

## **RE-CALIBRATION OF THE METHODOLOGY DETERMINING BURST PRESSURE OF PIPE WITH SURFACE DEFECT.**

**M. Španiel, C. Novotný, M. Růžička<sup>1</sup>**

**Summary:** *The paper documents re-calibration of the remaining load-carrying capacity (RCMT) methodology assessed to determine limit pressure of pipeline with surface areal defect. It was done under research contract between RWE Transgas, a.s. and FME of CTU in Prague. 9 artificial defects that had been experimentally tested in past, were analysed and utilised as re-calibration resource.*

### **1. Úvod**

Předmětem příspěvku je rekalibrace metodiky výpočtu mezního tlaku potrubí dálkových plynovodů s plošným defektem, která byla provedena ve spolupráci s firmou RWE Transgas, a.s. Metodika (MVMT) předpokládá, že o plastickém kolapsu rozhoduje rozložení plastické deformace v místě plošného ztenčení stěny potrubí. Je použitelná za předpokladů: 1) Defekt je dostatečně velký v porovnání s tloušťkou stěny a má charakter plošné poruchy tloušťky stěny; 2) Materiál potrubí má velkou zásobu plasticity (tažnost nad 10%). Poměrná délka defektu  $\Lambda = L_P/L_D$  – kritérium mezního stavu vycházející z délky plastické oblasti  $L_P$  a deformační vlny  $L_D$  – je vypočtena MKP jako funkce tlaku. Konfrontací s experimentálně stanovenými mezními tlaky je určena její mezní hodnota  $\Lambda_{LIM}$ . Metodika byla vyvíjena a testována na Ústavu mechaniky Strojní fakulty ČVUT v devadesátých letech minulého století [Gajdoš 2004] a její použitelnost byla negativně ovlivněna faktem, že podklady byly průběžně vyhodnocovány během celého výše zmíněného desetiletí. Relevantnost experimentů zůstává prakticky neměnná, ale výsledky získané na starších MKP modelech nejsou plně srovnatelné s dnešními. Hlavním cílem práce bylo revokovat starší modely experimentálně vyšetřovaných defektů, analyzovat je jednotným MKP aparátem na srovnatelných sítích a provést rekalibraci stávajících mezních hodnot  $\Lambda_{LIM}$ .

### **2. MVMT**

Předpoklady platnosti metodiky formulované v úvodu plnou z představy o mechanismu porušení v důsledku nestabilního rozvoje plastické deformace. Přídavná ohybová napětí způsobená poruchou tloušťky stěny vedou v první etapě narůstání tlaku k vytváření liniového plastického kloubu, který obklopuje defekt. Ohybové změkčení stěny způsobuje její „boulení“.

Narůstání a přerozdělování plastické deformace je v této etapě omezeno na oblast danou výše zmíněným plastickým kloubem, kterou budeme nazývat jádrem defektu. Je-li defekt dostatečně

<sup>1</sup> Ing. Miroslav Španiel, CSc., Ing. Ctirad Novotný, Prof. Ing. Milan Růžička, CSc. Strojní fakulta ČVUT v Praze, Technická 4, 166 07 Praha 6. tel. +420 224 352 561, email miroslav.spaniel@fs.cvut.cz

velký a hluboký, muže dojít k proplastizování jeho jádra a ke ztrátě stability ještě před počátkem plastizace okolí s neztenčenou stěnou. Častěji dochází ke zhroucení ve stavu, kdy i neztenčené části potrubí jsou již také na počátku plastického stavu.

MVMT funguje tak, že k poškozenému potrubí popsanému vlastními rozměry, geometrií poškození a pracovním diagramem materiálu je pomocí metody konečných prvků vypočtena závislost stavového parametru  $\Lambda = \Lambda(p)$  na tlaku média, která slouží k přibližnému stanovení mezního tlaku řešením rovnice

$$\Lambda(p_{LIM}) = \Lambda_{LIM}. \quad (1)$$

### 2.1. Definice stavového parametru poměrné délky defektu.

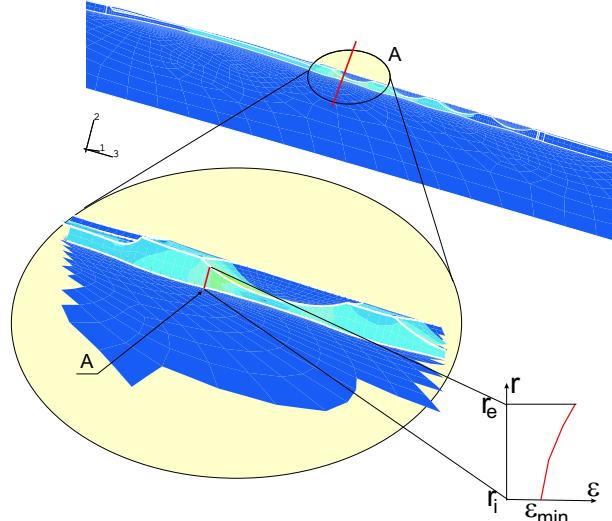
Parametr **poměrná délka defektu**  $\Lambda$  se opírá o pojem **plastické oblasti**, jehož smyslem je převést 3D oblast ve stěně potrubí na 2D oblast na povrchu válce. Má-li bod povrchu válce patřit do plastické oblasti, musí být plastizace<sup>2</sup> podél celé úsečky, ve které jím vedený radiální paprsek protíná stěnu potrubí, rovna event. větší než daná hodnota  $\varepsilon_{LIM}$  (viz obr.1). Délkou plastické oblasti  $L_P^{\varepsilon LIM}$  se rozumí její maximální osový rozměr.

Pojem jádra defektu souvisí s vymezením oblasti, ve které probíhá plastizace a její redistribuce. Jádro defektu je identifikováno pomocí pole radiálního posuvu. Řada MKP analýz potvrdila skutečnost, že průběh radiálního posuvu podél površky trubky, která prochází oblastí defektu má charakter vlny ohraničené lokálními minimy (viz obrázek 2). Vzdálenost těchto minim určuje délku defektu  $L_D$ . Při vývoji metodiky byla zavedena *délka jádra defektu*  $L_C$  daná zmenšením délky defektu o dvojnásobek délky půlsvny průběhu radiálního posuvu na polonekonečné trubce při zatížení jejího okraje rovnoměrně rozloženou silou nebo momentem  $L_w$ .

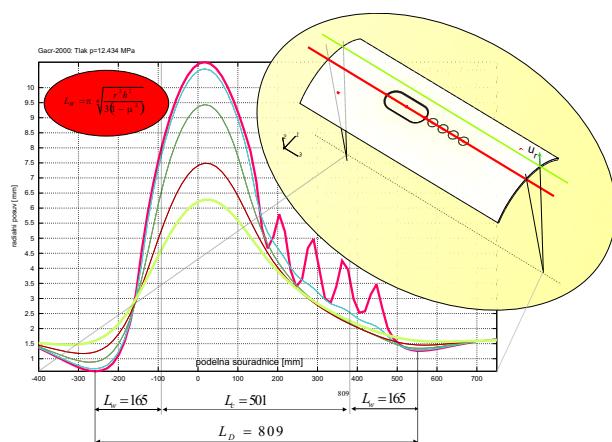
$$L_C = L_D - 2 L_w. \quad (2)$$

Definice plastické oblasti i jádra defektu slouží přímo k jejich stanovení z dat vypočtených MKP. Hodnoty  $L_{P,i}$  a  $L_{C,i}$  pro různé úrovně tlaku média  $p_i$  určují interpolaci závislosti délky plastické oblasti  $L_P(p)$  a délky jádra defektu  $L_C(p)$  na tlaku média  $p$ .

<sup>2</sup> Mírou plastizace je akumulovaná intenzita plastických deformací  $\varepsilon_a$



Obrázek 1: Vyšetření plastické oblasti a její délky na povrchu trubky.



Obrázek 2: Definice jádra defektu.

Kritériem dosažení mezního stavu je poměrná délka defektu definovaná jako

$$\Lambda(p) = \frac{L_P(p)}{L_C(p)}, \quad (3)$$

která pro výpočtový mezní tlak  $p_{LIM}$  dosahuje mezní hodnoty  $\Lambda_{LIM}$ . Mezní poměrnou délku defektu  $\Lambda_{LIM}$  je třeba pro potrubí daného průměru, tloušťky stěny a materiálu stanovit experimentálně. Těleso s plošným defektem je tlakováno vodou až do destrukce, přičemž je zaznamenán experimentálně zjištěný mezní tlak  $p_{LIM}^{exp}$ . Současně je pomocí MKP vypočtena a určena závislost  $\Lambda(p)$ . Pro mezní poměrnou délku defektu odpovídající zkoumanému případu máme vztah

$$\Lambda_{LIM} = \Lambda(p_{LIM}^{exp}). \quad (4)$$

### 3. Automatizace procedury predikce mezního tlaku

Praktická použitelnost metodiky byla snižována také vysokým podílem lidské práce při vyhodnocování výpočtů. Součástí projektu rekalibrace proto byl i vývoj programového aparátu MVMT. Celé vyhodnocení defektu od identifikace plastické oblasti až po určení závislosti  $\Lambda(p)$  je implementováno jako skript v prostředí MKP systému ABAQUS v jazyce Python. Pro určení mezních hodnot  $\Lambda_{LIM}$  ze série experimentů na základě statistického zpracování byl vytvořen program v prostředí systému Origin Lab.

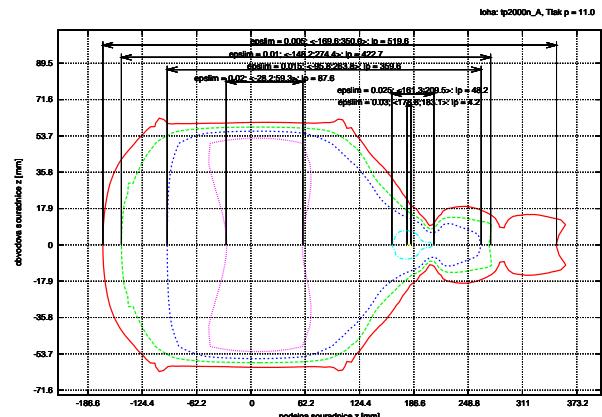
#### 3.1. Vyšetření plastické oblasti.

Stanovení délky plastické oblasti spočívá ve vyšetření pole minim akumulované intenzity plastické deformace po tloušťce stěny  $\varepsilon_{a,min}(x, z)$  na (rozvinutém) povrchu trubky ( $x$  je obvodová a  $z$  osová souřadnice).

Izočára pro danou hodnotu  $\varepsilon_{a,LIM}$  v tomto poli ohraničuje plastickou oblast. Délka plastické oblasti je definována jako její maximální osový rozměr. Pole minim  $\varepsilon_{a,min}(x, z)$  je interpolováno z hodnot ve zvolené množině bodů  $[x_i; z_i]$  na povrchu trubky, které jsou vyšetřeny přímo z výsledků výpočtu MKP<sup>3</sup>. V minulosti byly vytvořeny dva aparáty pro vyhodnocení plastické oblasti, které pro interpolaci pole  $\varepsilon_{a,min}(x, z)$  využívaly buď program *Gnuplot* nebo *Origin*. V obou případech musela být délka plastické oblasti odměřena ručně, což je jednak zdlouhavé, jednak to zanáší do vyhodnocení chyby. Nově vyvinutý programový aparát řeší interpolaci pole  $\varepsilon_{a,min}(x, z)$  vlastními prostředky a umožňuje tak i automatické stanovení izočar a délky plastické oblasti. Pro kontrolu současně vytváří grafickou reprezentaci plastických oblastí (viz např. obr. 3).

#### 3.2. Stanovení délky defektu. Alternativní definice délky defektu.

Pole radiálního posudu podél površky trubky v oblasti defektu se vyznačuje nemonotoním průběhem s maximy a minimy. Délka defektu se definuje jako vzdálenost mezi minimy, která



Obrázek 3: Stanovení délky plastické oblasti.

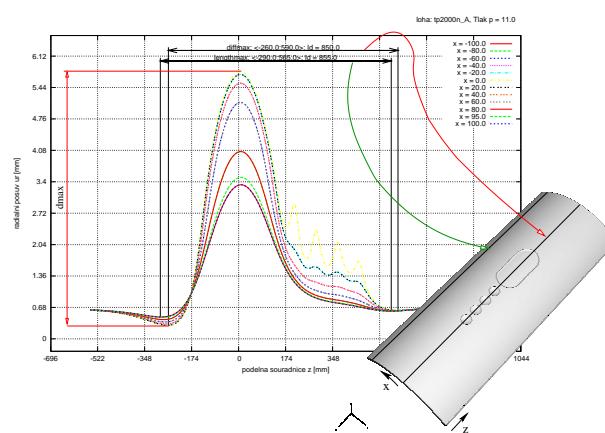
jsou v již neztenčené oblasti, ale nejblíže hranici geometrické poruchy.

Doposud se stanovení délky defektu provádělo ruční analýzou průběhu radiálního posuvu podél površek. V rámci rekalibrace MVMT byla tato operace naprogramována. Vzhledem k velké variabilitě variant musí být automaticky stanovená délka defektu kontrolována kvalifikovaným pracovníkem. Proto je součástí programu grafický výstup průběhu radiálních posuvů nad jednotlivými površkami (viz obr. 4).

Automatické vyhodnocování revokovaných výpočtů umožnilo prověřit alternativní definice délky defektu. Ve stávajícím pojetí, jak bylo napsáno, je délka defektu definována jako vzdálenost dvou nejvzdálenějších minim deformacní vlny na společné površce. Takto pojatá definice může v případě velkého segmentu vést k vyhodnocení minim blízko hranic segmentu a ne nad defektem. Alternativní definice délky defektu bere vzdálenost dvou minim s největším rozdílem minima a maxima na společné površce.

Příkladem stanovení délek defektu podle původní ( $L_{D,lmax}$ ) i alternativní ( $L_{D,dmax}$ ) definice je obrázek 4

- Na površce  $x = 0$  mm je ze všech vyšetřovaných površek největší rozdíl  $d_{max} = u_{r,max} - u_{r,min0}$ , a proto je právě ona definiční površkou pro délku  $L_{D,dmax} = |z_{min1} - z_{min0}|$  definovanou jako absolutní hodnota rozdílu poloh (osových souřadnic  $z$ ) dvou výše definovaných minim.
- Na površce  $x = 95$  mm je ze všech vyšetřovaných površek největší rozdíl  $|z_{min1} - z_{min0}|$ , a proto je právě ona definiční površkou pro délku  $L_{D,lmax} = |z_{min1} - z_{min0}|$  definovanou jako absolutní hodnota rozdílu poloh (osových souřadnic  $z$ ) dvou výše definovaných minim.



Obrázek 4: Stanovení délky defektu.

**Alternativní definice délky defektu.** Délka defektu se obecně mění s narůstajícím tlakem. To souvisí se změnou tuhosti stěny v důsledku postupné plastizace. Tento jev vede v některých případech k nemonotónnímu průběhu kritéria  $\Lambda$  v závislosti na tlaku  $p$ . Zejména při nižších hodnotách  $\varepsilon_{LIM}$  dochází k poklesu kritéria ještě před dosažením mezního tlaku. Z tohoto důvodu byly implementovány další dvě alternativní definice délky defektu označované „lmax0“, resp., „dmax0“. Podle nich se délka defektu nastaví při dosažení první plastické oblasti s nenulovou délkou (podle definic „lmax“, resp., „dmax“) při tlaku  $p_0$  a dále se s rostoucím tlakem nemění. Tyto čtyři alternativní definice délky defektu  $L_{D,lmax}(p)$ ,  $L_{D,dmax}(p)$ ,  $L_{D,lmax0}(p) = L_{D,lmax}(p_0)$  a  $L_{D,dmax0}(p) = L_{D,dmax}(p_0)$  implikují odpovídající definice délky jádra defektu podle vztahu 2 a konečně i poměrné délky defektu podle 3

$$\Lambda_x^{\varepsilon_{LIM}}(p) = \frac{L_P^{\varepsilon_{LIM}}(p)}{L_{C,x}(p)}, \quad \text{kde } x \in \{lmax, dmax, lmax0, dmax0\}. \quad (5)$$

### 3.3. Stanovení $\Lambda_{x,LIM}^{\varepsilon LIM}$ a statistické vyhodnocení.

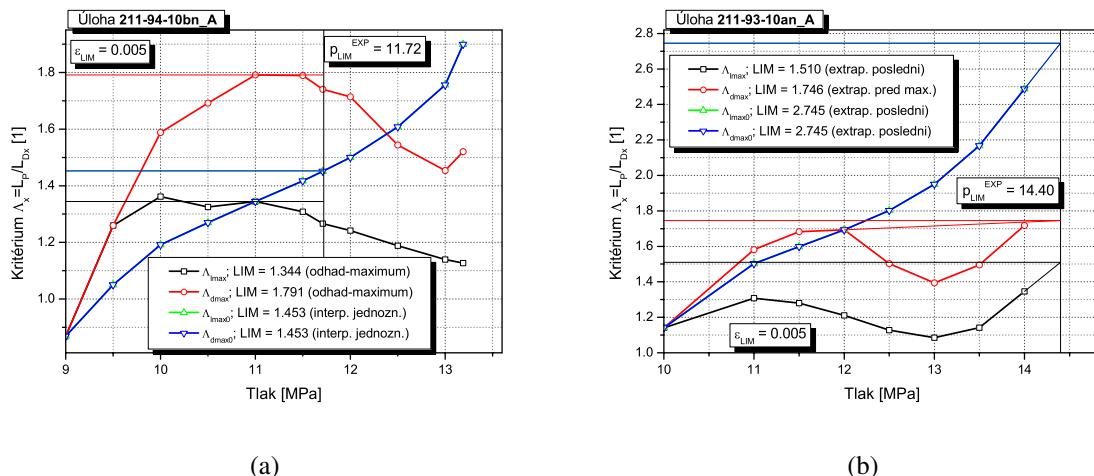
Stanovení  $\Lambda_{x,LIM}^{\varepsilon LIM}$  podle

$$\Lambda_{x,LIM}^{\varepsilon LIM} = \Lambda_x^{\varepsilon LIM} (p_{LIM}^{exp}), \quad \text{kde } x \in \{lmax, dmax, lmax0, dmax0\} \quad (6)$$

se komplikuje jak v případě nemonotonné závislosti  $\Lambda_x^{\varepsilon LIM} (p)$ , tak i v případě, že výpočtový tlak nepřekročil destrukční  $p_{LIM}^{exp}$ <sup>4</sup>. Zkušenosti získané v minulosti při vyhodnocování experimentálních a výpočtových podkladů byly využity při formulaci níže uvedených pravidel, která jsou základem procedury naprogramována v prostředí programu *Origin* v jazyce Origin C.

Základem strategie stanovení  $\Lambda_{x,LIM}^{\varepsilon LIM}$  je lineární interpolace funkce  $\Lambda_x^{\varepsilon LIM} (p)$  po jednotlivých intervalech. Pro každý interval je stanoveno  $\Lambda_x$  v průsečíku interpolované funkce s přímkou  $p = p_{LIM}^{exp}$ . Z těchto průsečíků se stanoví (pokud existuje) hodnota  $\Lambda_{x,LIM}^{\varepsilon LIM}$  interpolovaná, hodnota extrapolovaná z posledního intervalu a hodnota extrapolovaná z posledního lokálního maxima před  $p_{LIM}^{exp}$ .

- Pokud existuje interpolovaná hodnota
  - a závislost  $\Lambda_x^{\varepsilon LIM} (p)$  je monotónní alespoň v intervalu  $\langle 0; p_{LIM}^{exp} \rangle$  je  $\Lambda_{x,LIM}^{\varepsilon LIM}$  rovno právě této hodnotě (viz např. křivku  $\Lambda_{dmax0}$  v obr. 5(a)).
  - a závislost  $\Lambda_x^{\varepsilon LIM} (p)$  není monotónní, je  $\Lambda_{x,LIM}^{\varepsilon LIM}$  stanovena jako poslední lokální maximum před  $p_{LIM}^{exp}$  (viz např. křivku  $\Lambda_{lmax}$  v obr. 5(a)).
- Pokud neexistuje interpolovaná hodnota je  $\Lambda_{x,LIM}^{\varepsilon LIM}$  stanovena jako minimum extrapolace z posledního lokálního maxima a z posledního intervalu (viz např. křivky  $\Lambda_{lmax}$  a  $\Lambda_{dmax}$  v obr. 5(b)).



Obrázek 5: stanovení  $\Lambda_{x,LIM}^{\varepsilon LIM}$ .

U každého defektu jsou pro všechna  $\varepsilon_{LIM} \in \mathcal{E}$  (viz 8) určeny čtyři průběhy  $\Lambda_x^{\varepsilon LIM} (p)$  pro čtyři alternativní definice délky defektu (5). Z nich jsou aplikací (6) stanoveny mezní hodnoty  $\Lambda$  kritéria –  $\Lambda_{x,LIM}^{\varepsilon LIM}$ .

<sup>4</sup> Např. při ztrátě konvergence MKP výpočtu

| 'step' | 'press' | 'Lddiffmax' | 'LDmax' | 'LD0diffmax' | 'LD0max' | 'Lw'      | 'Lp'      |
|--------|---------|-------------|---------|--------------|----------|-----------|-----------|
| 13     | 10      | 910         | 915     | 910          | 915      | 165.01683 | 0         |
| 14     | 10.5    | 875         | 875     | 910          | 915      | 165.01683 | 0         |
| 15     | 11      | 850         | 855     | 910          | 915      | 165.01683 | 87.61288  |
| 16     | 11.5    | 835         | 860     | 910          | 915      | 165.01683 | 388.33223 |
| 17     | 11.78   | 835         | 860     | 910          | 915      | 165.01683 | 465.30339 |
| 18     | 12      | 835         | 865     | 910          | 915      | 165.01683 | 507.01738 |

| 'step' | 'press' | 'lambdiffmax' | 'lambmax' | 'lambdiffmax0' | 'lambmax0' | 'distcenters' |
|--------|---------|---------------|-----------|----------------|------------|---------------|
| 13     | 10      | 0             | 0         | 0              | 0          | 190           |
| 14     | 10.5    | 0             | 0         | 0              | 0          | 172.5         |
| 15     | 11      | 0.1685        | 0.16689   | 0.15107        | 0.14977    | 149.44616     |
| 16     | 11.5    | 0.76903       | 0.73275   | 0.66958        | 0.66385    | 59.49027      |
| 17     | 11.78   | 0.92145       | 0.87799   | 0.80229        | 0.79544    | 39.38591      |
| 18     | 12      | 1.00406       | 0.94776   | 0.87422        | 0.86675    | 34.59112      |

Tabulka 1: Příklad vyhodnoceného průběhu  $\Lambda_x^{\varepsilon_{LIM}=0,02}$  (p) pro defekt tp2000.

Limitní hodnoty  $\Lambda_x^{\varepsilon_{LIM}}$  jsou podrobny statistickému zpracování odděleně pro defekty na potrubí DN 800 A DN 900. Výsledkem jsou střední mezní hodnoty  $\Lambda_x^{\varepsilon_{LIM}}$  a směrodatné odchylky  $\delta \Lambda_x^{\varepsilon_{LIM}}$  kritéria v závislosti na volbě  $\varepsilon_{LIM}$ . Původně směrodatná odchylka  $\delta \Lambda_x^{\varepsilon_{LIM}}$  definovala míru přesnosti predikcí mezního tlaku.

### 3.4. Stanovení $p_{x,LIM}^{\varepsilon_{LIM}}$ a statistické vyhodnocení.

Stanovení  $p_{x,LIM}^{\varepsilon_{LIM}}$  jako řešení rovnice 1

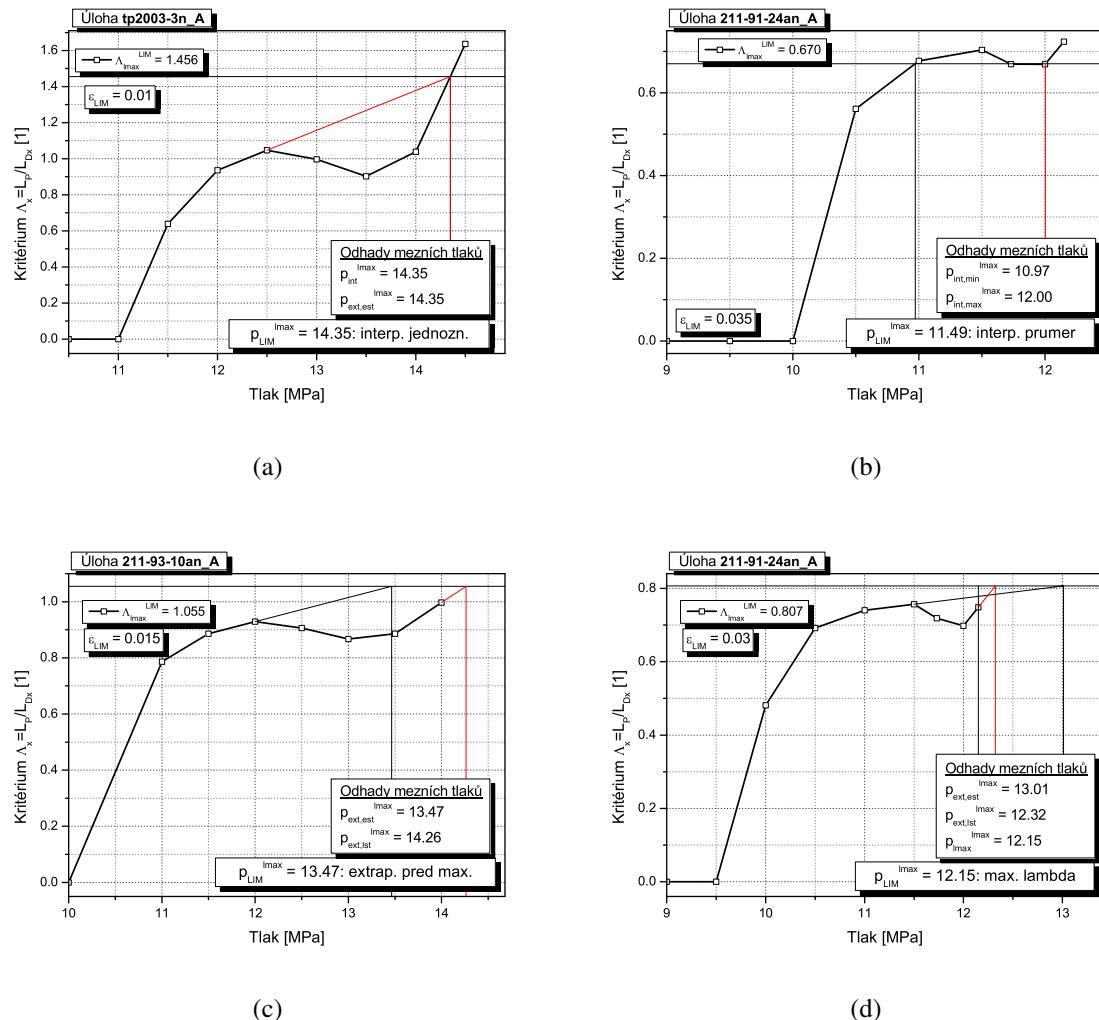
$$\Lambda_x^{\varepsilon_{LIM}}(p_{x,LIM}^{\varepsilon_{LIM}}) = \Lambda_x^{\varepsilon_{LIM}} \quad \text{kde } x \in \{lmax, dmax, lmax0, dmax0\} \quad (7)$$

se komplikuje jak v případě nemonotonné závislosti  $\Lambda_x^{\varepsilon_{LIM}}(p)$ , tak i v případě, že  $\Lambda_x^{\varepsilon_{LIM}}(p) < \Lambda_x^{\varepsilon_{LIM}}$  v celém intervalu výpočtových tlaků. Podobně jako při určování  $\Lambda_x^{\varepsilon_{LIM}}$  byla naprogramována příslušná procedura v prostředí programu *Origin* v jazyce Origin C.

Základem strategie stanovení  $p_{x,LIM}^{\varepsilon_{LIM}}$  je také lineární interpolace funkce  $\Lambda_x^{\varepsilon_{LIM}}(p)$  po jednotlivých intervalech. Pro každý interval je stanoveno  $p_x$  v průsečíku interpolované funkce s přímkou  $\Lambda = \Lambda_x^{\varepsilon_{LIM}}$ . Z těchto průsečíků se stanoví (pokud existuje) hodnota  $p_{x,LIM}^{\varepsilon_{LIM}}$  interpolovaná, hodnota extrapolovaná z posledního intervalu, hodnota extrapolovaná z posledního lokálního maxima a hodnota odhadnutá na základě maxima, pokud se maximum  $\Lambda_x^{\varepsilon_{LIM}}(p)$  přiblíží kritériu  $\Lambda_x^{\varepsilon_{LIM}}$  na 10%.

- Pokud existuje jediná interpolovaná hodnota
  - a současně neexistuje hodnota extrapolovaná z maxima před interpolovanou hodnotou, je  $p_{x,LIM}^{\varepsilon_{LIM}}$  rovno právě jí (viz obr. 6(a)).
  - a současně existuje hodnota extrapolovaná z maxima před interpolovanou hodnotou, je  $p_{x,LIM}^{\varepsilon_{LIM}}$  rovno menší z nich
- Pokud existuje více interpolovaných hodnot
  - a současně neexistuje hodnota extrapolovaná z maxima před největší interpolovanou hodnotou, je  $p_{x,LIM}^{\varepsilon_{LIM}}$  rovno středu intervalu mezi minimální a maximální interpolovanou hodnotou (viz obr. 6(b)).

- a současně existuje hodnota extrapolovaná z maxima před největší interpolovanou hodnotou, je  $p_{x,LIM}^{\varepsilon LIM}$  rovno menší hodnotě ze středu intervalu mezi minimální a maximální interpolovanou hodnotou a extrapolované hodnoty.
- Pokud neexistuje interpolovaná hodnota
  - a absolutní maximum závislosti  $\Lambda_x^{\varepsilon LIM}(p)$  se přibližuje kritériu  $\Lambda_{x,LIM}^{\varepsilon LIM}$  na 10% je jako  $p_{x,LIM}^{\varepsilon LIM}$  určen bod tohoto maxima (viz obr. 6(d)).
  - jinak je vybrána menší z existujících extrapolovaných hodnot (viz obr. 6(c)).

Obrázek 6: Stanovení  $p_{x,LIM}^{\varepsilon LIM}$ .

#### 4. Výsledky rekalibrace.

Rekalibrace byla provedena na 6 defektech na potrubí DN 800, resp. 3 defektech na potrubí DN 900 (viz [Španiel 2005]). Byly vytvořeny nové MKP modely těchto defektů, byla provedena

jejich analýza „komerčním“ MKP systémem *ABAQUS* a vypočtená data byla zpracována až do výběru optimálních hodnot kritéria mezního stavu  $\Lambda$ .

Rozměry plastické oblasti závisí na volbě mezní hodnoty intenzity plastické deformace  $\varepsilon_{LIM}$ , která je parametrem metodiky. Byla zvolena jednotná množina testovaných hodnot  $\varepsilon_{LIM}$

$$\mathcal{E} = \{0, 005; 0, 01; 0, 015; 0, 02; 0, 025; 0, 03; 0, 035; 0, 04; 0, 045; 0, 05; 0, 07\}. \quad (8)$$

Při kalibraci se na množině  $n$  defektů  $\mathcal{L}$  s experimentálně stanoveným mezním tlakem pro každou hodnotu  $\varepsilon_{LIM} \in \mathcal{E}$  stanoví odpovídající množina

$$\mathcal{L}_{x,\Lambda}^{\varepsilon_{LIM}} = \left\{ \Lambda_{x,LIM}^{i,\varepsilon_{LIM}} \right\}_{i=1}^n$$

a její průměrná hodnota  $\bar{\Lambda}_{x,LIM}^{\varepsilon_{LIM}}$ . Optimální hodnota  $\varepsilon_{LIM}$  byla v minulosti určována pro nejmenší rozptyl množiny  $\mathcal{L}_{x,\Lambda}$ . Nové programové vybavení umožnilo stanovit optimální  $\varepsilon_{LIM}$  pomocí simulované predikce mezních tlaků na množině defektů  $\mathcal{L}$  na základě střední kvadratické chyby

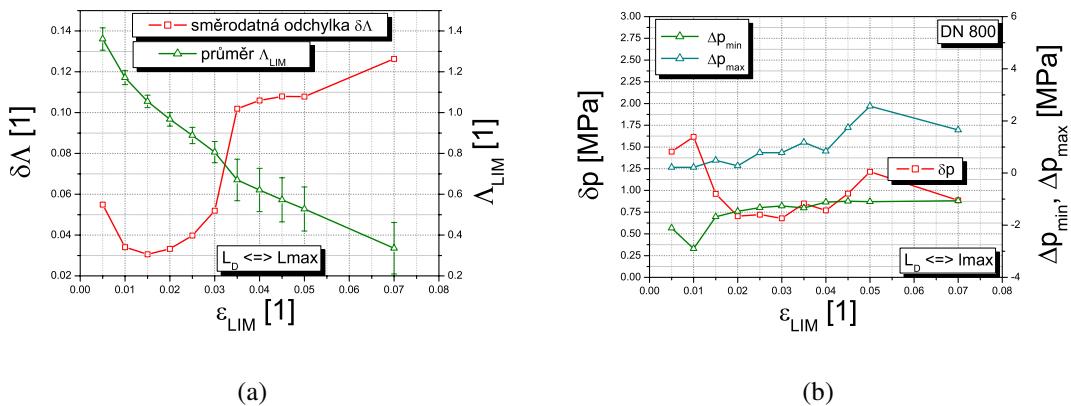
$$\delta p_{x,LIM}^{\varepsilon_{LIM}} = \sqrt{\frac{\sum_{i \in \mathcal{L}} (\Delta p_{x,LIM}^{i,\varepsilon_{LIM}})^2}{n(\mathcal{L})}} \quad (9)$$

a minimální  $\Delta p_{x,min}^{\varepsilon_{LIM}}$ , resp. maximální  $\Delta p_{x,max}^{\varepsilon_{LIM}}$  odchylky predikovaných mezních tlaků

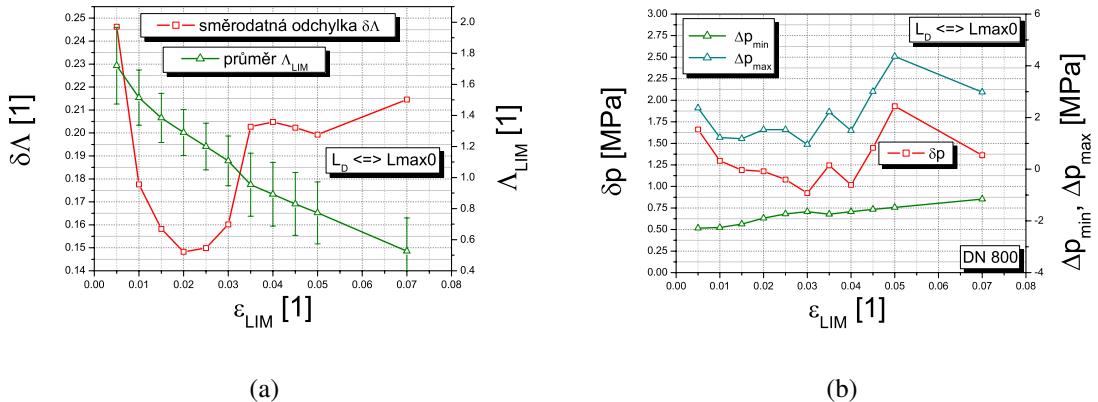
$$o \Delta p_{x,LIM}^{i,\varepsilon_{LIM}} = p_{x,LIM}^{i,\varepsilon_{LIM}} - p_{LIM}^{i,exp} \quad (10)$$

vybírané z množiny  $\mathcal{L}$ , která obsahuje  $n(\mathcal{L})$  defektů.  $p_{x,LIM}^{i,\varepsilon_{LIM}}$  je mezní tlak  $i$ -tého defektu z  $\mathcal{L}$  stanovený podle 7 pro danou alternativu délky defektu  $x$ .  $p_{LIM}^{i,exp}$  je experimentálně stanovený mezní tlak  $i$ -tého defektu.

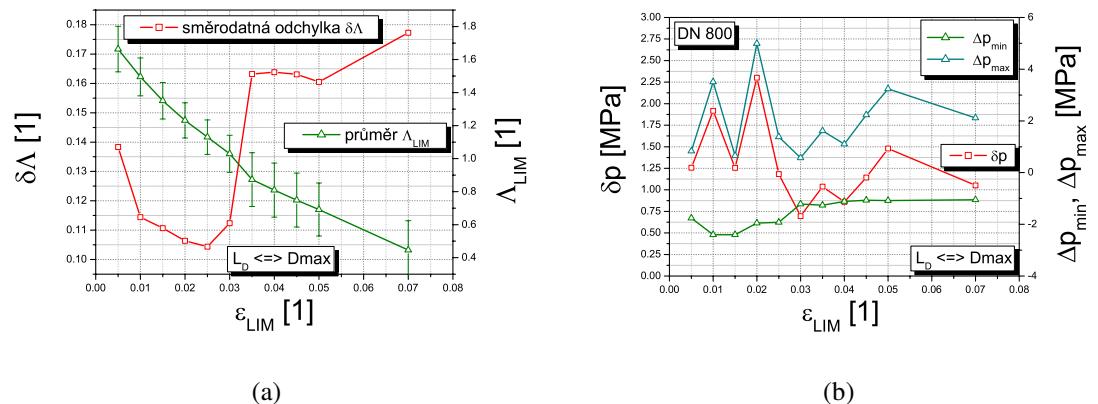
Na obrázcích 7–14 jsou pro oba jmenovité průměry (DN 800 i DN 900) grafy závislosti kritérií  $\delta\Lambda_{LIM}$ ,  $\delta p_{LIM}$ ,  $\Delta p_{min}$ ,  $\Delta p_{max}$  pro všechny uvažované způsoby stanovení délky defektu  $L_D$  na volbě  $\varepsilon_{LIM}$ . Kritériem pro volbu  $\varepsilon_{LIM}$  způsobu stanovení délky defektu  $L_D$  je dosažení minimální hodnoty střední kvadratické chyby predikovaného tlaku  $\delta p_{LIM} \rightarrow \min$ .



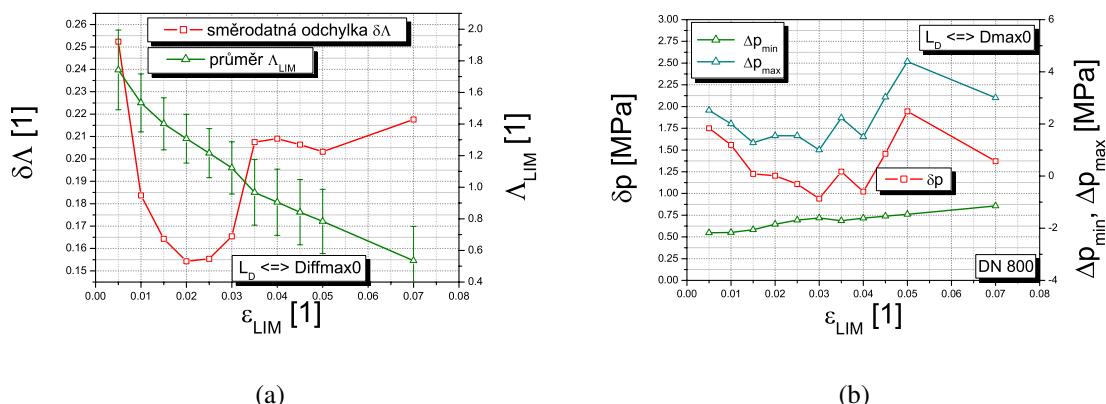
Obrázek 7: Závislosti  $\Lambda_{LIM}$ ,  $\delta\Lambda_{LIM}$ ,  $\delta p_{LIM}$ ,  $\Delta p_{min}$  a  $\Delta p_{max}$  na  $\varepsilon_{LIM}$ . Trubka DN 800. Délka defektu je vyhodnocena podle  $l_{max}$



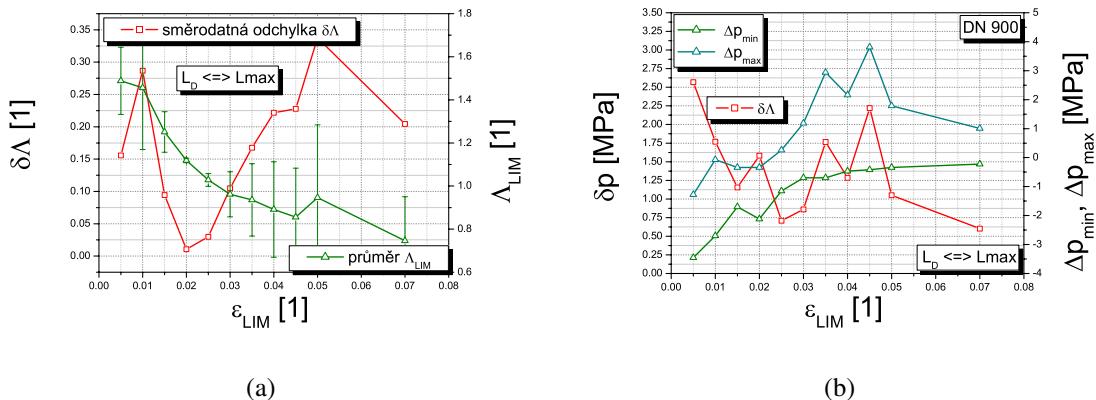
Obrázek 8: Závislosti  $\Lambda_{LIM}$ ,  $\delta\Lambda_{LIM}$ ,  $\delta p_{LIM}$ ,  $\Delta p_{min}$  a  $\Delta p_{max}$  na  $\varepsilon_{LIM}$ . Trubka DN 800. Délka defektu je vyhodnocena podle  $l_{max0}$



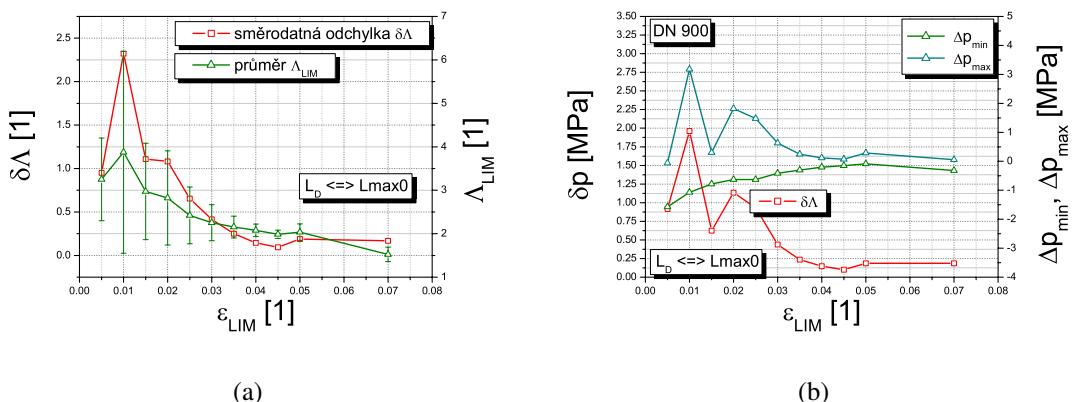
Obrázek 9: Závislosti  $\Lambda_{LIM}$ ,  $\delta\Lambda_{LIM}$ ,  $\delta p_{LIM}$ ,  $\Delta p_{min}$  a  $\Delta p_{max}$  na  $\varepsilon_{LIM}$ . Trubka DN 800. Délka defektu je vyhodnocena podle  $d_{max}$



Obrázek 10: Závislosti  $\Lambda_{LIM}$ ,  $\delta\Lambda_{LIM}$ ,  $\delta p_{LIM}$ ,  $\Delta p_{min}$  a  $\Delta p_{max}$  na  $\varepsilon_{LIM}$ . Trubka DN 800. Délka defektu je vyhodnocena podle  $d_{max0}$



Obrázek 11: Závislosti  $\Lambda_{LIM}$ ,  $\delta\Lambda_{LIM}$ ,  $\delta p_{LIM}$ ,  $\Delta p_{min}$  a  $\Delta p_{max}$  na  $\varepsilon_{LIM}$ . Trubka DN 900. Délka defektu je vyhodnocena podle  $l_{max}$

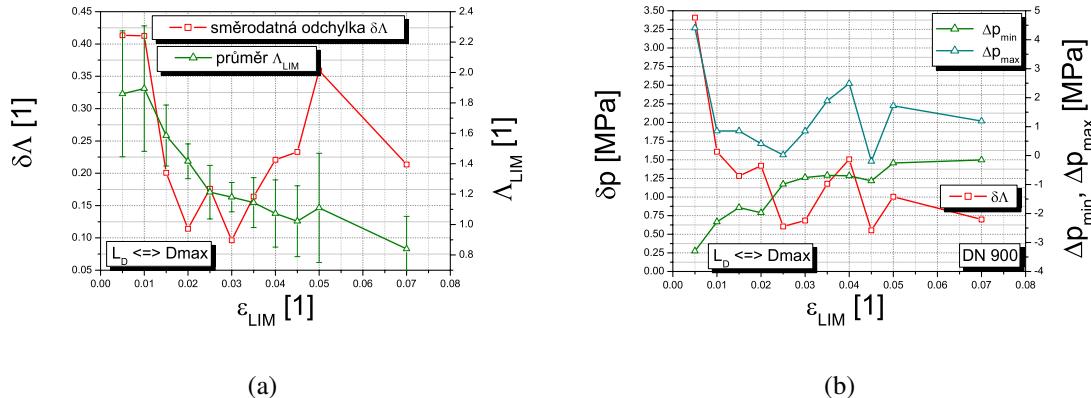


Obrázek 12: Závislosti  $\Lambda_{LIM}$ ,  $\delta\Lambda_{LIM}$ ,  $\delta p_{LIM}$ ,  $\Delta p_{min}$  a  $\Delta p_{max}$  na  $\varepsilon_{LIM}$ . Trubka DN 900. Délka defektu je vyhodnocena podle  $l_{max0}$

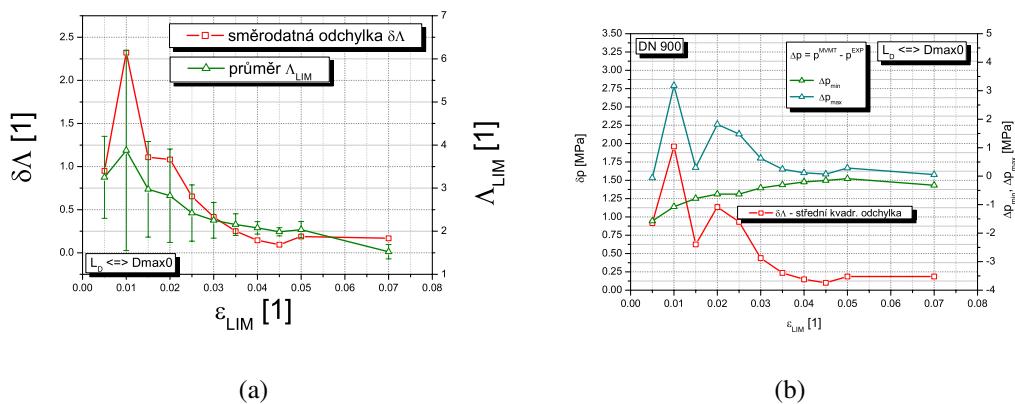
## 5. Závěry.

Bylo analyzováno celkem devět defektů s experimentálně stanoveným mezním tlakem. Těchto devíti analýz bylo využito k rekalibraci a ověření metodiky pro stanovení mezního tlaku MVMT, vyvinuté v devadesátých letech minulého století ve spolupráci firmy Transgas a Strojní fakulty ČVUT v Praze.

- Metodika MVMT byla rekalibrována pro potrubí DN 800 (ze šesti vzorků) a DN 900 (ze tří vzorků). Mezní hodnoty kritéria jsou v grafech 7(a) až 14(a). Přesnost lze posoudit na základě rozptylů dle grafů 7(b)–14(b). Střední kvadratická odchylka tlaků na potrubí DN 800 je nejmenší při  $\varepsilon_{LIM} = 0,03$  a dosahuje hodnoty  $\delta p = \pm 0,68$  MPa. Odchylky tlaku jsou ohraničeny hodnotami  $\Delta p_{min} = -1,26$  MPa;  $\Delta p_{max} = 0,78$  MPa, způsob stanovení délky defektu je „ $l_{max}$ “. Na potrubí DN 900 je nejmenší  $\delta p = \pm 0,1$  MPa, resp.  $\Delta p_{min} = -0,15$  MPa;  $\Delta p_{max} = 0,07$  MPa při  $\varepsilon_{LIM} = 0,045$  a způsobu stanovení délky defektu „ $d_{max}$ “. Rozptyly na potrubí DN 900 jsou menší proto, že soubor defektů byl menší a měl výrazně nižší variabilitu geometrií. Na základě těchto rozptylů lze konstatovat, že mezní tlaky stanovené podle MVMT leží v tolerančním pásmu  $\pm 1$  MPa.



Obrázek 13: Závislosti  $\Lambda_{LIM}$ ,  $\delta\Lambda_{LIM}$ ,  $\delta p_{LIM}$ ,  $\Delta p_{min}$  a  $\Delta p_{max}$  na  $\varepsilon_{LIM}$ . Trubka DN 900. Délka defektu je vyhodnocena podle  $d_{max}$



Obrázek 14: Závislosti  $\Lambda_{LIM}$ ,  $\delta\Lambda_{LIM}$ ,  $\delta p_{LIM}$ ,  $\Delta p_{min}$  a  $\Delta p_{max}$  na  $\varepsilon_{LIM}$ . Trubka DN 900. Délka defektu je vyhodnocena podle  $d_{max0}$

2. Všechny defekty byly analyzovány metodou konečných prvků jednotným programovým aparátem ABAQUS 6.4 na modelových segmentech se srovnatelnou geometrií a se srovnatelnou MKP sítí. Lze říci, že rozptyly jsou způsobeny heuristickou podstatou kritéria poměrné délky defektu a nepřesnostmi v popisu materiálu a v geometriích trubek i defektů. Další zvyšování věrohodnosti a spolehlivosti MVMT je možné jen pomocí dalších experimentů nebo změnou kritéria. Na druhé straně pro posouzení bezpečnosti přirozených defektů vůči provoznímu tlaku je stávající spolehlivost MVMT dostačující.
3. Významným výstupem provedené práce je programový aparát, který plně automatizuje rutinní práce spojené s aplikací MVMT, jež musely být doposud prováděny „ručně“. Generuje však podklady pro rozhodování a kontrolu v grafické formě.
4. Díky automatizaci zpracování „surových“ výsledků MKP analýz se podařilo testovat čtyři alternativní definice délky defektu.  $l_{max}$  definuje délku defektu jako vzdálenost dvou nejodlehlejších minim radiálního posuvu podél površky, kde je její hodnota maximální.  $d_{max}$  definuje délku defektu jako vzdálenost dvou minim podél površky, s maximálním převýšením. Definice  $l_{max0}$  a  $d_{max0}$  definují délku defektu konstantní v procesu zatěžování, rovnou hodnotám na počátku plastizace. U jednoduchých defektů dávají definice „ $l_{max}$ “ a „ $d_{max}$ “, resp. „ $l_{max0}$ “ a „ $d_{max0}$ “ stejné délky defektu, u složených defektů vyhovuje lépe

*definice „lmax“, resp. „lmax0“ s tím, že je třeba průběhy radiálních posuvů kontrolovat vizuálně.*

5. Vytvořený programový aparát zkracuje výpočet jednotlivého defektu z několika dnů na dobu do 15 hodin na běžně dostupném hardwaru. Celková doba zpracování může být ovlivněna složitostí geometrie při vytváření MKP sítě.

## **6. Poděkování**

Tento výzkum byl financován RWE Transgas, a.s.

## **7. Literatura**

[Gajdoš 2004] Gajdoš, L. et al. 2004: Structural Integrity of Pressure Pipelines, Transgas, a.s., Praha.

[Španiel 2005] Španiel, M. & Novotný, C. & Růžička, M. 2005: Rekalibrace a zpřesnění metody výpočtu mezního tlaku potrubí s plošným defektem. *Technická zpráva 2051/05/14*, FS ČVUT v Praze.