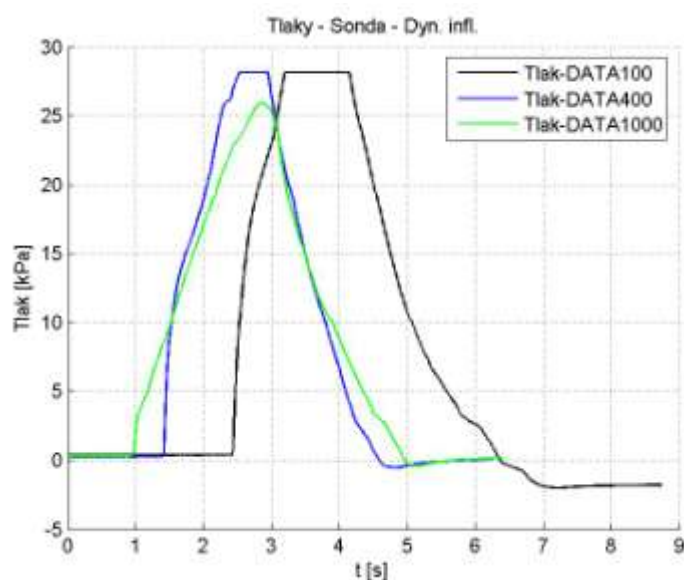
DATA100 – 100 Hz  
 DATA400 – 400 Hz  
 DATA1000 – 1000Hz



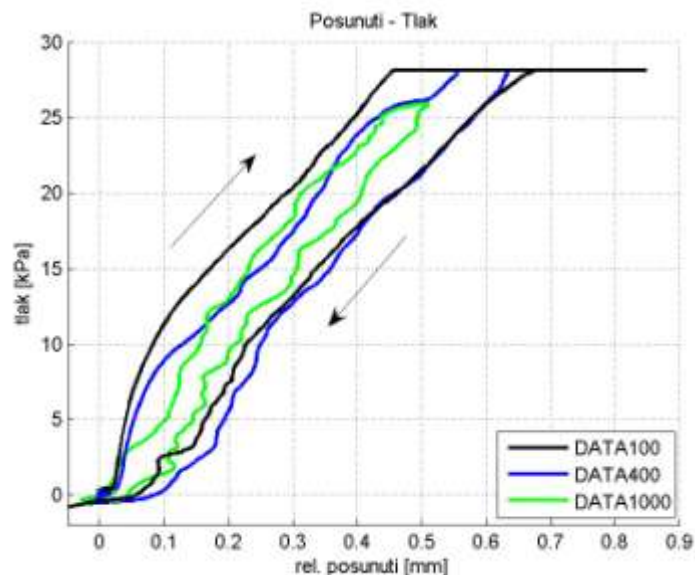
Obr. 9: Grafy filtrovaných a nefiltrovaných signálů ze sondy 2 při dynamickém inflačním testu v čase, pro dané 3 vzorkovací frekvence. Signál je absolutní vzd. od senzoru v  $\mu\text{m}$ .

Naměřená data ze sondy (obr. 9) vykazují kromě naměřených výchylek i pravidelnou mírnou oscilaci s amplitudou zhruba  $50 \mu\text{m}$ . Tato oscilace je patrně způsobena nedostatečnou tuhostí měřící soustavy, zejména možnou nezávislou deformací vertikálních stojanů se sondou a vzorkem. Jsou to zřejmě vlastní kmity měřící soustavy buzené z okolí, např. přecházení osob po podlaze v okolí měřící soustavy nebo manipulací z měřící aparaturou a kabely. Na záznamech z tlakových čidel tyto oscilace nejsou.

Křivky z tlakových sond (obr. 10) jsou hladké, na dvou pro DATA100 a DATA400 je patrný překmit tlaku nad měřící rozsah čidla.



Obr. 10: Grafy signálů z tlakových čidel pro dané vzorkovací frekvence.



Obr. 11: Grafy zatěžovacích a odlehčovacích křivek pro dynamické měření, pro 3 vzorkovací frekvence. „Useknuté“ oblasti odpovídají překmitům tlaku nad měřený rozsah

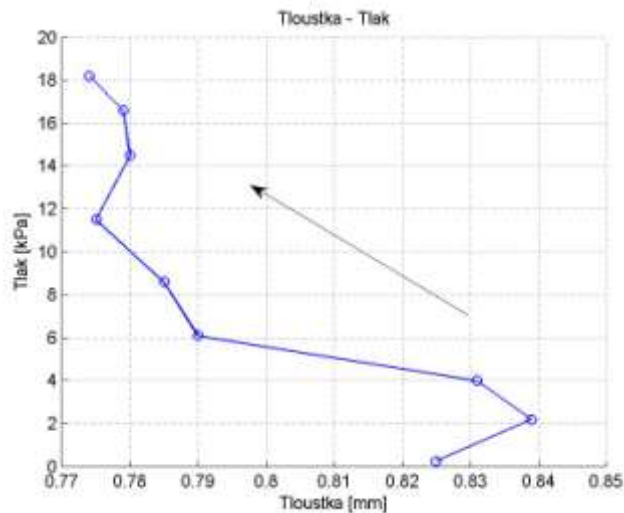
Z důvodu absence trigování měřených dat bylo nutné ruční sesazení křivek posunutí a tlaku, podle počátečního náběhu v časové oblasti. Tato subjektivní chyba časového zpoždění křivek vnáší systematickou chybu do grafů posunutí-tlak. Překročení měřicího rozsahu u prvních dvou měření se projevuje vertikální hraniční čarou na grafu posunutí-tlak, „useknutou“ smyčkou.

### 2.3 Měření tloušťky – statický inflační test

Tab. 3: Naměřená data -  
Tloušťka1

měř.č.	Tlak [kPa]	Tloušťka [μm]
1	0,26	825
2	2,20	839
3	4,00	831
4	6,10	790
5	8,60	785
6	11,50	775
7	14,50	778
8	16,60	779
9	18,20	774





Obr. 12: Graf tloušťka-tlak pro statické měření tloušťky stěny trubičky. Směr posunu po křivce při zatěžování vyznačen šipkou.

Na grafu statického měření tloušťky je patrný velký rozkmit naměřených hodnot (obr. 12, tab. 3). Přesnost měření tloušťky stěny u této sondy je ovlivněna řadou parametrů, jako je např. průhlednost nebo odrazivost materiálu trubičky. V případě, že je intenzita světla odraženého od vnitřní hrany trubičky nízká, stanovení tloušťky je zatíženo větší chybou. Přesnější statické měření by vyžadovalo průměrování statických hodnot z delších časových úseků záznamu měřené tloušťky pro dané tlaky.

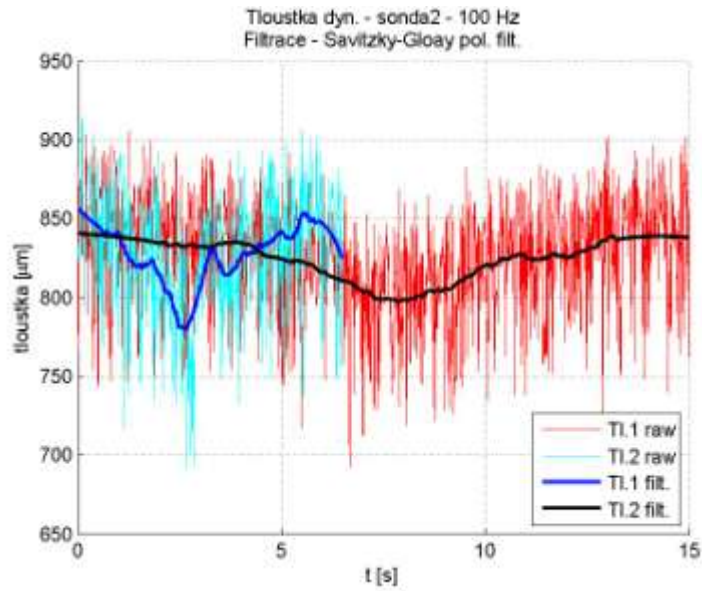
## 2.4 Měření tloušťky – dynamický inflační test

Naměřená data:

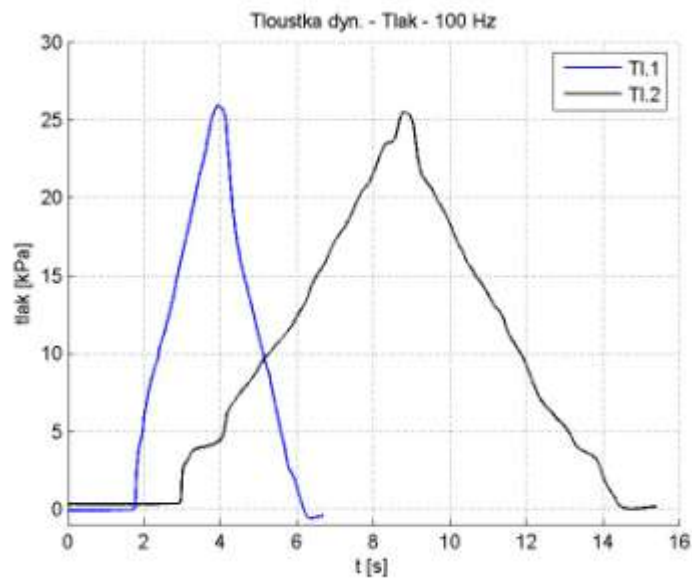
Dvě měření se vzorkováním 100 Hz, pro různé rychlosti tlakování trubičky (Tl.1 a Tl.2)

Ruční sesazení křivek z tlakového čidla (obr. 14) a sondy (obr. 13) nebylo v tomto případě dobře možné. Filtrací naměřených dat se nepodařilo dostatečně konzistentně určit bod začátku reakce stěny trubičky na tlakování. Časový odstup křivek posunutí a tlaku zásadně ovlivňuje tvar smyčky na diagramu posunutí-tlak, tj. sklon zatěžovací a odlehčovací křivky a jejich vzájemnou hysterezi.

Data ze senzoru v modu měření tloušťky vykazují mnohem vyšší nestabilitu než poměrně přesné měření vzdálenosti (obr. 9). Měřená tloušťka je v našem případě kolem 800  $\mu\text{m}$  a její změna (užitečný signál) menší než 100  $\mu\text{m}$ . Šum v datech, má podobnou amplitudu kolem  $\pm 75\text{-}100 \mu\text{m}$ , působí tedy dosti významné zkreslení výsledků, poměr signál/šum (v bezrozměrných jednotkách) je tedy okolo nebo spíše pod hodnotou 1. Signál v modu měření tloušťky je tedy signálem s nízkým poměrem signál/šum. Zvýšení tohoto poměru by šlo dosáhnout opakováním dynamického inflačního testu pro definovaný tvar tlakového pulzu v čase a následné průměrování měřeného signálu nebo nejlépe synchronizací optické sondy s tlakovou pomocí trigovacího signálu.



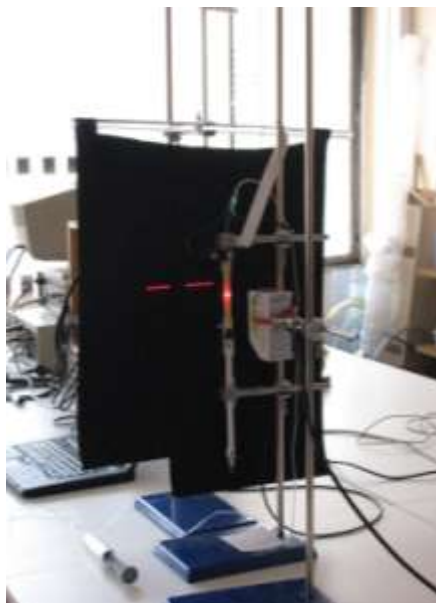
Obr. 13: Tloušťka stěny pro dvě dynamická měření (Tl.1 a Tl.2), pro každé měření data ze sondy a filtrovaná data.



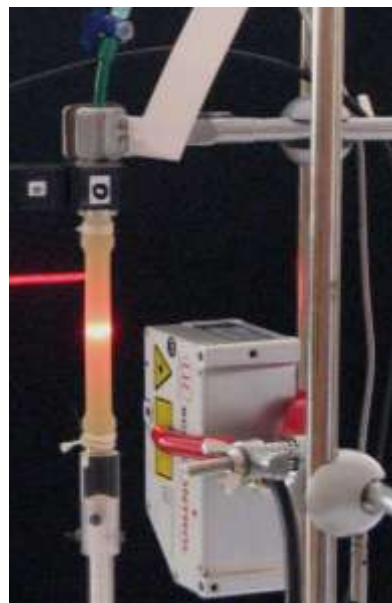
Obr. 14: Průběhy tlaků při dynamickém měření změny tloušťky trubičky.

### 3 Laserový scanner – scanCONTROL 2810 – 25 – sonda 3

#### 3.1 Příčné uspořádání – statický inflační test



Obr. 15: Měřicí soustava pro statické měření sondou 3 v příčném uspořádání.



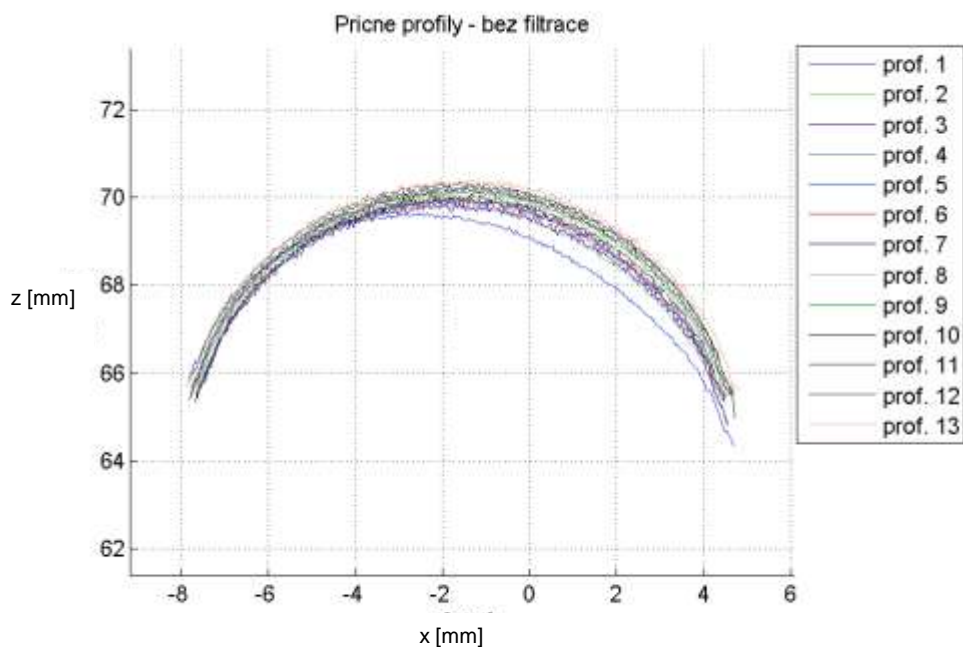
Obr. 16: Detail měřicí soustavy pro příčné statické měření sondou 3. Osa oblasti snímané laserem je kolmá na osu měřené trubičky.

Naměřená data:

Jedno statické měření, hodnoty tlaku jsou v tabulce 4, naměřené profily na obr. 17. Uspořádání měřicí čáry paprsku je kolmo na osu měřené trubičky, viz obr. 15.

Tab. 4: Sonda3 - Příčné uspořádání

měř.č.	Tlak [kPa]	r - fitted [mm]	dif. r fitt. [mm]	abs. čelo prof. [mm]	dif. čelo prof. [mm]
1	0,235	~~~~	~~~~	69,527	0,000
2	3,6	6,3404	0,0611	69,765	0,238
3	4,9	6,325	0,0457	69,85	0,323
4	6,8	6,2793	0	69,943	0,416
5	7,3	6,2828	0,0035	69,967	0,440
6	8,8	6,2955	0,0162	69,982	0,455
7	10,3	6,3121	0,0328	69,965	0,438
8	12	6,3444	0,0651	69,995	0,468
9	15,2	6,392	0,1127	70,106	0,579
10	17,5	6,4312	0,1519	70,14	0,613
11	19	6,4686	0,1893	70,246	0,719
12	21,4	6,5293	0,25	70,316	0,789
13	23,8	6,5788	0,2995	70,317	0,790



Obr. 17: Naměřená data z laserové skenovací sondy pro příčné uspořádání, naměřeno 13 profilů z jednoho místa trubičky (v axiálním směru) pro různé tlaky.

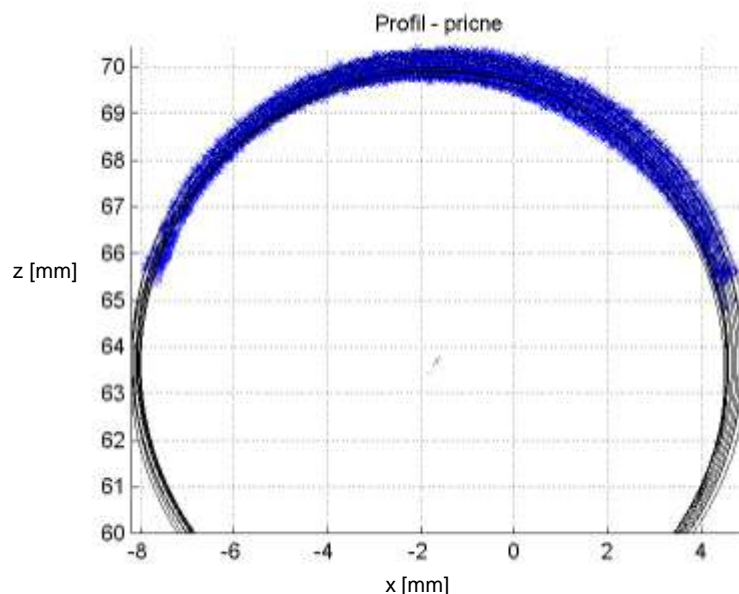
Profily naměřené sondou jsou složeny zhruba z 350 datových bodů. Šum v datech má amplitudu zhruba  $\pm 50 \mu\text{m}$  ve směru osy z (měřicí osa od sondy ke vzorku), výrobce udává

rozlišení v tomto směru 10  $\mu\text{m}$ . Největší přesnost sonda vykazuje ve střední oblasti měřicího pole, body na periférii měřicího pole nemusí splňovat všechny požadavky na přesnost, v našem případě příčný profil trubičky zasahuje pouze do střední oblasti měřicího pole, viz obr 15. Počet naměřených bodů každého profilu se liší v rámci jednotek bodů, tak jak se trubička deformovala a měřený profil pomalu „cestoval“ skrz měřicí pole. Pro tento typ měření s laserovou skenovací sondou musel být zvolen statický typ měření, postupné zaznamenávání naměřených profilů pro ustálené hodnoty tlaku. Pro příslušné dynamické měření (kterého je samozřejmě sonda schopna) by muselo být k dispozici jiné softwarové vybavení.

Jsou možné dva typy vyhodnocení. Buď odečteme posunutí stěny na jednom místě profilu, například na čele profilu, který měříme a kde jsou posunutí již známa z minulých měření anebo můžeme využít informace o tvaru profilu, který měříme a o jeho tvaru teoretickém. V našem případě je tvar měřené trubice zhruba válcový, tudíž obvodové kruhové výseče naměřené sondou můžeme proložit kružnicemi a změnu poloměru sledovat přes rovnici kružnice, která je fitována do měřených dat.

### 3.1.1 Vyhodnocení změny poloměru trubice pomocí proložených kružnic

Tento přístup nám také umožní izolovat posunutí osy trubice (středu profilu), fitování proběhlo metodou nejmenších čtverců se 3 stupni volnosti (střed\_z, střed\_x, a poloměr kružnice), viz obr. 18. Minimalizujeme funkci 3 proměnných, která popisuje sumu kvadrátů odchylek poloměrů bodů od poloměru myšlené kružnice. Nevýhodou tohoto přístupu je, že pokud se tvar profilu trubice vzdálí od kruhového, tak výsledky budou zkreslené, z tohoto důvodu vynecháme pro fitování naměřený příčný profil č. 1, který je silně nekruhový.

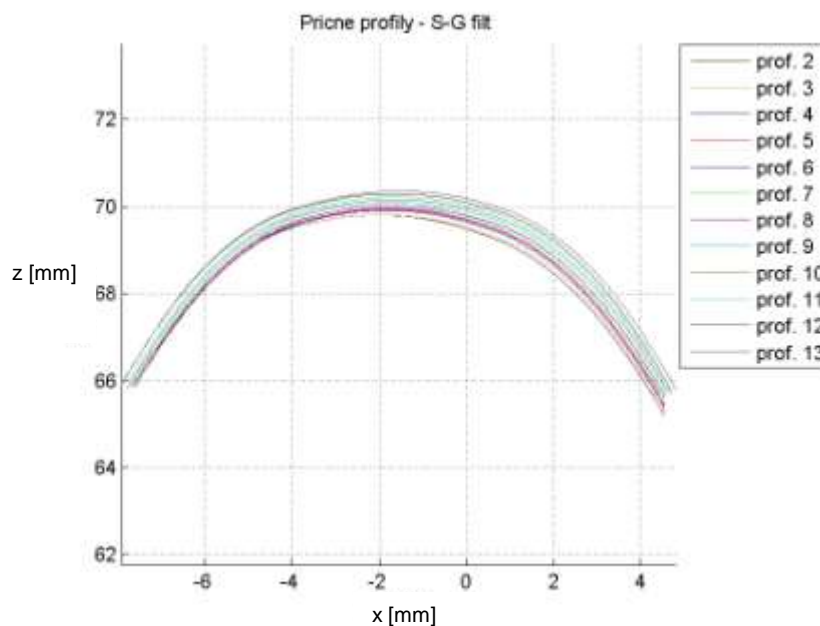


Obr. 18: Kružnice vepsané do naměřených bodů příčného profilu trubice metodou nejmenších čtverců pro různé vnitřní tlaky. Pro první měřený profil neprovedeno – příliš velká odchylka od kruhovitosti.

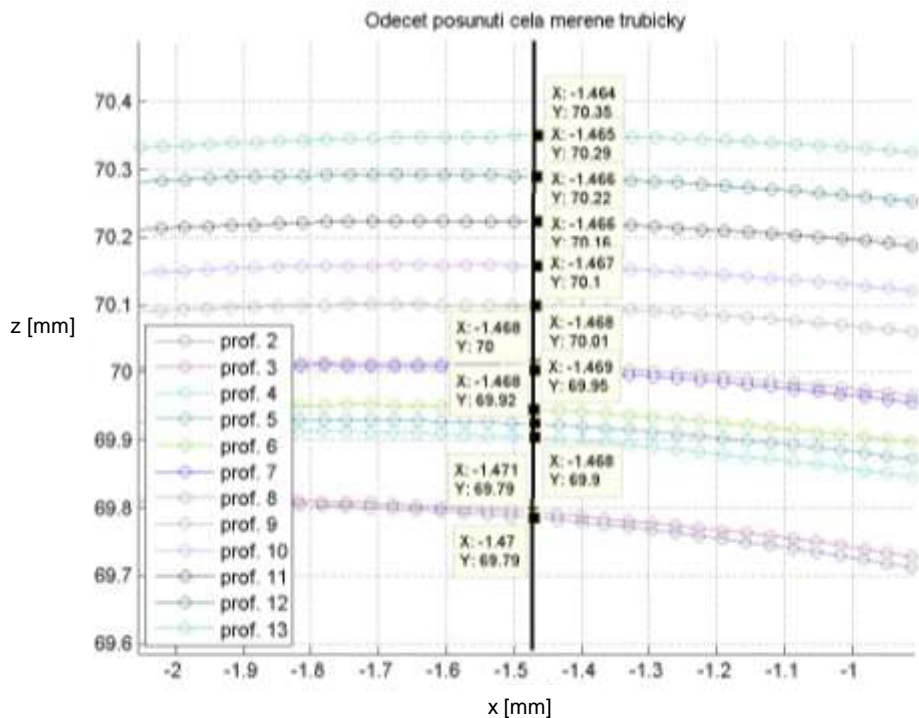
Poloměr vepsaných kružnic z počátku tlakování paradoxně klesá (chyba kruhovitosti), ale znovu po jistém radiálním předeptnutí a vyrovnání tvarových nepřesností trubičky stabilně lineárně roste, viz obr. 21. Hodnoty zjištěných poloměrů jsou uvedeny v tab. 4. Jako výchozí referenční poloměr byl zvolen minimální zjištěný, který ale z výše uvedených důvodů je až 3 v pořadí (odpovídá 4. měření), proto je křivka z počátku zatěžování zalomena a celkově oproti ostatním bude posunuta doleva. Graf relativní změny fitovaného poloměru je na obr. 21.

### 3.1.2 Změna poloměru trubice pomocí posunutím na čele měřeného profilu

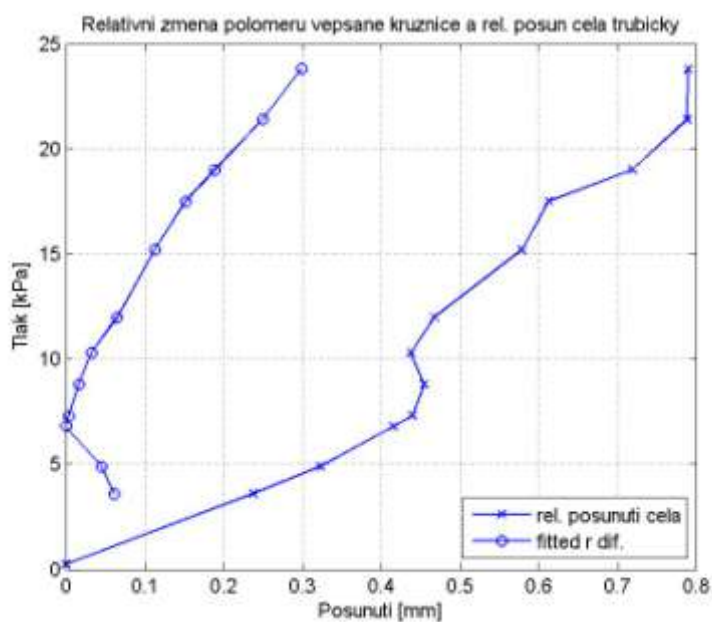
Vyhodnocení metodou, kdy budeme uvažovat pouze posun zvoleného bodu na čele měřeného profilu je jednodušší a bere v úvahu pouze lokální posunutí stěny trubice. Pro tento účel je nutno naměřené profily vyhladit, použit je polynomiální aproximační filtr Savitzky-Golay, viz obr. 20. Pro toto vyhodnocení, jako referenční polohu čela trubice bereme měřený profil č. 1, jeho nekruhovitost (obr. 17) nám v tomto případě nevadí a počáteční větší posunutí bude ve shodě s již naměřenými daty na čele trubice, kde bylo také delší počáteční posunutí. Relativní posunutí čela příčného profilu trubičky je na obr. 21.



Obr. 19: Změna poloměru vepsaných kružnic do naměřených bodů příčného profilu pro různé tlaky, jako referenční poloměr je brán 3. v pořadí (minimální).

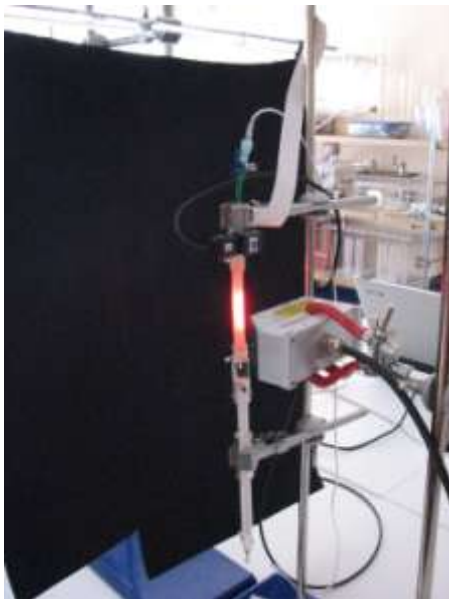


Obr. 20: Odečet hodnot posunutí na čele měřeného profilu (filtrováno). Čelo identifikováno dle lokálního maxima posledního profilu ( $x = -1,464$ ), poté odečteny hodnoty v této z-ové souřadnici (nebo nejbližší možné) ze všech profilů, hodnoty viz tab. 4. Hodnoty na obr. x odpovídají směru z.

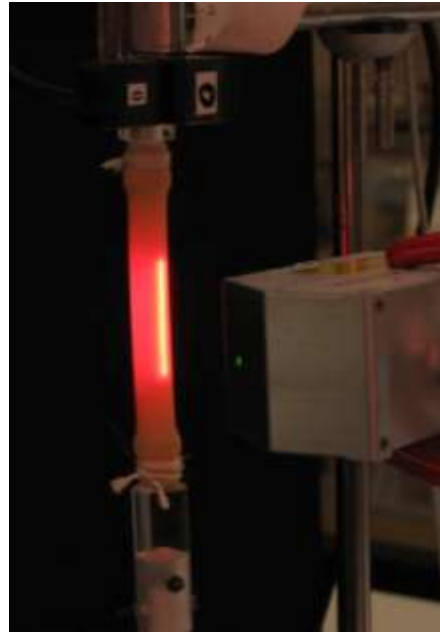


Obr. 21: Graf hodnot relativního posunutí čela měřeného příčného profilu trubičky (počáteční hodnota až 4. měřená) a změna poloměru kružnic vepsaných do naměřených bodů příčného profilu.

### 3.2 Podélné uspořádání – statický inflační test



Obr. 22: Měřicí soustava pro statické měření sondou 3 v podélném uspořádání.



Obr. 23: Detail měřicí soustavy pro podélné statické měření sondou 3. Osa oblasti snímané laserem je rovnoběžná s osou měřené trubičky.

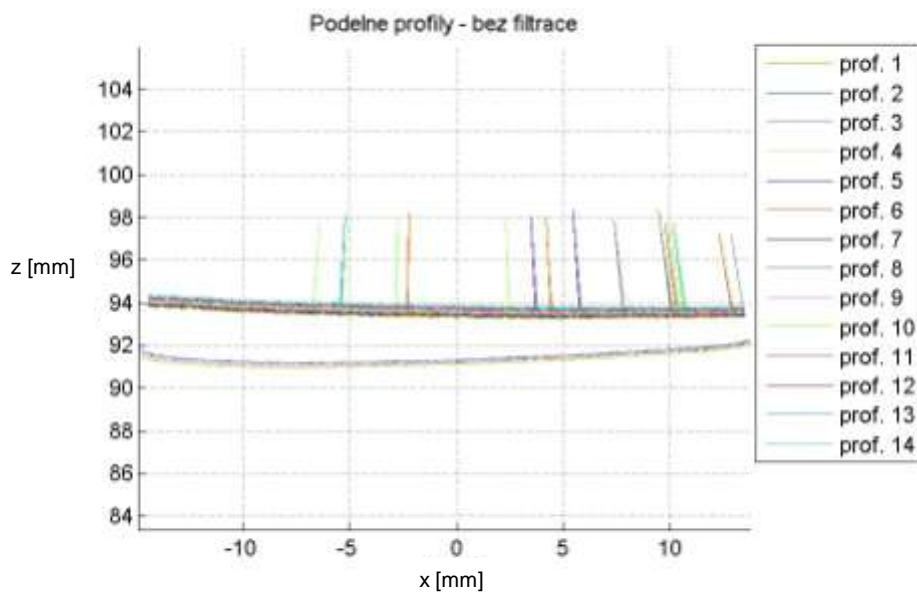
Naměřená data:

Jedno statické měření (softwarové omezení) pro podélné umístění měřicí oblasti paprsku, rovnoběžně s osou měřené trubičky, viz obr. 22 a 23. Tentokrát měříme podélný profil trubičky. Hodnoty tlaku jsou uvedeny v tabulce. 5., naměřené profily na obr. 24.



Tab. 5: Sonda3 – Podélné uspoř.

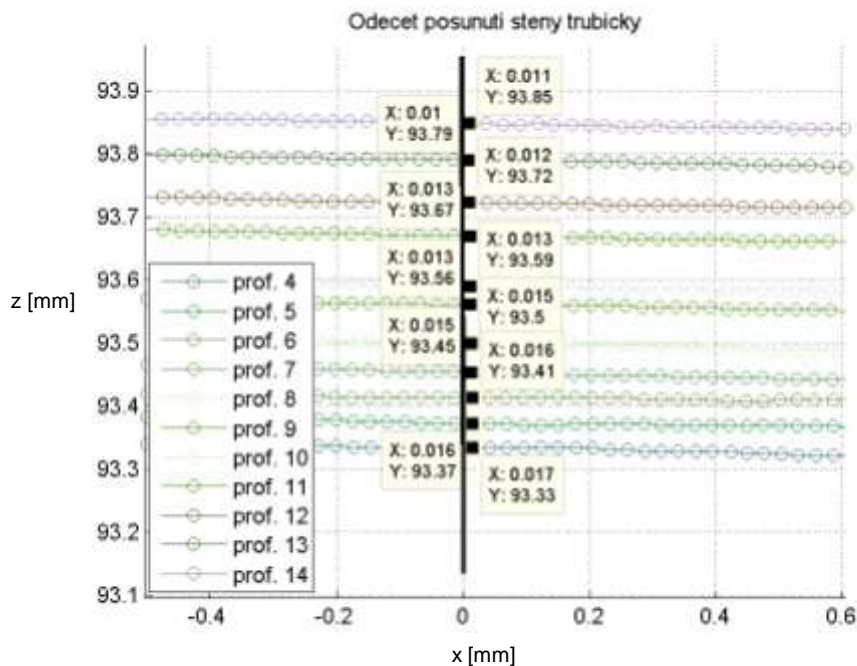
měř.č.	Tlak [kPa]	abs. pos [mm]	dif. pos. [mm]
1	0,2	~~~~	~~~~
2	~~~~	~~~~	~~~~
3	2	~~~~	~~~~
4	3,9	93,334	0,000
5	6	93,371	0,037
6	7,9	93,405	0,071
7	10,1	93,449	0,115
8	12	93,496	0,162
9	14	93,560	0,226
10	16,4	93,589	0,255
11	19	93,673	0,339
12	21	93,715	0,381
13	23,5	93,787	0,453
14	25,2	93,850	0,516



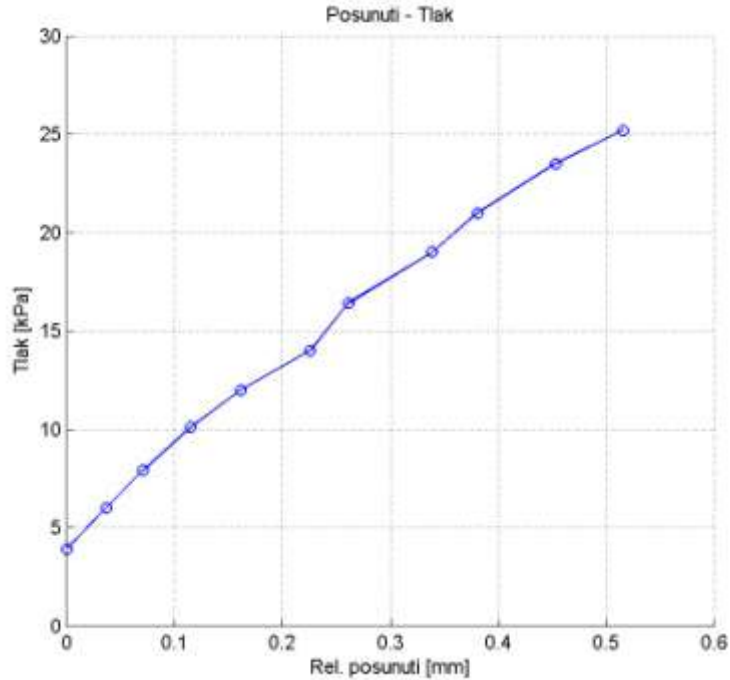
Obr. 24: Naměřená data z laserové skenovací sondy pro podélné uspořádání, naměřeno 14 profilů z jednoho místa trubičky pro různé tlaky (v obvodovém směru). První tři profily (dole) nejsou do vyhodnocení zahrnuty.

Naměřené profily se pro toto měření skládají všechny z 1024 datových bodů (celá měřicí oblast sondy byla zaměřena na trubičku, žádná část měřicí oblasti sondy nešla mimo, viz obr. 23). Amplituda šumu v datech se pohybuje, jako u příčného měření, opět kolem  $\pm 50$   $\mu\text{m}$  ve směru osy z (měřicí osa od sondy ke vzorku).

První 3 naměřené profily (obr. 24) vykazují skokovou deformaci přes 2 mm mezi kroky 3 a 4 a proto nebudou do vyhodnocení zahrnuty. Pravděpodobně k tomuto měření nepatří a jedná se o chybu v kompletaci dat. Křivka posunutí-tlak tedy bude začínat na hodnotě tlaku při kroku 4 a bude posunuta směrem k nižším hodnotám posunutí stěny trubičky. Hodnoty posunutí byly odečteny jako nejbližší kladné hodnoty k 0 v z-ovém směru, to je místo na trubičce, ležící v měřicí ose sondy uprostřed měřicího pole. Odečtené hodnoty jsou v tabulce 5 a na obr. 25.



Obr. 25: Odečet hodnot posunutí měřených podélných profilů (filtrováno, S-G filtr). Hodnoty posunutí ve směru x odečteny v okolí středu měřicího pole sondy (nejbližší bod v kladném směru x). Odečtené hodnoty jsou uvedeny tabulce 5.

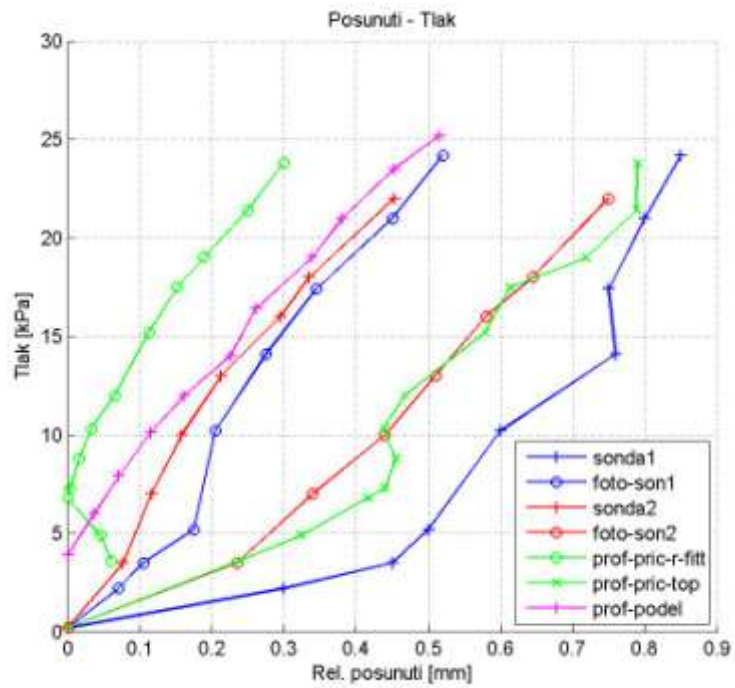


Obr. 26: Graf relativního posunutí trubičky v místě středu měřicího pole sondy<sub>3</sub>, při podélném měření. Hodnoty jsou uvedeny tabulce 5.

#### 4 Závěr

Při měření sondami firmy MICRO-EPSILON byly zkoušeny 3 výše uvedené sondy. Nejpřesnější měření provádí konfokální sonda<sub>2</sub>, u laserového scanneru se dá využít tvarová filtrace hodnot (hladká trubička) a tím i jistého zpřesnění.

Na obr. 27 je souhrn naměřených zatěžovacích křivek latexové trubičky, zatěžované vnitřním tlakem, pro různé použité metody, viz výše. V ideálním případě, kdy je trubička naprosto symetrická s konstantní tloušťkou, bychom měli naměřit pokaždé podobnou zatěžovací charakteristiku trubičky. Reálná trubička má ale trochu nepravidelný tvar a kolísající tloušťku, proto se z počátku zatěžování, kdy je odlehčena na tlak atmosféry, může deformovat nesymetricky. Pokud neměříme všechny charakteristiky pro přesně definované topologické místo na povrchu trubičky, dostaneme mírně odlišné charakteristiky v různých místech povrchu. Pokud sklon naměřené charakteristiky bereme jako určitou tuhost trubičky, pak se tato tuhost, pro vyšší tlaky, jeví jako podobná napříč všemi statickými měřeními. Trubička tedy zpočátku zatěžování nejprve vyrovná tvarové rozdíly a asymetrie a po jistém tlakovém předeprnutí se s rostoucím tlakem deformuje při všech měřeních podobně.



Obr. 27: Grafy naměřených relativních posunutí trubičky pro statické zatěžování pro všechny použité metody.