

SLOVENSKÁ POĽNOHOSPODÁRSKA UNIVERZITA

V NITRE

Rektor: prof. Dr. h. c. Ing. Mikuláš Látečka, PhD.

TECHNICKÁ FAKULTA

Dekan: prof. Ing. Vladimír Kročko, CSc.

Minimalizácia strát prúdenia vody v plastových  
potrubiach zváraných na tupo

Dizertačná práca

Katedra elektrotechniky, automatizácie a informatiky

Vedúci katedry: Ing. Ondrej Lukáč, PhD.

Vedúci práce: prof. Ing. Dušan Hrubý, PhD.

Ing. Stanislav Paulovič

Nitra 2010

## ABSTRAKT

Na prepravu pitnej a teplej úžitkovej vody sa v praxi používajú najmä plastové rúry z polyetylénu (PE), resp. polypropylénu (PP). Medzi jednu z metód spájania polyetylénových potrubí patrí aj zváranie metódou na tupo. Klasická koncepcia zváracieho diagramu má niektoré svoje nedostatky, ktoré nová koncepcia zvárania čiastočne eliminuje. Na overenie nového zváracieho algoritmu bolo navrhnuté experimentálne zváracie pracovisko. Ako nový zdroj energie namiesto klasického hydraulického systému bol navrhnutý systém krokového motora riadeného frekvenčným meničom. Automatizáciou pracoviska sa zároveň odstránil vplyv obsluhy a zvýšila sa kvalita a spoľahlivosť procesu zvárania. Nová koncepcia riadenia zároveň zavádza do procesu zvárania spätnú väzbu a priebeh zváracieho procesu je lepšie kontrolovateľný.

Na skúšobných vzorkách zvarov vytvorených v laboratórnych podmienkach na prototype zariadenia boli podľa zvolenej metodiky pokusov realizované testy a na základe ich výsledkov sú navrhnuté optimálne hodnoty parametrov zvárania (teplota zrkadla, interval ochladzovania). Dlhodobá zváracia pevnosť bola zisťovaná pomocou krípkových pokusov. Meranie tlakových strát vznikajúcich v okolí zvaru bolo založené na diferenciálnej metóde merania tlaku pomocou U-trubice a bolo realizované vo VÚVH BA. Z hodnôt relatívneho prietokového čísla bola zisťovaná súvislosť medzi rozmermi (šírka, výška) vnútorných pretokov a tlakovými stratami. Pomocou metódy konečných prvkov sa výpočtovými simuláciami v programe ANSYS zistili tlakové a rýchlostné pomery v okolí zvaru.

**Kľúčové slová:** plastové potrubia, zváranie na tupo, pretok, tlakové straty, MKP

## ABSTRACT

The polyethylene and polypropylene plastics pipes are often used for transport drinking and hot water in practice. The one of all methods joining polyethylene pipes include also butt welding method. The welding diagram of classical conception has some deficiencies. Deficiencies are partly eliminated by new welding conception. Experimental welding workplace to verify of new welding algorithm was designed. Stepper motor system controlled by frequency converter was designed like a new source of energy instead of classical hydraulic system. Minimization of human factor errors, increase quality and reliability, are required automation of experimental workplace. New control conception also implementing feedback to welding process and its monitoring is better.

In laboratory conditions made experimental samples welds were realized tests by selected methods of experiments. This results show optimal values of parameter welding (mirror temperature, cooling interval). Long time welding strength was investigated by creep experiments. Pressure loss measurement emerging around weld was based on differential method of pressure measurement by U-tube and that was realized in the VÚVH BA. From values of relative flow number was assessed relationship between dimensions internal weld seam and pressure loss. Computational simulations in program ANSYS by finite element method were evaluated ratio of pressure and ratio of velocity around the weld.

**Key words:** elastic pipes, butt welding, seam, pressure loss, finite element method (FEM)

# ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Podpísaný Ing. Stanislav Paulovič týmto prehlasujem, že som dizertačnú prácu na tému „**Minimalizácia strát prúdenia vody v plastových potrubiach zváraných na tupo**“ vypracoval samostatne s použitím uvedenej literatúry. Som si vedomý právnych dôsledkov v prípade, ak uvedené tvrdenie nie je pravdivé.

V Nitre, jún 2010

.....  
Ing. Stanislav Paulovič

# POĎAKOVANIE

Ďakujem vedúcemu dizertačnej práce prof. Ing. Dušanovi Hrubému, PhD. za odborné vedenie, usmerňovanie a cenné rady počas vypracovávaní mojej dizertačnej práce. Zároveň chcem poďakovať aj pracovníkom firmy VÚSAPL, a.s., najmä Ing. Jurajovi Tóthovi, PhD. za pomoc pri vývoji zväracieho zariadenia, pracovníkom firmy VÚVH BA za pomoc pri meraní tlakových strát, Ing. Štefanovi Hajduovi, PhD. za poskytnuté konzultácie pri simulovaní metódou konečných prvkov a všetkým pracovníkom z riešiaceho kolektívu projektu APVT-99-01420 a spolupracovníkom KEAI TF SPU za podporu a trpezlivosť.

## ZOZNAM SKRATIEK A ZNAČIEK

d	vnútorný priemer škrtiaceho orgánu	m
dem	menovitý vonkajší priemer ( <i>mean outside diameter</i> )	mm
dn	menovitý priemer ( <i>nominal diameter</i> )	mm
dqv	elementárny objemový prietok pretekajúci medzikružím	m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>
dr <sub>x</sub>	šírka zvoleného medzikružia	m
e	výška pretoku	mm
e <sub>1</sub>	výška prvého pretoku	mm
en	menovitá hrúbka steny ( <i>nominal wall thickness</i> )	mm
f <sub>s</sub>	koeficient dlhodobého zvárania	-
f <sub>T</sub>	teplotný koeficient	-
g	tiažové zrýchlenie g = 9,80665	m.s <sup>-2</sup>
h	výška vnútorného pretoku zvaru	m
h <sub>1</sub> , h <sub>2</sub>	hydrostatické polohové výšky charakterizujúce umiestnenie škrtiaceho orgánu	m
m	hmotnosť tekutiny	kg
m <sub>s</sub>	pomer plošných obsahov prierezu škrtiaceho orgánu a potrubia	-
n	exponent závisiaci od typu prúdenia	-
p <sub>1</sub> , p <sub>2</sub>	hydrostatické tlaky v daných odberných miestach	MPa
p <sub>1</sub>	zarovnávací, zvarací, prítlačný tlak (kapitola zváranie)	MPa
p <sub>2</sub>	tlak počas ohrevu (kapitola zváranie)	MPa
p <sub>6</sub>	tlak zvárania a ochladzovania	MPa
pH	kyslosť ( <i>potencia Hydrogeni</i> )	-
q <sub>m</sub>	hmotnostný prietok pretekajúcej tekutiny	kg.s <sup>-1</sup>
qv	objemový prietok pretekajúcej tekutiny	m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>
r	vzdialenosť vrstvy prúdu tekutiny od osi kruhového potrubia	m
s	hrúbka steny rúry	m
t	čas	s, min
t <sub>0</sub>	referenčný čas	s
t <sub>1</sub>	čas zarovňovania	s
t <sub>2</sub>	čas ohrevu	s
t <sub>3</sub>	čas prestavenia	s
t <sub>4</sub>	čas vytvorenia zvaracieho tlaku	s
t <sub>5</sub>	čas ochladzovania	min
t <sub>6</sub>	čas vychladzovania	min
t <sub>c</sub>	celková doba zvárania	min
t <sub>N</sub>	doba trvania ohrevu	s
v <sub>X</sub>	x-ová zložka vstupnej strednej rýchlosti	m.s <sup>-1</sup>
v <sub>y</sub>	y-ová zložka vstupnej strednej rýchlosti	m.s <sup>-1</sup>
w	okamžitá rýchlosť vrstvy prúdu tekutiny	m.s <sup>-1</sup>

—		
$W$	stredná rýchlosť prúdu tekutiny v danom priereze	$\text{m.s}^{-1}$
$w_{\max}$	maximálna rýchlosť prúdu tekutiny v danom priereze potrubia	$\text{m.s}^{-1}$
$w_x$	aktuálna rýchlosť prúdenia v medzikruží	$\text{m.s}^{-1}$
$w_1, w_2$	stredné rýchlosti prúdiacej tekutiny pred a za škrtiacim orgánom	$\text{m.s}^{-1}$
APVT	Agentúra na podporu výskumu a vývoja	
B	šírka pretoku zvaru	mm
$B_1$	šírka prvého pretoku zvaru	mm
$B_{\min}$	minimálna nameraná hodnota šírky pretoku	mm
$B_{\max}$	maximálna nameraná hodnota šírky pretoku	mm
C	celkový prevádzkový koeficient bezpečnosti ( <i>overall service coefficient</i> )	-
CFD	numerická dynamika tekutín ( <i>Computational Fluid Dynamics</i> )	
D	vnútorný priemer rúry ( <i>diameter</i> )	m
$D_A$	aktivačná energia difúzie segmentov makromolekúl	$\text{kJ.mol}^{-1}$
$D_V$	vonkajší priemer rúry ( <i>diameter</i> )	m
DN	menovitá svetlosť ( <i>nominal size</i> )	mm
E	modul pružnosti	Pa
F	sila čelustí	N
$F_T$	reakčná sila	N
$F_{z\max}$	maximálna prítlačná sila čelustí	N
FEA	analýza metódou konečných prvkov ( <i>finite element analysis</i> )	
FEM	metóda konečných prvkov ( <i>finite element method</i> )	
HD PE	vysokohustotný polyetylén ( <i>high-density polyethylene</i> )	
ISO	Medzinárodná organizácia pre normalizáciu ( <i>international organization for standartization</i> )	
LCL	hranica spoľahlivosti ( <i>lower control limit</i> )	%
LD PE	nízkohustotný polyetylén ( <i>low-density polyethylene</i> )	
LLD PE	lineárny nízkohustotný polyetylén ( <i>linear low-density polyethylene</i> )	
LTHS	dlhodobá hydrostatická pevnosť rúr ( <i>long term hydrostatic strength</i> )	$\text{r.}^\circ\text{C}$
MAOP	maximálny prevádzkový tlak ( <i>maximum allowed operating pressure</i> )	bar
MESOS	štatistický softvér ( <i>Methode zur empirisch-statistischen Offline-Systemanalyse</i> )	
MD PE	strednohustotný polyetylén ( <i>medium-density polyethylene</i> )	
MFI	index toku taveniny ( <i>melt flow index</i> )	$\text{g.(10 min)}^{-1}$
MFR	hmotnostný index toku taveniny ( <i>melt-mass flow rate</i> )	$\text{g.(10 min)}^{-1}$
MKP	metóda konečných prvkov	
MOP	maximálny prevádzkový tlak ( <i>maximum operating pressure</i> )	bar
MRS	minimálna požadovaná pevnosť ( <i>minimum required strenght</i> )	-
MŽP SR	Ministerstvo životného prostredia Slovenskej republiky	
NMR	spektroskopia nukleárnej magnetickej rezonancie ( <i>nuclear magnetic resonance</i> )	
OV	ovalita rúry	%
P	zváracia plocha	$\text{cm}^2$
PE	polyetylén	-

PEX	sieťovaný polyetylén ( <i>cross linked polyethylene</i> )	
PFA	prípustný prevádzkový tlak ( <i>allowable operating pressure</i> )	bar
PN	menovitý tlak ( <i>nominal pressure</i> )	bar
PP	polypropylén	
PVC	polyvinylchlorid	
Q	teplo	kJ
Q	objemový prietok	m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>
R <sub>OH</sub>	polomer ohybu rúry	m
R	plynová konštanta R = 8,314472	J.K <sup>-1</sup> .mol <sup>-1</sup>
R	vnútorný polomer potrubia (v kapitole prúdenie tekutín)	m
Re	Reynoldsovo číslo	-
S	rúrový rad	-
S	plošný obsah prierezu potrubia	m <sup>2</sup>
S <sub>2</sub>	plošný obsah prierezu škrtiaceho orgánu	m <sup>2</sup>
SDR	štandardný rozmerový pomer ( <i>standard dimensions ratio</i> )	-
SPP	Slovenský plynárenský priemysel, a.s.	
T	teplota	°C, K
T <sub>f</sub>	teplota topenia polyméru	K
T <sub>Z</sub>	teplota zrkadla	°C
T <sub>N</sub>	zváracia teplota	°C, K
T <sub>prac</sub>	teplota na pracovisku	°C
UHMWPE	polyetylén s ultravysokou molekulovou hmotnosťou ( <i>ultra high molecular weight polyethylene</i> )	
V	množstvo pretekajúcej tekutiny	m <sup>3</sup>
VÚSAPL	Výskumný ústav spracovania a aplikácie plastických látok v Nitre	
VÚVH	Výskumný ústav vodného hospodárstva v Bratislave	
WP	pracovná rovina ( <i>workplane</i> )	
Y <sub>j</sub>	odozva nezávisle premennej veličiny	-
α	prietokové číslo	-
β	pomer priemerov škrtiaceho orgánu a potrubia	-
Γ	relatívne prietokové číslo	-
Δh	rozdiel výšok hladín	m
Δm	elementárna hmotnosť pretekajúcej tekutiny	kg
Δp	trvalá tlaková strata pretekajúcej tekutiny	MPa
Δp <sub>002 2cm</sub>	rozdiel tlakov na zvárannej rúre (vzorka VH-002) zistený ±2 cm od roviny zvaru	Pa
Δt	časový interval	s
ΔT	rozdiel teplôt	°C
ΔV	elementárny objem pretekajúcej tekutiny	m <sup>3</sup>
Δx	osový posuv dĺžky rúr, krok stlačenia	mm
ΔX <sub>002 2 cm</sub>	rozdiel rozdielov tlakov vo zvárannej rúre (vzorka VH-002)	



	a nezváranej rúre vo vzdialenosti $\pm 2$ cm od roviny zvaru	Pa
$\Delta Y_{002\ 2\ cm}$	vplyv typu zvaru (vzorka VH-002) na celkové tlakové straty	%
$\varepsilon$	expanzný koeficient	-
$\lambda$	koeficient tepelnej vodivosti	W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
$\eta$	dynamická viskozita	Pa.s
$\sigma_s$	konštrukčné napätie ( <i>design stress</i> )	MPa
$\rho$	objemová hustota pretekajúcej tekutiny	kg.m <sup>-3</sup>
$\xi$	koeficient, ktorý zahŕňa všetky vplyvy ovplyvňujúce skutočnú hodnotu rýchlosti prúdenia	-
$\mu$	koeficient kontrakcie	-
$\nu$	kinematická viskozita	m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup>

# OBSAH

ÚVOD.....	12
1 SÚČASNÝ STAV RIEŠENEJ PROBLEMATIKY .....	13
1.1 Plastové potrubné systémy.....	13
1.1.1 Základné definície a vlastnosti polyetylénu.....	13
1.1.2 Typy polyetylénov .....	20
1.2 Spájanie potrubných systémov .....	25
1.2.1 Spôsoby spájania jednotlivých časti PE systému .....	25
1.2.1.1 Rozoberateľné spôsoby spájania.....	25
1.2.1.2 Pevné spôsoby spájania .....	26
1.2.2 Zváranie na tupo .....	27
1.2.2.1 Zváranie a kvalita spoja zváraného metódou na tupo.....	30
1.2.2.2 Stručný prehľad vývoja techniky zvárania metódou na tupo .....	32
1.2.2.3 Zvárací diagram .....	37
1.2.2.4 Opis zváracieho zariadenia .....	42
1.2.3 Kontrola zvarových spojov .....	42
1.3 Prúdenie tekutín potrubím .....	44
1.3.1 Základné definície a jednotky v prúde tekutín .....	44
1.3.2 Princípy merania prietoku a pretečeného množstva .....	47
1.3.3 Meradlá na meranie prietoku v uzavretých potrubíach .....	48
1.3.4 Prietokomery využívajúce tlakovú stratu prúdiacej tekutiny .....	48
1.3.4.1 Prierezové prietokomery.....	49
1.3.4.2 Normalizovaná clona .....	53
1.3.4.3 Tlakové straty a zabudovanie škrtiacich orgánov.....	54
1.4 Metóda konečných prvkov.....	55
1.4.1 ANSYS .....	55
1.5 Zhrnutie problematiky .....	56
2 CIEĽ DIZERTAČNEJ PRÁCE .....	57
3 METODIKA DIZERTAČNEJ PRÁCE.....	58
3.1 Charakteristika pracoviska.....	58
3.2 Charakteristika súčasného stavu technickej úrovne riešenej problematiky .....	58
3.3 Vedecké ciele riešenia úlohy .....	60
3.4 Prístrojové a materiálne zabezpečenie úlohy.....	61
3.4.1 Zvárací systém WIDOS 4600 .....	61
3.4.2 Materiál PE 100 .....	62
3.4.3 Monitorovacie a meracie prístroje .....	62
3.5 Vykonanie funkčných skúšok .....	63
3.6 Návrhy na využitie výsledkov .....	64
4 VÝSLEDKY .....	65
4.1 Automatizované zváracie zariadenie .....	65
4.1.1 Dôvody zmeny koncepcie zváracieho algoritmu.....	65
4.1.2 Upravená koncepcia zváracieho algoritmu.....	65
4.1.3 Popis zváracieho zariadenia.....	66
4.1.3.1 Bloková schéma zváracieho zariadenia .....	67
4.1.3.2 Upínacie zariadenie.....	68
4.1.3.3 Pohonový mechanizmus .....	68
4.1.3.4 Snímače a ovládací panel.....	69
4.1.3.5 Zapojenie a ovládanie frekvenčného meniča UNIDRIVE SP 1402 .....	70
4.1.4 Monitorovanie činnosti zváracieho zariadenia .....	72

4.2	Optimalizácia procesu zvarovania na tupo vzhľadom na vybrané vlastnosti zvarov	73
4.2.1	Špecifikácia použitých vzoriek rúr a podmienok experimentu	73
4.2.2	Vyhodnocovanie výsledkov pomocou aplikácie MESOS	73
4.2.3	Postup zhotovenia zvarov	75
4.3	Meranie tlakových strát vznikajúcich pri prúdení vody v polyetylénoch	
	potrubíach	77
4.3.1	Predbežné meranie tlakových strát	77
4.3.2	Meranie tlakových strát	78
4.3.2.1	VÚVH BA meracie pracovisko	78
4.3.2.2	Zdroj prúdu vody	78
4.3.2.3	Ovládacie prvky	79
4.3.2.4	Monitorovacie prvky	80
4.3.3	Kompletná meracia sústava	81
4.3.4	Postup merania tlakových strát	82
4.3.5	Výsledky a vyhodnotenie meraní tlakových strát	84
4.4	Meranie a vyhodnotenie kríповých vlastností	87
4.5	Vyhodnotenie závislosti výšky pretokov od parametrov zvarovania	88
4.5.1	Metodika merania pretokov zvarov	88
4.5.2	Vyhodnotenie výsledkov	89
4.5.3	Porovnanie závislostí relatívneho prietokového čísla od výšky vnútorného pretoku	90
4.6	Definovanie optimálnych podmienok zvarovania	91
4.7	Simulovanie prúdenia tekutín v okolí zvarov v PE potrubíach metódou konečných prvkov	93
4.7.1	ANSYS	93
4.7.2	Tvorba modelu	93
4.7.3	Výsledky zo simulácií získané metódou MKP	96
4.7.3.1	Rýchlostné pomery	96
4.7.3.2	Tlakové pomery	97
4.7.4	Porovnanie výsledkov získaných z merania tlakových strát vo VÚVH a zo simulácií pomocou programu ANSYS	98
5	DISKUSIA	102
6	ZÁVERY	105
7	NÁVRH NA VYUŽITIE VÝSLEDKOV	107
8	ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY	109
9	ZOZNAM PUBLIKOVANÝCH PRÁČ K DANEJ TÉME	113
10	PRÍLOHY	115

## ÚVOD

Plastové potrubné systémy v súčasnosti nachádzajú široké uplatnenie. Už na začiatku 50-tich rokov prišlo k ich prvým nasadeniam. Vývoj plastov do súčasnosti zaznamenal nebývalý dynamický rozvoj. Už dávno neplatí názor alebo tvrdenie uvádzané v technickej literatúre spred niekoľkých desaťročí, že plasty len v niektorých oblastiach dopĺňajú kovy. Dynamický vývoj nových druhov plastov, ale najmä ich úžitkových vlastností spôsobil, že kovy sú plastmi v skutočnosti vytláčané, ak nie úplne nahrádzané. Či chceme alebo nie, plasty zasahujú do nášho života čoraz výraznejšie.

Z hľadiska aplikácie plastov na rozvod a prepravu médií pod tlakom uložených v zemi je potrebné skonštatovať, že okrem niektorých výnimiek ide v zásade o polyetylénové potrubné systémy.

Polyetylénové potrubné systémy sa úspešne presadzujú v plynárenskom priemysle pri nízkotlakových a strednotlakových plynových rozvodoch. Napr. SPP a.s. má z polyetylénu vybudovaných a prevádzkovaných 11 749 km potrubí, čo je takmer 48 % podiel z nízkotlakových a strednotlakových rozvodov (Bezák, 2005). Okrem plynárenského priemyslu sa význame plastové potrubia uplatňujú vo vodohospodárstve, teplárstve, či v poľnohospodárstve pri zavlažovaní.

Medzi základné nerozoberateľné spôsoby spájania polyetylénových potrubí patrí aj zváranie na tupo. Najmä z ekonomického hľadiska je zváranie na tupo v súčasnej dobe často používané, aj keď z hľadiska spoľahlivosti je bezpečnejšie spájanie polyetylénových potrubí pomocou elektrofúzných tvaroviek, keďže sú podstatne spoľahlivejšie, ale sú drahšie.

Zváranie polyetylénových potrubí metódou na tupo okrem výhod (cena, spájanie bez použitia prídavného materiálu) má však aj svoje nevýhody. Tou najvýznamnejšou nevýhodou je nevyhnutný vznik vonkajších ako aj vnútorných pretokov. Pri prúdení tekutín práve na vnútorných pretokoch vznikajú najväčšie energetické straty v dôsledku vzniku tlakových strát. Táto práca sa venuje práve možnosti minimalizovania tlakových strát vznikajúcich pri prúdení vody v plastových potrubíach na tupo optimalizáciou parametrov zvárania. Pre potreby optimalizácie parametrov zvárania je pôvodné zváracie zariadenie WIDOS 4600 inovované o krokový motor riadený frekvenčným meničom, ktorý nahrádza pôvodný hydraulický pohon pohyblivých čeľustí zváracieho zariadenia.

# 1 SÚČASNÝ STAV RIEŠENEJ PROBLEMATIKY

## 1.1 Plastové potrubné systémy

Polyetylén (PE) je jedným z najrozšírenejších termoplastických materiálov na svete. Bol objavený v roku 1933 a od 50-tich rokov minulého storočia sa začal používať v potrubných systémoch. Od svojich počiatkov prešiel tento materiál významným vývojom a mnohé zdroje odhadujú, že takmer 95 % všetkých nových inštalácií plynových rozvodov (s priemerom do 300 mm) v Severnej Amerike bolo realizovaných polyetylénovými rúrami. Výhody, ktoré sa ukázali pri nasadeniach v plynárenskom priemysle viedli k významnému rozšíreniu a používaniu týchto rúr na prepravu takmer akéhokoľvek média, kde sa vyžaduje pevný a zároveň prispôsobivý materiál s dlhou životnosťou (Bezák, 2005).

### 1.1.1 Základné definície a vlastnosti polyetylénu

Polyetylénové potrubné systémy poskytujú efektívne riešenie pre širokú škálu použitia - rozvody plynu, rozvody vody, kanalizácia, ale tiež napríklad ako ochrana elektrických a dátových rozvodov. Polyetylénové rúry môžu byť inštalované nad alebo pod zemou, pod vodou alebo na hladine. Vlastnosti a výhody resp. nevýhody polyetylénových rúr sú nasledovné:

- **Úspory nákladov počas životného cyklu.** Extrémne hladký povrch rúr zabezpečuje vynikajúce prietokové vlastnosti a spájanie pomocou elektrospojok alebo zvarom na tupo úplne eliminuje netesnosť.

- **Nepretiekajúce spoje.** Zváranie rúr pomocou elektrospojok alebo zvarom na tupo úplne eliminuje netesnosť a je pevnejšie ako samotná rúra. Stačí si to porovnať s tradičnými potrubnými spojmi (hlavne pri kanalizáciách realizovaných PVC), keď pri zanášaní spojov alebo deformáciách potrubia môže dôjsť k čiastočným únikom prepravovaného média. Polyetylénové rúry tento problém úplne eliminujú.

- **Antikorózna a chemická odolnosť.** Rúry z vysokohustotného polyetylénu (HD PE) nehrdzavejú, nehnijú ani nepodporujú rast biologických nánosov (inkrustácia). Majú vynikajúcu chemickú odolnosť, odolávajú pôsobeniu bežných dezinfekčných koncentrovaných prostriedkov, bežných zložiek pôdy vrátane umelých hnojív. Nie sú ale odolné proti dlhodobému pôsobeniu koncentrovaných ropných produktov. Prepravované médium musí mať pH v rozmedzí 2 až 12, t.j. vody môžu vykazovať

kyslú aj zásaditú reakciu. Ak je potrebné určiť chemickú odolnosť rúr, rúra sa musí ohodnotiť podľa ISO 4433-1:1997 a ISO 4453-2:1997. Nasiakovanie PE vodou je zanedbateľné, čo znamená že nemôže dôjsť k bobtnaniu, zmene rozmerov alebo poškodeniu stien vplyvom zmrznutia vsiaknutej vody do PE materiálu rúry. HD PE rúry sú na rozdiel od oceľových rúr imúnne proti vplyvu tzv. blúdívých elektrických prúdov. Zároveň to znamená, že PE potrubia sa nedajú rozmrazovať za pomoci elektrického prúdu, že pod zemou sú ťažšie zistiteľné ako napríklad liatinové rúry a že sa tiež nedajú použiť ako zemniče.

- **Odolnosť materiálu a flexibilita.** Pružnosť HD PE rúr dovoľuje previesť zmeny smeru, alebo kopírovať terén tvorením oblúkov s polomerom  $R_{OH}$ , ktorý je závislý na teplote (pri 20 °C:  $R_{OH} = 20 \times D$ ; pri 10 °C:  $R_{OH} = 35 \times D$ ; pri 0 °C:  $R_{OH} = 50 \times D$ ), a nie je závislý na tlakovej rade rúry. Parameter D je vonkajší priemer rúry. Vhodne prevedený výkop môže teda znamenať materiálovú i časovú úsporu pri kladení rúr. Na stavbe nie je dovolené vykonávať tvarovanie rúr pomocou tepla. HD PE rúry majú vynikajúcu odolnosť proti únave a aj pri prevádzke na úrovni maximálneho tlaku vydržia záťaž až do 100 % nad úroveň maximálnej hodnoty bez negatívneho vplyvu na životnosť materiálu. HD PE majú taktiež vynikajúcu odolnosť voči efektu *Water hammer* „vodné kladivo“. *Water hammer* nastáva pri náhlom uzatvorení (poklese) prietoku tekutiny (napr. umývačka, práčka, toaleta) alebo náhlejšej zmene toku. Takéto uzatvorenie prietoku spôsobí tlakovú vlnu, šíriacu sa potrubím, sprevádzanú typickým zvukom kladiva. Takáto nárazová vlna sa šíri rýchlejšie ako rýchlosť zvuku a môže vyvinúť vysoký tlak, ktorý môže časom poškodiť potrubie alebo spoje potrubia.

- **Seizmická odolnosť.** Vlastnosti, ktoré HD PE rúram umožňujú prispôsobiť sa opakovaným tlakovým záťažiam, kombinované s prirodzenou flexibilitou a tesnými spojmi ich predurčujú na použitie v dynamických pôdach a v oblastiach so seizmickou aktivitou.

- **Inštalačné výhody.** Inštalačné výhody súvisia s nízkou váhou, flexibilitou pri pokladaní a spájaní rúr. Pri váhe približne 1/8 oceľového potrubia a spoľahlivých metódach spájania je pokladanie potrubia relatívne jednoduché a nevyžadujú sa ťažké zdvíhacie mechanizmy. Polyetylénové rúry sa dodávajú ako tyče alebo u menších priemerov navíjané na cievkach.

- **Životnosť.** Životnosť polyetylénových rúr je 50 rokov za predpokladu, že potrubný systém bol navrhnutý a inštalovaný podľa doporučení výrobcu. Správne inštalované systémy vyžadujú len veľmi malú údržbu. V molekulárnej štruktúre plastických hmôt, vystavených trvalému pôsobeniu napätia dochádza k javu, ktorý sa nazýva *relaxácia*, a ktorý spočíva v pomalejšej orientácii molekúl. Výsledkom je pokles pevnostných vlastností materiálu. Je to jav za normálnej teploty veľmi pomalý. So zvyšujúcou sa teplotou pevnosť klesá rýchlejšie. V rámci skúšok vhodnosti každého materiálu pre tlakové použitie sú stanovené pevnostné charakteristiky. Ide o hodnoty získané z dlhodobých laboratórnych skúšok, dnes už overené aj praktickým nasadením. Z týchto pevnostných charakteristík vyplýva maximálne povolený prevádzkový tlak v závislosti od teploty a času. Hrúbky stien sú stanovené tak, aby na konci plánovanej životnosti rúr, trvale prevádzkovaných pri plnom tlaku a teplote 20 °C, ich pevnosť dosahovala hodnoty potrebné pre spoľahlivú funkčnosť tlakovej rady pri maximálnom prevádzkovom tlaku a s predpísaným bezpečnostným koeficientom. Ak nie je potrubie počas celej doby pri maximálnom tlaku a prevádzková teplota je nižšia, dochádza de facto k predĺženiu jeho životnosti.

- **Teplotná odolnosť.** Interval prevádzkových teplôt pre HD PE rúry je od -40 °C do 60 °C. Rozsiahle testy pri veľmi nízkych teplotách svedčia o vynikajúcej odolnosti HD PE rúr. Pri teplotách na hranici 60 °C si polyetylénové materiály zachovávajú 50 % svojej pevnosti, ktorú majú pri teplote 20 °C. Pre porovnanie PVC pri teplote 60 °C stráca až 80 % svojej pevnosti.

- **Recyklácia.** Polyetylén je zatriedený podľa Katalógu odpadov vyhlášky MŽP SR č. 284/2001 z. z. do kategórie odpadový plast pod katalógovým číslom 070213 ako odpad ostatný. Neznečistené kusy rozvodov sú 100 % recyklovateľné. Znečistené kusy, ktoré nie je možné očistiť, je možné zneškodniť spaľovaním v spaľovni.

- **Duktilita (ťažnosť).** Je schopnosť materiálu deformovať sa bez toho, aby došlo k zlomeniu či pretrhnutiu. Je to dôležitá charakteristika HD PE rúr. Vertikálny priemer rúry je napríklad znižovaný vplyvom záťaže zeminy. Táto redukcia sa naopak prejaví zväčšením horizontálneho priemeru a rúra sa stabilizuje polohou o zeminu, ktorá sa nachádza po bokoch a chráni rúru pred ďalšou deformáciou. Lokálne preťaženie sa tak prostredníctvom deformácie presúva do okolitej oblasti materiálu, kde je záťaž nižšia. Výsledkom je významná redukcia preťaženia bez zmeny vlastností materiálu.

Vybrané definície, parametre a ich význam podľa normy STN EN 12201 - *Plastové potrubné systémy z polyetylénu na zásobovanie vodou* sú uvedené v tabuľke 1.

Polyetylénové rúry sú vyrábané z lineárneho (vysoko hustotného) polyetylénu (iné označenie PE, HD PE, PE HD). Polyetylénové materiály musia garantovať tzv. *MRS* (minimálnu požadovanú pevnosť) materiálu. Tento parameter vyžaduje päťdesiatročnú životnosť (obrázok 1) používania rúr pri referenčnom prevádzkovom tlaku a teplote max. 20 °C.

**Tabuľka 1** Vybrané definície, parametre a ich význam podľa STN EN 12201

Označenie parametra	Názov parametra	Význam parametra
<b>dn</b>	Menovitý priemer ( <i>nominal diameter</i> )	Priemer PE rúry alebo tvarovky, v mm.
<b>en</b>	Menovitá hrúbka steny ( <i>nominal wall thickness</i> )	Minimálna hrúbka steny PE rúry alebo tvarovky, v mm.
<b>de</b>	Menovitý vonkajší priemer ( <i>nominal outside diameter</i> )	Vonkajší priemer meraný z ktoréhokoľvek bodu obvodu PE rúry alebo tvarovky, v mm .
<b>dem</b>	Stredný vonkajší priemer ( <i>mean outside diameter</i> )	Podiel nameraného vonkajšieho obvodu rúry alebo hladkého konca tvarovky v ľubovoľnom mieste prierezu a čísla $\pi$ ( $\pi = 3,142$ ), v mm.
<b>SDR</b>	Štandardný rozmerový pomer ( <i>standard dimensions ratio</i> )	Pomer priemeru rúry dn a hrúbky steny en.
<b>DN</b>	Menovitá svetlosť DN ( <i>nominal size DN</i> )	Vzťahuje sa na fyzikálny rozmer svetlosti alebo vonkajšieho priemeru pripájacích koncov, v mm
<b>S</b>	Rúrový rad	Zaradenie rúr podľa ISO 4065.
<b>PN</b>	Menovitý tlak ( <i>nominal pressure</i> )	Zodpovedá maximálnemu trvalému tlaku v baroch, pri preprave vody s teplotou 20 °C s minimálnym koeficientom bezpečnosti.
<b>MAOP</b>	Maximálny prevádzkový tlak ( <i>maximum allowed operating pressure</i> )	Maximálny tlak tekutiny v potrubí povolený na trvalé používanie, v MPa alebo v baroch.
<b>MOP*</b>	Maximálny prevádzkový tlak ( <i>maximum operating pressure</i> )	Maximálny tlak tekutiny v potrubí povolený na trvalé používanie, v MPa alebo v baroch. * - alternatívne označenie
<b>MRS</b>	Minimálna požadovaná pevnosť ( <i>minimum required strenght</i> )	
<b>PFA</b>	Prípustný prevádzkový tlak ( <i>allowable operating pressure</i> )	Maximálny hydrostatický tlak, ktorému je súčasť systému schopná odolávať v plynulej prevádzke (s vylúčením efektu <i>Water hammer</i> - vodné kladivo)
<b>C</b>	Celkový prevádzkový koeficient bezpečnosti ( <i>overall service coefficient</i> )	Zohľadňuje prevádzkové podmienky a vlastnosti potrubného systému ako vlastnosti v dolnej hranici intervalu spoľahlivosti.
<b><math>\sigma_s</math></b>	Konštrukčné napätie ( <i>design stress</i> )	Dovolené napätie v MPa, je podielom MRS a C.
<b>MFR</b>	Hmotnostný index toku taveniny ( <i>melt-mass flow rate</i> )	Hodnota v gramoch za jednotku času $g.(10 \text{ min})^{-1}$ vzťahujúca sa na viskozitu roztaveného materiálu pri špecifikovanej teplote a zaťažení.
<b>D</b>	Nominálny vonkajší priemer oceľovej rúry ( <i>diameter</i> )	Nominálny vonkajší priemer oceľovej rúry, v palcoch ( <i>inch</i> ).



V praxi je však tento teoretický prevádzkový tlak znížený tzv. *bezpečnostným koeficientom* ( $C$ ) a prípadne tzv. *teplotným koeficientom*  $f_T$  pre teplotu média do 40 °C (tabuľka 2). Každý typ *MRS* má konštrukčné napätie  $\sigma_s$ , ktoré je odvodené od bezpečnostného koeficientu  $C$ . Udáva sa v MPa.

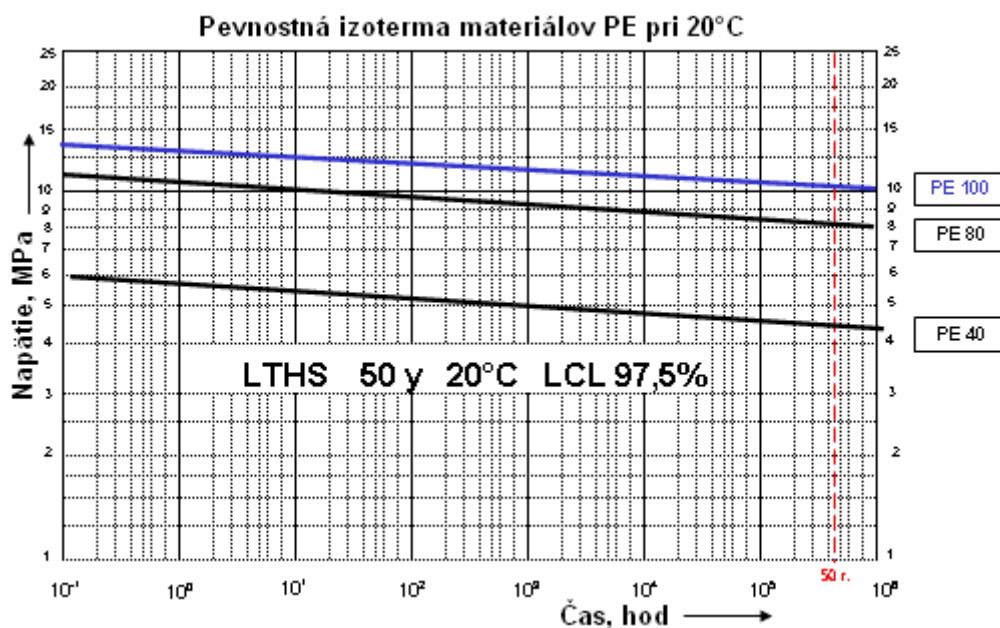
Tabuľka 2 Redukčný faktor  $f_T$  pre prevádzkovú teplotu vody do 40 °C

Označenie materiálu	Znižujúci faktor $f_T$ pre teplotu vody				
	20 °C	25 °C	30 °C	35 °C	40 °C
PE 100	1	0,93	0,87	0,80	0,74
PE 80	1	0,90	0,81	0,72	0,62
PE 40	1	0,82	0,65	0,47	0,30

U potrubia určeného na rozvod vody musí mať koeficient bezpečnosti minimálnu hodnotu  $C = 1,25$  (podľa STN EN 12201), kým hodnota koeficientu bezpečnosti plynového potrubia je  $C = 3,25$ . Špecifikácia materiálu potrubí resp. tvaroviek sa označuje pomocou skratky PE odvodenej od hodnoty *MRS* násobenej 10. (tabuľke 3).

Tabuľka 3 Označovanie polyetylénových potrubí podľa *MRS*

Označenie	Minimálna požadovaná pevnosť <i>MRS</i> , MPa	Konštrukčné napätie	
		$\sigma_s$ vody, MPa	$\sigma_s$ plynu, MPa
PE 80	8,0	6,3	2,4
PE 100	10,0	8,0	3,1



Obrázok 1 Pevnostná izoterma polyetylénových materiálov (Plastika, 2007)

Hodnota *SDR* (štandardný rozmerový pomer) vyjadruje vzťah medzi priemerom *dn* a hrúbkou steny *en* rúry, resp. tvarovky. Rúry sa vyrábajú v normou stanovených radoch (sériách) *SDR*.

$$SDR = \frac{de}{en} \quad (1)$$

- SDR* - štandardný rozmerový pomer
- de* - menovitý vonkajší priemer, mm
- en* - menovitá hrúbka steny, mm

Označenie série (rúrového radu) *S* je odvodené od hodnoty *SDR*.

$$S = \frac{SDR - 1}{2} = \frac{de - en}{2 \cdot en} \quad (2)$$

Menovitý tlak - *PN*. Zodpovedá dovolenému prevádzkovému tlaku v baroch pri doprave vody s teplotou vody 20 °C. Pre stanovenie *PN* platí vzťah:

$$PN = \frac{20 \cdot \sigma_s}{SDR - 1} = \frac{10 \cdot \sigma_s}{S}, \text{ bar} \quad (3)$$

- PN* - menovitý tlak, bar
- $\sigma_s$  - tangenciálne konštrukčné napätie, MPa
- S* - označenie série (rúrového radu)

Prípustný prevádzkový tlak - *PFA*. Maximálny hydrostatický tlak, ktorému je súčasť systému schopná odolávať v plynulej prevádzke (s vylúčením výkyvov tlaku).

$$PFA = \frac{20 \cdot \sigma_s}{SDR - 1} = \frac{10 \cdot \sigma_s}{S}, \text{ bar} \quad (4)$$

Ako už bolo spomenuté, polyetylén je materiál s viskoelastickými vlastnosťami, čo znamená, že mechanická odolnosť PE sa znižuje so zvyšovaním prevádzkovej teploty. V prílohe (v tabuľkách A.1, A.2) sú uvedené hodnoty maximálneho prevádzkového tlaku *MAOP* (*maximum allowed operating pressure*), ktoré sa odvíjajú od teploty prepravovanej teploty.

Pre výpočet maximálneho prevádzkového tlaku *MAOP* platí (STN EN 13244-1):

$$MAOP = \frac{2 \cdot MRS}{(SDR - 1) \cdot C}, \text{ MPa} \quad (5)$$

- MRS* - minimálna požadovaná pevnosť, MPa
- SDR* - štandardný rozmerový pomer,
- C* - celkový prevádzkový koeficient bezpečnosti.

Polyetylénový materiál je však schopný znášať aj vyššie teploty, bez tlaku až 80 °C, ktoré sú krátkodobo prekročiteľné. Pri prevádzke za vyšších teplôt a s plným tlakom je ale potrebné počítať so znížením životnosti rúr. Pri nižších teplotách sa

životnosť predlžuje. Do  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  nedochádza ku krehnutiu materiálu. Pri doprave iných médií ako vody je potrebné pamätať na to, že životnosť potrubia môže s rastúcou teplotou klesať oveľa výraznejšie. PE materiál sa môže použiť aj pre podtlakové aplikácie, kde je možné bežne pracovať pri podtlaku  $0,08\text{ MPa}$  ( $0,8\text{ bar}$ ), pri absolútnom tlaku  $0,02\text{ MPa}$  pri  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Krivky minimálnej pevnosti v závislosti na čase a teplote (izotermy) pre PE80 (PE100) sú zobrazené v prílohách (obrázok B.1, B.2). Vybrané fyzikálno-mechanické vlastnosti PE materiálu sú uvedené v tabuľke 4.

**Tabuľka 4** Vybrané fyzikálno-mechanické vlastnosti PE

Charakteristika	PE 80	PE 100	Podľa normy
Materiál	PE 80 - MRS 8 MPa	PE 100 - MRS 10 MPa	ISO TR 9080
Hustota	$> 950\text{ kg.m}^{-3}$	$> 955\text{ kg.m}^{-3}$	ISO 1183
Obsah sadzí	$2,0 \div 2,5\%$	$2,0 \div 2,5\%$	UNI 9556
Index toku taveniny ( $190^{\circ}\text{C}/5\text{kg}$ )	$0,4 \div 0,8\text{ g za } 10\text{ min}$	$0,2 \div 0,5\text{ g za } 10\text{ min}$	ISO 1133
Oxidačno indukčný čas ( $210^{\circ}\text{C}$ )	$> 30\text{ min}$	$> 30\text{ min}$	EN 728
Medzná pevnosť	$> 19\text{ MPa}$	$> 21\text{ MPa}$	EN ISO 6259
Predĺženie pri pretrhnutí	$> 500\%$	$> 500\%$	EN ISO 6259
Hydrostatická odolnosť ( $80^{\circ}\text{C} - 4,0\text{ MPa}$ )	$> 1000\text{ h}$	$> 1000\text{ h}$	UNI EN 921
Odolnosť proti pomalému šíreniu trhlin ( $80^{\circ}\text{C}$ )	$> 165\text{ h}$	$> 165\text{ h}$	EN ISO 13479
Teplota krehkosti	$< -100^{\circ}\text{C}$	$< -100^{\circ}\text{C}$	ASTM D746
Tepelná vodivosť ( $23^{\circ}\text{C}$ )	$0,38\text{ W.m}^{-1}\text{.}^{\circ}\text{C}^{-1}$	$0,38\text{ W.m}^{-1}\text{.}^{\circ}\text{C}^{-1}$	DIN 52612
Koeficient teplotnej rozťažnosti	$1,4\cdot 10^{-4}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$	$1,4\cdot 10^{-4}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$	ASTM D696

PE rúry sa dodávajú ako kusový tyčový materiál v dĺžke 4 až 12 metrov. V prípade, že rúry majú priemer menší ako 90 mm, dodávajú sa aj ako náviny v dĺžke 50 až 100 m (v závislosti od priemeru), ktorých použitie výrazne znižuje časové i materiálové náklady pokládky. Pre rozvody vody sa používajú rúry čiernej farby s modrým pásikom alebo modré, pre rozvody plynu so žltým pásikom alebo žlté, prípadne oranžové. Priemery rúr podľa STN EN 12201 sú uvedené v prílohe (tabuľka A.3).

Rúry resp. tvarovky musia mať zreteľne a nezmazateľné označenie tak, aby bolo označenie čitateľné počas životnosti výrobku pri vystavovaní poveternostným vplyvom, skladovaním a montáži:

**Značenie rúr:**

- meno výrobcu, alebo obchodná značka
- rúrový materiál

**Značenie tvaroviek:**

- meno výrobcu, alebo obchodná značka
- materiál tvaroviek

- menovitý priemer
- menovitý tlak
- číslo normy
- dátum výroby

- menovitý priemer
- číslo normy
- dátum výroby
- recyklačný znak

### 1.1.2 Typy polyetylénov

Označenie polyetylén zahrňuje celú triedu plastov od bežných typov až po špeciálne extrémne pevné vlákna. Všetky tieto materiály sú vyrábané z etylénu ako základnej chemickej stavebnej jednotky, ale líšia sa dĺžkou molekulárneho reťazca, jeho pravidelnosťou, vetvením a podielom kryštalickej fázy. Dôsledkom rôznej štruktúrnej výstavby sú rozdiely vo vlastnostiach, ktoré potom jednotlivé typy polyetylénov predurčujú k určitej spracovateľskej technológii a odpovedajúcim aplikáciám (Martinec, 1995; Lunaplast, 2008).

- **Nízkohustotný polyetylén (LD PE)**

Najstarší typ polyetylénu bol pripravený už v roku 1933 v laboratóriách britskej firmy *ICI Chemicals* reakciou za vysokého tlaku (cca 140 - 170 MPa) a teploty. Podľa toho sa na začiatku označoval ako „vysokotlaký typ“. Výskum neskôr ukázal, že vysoký tlak a polymerizačná reakcia sú príčinami, že molekuly tohto polyetylénu sa vetvia podobne ako u koreňov drevín. To obmedzuje ich schopnosť kryštalizovať a takýto materiál potom má vzhľadom k ostatným typom polyetylénu nižšiu hustotu. Dnes sa preto nazýva nízkohustotný polyetylén LD PE (z angl. *low-density polyethylene*). Tento polyetylén má vzhľadom k ostatným najnižšiu pevnosť, tuhosť i tvrdosť, možno do neho rýpať nechtom a podľa toho i ľahko rozpoznať. Na druhej strane má vysokú húževnatosť a je veľmi dobre odolný voči korózií pod napätím. Krátko po začatí priemyselnej výroby v roku 1938 získal polyetylén význačné postavenie. Bol úspešne použitý pri izolovaní a pri ochrane podmorských káblov a jeho dielektrické vlastnosti umožnili konštruovanie prvých radarov.

- **Vysokohustotný polyetylén (HD PE)**

Začiatkom päťdesiatich rokov sa dospelo k nízkotlakým procesom polymerizácií, ktoré produkujú polyetylén s lineárnymi molekulami. Ich podstatou sú heterogénne katalyzátory. V roku 1963 za ich objavenie získali nemecký chemik Karl Ziegler a talian Gulio Natta spoločnú Nobelovu cenu. Výsledkom katalyzovanej polymerizácie za relatívne nízkeho tlaku a pri nízkej teplote je vysokohustotný polyetylén HD PE (z angl. *high-density polyethylene*). Oproti predchádzajúcemu typu

LD PE má tento materiál kryštalinitu, a preto taktiež omnoho vyššiu teplotnú odolnosť, pevnosť, tuhosť a tvrdosť. Je však menej húževnatý a v prostredí tenzidov a mydiel môže byť náchylný ku korózií pod napätím.

- **Lineárny nízko hustotný polyetylén (LLD PE)**

V sedemdesiatich rokoch pribudol do rodiny polyetylénov ďalší člen, lineárny nízko hustotný polyetylén LLD PE (z angl. *linear low-density polyethylene*). Vyrába sa rovnako ako lineárny vysokohustotný typ, ale do lineárnej molekuly polyetylénu sa v priebehu polymerizácie zabudujú tzv. alfa olefiny. Tie sú potom príčinou nižšej hustoty materiálu, pretože bránia dokonalejšiemu kryštalickému usporiadaniu. Tento materiál svojimi vlastnosťami tvorí prechod medzi LD PE a HD PE.

- **Iné typy.** Okrem spomenutých troch základných typov polyetylénu existujú aj ďalšie varianty: UHMWPE, PEX, MD PE (stredno hustotný PE - *medium-density PE*).

**UHMWPE - polyetylén s ultravysokou molekulovou hmotnosťou** (z angl. *ultra high molecular weight polyethylene*). Tento polymér má extrémne dlhé polymérne reťazce s mólovou hmotnosťou 3,1 až 5,7.10<sup>6</sup>. Vysoká mólová hmotnosť reťazcov a ich nízke rozvetvenie umožňuje veľmi dobré ukladanie reťazcov do kryštalických štruktúr. Výsledkom je veľmi pevný a húževnatý materiál s najvyššou rázovou húževnatosťou medzi termoplastami. UHMWPE polyetylén výborne odoláva korozívnym chemikáliám s výnimkou oxidačných kyselín. Má extrémne nízku navlhavosť (odolný voči vode), veľmi nízky koeficient trenia, je samomazivý a vysoko odolný voči abrázií (až 10x odolnosti oproti uhlíkovej oceli).

**PEX - sieťovaný polyetylén** (z angl. *cross linked polyethylene*). Sieťovaný polyetylén sa vo väčšine prípadov pripravuje z HD PE. V PEX sú jednotlivé reťazce polyetylénu pospájané do polymérnej siete vhodnými sieťovacími systémami, čím sa mení pôvodný termoplastický polyetylén na reaktoplast. Požadovaný stupeň zosietenia je medzi 65 - 89 % (podľa ASTM F876-63). Sieťovaním sa zlepšia fyzikálo-mechanické vlastnosti pôvodného polyetylénu. Sieťovaný polyetylén si zachováva mechanickú pevnosť až do teploty 120 - 150 °C, pričom tendencia k toku pod napätím je redukovaná. PEX taktiež lepšie odoláva organickým rozpúšťadlám. PEX sa využíva hlavne na produkciu potrubí pre rôzne účely, prevažne však pre konštrukciu rozvodov studenej, alebo teplej vody, pri podlahovom vykurovaní a pri rozvodoch zemného plynu. PEX potrubia sa taktiež s úspechom používajú pri rozvodoch kvapalín a kalov

v oblasti ropného priemyslu, hlavne pri ťažbe ropy z morského dna, kde PEX je výhodný vzhľadom na svoju odolnosť voči morskej vode a odolnosť voči oderu.

Typické vlastnosti základných troch typov polyetylénov sú zhrnuté a porovnané v tabuľke 5. Vlastnosti u jednotlivých typov sa môžu líšiť podľa polymerizačného stupňa alebo podľa veľkosti molekuly. Veľkosť molekuly sa presne charakterizuje molárnou hmotnosťou. S rastúcou molárnou hmotnosťou sa prakticky nemení teplota tavenia polyetylénu, ale výrazne rastie viskozita taveniny, pevnosť v ťahu i odolnosť voči koróznemu praskaniu v pevnom stave. Z hľadiska výrobcu je dôležité, že taveniny rôznych typov polyetylénov sa líšia nielen viskozitou, ale taktiež termodynamickými vlastnosťami. Zamiešať rôzne typy polyetylénov do zmesi s uspokojujivými vlastnosťami preto nie je jednoduché a vyžaduje značné skúsenosti (Matnet, 2008).

**Tabuľka 5** Porovnanie vybraných typov polyetylénov

Charakteristická vlastnosť	PE-LD	PE-HD	PE-LLD
Stupeň kryštalizácie, %	40 - 50	60 - 80	30 - 40
Merná hustota, g.cm <sup>-3</sup>	0,915 - 0,935	0,94 - 0,97	0,91 - 0,93
Modul pružnosti v ťahu pri 23°C, N.mm <sup>2</sup>	cca 130	cca 1000	-
Oblasť tavenia kryštálov, °C	105 - 110	130 - 135	121 - 125
Chemická odolnosť	dobrá	vyššia	dobrá
Medza klzu, N.mm <sup>2</sup>	8 - 10	20 - 30	10 - 30
Predĺženie v medzi klzu, %	20	12	16
Koeficient teplotnej rozťažnosti, K <sup>-1</sup>	1,7.10 <sup>-4</sup>	2.10 <sup>-4</sup>	2.10 <sup>-4</sup>
Maximálne trvalé teplotné zaťaženie, °C	80	100	-
Teplota mäknutia, °C	110	140	-

Z pohľadu používateľa je asi najdôležitejšia vlastnosť polyetylénu nízka hustota, osemkrát nižšia ako u ocele. Navyše možno polyetylén „jednoducho“ zvärať pri relatívne nízkej teplote. Z toho vyplývajú úspory pri kladení potrubných tras a káblovodov z tohto materiálu a jeho doprave v porovnaní s oceľou, betónom, alebo inými plastmi. Tam, kde oceľové potrubie musí pokladať žeriav, stačia na potrubie z polyetylénu dvaja zdatnejší pracovníci. Výhodné sú taktiež u polyetylénov aj ich elektrické vlastnosti. Bežný polyetylén je veľmi dobrý izolátor, takže v potrubí nemôžu vznikáť indukované prúdy, ani keď je v blízkosti vedenia vysokého napätia. Z dlhodobého hľadiska je veľmi výhodná odolnosť voči povrchovej korózií. Polyetylénové potrubia nie je nutné povrchovo ošetrovať náterom a nevytvárajú sa v ňom takmer žiadne usadeniny. Pri aplikovaní polyetylénov si ale musíme byť vedomí

špecifických vlastností polyetylénu, ktoré ich odlišujú od kovov a iných klasických materiálov. Predovšetkým je to výrazná závislosť všetkých mechanických vlastností na teplote a dobe pôsobenia mechanického napätia. Typická je taktiež trvalá plastická deformácia, ktorej účinok rastie s teplotou a dobou zaťaženia (Pipelife, 2008; Pipeco, 2007).

Plastická deformácia sa prejavuje obzvlášť výrazne, keď mechanické zaťaženie dosiahne medzu klzu, alebo pri nižšej úrovni pôsobí dlhodobo za zvýšenej teploty. U nesprávne skladovaných výrobkov potom môže dôjsť k deformáciám, alebo zmene štruktúry. V prípade rúr skladovaných v príliš vysokých vrstvách sa môže vytvoriť nepriaznivá ovalita. Ultrafialová zložka priameho slnečného svetla zase narušuje chemické väzby v molekulách polyetylénu a po čase vyvolá povrchové praskanie. Táto fotooxidačná degradácia sa prejaví tiež zhoršovaním mechanických vlastností, najmä krehnutím. Polyetylén síce obsahuje chemické stabilizátory a jeho odolnosť voči ultrafialovému žiareniu sa zvyšuje pridávaním sadzí, ale dlhodobá expozícia na slnku je vždy škodlivá. Zvláštnosťou polyetylénu je taktiež tzv. *korózia pod napätím*, keď spoločné pôsobenie niektorých saponátov a mechanického napätia môže vyvolať vznik prasklín. Napokon každý používateľ musí mať na zreteli, že bežný polyetylén horí s teplotou vznietenia 370 °C, pri horení odkvapkáva a môže zapáliť i ďalšie menej horľavé materiály. Pridávaním vhodných aditív, ale možno horľavosť polyetylénu výrazne potlačiť.

### **Typy základných skúšok a testov na polyetylénoch**

Každý materiál, predtým ako sa aplikuje do praxe, musí prejsť cez rad skúšok, ktorými sa hodnotí jeho kvalita, rovnakosť a schopnosť vyhovieť v prevádzkových podmienkach. V prípade polyetylénu možno skúšky rozdeliť do troch skupín:

- chemická a spektrálna analýza,
- reologické skúšky taveniny,
- skúšanie vlastností materiálu v pevnom stave.

Chemická a spektrálna analýza v prvom rade jednoznačne určí, či daná vzorka je skutočne polyetylén, alebo či ide o zmes polyetylénu s inými polymérmi, prípadne s ďalšími aditívami. K rozlíšeniu vysokohustotného a nízkohustotného polyetylénu však samotná infračervená spektroskopia nepostačuje, k tomu je nutné použiť spektroskopiu nukleárnej magnetickej rezonancie - NMR (*Nuclear magnetic resonance*), alebo stanoviť spektrum mechanických strát. Meranie viskozity taveniny je dôležité pre spracovateľské technológie. Viskozitné merania navyše poskytuje údaje o rozmeroch

molekúl (molárna hmotnosť), prípadne ich rozloženie. S rastúcimi rozmermi molekúl viskozita taveniny rastie. Pri rutinnej kontrole výroby i kvalitatívnych prebiekch materiálu sa ale bežne používa jednoduchá dohodnutá metóda indexu toku taveniny (MFI), resp. metóda tavného indexu. Ten sa stanovuje podľa množstva materiálu vytlačeného tryskou pri danom čase, tlaku a teplote. Čím má polyetylén vyššiu molárnu hmotnosť, tým nižšia je hodnota indexu toku. Americká norma (ASTM D1248 *Standard Specification for Polyethylene Plastics Extrusion Materials for Wire and Cable*) rozdeľuje podľa toho polyetylény do piatich kategórií. Polyetylén s nižším indexom toku je vhodný k vytlačovaniu, materiál s mierne vyšším MFI je určený ku vstrekovaniu a veľmi tekutý polyetylén s vysokým MFI sa zvláknuje.

Skúšky v tuhom stave poskytujú údaje o mechanickým, prípadne o elektrických vlastnostiach polyetylénu. Základom je vždy ťahová skúška na trhacom stroji, pričom jej výsledkom je pracovný diagram, alebo deformačno-napät'ová krivka. Z tejto krivky možno odčítať najdôležitejšie mechanické charakteristiky, modul pružnosti ako smernicu začiatocnej časti krivky, napätie a deformáciu na medzi klzu, napätie pri pretrhnutí, alebo pevnosť v ťahu a deformáciu pri ťahaní, resp. ťažnosť. Ťažnosť sa síce bežne neprejaví pri bežnom prevádzkovom namáhaní, ale jej hodnota je dôležitou mierou homogenity a stupňa degradácie materiálu. V praxi často dôležitejšia vlastnosť než pevnosť je húževnatosť, ktorá vyjadruje schopnosť materiálu odolať energiám nárazu. V laboratóriách sa hodnotí skúškou rázovým kladivom. Z hľadiska dlhodobej životnosti a spoľahlivosti materiálu je významná taktiež odolnosť voči koróziám pod napätím.

Skúšanie hotových výrobkov je dôležitým doplnkom materiálových skúšok, pretože simuluje skutočné prevádzkové podmienky. V prípade rúr určených pre rozvody vody, plynu, príp. vykurovania, sa skúša tlaková pevnosť za zvýšených teplôt a z nej sa stanovuje dovolené zaťaženie a životnosť pri prevádzkovej teplote. U ochranných rúrok káblovodov (chráničiek) je dôležitejšie hodnotenie deformácie pri vonkajšom zaťažení. I pri týchto skúškach hrá dôležitú úlohu nielen úroveň zaťaženia, ale taktiež doba jeho pôsobenia a samozrejme i teplota.

#### Zhrnutie základných pravidiel pre prax

- Vlastnosti i tvar polyetylénových rúr i iných výrobkov sa môžu meniť v priebehu skladovania, obzvlášť keď sú dlhodobo zaťažené pri vyššej teplote.
- Ultrafialové svetlo pôsobí degradáciu, preto sa rúry skladované vonku musia chrániť reflexnou alebo aspoň neprehľadnou fóliou.



- Dlhodobé zaťaženie v prostredí saponátov, mydiel a niektorých uhl'ovodíkov vyvoláva v polyetyléne vznik prasklín (korózia pod napätím).
- Pri inštalácii chráničiek sa musí vylúčiť trvalé miestne preťaženie.
- Dobre zvariť sa dajú len diely z rovnakého typu polyetylénu.
- Polyetylén nie je možné lepiť bežnými lepidlami, spoje medzi dielmi sa môžu utesniť trvalo plastickými tmelmi na báze kaučuku, alebo asfaltu.
- Správne uložené polyetylénové potrubie zahrnuté pieskom a zeminou si zachová prevádzkovú spoľahlivosť po desiatky rokov.
- Polyetylénový odpad a výrobky, ktoré už doslúžili, sú cennou surovinou. Polyetylén pre druhotné spracovanie ale nesmie obsahovať cudzie prímеси (iné plasty, piesok) a ani materiál, ktorý obsahuje senzibilizátory alebo bol dlhodobo vystavený slnečnému svetlu (poľnohospodárske fólie).
- Polyetylén je horľavina stupňa C3 (STN 730823), odpad a fólie, ktoré sa nedajú spracovať, možno vhodným spôsobom spáliť a získať tak energiu. Pri horení polyetylénu nevznikajú škodlivé splodiny (to ale neplatí u iných plastov).
- Polyetylén je ekologicky nezávadný, pre potravinárske aplikácie ale musia byť vylúčené niektoré typy stabilizátorov.

## 1.2 Spájanie potrubných systémov

### 1.2.1 Spôsoby spájania jednotlivých častí PE systému

Potrubia a tvarovky z PE sa najčastejšie spájajú nasledovnými spôsobmi:

- rozoberateľný spôsob (mechanické spojenie)
- pevný (nerozoberateľný) spôsob - tepelné zváranie

#### *1.2.1.1 Rozoberateľné spôsoby spájania*

Tieto spôsoby zvárania umožňujú spájať rôzne materiály (PE, PVC, oceľ alebo liatinu), pridávať ventily a používať aj viacovalizované rúry, ktoré sú si tvarovky schopné sformovať. Tvarovka na mechanické spájanie sa môže dodávať na montáž v teréne alebo sa môže predmontovať výrobcom. Tvarovka obyčajne obsahuje kompresnú časť na zabezpečenie integrity tlaku, tesnosti a odolnosti proti koncovým zaťaženiám. Mechanické tvarovky a spojky môžu byť kovové alebo plastové. Platí pre ne, že správne uskutočnené spojenie má rovnakú alebo vyššiu pevnosť v ťahu ako samotná spájaná rúra.

- **Zúžený koniec a podporná prírubu.** Spájanie so zúžením koncom, podpornou prírubou a tesnením sa používa na spojenie PE rúr s rúrami z iného materiálu, alebo na dočasné spojenie dvoch PE rúr. Zúžený koniec musí byť napojený k PE rúre zvarením na tupo alebo elektrofúziou, čím sa vytvorí podporný základ pre prírubu, väčšinou vyrobenú z ocele, alebo hliníka. Protiahlá prírubu je spojená skrutkami a tesnosť je zabezpečená použitím plochého tesnenia. Tesniace materiály závisia od použitia potrubia (voda, resp. plyn).

- **Zúžený koniec a polypropylénová prírubu.** Tento spôsob spojenia je podobný ako vyššie uvedený spôsob. Je vytvorený polyetylénom so zúženým koncom a polypropylénovou prírubou špeciálneho dizajnu, ktorá zabraňuje deformáciám protiahle príruby a zabezpečuje tesnosť spojenia počas dlhého obdobia.

- **Lisovacia tvarovka.** Prezývaná tiež „rýchlo uvoľniteľné spojenie“ alebo „svorkové spojenie“ kvôli jej konštrukčným vlastnostiam. Pozostáva z hlavného tela zoskrutkovaného dvomi skrutkami. Tesnosť je zabezpečená elastomerickým tesnením stlačeným mechanickými telesami. Tento typ tvarovky sa obyčajne používa v nízkotlakových potrubných systémoch, keďže zvýšený tlak alebo tlakové nárazy môže uvoľniť tesnosť na rúre.

- **Celoplastová tvarovka.** Spájanie pomocou celoplastovej tvarovky je vhodné pre rozoberateľný spoj na rozvody vnútorného vodovodu. Systém pozostáva z celoplastovej tvarovky opatrenej závitom a kónických čeľusti. Pri skrutkovaní závitú sa kónické čeľuste sťahujú do rúry a tým sa vytvára vodotesný spoj. Tieto spoje sú vhodné pre menšie priemery rúr z materiálov LD PE a MD PE.

#### *1.2.1.2 Pevné spôsoby spájania*

Technológia pevného spôsobu spájania spočíva v kontaktnom tepelnom zvarení, bežne označovanom ako zváranie na tupo, ďalej v spájaní polyfúznym zváraním a elektrofúznym zváraním podľa noriem EN 1555 a EN 12201. Tepelným zvaracím procesom sa jednotlivé potrubia stanú jedinou súčasťou, pričom platí, že zvarový spoj má minimálne rovnakú pevnosť v ťahu ako spájané rúry.

Polyetylén s polypropylénom sa vzájomne nesmú zvärať. Rovnako tak nie je možné zváranie rúr a tvaroviek z rozvetveného a lineárneho PE. Tieto pomerne ťažko od seba odlišiteľné materiály sa v žiadnom prípade nesmú zvariť. Ak je nutné takéto materiály spojiť, resp. v prípade pochybností o pôvode rúr, je lepšie použiť mechanické tvarovky. Rúry z polyetylénu sa nedajú lepiť a ani spájať pomocou závitov.

- **Zváranie na tupo.** Tento spôsob sa používa na zvarenie rúr a tvaroviek rovnakej hrúbky a priemeru. Princíp tejto technológie spočíva v nahriatí koncov rúr tzv. zvaracím zrkadlom, ktorého plochy sú pokryté teflónovou vrstvou, následným spojením pod predpísaným prítlačným tlakom a vychladnutím.

- **Zváranie hrdlovou tvarovkou.** Tento zvarací proces používa špeciálne tvarovky takého tvaru, ktorý dokáže obsiahnuť koniec rúry, ktorý sa má zvariť. Rúry a tvarovky sa nahrejú ohrevným telesom špecifickým pre každý priemer. Dobrý výsledok tohto spôsobu závisí od manuálnej zručnosti zvarača. Z tohto dôvodu nemá tento spôsob široké uplatnenie.

- **Polyfúzne zváranie.** Pri zvaraní vnútorných vodovodov sa často využíva technológia polyfúzneho zvárania. Jej princíp spočíva v nahriatí vonkajšieho povrchu rúry a vnútorného povrchu spojovacej tvarovky výhrevným telesom a následným zasunutím natavených plôch do seba. Teplota zvárania je 250 - 270 °C.

- **Elektrofúzne zváranie.** Touto technológiou sa spájajú MD PE, HD PE rúry a tvarovky s rovnakým priemerom, s rovnakou alebo odlišnou hrúbkou steny pomocou elektrofúznej tvarovky, ktorá nataví povrchy rúr teplom vyvolaným zabudovanou elektrickou odporovou špirálou.

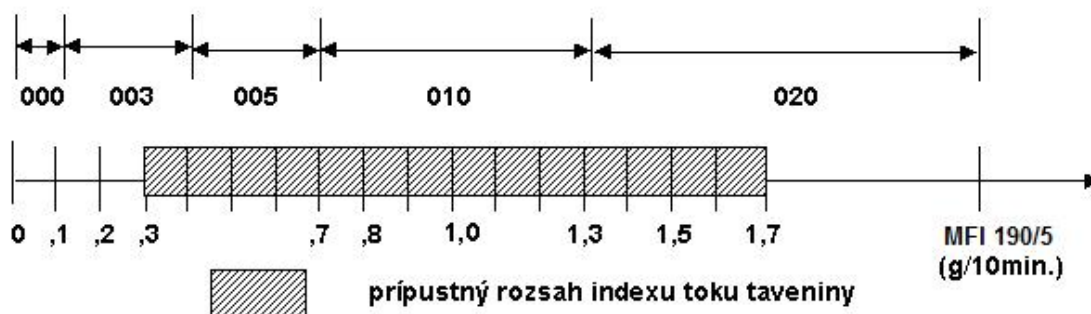
### 1.2.2 Zváranie na tupo

Pri zvaraní plastových rúr metódou na tupo sa spájajú povrchy nahrejú kontaktom s ohrevným telesom a následne sa spoja použitím špeciálneho zvaracieho prístroja.

- **Zvar.** Je rozhranie medzi spojenými zvarovými povrchmi, v rozsahu ktorého dochádza k difúznemu prepletaniu makromolekúl zvarencov. Pevnosť spojenia obstarávajú medziatómové a medzimolekulové súdržné sily, ktoré vznikajú difúziou segmentov makromolekúl v prechodovej vrstve medzi polymérnymi zložkami zúčastňujúcimi sa zvárania. Difúzia nastáva po prechode zvarových povrchov a prídavného materiálu do viskózneho stavu.

- **Kompatibilita.** Technológia zvárania na tupo sa používa na zváranie rúr a tvaroviek s rovnakou hrúbkou a priemerom. Pre rúry s priemerom menším ako 63 mm sa zváranie na tupo neodporúča. Základným predpokladom kvalitného zvárania je dodržanie kompatibility indexu toku taveniny (MFI) spájaných PE rúr a tvaroviek. Tento sa stanovuje podľa STN EN ISO 1133 pri teplote 190 °C a zaťažení 50 N na predpísanom skúšobnom zariadení. Výslednou hodnotou je množstvo vytečenej

taveniny v gramoch za čas 10 minút ( $\text{g} \cdot (10 \text{ min})^{-1}$ ). HD PE a MD PE sú zvariteľné v rozsahu MFI od 0,3 do 1,7 g za 10 min. MFI je delený na tzv. triedy zvariteľnosti (obrázok 2).



**Obrázok 2** Triedy zvariteľnosti podľa STN EN ISO 1133

- **Triedy zvariteľnosti.** Hodnoty MFI musia byť pre zváranie rúr a tvaroviek známe a dokladované. Vysokú bezpečnosť spojov poskytujú zvary rúr a tvaroviek s rovnakou triedou zvariteľnosti. Za bezpečné sa taktiež považujú zvary, ktorých hodnoty MFI materiálu sa nachádzajú v susedných triedach zvariteľnosti. V ostatných prípadoch, resp. kombináciách (napr. tr. 003 a s tr. 010) sa odporúča vykonať overenie zvaru deštruktívnou alebo nedeštruktívnou skúškou. Tieto prípady môžu nastať najmä pri zváraní materiálov PE 80 a PE 100, ktoré je vo všeobecnosti možné vzájomne zvärať aj na tupo. Odporúča sa však zváranie elektrotvarovkami, najmä ak je potrebné zvariť rúry rozdielnych SDR.

- **Podmienky prostredia.** Proces zvárania sa musí uskutočniť na suchom a chránenom mieste. Aby bola zváracia operácia chránená, musia byť dodržané určité podmienky (dážď, vysoká vlhkosť, teplota, vietor). Teplota okolia musí byť v rozmedzí od  $-5\text{ °C}$  do  $+40\text{ °C}$ .

- **Prípravné operácie pred zváraním.** Pred samotným zváraním je nutné skontrolovať materiálovú celistvosť, účinnosť a bezpečnosť zariadenia. Zvárač musí mať úplnú vizuálnu kontrolu nad celou procedúrou a dostatok priestoru na prácu bez obmedzení na suchom a rovnom priestore. Príprava povrchov na zváranie je veľmi dôležitá pre kvalitné spojenie a pozostáva z viacerých krokov. Konce rúr (tvaroviek) musia byť očistené od špiny, blata alebo podobných zvyškov vhodným spôsobom a potom upevnené v čelustiach zváracieho prístroja. Následne musia byť kolmo orezané hobľovacím nástrojom (hoblíkom). Konce rúr sa priložia k elektrickému hobľovaciemu prístroju a až po jeho spustení sa nastaví postupný tlak, aby sa motor hoblíka nezastavil počas operácie. Proces orezania je hotový, keď hoblina oba konce lemujú a sú rovnakej

veľkosti. Po dokončení orezania sa orezané konce rúr priložia k sebe a následne sa skontroluje:

- **nesúlad**, ktorý nesmie presiahnuť viac ako 10 % (max. 2 mm) hrúbky zváraných rúr. Je však možné prispôbiť spôsob fixovania čeľustí alebo otáčať rúry do najlepšej polohy pre spojenie a zopakovať orezanie.
- **prilnavosť koncov rúr**, medzi ktorými by mala byť vzdialenosť menšia, ako je hodnota uvedená v nasledujúcej tabuľke 6. Ak je prekročená, je potrebné rúry opäť orezať.

**Tabuľka 6** Maximálna dovolená vzdialenosť koncov rúr po orezaní

Vonkajší priemer, mm	Maximálna dovolená vzdialenosť koncov rúr, mm
do 200	0,3
200 až 400	0,5
nad 400	1,0

- **ovalita rúry**, ktorá nesmie presiahnuť 1,5 % z hodnoty vypočítanej nasledovne:

$$OV = \frac{de_{\max} - de_{\min}}{dn} \cdot 100, \% \quad (6)$$

- OV - ovalita rúry, %
- de - vonkajší priemer (maximálny, minimálny), mm
- dn - vnútorný priemer, mm

Ovalita sa dá redukovať, ak sa rúra odtočí z cievky skôr ako 24 hodín pred pokladaním alebo používaním špeciálneho odvíjacieho zariadenia.

Konce orezaných rúr sa musia očistiť vhodným čistiacim prostriedkom (alkohol), aby sa odstránili zvyšky mastnoty, prachu alebo polyetylénu. Vyčistené povrchy sa už nesmú znečistiť ani len dotykom ruky.

- **Ohrevné teleso.** Ohrevné teleso (tzv. zváracie zrkadlo) musí zabezpečiť, aby sa dosiahla prevádzková teplota do 20 minút od jeho zapnutia. Teplota okolo celého povrchu musí byť v rozmedzí  $\pm 10$  °C s ohľadom na teplotu stanovenú na termostate.

- **Kontrola.** Zvárač sa musí ubezpečiť, že žiadna externá príčina nenaruší správne vykonanie úkonov spájania počas zvárania. Často sa stáva, že ohrevné zrkadlo sa ochladí vzduchom, ktorý sa nachádza vo vnútri rúr. Preto sa odporúča uzatvoriť konce rúr ochrannými viečkami a odstrániť ich až po úplnom dokončení zvárania. Ohrevné zrkadlo musí byť vždy umiestnené vo svojom špeciálnom kryte, aby sa nepoškodil teflónový náter. Tento náter sa musí pravidelne obnovovať podľa častosti používania.

Musí sa očistiť alkoholom za studena, a to vždy, keď sú na ňom stopy mastnoty, prachu alebo polyetylénové zvyšky.

- **Zvárací a ťahací tlak.** Polyetylénový materiál si väčšinou vyžaduje zvárací tlak  $0,15 \text{ N.mm}^{-2}$ . Výrobcovia zváracích prístrojov (Georg Fisher, Dytron, Gawaplast, Widos a ďalšie) dodávajú špeciálne tabuľky s hodnotami zváracích tlakov potrebných pre zváranie rôznych priemerov a hrúbok v súlade s tlakom vo valci, ktorý poháňa pohyby čeľustí. Ťahací tlak je tlak takej veľkosti, ktorá je potrebná na pohybovanie čeľustí zváracieho stroja, ktorý nesie rúru. Táto veľkosť tlaku závisí najmä od hmotnosti spájaných rúr, ale aj od teploty oleja v hydraulickom obvode a upínacej sily čeľustí. Jednotliví výrobcovia opäť dodávajú hodnoty ťahacieho tlaku v špeciálnych tabuľkách.

### 1.2.2.1 Zváranie a kvalita spoja zváraného metódou na tupo

Podľa prameňa (Grom, 1990) možno uviesť základné podmienky režimu difúzneho zvárania, ktorými sú zváracia teplota  $T_N$ , zvárací čas  $t$  a zvárací tlak  $p$ . Medzi zváracou teplotou  $T_N$  a trvaním ohrevu  $t_N$  platí empirický vzťah:

$$t_N = t_0 e^{\frac{D_A}{R \cdot T_N}} \quad (7)$$

$t_N$  - trvanie ohrevu, s

$t_0$  - referenčný čas, s

$D_A$  - aktivačná energia difúzie segmentov makromolekúl,  $\text{kJ.mol}^{-1}$

$R$  - plynová konštanta  $R = 8,314472 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$

$T_N$  - zváracia teplota, K

Zváraciu teplotu  $T_N$  volíme v intervale medzi teplotou topenia polyméru  $T_f$  a teplotou, pri ktorej sa začína jeho rozklad.

Keďže pri zváraní sa miesto zvaru privedie do plastifikovaného stavu a pôsobením primeraného tlaku spojí, pri tomto procese dochádza k vzniku vzájomného trvalého spletenia makromolekúl materiálov spájaných častí, pričom sa pri tomto procese uplatňujú sekundárne medzimolekulové sily, ktorých súčet dáva zvaru pevnosť. Ku spleteniu makromolekúl dochádza na hranici stavenia. Kvalita spoja podľa (Potočan, 1984) je daná voľbou optimálnej teploty zvárania a prítlačného tlaku, pretože tieto dva parametre súčasne ovplyvňujú veľkosť a kvalitu teplom ovplyvnenej oblasti. Šírku a kvalitu teplom ovplyvnenej oblasti ovplyvňujú napätia, ktoré vznikli v priebehu zvárania vo zvarovom spoji ako morfológické zmeny nadmolekulovej štruktúry polymérov okolo hranice stavenia.

Zhotoviť kvalitný zvarový spoj možno len pri dôslednom dodržaní technologických parametrov kritérií kvality. Všetky odporúčané hodnoty technologických parametrov zvarovania sú výsledkom dlhodobých skúseností, výsledkom experimentálnych laboratórnych meraní overených praxou v interiéroch ako aj externých podmienkach. Pre metódu zvarovania horúcim telesom možno charakterizovať štyri technologické kritéria kvality:

- **Rýchlosť ohrevu.** Určuje čas, za ktorý sa vytvorí tepelne priaznivá zóna pre zvarovanie. Závisí od tepelnej vodivosti spojovaných materiálov a od teploty povrchu horúceho telesa (zvaracieho zrkadla).

- **Teplota zvarovania.** Je daná druhom spájaného materiálu a vzhľadom na ich prechodné teploty (stanovené termomechanickými krivkami) je teplotou, pri ktorej je materiál v splastifikovanom stave. Býva v rozmedzí 20 až 80 °C nad teplotou viskózneho toku  $T_f$ .

- **Čas ohrevu.** Nemá byť veľký, aby sa nevytvorila na styku materiálu s povrchom horúceho telesa hrubá oxidická vrstva, ktorá bráni difúzií (spleteniu makromolekúl) v procese zvarovania. Čas ohrevu je funkciou teploty povrchu zvaracieho zrkadla.

- **Nahrievací a zvarací prítlak.** Nahrievací prítlak zabezpečuje dokonalý kontakt čiel spojovaných materiálov s povrchom horúceho telesa. Zvarací prítlak so zvaracou teplotou stanovuje kvalitu zvarového spoja. Správne zvolený zvarací prítlak zabezpečí vytlačenie cca 25 % splastifikovaného materiálu do pretoku. Správne zvolená teplota a prítlak zabezpečia dokonalé spojenie materiálov. Necelistvosti na hranici stavenia sú dôsledkom nesprávne zvolených parametrov zvarovania.

Na zvaraní plastov sa môžu zúčastniť len tie objemy materiálov, ktoré sa nahrejú na zvaraciu teplotu. V týchto objemoch prebieha pri zvaraní sekundárna kryštalizácia, ktorá sa prejaví výrazne menšou veľkosťou sférolitických útvarov. Z tohto pohľadu poloha morfológického rozhrania je rozmedzím medzi materiálom nahriatym a nenahriatym nad teplotu zvarovania. Pri zvarových spojoch polyolefínov vzniká teplom ovplyvnená oblasť, ktorá zasahuje len do vzdialenosti 2,5 až 3,5 mm od hranice stavenia. Tieto objektívne skutočnosti možno zdôvodniť nízkou tepelnou vodivosťou plastov a ich viskoelasticitou, ktorá je príčinou výraznej relaxácie hneď po vzniku zvarového spoja.

### 1.2.2.2 Stručný prehľad vývoja techniky zvárania metódou na tupo

Postup zvárania metódou na tupo je najpopulárnejšou technikou v spájaní PE (PP) potrubí. Je ľahko realizovateľná, lacná a použiteľná pre takmer všetky priemery, i keď európske zásady jej aplikovanie obmedzujú na hrúbky stien väčších než 4 mm.

Zváranie metódou na tupo predstavuje zároveň aj spoľahlivú metódu spájania, pokiaľ sa rešpektujú niektoré základné pravidlá. Informácie o najpodstatnejších momentoch vývoja techniky zvárania na tupo poskytuje prameň (Árendás a kolektív, 2002).

Technika zvárania, vypracovaná v 60-tich rokoch v DVS a NIL spoločnosťou ELECTRABEL vychádzala z materiálu Hostalen GM 5010, ktorý je vysokohustotným PE s nízkym indexom toku 0,3 g za 10 min pri 190 °C a 50 N. V roku 1988 ELECTRABEL obnovil výskum z nasledovných dôvodov:

- problémy s vizuálnym vyhodnocovaním zváraných zostáv - príliš široké pretoky s občasným výskytom nepravidelností,
- tendencia obmedziť vplyv ľudského faktora na proces zvárania, ako je napríklad posudzovanie výšky prvého pretoku  $e_1$  do 1 mm zväračom v priebehu fázy jeho vytvárania, ktorý sa v praxi mení medzi 0,5 a 2 mm,
- vytvorenie postupu zjednodušujúceho automatizáciu zväracieho procesu, tzv. *zväracieho diagramu* (obrázok 3).

K významnej zmene v procese zvárania došlo v roku 1976 pri znížení zväracieho tlaku potrebného na vytvorenie prvého pretoku  $p_1$  najskôr na 50 %, neskôr na úroveň tlaku  $p_2$  počas doby ohrevu. V dôsledku toho už nemusel zvärač vyhodnocovať výšku prvého pretoku ( $e_1 = 1$  mm) a následne znižovať tlak na úroveň  $p_2$ , predpísaný počas ohrevu zwarencov. Na základe týchto poznatkov, je potrebné dodržiavať už iba dva tlaky. Tlak  $p_2$  pre ohrev a tlak  $p_1$ , ktorý sa počas doby zvárania už nemení.

Ako uvádza prameň (Árendás a kolektív, 2002), predošlé štúdie ukázali, že niektoré špecifické charakteristiky PE materiálov (rekryštalizácia, rýchlosť tuhnutia) môžu interagovať s neuvažovanými parametrami zvárania, napr. s dobou  $t_5$  na dosiahnutie zväracieho tlaku  $p_1$ . Tieto prvotné poznatky poukazujú na potrebu ďalšieho výskumu zvárania na tupo vzhľadom na objavovanie sa nových materiálov na trhu a rastúce nároky spotrebného priemyslu. Hoci spomenuté analýzy sú



orientované na rúry z polyetylénu, vzhľadom k podobnosti materiálov PE a PP, možno predpokladať platnosť takýchto úvah aj pre rúry vyrobené z polypropylénu.

Z doterajších poznatkov sa ukazuje, že parametre zvárania je možné optimalizovať vzhľadom na:

- **vzhľad pretoku.** V súčasnom stave sa kvalita zvárania na tupo stále overuje hlavne vizuálnym posúdením vzhľadu pretoku. Je veľmi dôležité, aby sa táto kontrola objektivizovala pri súčasnom definovaní tolerančných pásiem (šírky, výšky, pravidelnosti) rozmerov pretoku.

- **pevnosť v ťahu.**

- **hrúbku jadra taveniny** (koreňa zvaru) - 190 až 590  $\mu\text{m}$  meranú na mikroatomických odrezkoch hrúbky 10  $\mu\text{m}$ ,

- **vhodnosť stanovených podmienok** zvárania pre rôzne materiály a rúry, vyrobené na rôznych extrúzných linkách (reprodukovateľnosť).

Na základe prehľadu spracovaného v literatúre (Árendás a kolektív, 2002), možno prehlásiť, že v snahe o optimalizáciu podmienok zvárania metódou na tupo, sa v priebehu doterajšieho vývoja overili prakticky všetky možné varianty usporiadania zväracieho diagramu, ktoré majú svoje technické opodstatnenie. Napriek tejto skutočnosti sa ukazuje, že daný proces vývoja nie je ukončený nakoľko:

- optimálne podmienky zvárania zostanú vždy materiálovou funkciou vlastností zváraných častí. Pri súčasnej diverzite komerčných typov z polyetylénu a polypropylénu pripravených navyše rôznymi technológiami syntézy, je potrebné zvärať materiály a ich kombinácie, vykazujúc v dôsledku štrukturálnych odlišností podstatné rozdiely vlastností taveniny (bod topenia, rýchlosť tavenia a tuhnutia, reologické a kríповé vlastnosti, a pod.).

- napriek určitým predstavám o štandardných podmienkach extrúzie rúr je zrejmé, že výrobky rovnakého materiálu a totožnej dimenzie profilov budú vždy vykazovať určitý rozptyl vlastností nielen v rámci produkcie určitého výrobku, ale hlavne pri vzájomnom porovnaní viacerých dodávateľov. Normami predpísané tolerancie relevantných vlastností surovín a z nich zhotovených rúr sú totiž príliš široké k tomu, aby kolísanie v rámci ich hraníc nemalo vplyv na podmienky zvárania (napr. rozdiel medzi MFI suroviny a MFI výrobku môže predstavovať rozdiel až 30 %).

Nemecká smernica DVS 2207 odporúča používať pri zváraní polyetylénových materiálov zväracie parametre, ktoré sú uvedené v tabuľke 7.

**Tabuľka 7** Parametre zvárania pre rúry z PE 80 (PE 100) SDR 11 podľa DSV 2207

Vonkajší priemer (de), mm	90	110	125	140	160	180	200	225	250	280	315	
Hrúbka steny (en), mm	8,2	10,0	11,4	12,8	14,6	16,4	18,2	20,5	22,8	25,5	28,7	
Zváracia plocha (P), cm <sup>2</sup>	21,1	31,4	40,6	51,1	66,6	84,2	103,9	131,6	162,6	203,7	258,0	
Zarovňavací tlak (p <sub>1</sub> ), MPa	0,6	0,9	1,2	1,5	2,0	2,5	3,05	3,9	4,8	6,0	7,6	
Výška pretoku (e), mm	1,5	1,5	1,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,5	2,5	2,5	3,0	
Čas ohrevu (t <sub>2</sub> ), s	82	100	114	128	146	164	182	205	228	255	287	
Čas prestavenia (t <sub>3</sub> ), s	PE 80	7	7	7	8	8	9	9	10	11	11	12
	PE 100	4	5	5	5	5	5	6	6	6	6	6
Čas vytvorenia zváracieho tlaku (t <sub>4</sub> ), s	PE 80	6	7	8	8	9	10	10	11	12	14	15
	PE 100	3	4	4	5	7	8	9	10	11	12	12
Tlak zvárania a ochladzovania (p <sub>6</sub> ), MPa	0,6	0,9	1,2	1,5	2,0	2,5	3,05	3,9	4,8	6,0	7,6	
Čas ochladzovania (t <sub>5</sub> ), min	12	14	16	18	20	22	24	26	28	32	33	

Z tabuľky 7 vidno, že zváracie parametre sa líšia iba v časoch prestavenia  $t_3$  a vytvorenia zváracieho tlaku  $t_4$ . Táto skutočnosť vychádza z vyššej rýchlosti tuhnutia materiálu PE 100 oproti materiálu PE 80. Pri porovnaní hodnôt uvedených v tabuľkách 7 a 8 vidno, že tabuľka 8 uvádza aj parameter čas zarovňavania  $t_1$  (nutný na dosiahnutie pretoku o výške  $e = 1,5$  mm). Naproti tomu, v parametroch času ohrevu  $t_2$  a času ochladzovania  $t_5$  uvádza pomerne široké rozpätie. Širšie rozpätie však nemá podstatný vplyv na výslednú kvalitu zvaru, už aj vzhľadom na skutočnosť, že na jeho ochladzovanie vplýva aj vonkajšia teplota, vlhkosť a rýchlosť prúdenia okolitého vzduchu, ktoré pritom nie sú definované ako číselné parametre zvárania v žiadnej norme.

**Tabuľka 8** Parametre zvárania PE 100

Hrúbka steny (en), mm	< 4,5	4,5 - 7	7 - 12	12 - 19	19 - 26	26 - 37	37 - 50	50 - 70
Čas zarovňavania (t <sub>1</sub> ), s	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
Čas ohrevu (t <sub>2</sub> ), s	45	45 - 70	70 - 120	120 - 190	190 - 260	260 - 370	370 - 500	500 - 700

Maximálny čas prestavenia ( $t_3$ ), s	5	5	6	8	10	12	16	20
Čas vytvorenia zváracieho tlaku ( $t_4$ ), s	5	5	6	8	11	14	19	25
Čas zvárania a ochladzovania ( $t_5$ ), min	6	6 - 10	10 - 16	16 - 24	24 - 32	32 - 45	45 - 60	60 - 80

Porovnanie dánskej technickej normy DS/INF 70-1: 1992 (tabuľka 9) s nemeckou smernicou DSV 2207 poukazuje na výrazné rozdiely v parametroch zvárania.

Tabuľka 9 Parametre zvárania PE – rúr podľa (DS/INF 70 – 1: 1992)

Parameter	PE 100	PE 80
Teplota zváracieho zrkadla ( $T_z$ ), °C	200 - 220	
Zarovňavací tlak ( $p_1$ ), MPa	0,18	0,15
Čas zarovňávania ( $t_1$ ), s	do dosiahnutia výšky pretoku $e = 0,5 + 0,1en$	
Tlak pri zahrievaní ( $p_2$ ), MPa	0 – 0,01	
Čas ohrevu ( $t_2$ ), s	15	
Čas prestavenia ( $t_3$ ), s	3 + 0,01 de	
Čas na vytvorenie zváracieho tlaku ( $t_4$ ), s	3 + 0,03 de	
Tlak zvárania a ochladzovania ( $p_5$ ), MPa	0,18	0,15
Čas zvárania a ochladzovania ( $t_5$ ), min	10 + 0,5 en	
de - menovitý vonkajší priemer (mm), en - menovitá hrúbka steny (mm)		

Najväčší rozdiel je v možnosti použitia zvaracej teploty aj 200 °C, ako aj v tlaku zarovňávania, zvárania a ochladzovania, ktorý v prípade PE 100 môže byť až 0,18 MPa oproti 0,15 MPa. Taktiež dánska norma predpisuje vyšší čas ohrevu (až o 50 %) bez ohľadu na typ polyetylénu. V ostatných parametroch už rozdiely nie sú výrazné.

Podľa (Árendás a kolektív, 2002) smernice DVS 2208 a DIN 16932 dopĺňajú smernicu DVS 2207. Podávajú obraz o priebehu a typických hodnotách parametrov zvárania na tupu. Predpisujú pre materiály PE 80 a PE 100 tlaky zarovňávania  $p_1$  a zvárania  $p_5$  v prepočte na nominálne prierezy  $dn$  uvažovaných profilov rúr na úrovni  $p_1 = p_5 = 0,15$  MPa.

Štandard ISO 11414: 1996 definuje priebeh zvaracieho procesu takmer v rovnakom zmysle (tabuľka 10). Predpisuje hodnotu tlaku zarovňavania  $p_1$  na hodnotu  $0,18 \pm 0,02$  MPa. Pri udávaní zvaracích parametrov štandard ISO 11414: 1996 nerozlišuje medzi materiálmi PE 80 a PE 100, čo je podstatný rozdiel voči dánskej norme DS/INF 70-1: 1992. Zároveň však predpokladá, že stredná hodnota pre tlak zvarania  $p_1$  a tlak zarovňavania  $p_5$  sa môže pohybovať v rozpätí 0,16 až 0,18 MPa. Taktiež na rozdiel od predchádzajúcich predpokladov definuje tlak v rovine zvaru počas ohrevu na hodnotu  $p_2 = 0,03 \pm 0,02$  MPa.

**Tabuľka 10** Prehľad parametrov zvarania na tupo PE v zmysle ISO 11414: 1996

Operácia	Parametre	Hodnoty		
Teplota zrkadla ( $T_Z$ )	$63 \leq dn \leq 250$ mm	$210 \pm 10$ °C		
	$dn > 250$ mm	$225 \pm 10$ °C		
Fáza 1	zarovňavací tlak ( $p_1$ )	$0,18 \pm 0,02$ MPa		
	čas zarovňavania ( $t_1$ )	čas do dosiahnutia šírky pretoku $B_1$ v sek		
	šírka pretoku zvaru ( $B_1$ )	$dn \leq 180$ mm	$1 < B_1 \leq 2$ mm	
		$180 < dn \leq 315$ mm	$2 < B_1 \leq 3$ mm	
$315 < dn$ mm		$3 < B_1 \leq 4$ mm		
Fáza 2	tlak pri zahrievaní ( $p_2$ )	$0,03 \pm 0,02$ MPa		
	čas ohrevu ( $t_2$ )	$(30 + 0,5dn) \pm 10$ s		
Fáza 3	čas prestavenia ( $t_3$ )	$3 + 0,01dn \leq t_3 \leq 8$ s		
Fáza 4	čas na vytvorenie zvaracieho tlaku ( $t_4$ )	$3 + 0,01dn \leq t_4 \leq 6$ s		
Fáza 5	tlak zvarania a ochladzovania ( $p_5$ )	$0,18 \pm 0,02$ MPa		
	čas zvarania a ochladzovania ( $t_5$ )	$t_5 \cong 10$ min		
Fáza 6	čas vychladzovania ( $t_6$ )	$1,5 en \leq t_6 \leq 20$ min		

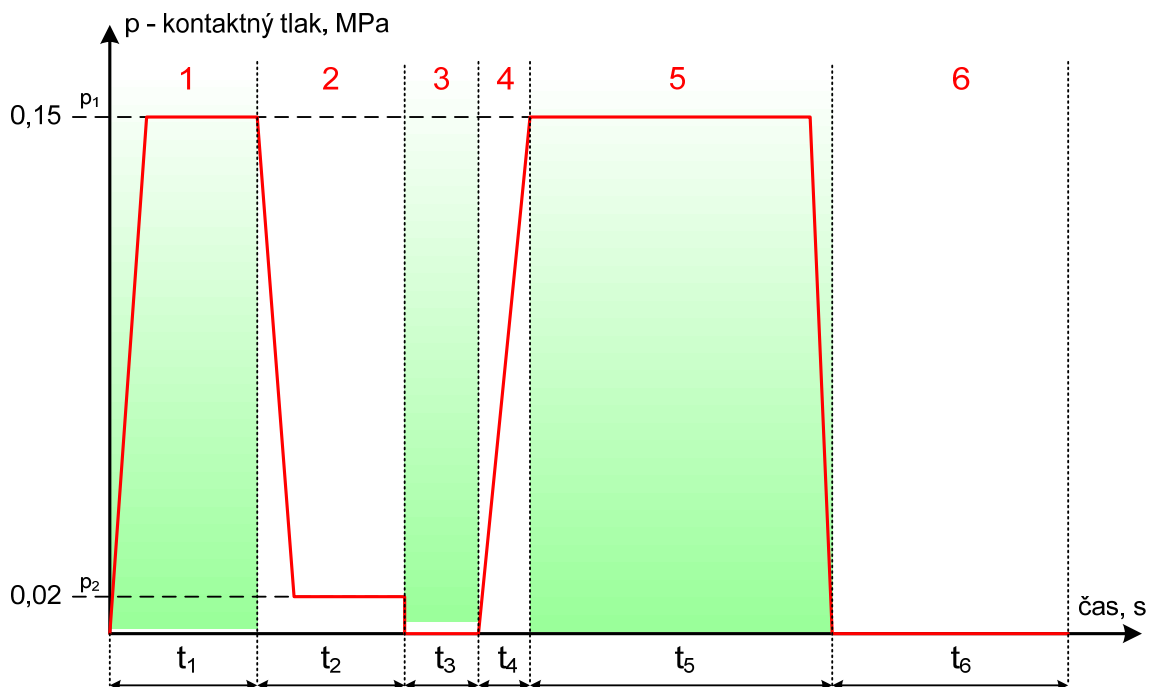
Štandard ISO 11414: 1996 taktiež definuje šírku pretoku zvaru  $B_1$ , ktorá sa dosahuje vo fáze zarovňavania koncov rúr na začiatku ich ohrevu. Je to lepšie kontrolovateľná veličina než výška pretoku  $e$ , nakoľko súvisí užšie so vzájomným osovým pretlačením koncov rúr v priebehu zvarania, než hodnota výšky pretoku  $e$ . Dá sa totiž predpokladať, že osový posuv ich dĺžky  $\Delta x$  je v dobrej korelácii so šírkou

vzniknutého pretoku  $B_I$ . Zároveň určite platí, že  $B_I < \Delta x$ , pretože časť hmoty zváraných koncov rúr sa pretlačí v radiálnom smere vytvárajúc pritom výškový rozmer pretoku  $e$ .

Popísané základné tabuľkové hodnoty zvárania, ktoré predstavujú základné (vstupné) informácie pre následné modifikovanie týchto parametrov v ďalších etapách riešenia úlohy. Základným informačným zdrojom pre vyššie spomenuté informácie boli predovšetkým skúsenosti organizácie VÚSAPL a.s. Nitra, v oblasti zvárania polyetylénových rúr a vytvorená informačná základňa, ktorú poskytuje primárne zdroj (Árendás a kolektív, 2002).

### 1.2.2.3 Zvárací diagram

Zvárací proces metódou na tupo v zmysle spomenutých noriem je rozdelený do šiestich základných fáz ako naznačuje obrázok 3 (Metalnet, 2007).



**Obrázok 3** Zvárací diagram pri zváraní polyetylénu metódou na tupo v zmysle ISO 11414: 1996

#### 1. fáza: Zarovnávanie koncov zváraných rúr (tlakom $p_1$ )

Pripravené konce rúr, po vykonaní prípravných fáz (konce rúr zarovnané, očistené a uchytené vo zváracích čeľustiach), sa pritlačia k ohrevnému telesu (zváraciemu zrkadlu) zohriateho na teplotu  $T_Z$  pôsobením prítlačného tlaku  $p_1$ . Predhriatie tlakom  $p_1$  končí po čase  $t_1$ , za ktorý sa vytvoria na oboch koncoch rúr krúžky (pretoky) nataveného materiálu so šírkou pretoku zvaru  $B_I$ , ktorých šírka závisí

od hrúbky rúry. Táto hrúbka (šírka) je uvádzaná vo zväracích tabuľkách. Odhadnúť šírku pretoku možno aj podľa vzťahu:

$$B_1 = 0,5 + 0,1 en, \text{ mm} \quad (8)$$

$en$  - menovitá hrúbka steny rúry, mm

## 2. fáza: Ohrev

V relatívne krátkom čase sa vytvoria natavené plastové výronky (pretoky), ktorých prítomnosť dokazuje, že sa začal proces spájania. Počas tohto kroku sa musí tlak z hodnoty  $p_1$  uvoľniť na hodnotu  $p_2$ , aby natavený materiál nebol vytlačený, čo by spôsobilo nedostatok polyetylénového materiálu potrebného na kvalitné spojenie. Ak nie je tlak  $p_2$  špecifikovaný v zväracích tabuľkách dodávaných so zväracím prístrojom, odporúča sa nastaviť tlakomer na hodnotu blízke 0, ale nikdy nie na nižšiu ako je hodnota ťahacieho tlaku.

Ak je procedúra počas tohto kroku trvajúceho počas času  $t_2$  správna povrchy sú nepretržite ohrievané, ale nedochádza k zhrubnutiu pretokov. Čas ohrievania bez tlaku  $t_2$  sa dá približne vyjadriť vzťahom:

$$t_2 = 12 en \pm en, \text{ s} \quad (9)$$

Účelom fázy ohrevu je akumulovať dostatočné množstvo tepla vo zväraných koncoch rúr, potrebné na vytvorenie taveniny určitej viskozity  $\eta$ . Aby vznikol zvar požadovanej kvality je pritom dôležité aj zachovanie určitého podielu mechanických vlastností pôvodného materiálu (konzistencie taveniny).

Nakoľko proces zvárania spočíva predovšetkým vo vzájomnej difúzii reťazcov z oboch koncov spájaných rúr a následného vytvorenia Van der Waalsových síl medzi molekulami a atómami reťazcov zväraných materiálov, cieľom by malo byť vytvorenie taveniny čo najnižšej viskozity taveniny  $\eta$ . Pretože v dôsledku poklesu hodnoty viskozity  $\eta$  rastie pohyblivosť reťazcov, musí tiež zároveň klesať difúzny odpor (daný koeficientom vzájomnej difúzie  $D$ ) a tým zároveň aj rásť pravdepodobnosť vzájomného prieniku a zapletenia voľných koncov reťazcov materiálu zvarencov ako ďalšieho predpokladu pevnosti budúceho zvaru. Pri danej teplote závislej tepelnej vodivosti  $\lambda(T)$  vznikajúcej taveniny je množstvo tepla  $Q$  odovzdaného zrkadlom do taveniny priamo úmerné gradientu teplôt  $\Delta T$  medzi povrchom zrkadla a taveninou, ako aj časom ohrevu  $t_2$ . V procese prestupu tepla konvekciou (vedením) si treba uvedomiť nasledovné skutočnosti:

- nie je možné bez obmedzenia zvyšovať teplotu zrkadla  $T_Z$ . V dôsledku obmedzenej a ešte aj s teplotou klesajúcej hodnoty tepelnej vodivosti  $\lambda(T)$  zváraných koncov rúr dôjde k tak prudkému lokálnemu poklesu hodnoty viskozity  $\eta$  taveniny, že táto úplne stratí svoje kríповé vlastnosti potrebné k ďalšiemu navodeniu zváracieho tlaku  $p_1$ . Istým rizikom pri aplikovaní vysokej teploty  $T_Z$  je aj tepelná degradácia materiálu rúr v okolí roviny vznikajúceho zvaru s následkom poklesu mechanických vlastností materiálu v rovine zvaru a jeho blízkom okolí.

- doba ohrevu  $t_2$ , pri danej teplote zrkadla  $T_Z$ , musí rešpektovať určité rozpätie  $\langle t_{2min}, t_{2max} \rangle$ . Na dolnej hranici  $t_{2min}$  zabezpečí ešte prestup dostatočného množstva tepla, kým v opačnom extréme  $t_{2max}$  nespôsobí ešte nežiaduce efekty popísané v predošlom bode.

- aby vo fáze ohrevu nedochádzalo k zbytočnému a predčasnému vytlačaniu taveniny z roviny budúceho zvaru, je snaha zabezpečovať potrebný ohrev materiálu rúr pri takom minimálnom tlaku  $p_2$ , kedy je ešte zabezpečený nevyhnutný kontakt koncov natavovaných rúr s povrchom zrkadla.

- z uvedených skutočností je zrejmé, že pri nižšej teplote zrkadla  $T_{min}$ , resp. vyšších tepelných stratách tepla (najmä sálaním) je potrebné uvažovať s dlhším časom ohrevu  $t_2$  a opačne. Popri tejto skutočnosti možno usúdiť, že tlak ohrevu  $p_2$  na svojej maximálne prípustnej úrovni rozhodne nebude mať takú závažnosť na kvalitu zvaru, ako práve zosúladenie spomínaných dvoch veličín.

- keďže k prestupu tepla dochádza už na konci prvej fázy, do času ohrevu  $t_2$  sa započítava nielen čas pri tlaku ohrevu  $t_2$ , ale aj čas nevyhnutný na pokles prítlačného tlaku z hodnoty  $p_1$  na hodnotu ohrevného tlaku  $p_2$ .

Z uvedených skutočností vyplýva, že doba ohrevu  $t_2$  patrí rozhodne medzi závažné parametre zvárania na tupo.

### **3. fáza: Odstránenie ohrevného telesa**

Po uplynutí času ohrevu  $t_2$  sa konce rúr odsunú, aby sa vybralo ohrevné teleso (zváracie zrkadlo) a rúry sa následne spojili. Tento krok je najkritickejší v celom cykle zvárania. Správne vykonanie tejto fázy je podstatné pre úspešné zvarenie. Rýchlosť odsunutia musí byť čo najvyššia, aby konce rúr neochladli. Čím je hrúbka rúr menšia, tým rýchlejšie musí byť aj odsunutie. V každom prípade sa tento krok musí uskutočniť v čase  $t_3$ :

$$t_3 = 4 + 0,3 \text{ en , s} \quad (10)$$

V laboratórnych podmienkach (uzavretá miestnosť) sa dá predpokladať, že čas  $t_3$  vymedzený na odstránenie ohrevného telesa nie je potrebné v plánovanom experimente zahrnúť medzi závislé premenné, nakoľko v laboratóriu je konštantná teplota okolitého vzduchu a bezvetrie. V prípade voľby dostatočne masívneho profilu rúry sa v dôsledku jej vyššej tepelnej kapacity vykompenzujú prípadné teplotné výkyvy taveniny spôsobené kolísaním hodnoty  $t_3$  do štatisticky zanedbateľnej miery.

#### 4. fáza: Spojovací tlak

Dva konce oddelených rúr sa spoja tlakom rastúcim do hodnoty  $p_1$ . Uzatváracia rýchlosť musí byť limitovaná, aby sa natavený materiál nevytlačil. Táto fáza musí byť ukončená v čase  $t_4$ :

$$t_4 = 4 + 0,4 \text{ en , s} \quad (11)$$

Ak sa stanovený tlak  $p_5$  prekročí, treba určite predísť následnému poklesu, pretože vyústi do podtlaku, ktorý poškodí spojenie.

Fáza navodenia zväracieho tlaku je najťažšie definovateľná fáza zväracieho procesu. Schematické zobrazenie lineárnej závislosti nárastu tlaku z nulovej hodnoty na hodnotu zväracieho tlaku  $p_1$ , nie je totiž s dostatočnou mierou opakovateľnosti v praxi realizovateľné. V dôsledku toho nie sú pomery na začiatku procesu zvärania definované, čím vzniká aj problém vyjadrenia závislosti kvality zvaru voči vytváranému tlaku a teplote zrkadla  $T_Z$ . Netreba pri tom zabudnúť na závislosť teploty taveniny  $T(T_N, t_4)$ . Základným fyzikálnym predpokladom ustálenia tlaku v systéme je dosiahnutie rovnosti medzi pôsobiacou silou čelustí  $F$  a jej reakciou  $F_r$ . Obe spomínané sily sa do zväraného spoja prenášajú prostredníctvom pevného spojenia čelustí so zväranými koncami rúr. V dôsledku rovnosti  $F = F_r$  sa teda v hydraulickom systéme môže vybudovať iba taký tlak  $p$ , ktorý zodpovedá momentálnej reakčnej sile  $F_r$ . Jej hodnota je však závislá od tepelnej a časovo závislej hodnoty modulu zväraného materiálu v tlaku  $E(T, \tau)$  v mieste zvaru a jeho blízkom okolí. Tavenina s počiatočnou teplotou  $T \cong T_N$  a s viskozitou  $\eta$  kladie však v tlaku neporovnateľne menší odpor a tým vyvíja aj menšiu hodnotu  $F_r$ . Správa sa najskôr ako málo stlačiteľná kvapalina v čiastočne uzavretom priestore a je vytláčaná z roviny zvaru v radiálnom i axiálnom smere. Postupne pritom stráca teplotu a tuhne od povrchu smerom ku koreňu zvaru. V každom okamihu jej



jednotkovú odolnosť voči stlačeniu reprezentuje už spomínaný modul v tlaku  $E(T, \tau)$ . Je nutné si uvedomiť:

- V natavených koncoch rúr z nedostatku počiatočnej tlakovej odolnosti (nízka hodnota  $F_r$ ) nie je možné vo všeobecnosti behom vopred určeného času  $t_4$  dosiahnuť želanú hodnotu zväracieho tlaku  $p_l$ , a tým ani hodnotu konečnej sily  $F$ .
- Pri snahe o nastolenie rovnováhy síl  $F = F_r$  v každom okamihu  $\tau \in \langle t_3, t_4 \rangle$  nastáva situácia, že sa prednostne vytlačí časť taveniny s najvyššou teplotou. Reakčnú silu  $F_r$  voči práve navodenej axiálnej sile  $F(\tau)$  potom kladie vrstva taveniny s nižšou a zároveň nedefinovanou teplotou.
- Po vytlačení teplejšej vrstvy následne zvar prebieha v tepelnej vrstevnici materiálu s nekontrolovanou teplotou  $T < T_N$ . Táto skutočnosť znemožňuje vyvodiť exaktné závery ohľadne závislostí medzi pôvodnou indikovanou teplotou zväracieho zrkadla  $T_Z$  a jeho dosiahnutými charakteristikami.

### 5. fáza: Zváranie tlakom

Zvärací tlak sa necháva pôsobiť počas doby  $t_5$ , po uplynutí tohto času sa teplota v zvarovej oblasti zníži z počiatočných cca 220 °C na cca 70 °C. Približná hodnota tlakového zväracieho času  $t_5$  sa vyjadruje v minútach.

$$t_5 = 3 + en, \text{ min} \tag{12}$$

Po dokončení 5. fázy, musí byť vytvorený pretok určitej šírky. Aj keď ochladzovanie zvaru začína už v predchádzajúcej fáze č.4, časovo dlhšia etapa vytvárania kryštalinickej fázy zväraného materiálu pripadá na časový interval  $t_5$ . V zmysle zákonitostí fyziky polymérov zvärací tlak  $p_l$  napomáha tvorbe kryštalinických útvarov, ktoré majú vo všeobecnosti vyššiu hustotu, než amorfná fáza. Poklesom pôvodnej teploty taveniny  $T_N$  a súčasným rastom viskozity  $\eta$  roztaveného materiálu sa však účinok tlaku  $p_l$  postupne znižuje. Z naznačených dôvodov sa ukazuje, že normami predpísaný čas  $t_5$  na úrovni 9-10 minút stačí na vytvorenie konečného stupňa kryštalinity zväraných koncov rúr. Rovnako sa dá logicky predpokladať, že jeho skrátenie by viedlo k zníženiu stupňa kryštalinity a tým aj k poklesu hodnôt mechanických charakteristík konečného zvaru. Doba zvärania tlakom  $t_5$  je síce významným faktorom, ale nedá sa predpokladať, že by sa jej skrátením (predĺžením) dali dosiahnuť prínosy ku charakteristikám zvarov.

O účinkoch zväracieho tlaku  $p_1$  počas fázy zvärania tlakom na kvalitu zvaru pojednáva pomerne podrobne prameň (Eusalenko - Kondratenko, 1992). V zmysle ich záverov sa dá predpokladať, že:

- zvary dosiahnuté účinkom menšieho tlaku  $p_1$ , než by zodpovedalo jeho optimálnej hodnote sa vyznačujú nižšou pevnosťou, resp. vytvorením mikroskopicky pozorovateľného rozhrania v rovine zvaru (tzv. studený spoj),
- pri prekročení optimálnej hodnoty  $p_1$  zase dochádza k tvorbe príliš vysokého podielu kryštalinickej fázy s relatívne veľkými orientovanými útvarmi s následným sklonom zvaru k porušeniu krehkým lomom.

### **6. fáza: Chladnutie - ochranný čas vytvoreného zvarového spoja**

Po uplynutí času  $t_5$  sa uvoľní tlak a vytvorené spojenie sa oddelí od svoriek. Pred uvoľnením spojenia sa odporúča (v zmysle štandardu ISO 11414) počkať ešte počas doby  $t_6$ . Dĺžka tohto času (ochranný čas) v minútach nesmie byť kratšia ako 1,5 násobok hrúbky steny rúry ( $en$ ). Po uplynutí tejto doby by teplota rúry mala byť cca 40 °C a zvar sa už môže vystaviť aplikačnej záťaži.

$$t_6 = 1,5 en, \text{ min} \quad (13)$$

Je zakázané chladieť zvar vodou, stlačeným vzduchom, alebo inými externými prostriedkami za účelom skrátenia ochranného času.

#### *1.2.2.4 Opis zväracieho zariadenia*

V súčasnosti existuje viacero popredných výrobcov zväracích prístrojov (Georg Fisher, Dytron, Gawaplast, Widos a iní). Keďže vytvárané experimentálne pracovisko je založené na zväracom zariadení WIDOS 4600 (obrázok 4), opis zväracieho prístroja je zameraný práve na tento typ.

Zväracie zariadenie WIDOS 4600 sa komerčne používa pre zväranie na tupo s nahrievacím telesom pre rúry a tvarovky z polyolefínov DA 75 – 250. PN 3,2 – 10, pre špeciálne použitie na potrubných mostoch, dielňach a vo výkopoch.

### **1.2.3 Kontrola zvarových spojov**

Norma STN EN 13067 presne predpisuje pravidlá skúšania zväračov a uvádza aj súvisiace normy na vyhodnotenie skúšobných vzoriek. Vizuálnu kontrolu zvarov rieši

norma STN EN 13100-1 *Nedeštruktívne skúšanie zvaraných spojov polotovarov z termoplastov* v časti 1 - Vizuálna kontrola (Tarcsi, 2005).



**Obrázok 4** Zvárací systém WIDOS 4600 (zľava: ohrevné zrkadlo, zarovnávací prístroj, elektrohydraulický ovládací agregát, upínací systém)

Kvalitu zvarového spoja po ochladnutí možno skontrolovať pomocou deštruktívnej, alebo nedeštruktívnej skúšky.

- **Nedeštruktívna skúška** - spočíva najmä na vizuálnej prehliadke spojenia.

V prípade zvarovania na tupo sa vizuálne kontroluje:

- zvarový pretok musí byť rovnomerný po celom obvode spoja,
- prierez v strede pretoku musí byť väčší ako je priemerná hrúbka spájaných častí,
- na vonkajšom povrchu pretoku nesmú byť póry, prachové inklúzie, či iné znečistenia,
- žiadne plytké zlomy,
- žiadny nadmerný lesk na vonkajšom povrchu pretoku.

Ako už bolo uvedené, pretok musí byť rovnomerný okolo celej dĺžky obvodu rúry. Jeho šírka  $B$  v ktoromkoľvek bode zvaru nesmie presiahnuť  $\pm 10\%$  priemernej veľkosti.

$$B = \frac{B_{\min} + B_{\max}}{2}, \text{ mm} \quad (14)$$

- $B$  - priemerná nameraná hodnota šírky pretoku, mm
- $B_{\min}$  - minimálna nameraná hodnota šírky pretoku, mm
- $B_{\max}$  - maximálna nameraná hodnota šírky pretoku, mm

- **Deštruktívna skúška** - spočíva v zistení mechanickej odolnosti spojenia v súlade so skúškou odolnosti ťahom podľa ISO 13953.

## 1.3 Prúdenie tekutín potrubím

Meranie prietoku, pretečeného množstva a rýchlosti prúdenia tekutín patrí v mnohých priemyselných odvetviach k najdôležitejším typom meraní. Využíva sa najmä v petrochemickom, vo farmaceutickom a v spracovateľskom priemysle. Významné zastúpenie má meranie prietoku v energetike a v plynárenstve (Chudý, 1999).

### 1.3.1 Základné definície a jednotky v prúdení tekutín

Kvapaliny, pary a plyny často označujeme spoločným názvom *tekutiny*. Uvedená stať sa bude zaoberať meraním prietoku, pretečeného množstva a rýchlosti prúdenia tekutín.

Pojmom *prietok* rozumieme množstvo tekutiny, pretekajúce za určitú časovú jednotku cez potrubie alebo otvorený kanál. Prietok sa môže vyjadrovať v objemových alebo v hmotnostných jednotkách. Hovoríme potom o objemovom, resp. o hmotnostnom prietoku.

**Objemový prietok**  $q_v$  sa podľa STN ISO 31-3 Mechanika definuje ako podiel objemu látky  $V$ , ktorá prechádza daným prierezom a času  $t$ :

$$q_v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{dV}{dt} \quad (15)$$

- $q_v$  - objemový prietok pretekajúcej tekutiny,  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
- $dV$  - je elementárny objem pretekajúcej tekutiny,  $\text{m}^3$
- $dt$  - je časový interval, s

Jednotkou objemového prietoku je  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . V priemyselnej praxi sa ešte stále objemový prietok často uvádza v  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  prípadne v  $\text{l} \cdot \text{s}^{-1}$ .

**Hmotnostný prietok**  $q_m$  sa podľa tej istej normy definuje ako podiel hmotnosti látky  $m$ , ktorá prechádza daným prierezom a času  $t$ :

$$q_m = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{dm}{dt} = \rho \frac{dV}{dt} \quad (16)$$

- $q_m$  - hmotnostný prietok pretekajúcej tekutiny,  $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
- $dm$  - je elementárna hmotnosť pretekajúcej tekutiny, kg
- $\rho$  - je objemová hustota pretekajúcej tekutiny,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Meradlá založené na vzťahu (15) sa používajú najmä vtedy, keď chceme získať veľmi presný údaj o hodnote prietoku (najčastejšie pri kalibrácii a overovaní druhých

prietokomerov). Ide o absolútnu metódu, pri ktorej sa odmeriava objem pretečeného množstva tekutiny  $\Delta V$  za určitý časový interval  $\Delta t$ .

V praxi prúdi meraná tekutina najčastejšie v uzavretých potrubiach. Pri známej hodnote plošného obsahu prierezu potrubia  $S$  a strednej rýchlosti prúdenia  $\bar{w}$  sa objemový prietok  $q_v$  vypočíta podľa vzťahu:

$$q_v = \frac{dV}{dt} = S \frac{ds}{dt} = S \cdot \bar{w} \quad (17)$$

- $q_v$  - je objemový prietok pretekajúcej tekutiny,  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
- $S$  - je plošný obsah vnútorného prierezu potrubia,  $\text{m}^2$
- $\bar{w}$  - je stredná rýchlosť prúdu tekutiny v danom priereze,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

Obdobne sa dá vypočítať i hmotnostný prietok  $q_m$ :

$$q_m = \frac{dm}{dt} = \rho \frac{dV}{dt} = \rho S \frac{ds}{dt} = \rho S \bar{w} \quad (18)$$

- $q_m$  - hmotnostný prietok pretekajúcej tekutiny,  $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$

Pre pretečené množstvo tekutiny  $V$ , ktoré prejde daným prierezom  $S$  za konečný časový interval  $t_2 - t_1$  a je dané priamym meraním objemu  $V$ , resp. hmotnosti  $m$ , platí:

$$V = \int_{t_1}^{t_2} q_v dt \quad (19)$$

$$m = \int_{t_1}^{t_2} q_m dt \quad (20)$$

- $V$  - je celkový objem pretečenej tekutiny,  $\text{m}^3$
- $m$  - je celková hmotnosť pretečenej tekutiny,  $\text{kg}$

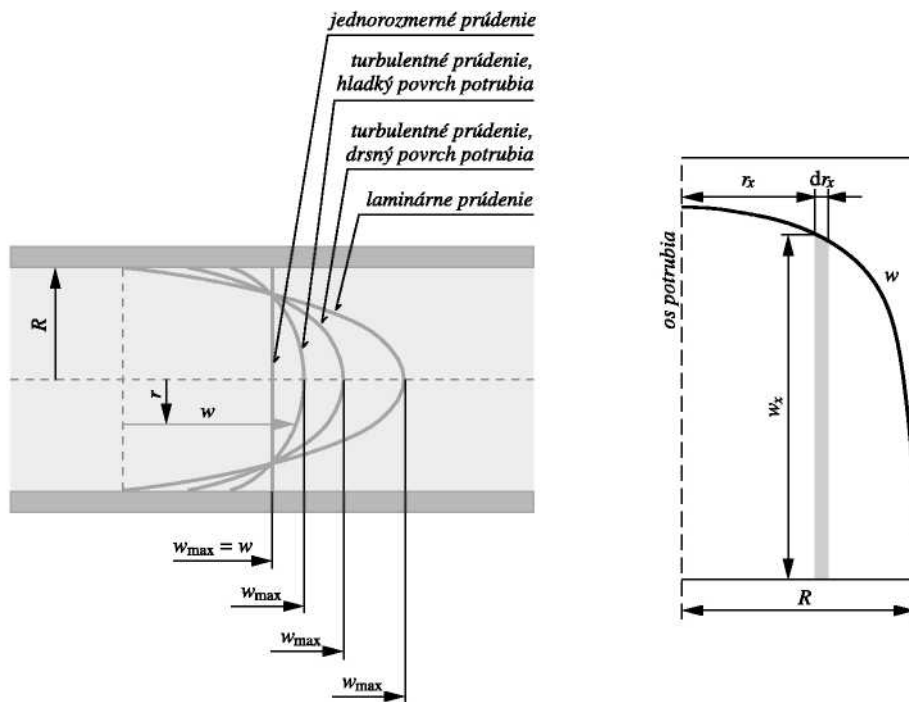
Okamžitá rýchlosť vrstvy prúdu tekutiny  $w$  v danom mieste kruhového potrubia sa dá určiť podľa vzťahu:

$$w = w_{\max} \left( 1 - \frac{r}{R} \right)^{n-1} \quad (21)$$

- $w$  - je okamžitá rýchlosť vrstvy prúdu tekutiny,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
- $w_{\max}$  - je maximálna rýchlosť prúdu tekutiny v danom priereze potrubia,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
- $r$  - je vzdialenosť vrstvy prúdu tekutiny od osi kruhového potrubia,  $\text{m}$
- $R$  - je vnútorný polomer potrubia,  $\text{m}$
- $n$  - je exponent závisiaci od typu prúdenia,

Vo vzťahoch (15) a (16) sa na výpočet používa stredná rýchlosť prúdenia  $\bar{w}$ . Nedá sa totiž predpokladať konštantná rýchlosť prúdenia tekutiny  $w$  v celom priereze potrubia. Takýto stav nastáva iba v ideálnom prípade tzv. jednorozmerného prúdenia

(obrázok 5). V skutočnosti sa rýchlosť prúdu tekutiny  $w$  v celom priereze potrubia, resp. kanála neustále mení podľa istých zákonitostí. Rozloženie rýchlosti pritom závisí od viacerých faktorov. Patria medzi ne tvar profilu potrubia (kanála), vlastnosti jeho povrchu, blízkosť zdroja tekutiny, prítomnosť regulačných prvkov a podobne.



**Obrázok 5** Rôzne typy rýchlostných profilov (vľavo) a priebeh rýchlosti prúdenia v potrubí (vpravo)

Na získanie strednej rýchlosti prúdenia  $\bar{w}$  treba preto stanoviť rýchlostný profil potrubia, resp. kanála (obrázok č. 5 vľavo) Ide o grafické znázornenie nameraných hodnôt rýchlosti prúdenia tekutiny vo viacerých bodoch jedného prierezu (vo vodorovnom alebo v zvislom smere). Na obrázku č.6 je znázornený symetrický rýchlostný profil prúdiacej tekutiny.

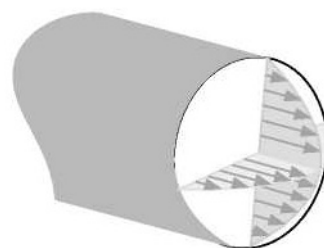
Keď má priebeh rýchlosti prúdenia tekutiny v potrubí kruhového prierezu s vnútorným polomerom  $R$  tvar podľa obrázka 5 vpravo, stredná rýchlosť prúdenia tekutiny  $\bar{w}$  sa dá stanoviť nasledujúcim postupom.

Pre elementárny objemový prietok  $dq_v$  pretekajúci medzikružím so šírkou  $dr_x$ , platí:

$$dq_v = 2 r_x dr_x w_x \quad (22)$$

$dq_v$  - elementárny objemový prietok pretekajúci medzikružím,  $m^3 \cdot s^{-1}$

$dr_x$  - šírka zvoleného medzikružia, m



**Obrázok 6** Symetrický rýchlostný profil prúdiacej tekutiny v rovnom potrubí

$w_x$  - je aktuálna rýchlosť prúdenia v medzikruží,  $m \cdot s^{-1}$

Zo vzťahu (17) potom môžeme určiť strednú rýchlosť prúdenia  $\bar{w}$ :

$$\bar{w} = \frac{q_v}{S} = \frac{\int_0^R dq_v}{\pi R^2} = 2 \int_0^R \frac{r_x}{R} w_x d \frac{r_x}{R} \quad (23)$$

Častice tekutiny môžu v ustálenom stave v zásade prúdiť dvoma spôsobmi (obrázok č.5 vľavo). V prípade *laminárneho prúdenia* sa častice tekutiny pohybujú po rovnobežných dráhach, v prípade *turbulentného prúdenia* dochádza ku kríženiu dráh jednotlivých častíc tekutiny. Medzi týmito dvoma stavmi sa nachádza tekutina v prípade takzvaného *prechodového prúdenia*.

Či je prúdenie laminárne alebo turbulentné sa pre daný tvar potrubia, resp. kanála dá posúdiť podľa hodnoty *Reynoldsovho čísla*. Toto číslo (*Re*) vyjadruje pomer medzi zotrvačnými a trecími silami vo vnútri tekutiny:

$$Re = \frac{D \bar{w}}{\nu} \quad (24)$$

*Re* - Reynoldsovo číslo,

*D* - je charakteristický rozmer, napríklad vnútorný priemer potrubia, hĺbka kanála a podobne, m

$\bar{w}$  - je stredná rýchlosť prúdiacej tekutiny v danom priereze,  $m \cdot s^{-1}$

$\nu$  - je kinematická viskozita,  $m^2 \cdot s^{-1}$

Potom sa v prípade kruhového potrubia dá prúdenie tekutiny v závislosti od hodnoty Reynoldsovho čísla rozdeliť do troch skupín:

- laminárne prúdenie, kde  $Re < 2300$ ,
- prechodové prúdenie, kde  $2300 < Re < 10^4$ ,
- turbulentné prúdenie, kde  $Re > 10^4$ .

### 1.3.2 Princípy merania prietoku a pretečeného množstva

Prístroje na meranie prietoku tekutiny sa nazývajú *prietokomery*, prístroje na meranie pretečeného množstva sa nazývajú *meradlá pretečeného množstva*, podľa konkrétnej meranej tekutiny napr. vodomery, plynomery a podobne. Prístroje na meranie rýchlosti prúdenia tekutiny sa označujú ako *rýchlostné sondy*, v špeciálnom prípade merania rýchlosti prúdenia plynov sa nazývajú *anemometre*.

Na meranie priemernej hodnoty prietoku počas určitej časovej jednotky sa dajú využiť aj meradlá pretečeného množstva, doplnené o časomerné zariadenie. Takto sa dá

zistiť iba hodnota priemerného prietoku za určitý časový interval, nedá sa merať okamžitý prietok.

### **1.3.3 Meradlá na meranie prietoku v uzavretých potrubiach**

Tekutina pretekajúca cez uzavreté potrubie sa nedostáva do styku s okolitým prostredím. Toto potrubie má zvyčajne kruhový prierez. V uzavretých potrubiach sa najčastejšie používajú tieto skupiny meradiel:

- objemové (pulzačné) meradlá pretečeného množstva,
- rýchlostné meradlá pretečeného množstva (vodomery),
- prietokomery využívajúce tlakovú stratu tekutiny,
- prietokomery využívajúce dynamické pôsobenie tekutiny,
- ultrazvukové prietokomery,
- magnetické indukčné prietokomery,
- špeciálne prietokomery,
- hmotnostné prietokomery.

V prípade merania prietoku, resp. pretečeného množstva kvapalín treba ešte brať do úvahy, či je potrubie zaplnené meranou tekutinou úplne alebo iba čiastočne. Niektoré meradlá pracujú správne iba pri úplnom zaplnení potrubia tekutinou. V daných prípadoch je nutné potrubia dokonale odvzdušniť, nakoľko v prípade čiastočného zaplnenia potrubia môže dôjsť k značnému skresleniu merania.

### **1.3.4 Prietokomery využívajúce tlakovú stratu prúdiacej tekutiny**

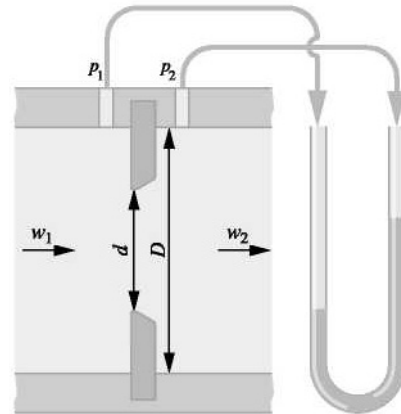
Prietokomery využívajúce tlakovú stratu tekutiny patria pre svoju jednoduchú konštrukciu a obsluhu medzi najpoužívanejšie prietokomery a zabezpečujú viac ako 50 % všetkých meraní prietoku. Medzi ne patria prierezové a kolenové prietokomery. Obidve skupiny využívajú na meranie prietoku tlakovú stratu prúdiacej tekutiny vznikajúcu na škrtiacom orgáne.



#### 1.3.4.1 Prierezové prietokomery

V prierezových prietokomeroch sa meria rýchlosť prúdiacej tekutiny  $w$  a zo známej geometrie potrubia sa stanovuje objemový (resp. hmotnostný) prietok. Rýchlosť prúdiacej tekutiny (resp. jej pretečené množstvo) sa stanovuje na základe zmeny energie tekutiny z tlakovej na kinetickú. K zmene dochádza na škrtiacom orgáne

vloženom do potrubia, kde pri náhlom zúžení prietokového prierezu nastane miestne zvýšenie kinetickej energie. Škrtiace orgány sú pevne zabudované do potrubia kruhového prierezu, ktoré je celkom vyplnené prúdiacou tekutinou. Medzi normalizované škrtiace orgány, ktoré sa stanovujú štátnou normou patrí clona, dýza a Venturiho dýza (trubica). Nenormalizované škrtiace orgány ako dvojité clona, štvrtkruhová clona, segmentová clona, meracia kapilára



Obrázok 7 Pomery na škrtiacom orgáne

a pod. nemajú presne definované rozmery a tvary. Používajú sa najmä na zvláštne účely, napr. v sťažených podmienkach, pri zvýšených nárokoch na prostredie a pod.

Nutnou podmienkou pri použití prierezových prietokomeroch je stály prietok, resp. prietok sa môže meniť iba málo a pomaly v čase. Prierezové prietokomery sa nehodia na meranie pulzujúceho prietoku.

Meranie prierezovými prietokomermi sa používa iba pre tekutiny prúdiace v kruhovom potrubí s vnútorným priemerom  $D$ . Vo všeobecnosti je v potrubí zabudovaný škrtiaci orgán (clona, dýza a podobne) s otvorom s vnútorným priemerom  $d$ , cez ktorý môže tekutina pretekať (obrázok 7).

Pri odvodzovaní prietokovej rovnice škrtiaceho orgánu, ktorý je zabudovaný v potrubí kruhového prierezu, sa vychádza z použitia dvoch základných rovníc hydrodynamiky, a to z Bernoulliho rovnice a z rovnice kontinuity. Ak je rýchlosť prúdiacej tekutiny pred škrtiacim orgánom  $w_1$  a jej tlak  $p_1$ , v mieste najväčšieho zúženia prúdu, ktoré sa nachádza tesne za škrtiacim orgánom, poklesne tlak (za predpokladu platnosti rovnice kontinuity) na hodnotu  $p_2$  a rýchlosť sa zvýši na hodnotu  $w_2$ . Vzťah tlakovej a kinetickej energie vyjadruje *Bernoulliho rovnica* (za predpokladu stacionárneho prúdenia), ktorá je upravená do tvaru:

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho g} = \frac{w_2^2 - w_1^2}{2g} + h_2 - h_1 \quad (25)$$

$p_1, p_2$  - sú celkové (hydrostatické + dynamické) tlaky v daných odberných miestach, MPa

$h_1, h_2$  - sú polohové výšky charakterizujúce umiestnenie škrtiaceho orgánu, m

$g$  - je tiažové zrýchlenie,  $g = 9,80665 \text{ m.s}^{-2}$

$\rho$  - je objemová hustota meranej tekutiny,  $\text{kg.m}^{-3}$

$w_1, w_2$  - sú stredné rýchlosti prúdiacej tekutiny pred a za škrtiacim orgánom,  $\text{m.s}^{-1}$

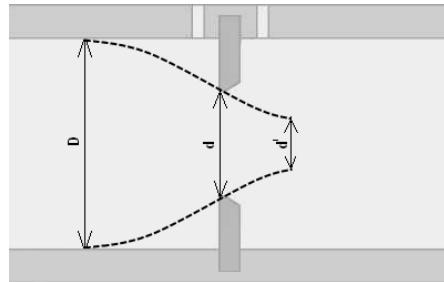
Ak je škrtiaci orgán umiestnený vo vodorovnej polohe, potom  $h_2 - h_1 = 0$ .

Vo zvislej polohe sa dá rozdiel  $h_2 - h_1$  pri malých rozmeroch škrtiaceho orgánu (napr. clone) zanedbať, a potom rovnica (25) prejde do tvaru:

$$w_2^2 - w_1^2 = \frac{2(p_1' - p_2')}{\rho} \quad (26)$$

$p_1', p_2'$  - sú hydrostatické tlaky v daných odberných miestach, MPa

Pri prúdení tekutiny cez škrtiaci orgán molekuly prúdiacej tekutiny narážajú na jeho steny, odrážajú sa od nich a tým tekutinu stláčajú a nútia ju pretekať menším prierezom. Preto sa do výpočtu zavádza koeficient kontrakcie  $\mu$  (dynamickej viskozity tekutiny) a najmenší prierez sa určí zo skutočného prierezu škrtiaceho orgánu, ako naznačuje obrázok 8.



Obrázok 8 Pomery na škrtiacom orgáne

$$S_2' = \mu S_2 \quad \text{resp} \quad d'^2 = \mu d^2 \quad (27)$$

$\mu$  - je koeficient kontrakcie (dynamickej viskozity tekutiny),  $\mu < 1$ ,

$S_2$  - je plošný obsah prierezu škrtiaceho orgánu, ( $S_2 = \pi d^2 / 4$ ),  $\text{m}^2$

Rovnica kontinuity charakterizuje stálosť prietoku tekutiny danými profilmi

$$S_1 \cdot w_1 \cdot \rho_1 = S_2' \cdot w_2 \cdot \rho_2 \quad (28)$$

resp. pre nestlačiteľné prúdenie ( $\rho_1 = \rho_2 = \text{konšt.}$ )

$$S_1 \cdot w_1 = S_2' \cdot w_2 \quad (29)$$

$S_1$  - je plošný obsah prierezu pred škrtiacim orgánom, ( $S_1 = \pi D^2 / 4$ ),  $\text{m}^2$

Z predchádzajúcich rovníc sa dá odvodiť vzťah pre prítokovú rýchlosť tekutiny

v potrubí  $w_1$ :

$$w_1 = \frac{S_2'}{S_1} w_2 = \mu \frac{S_2}{S_1} w_2 = \mu m \cdot w_2 \quad (30)$$

$m$  - je pomer plošných obsahov prierezu škrtiaceho orgánu a potrubia

Pre stanovenie pomerného koeficientu  $m$  platí:

$$m = \frac{S_2}{S_1} = \frac{d^2}{D^2} \quad (31)$$

Teoretická rýchlosť prietoku tekutiny za škrtiacim orgánom  $w_2$  (vychádzajúc z rovníc 26 a 30) sa vypočíta podľa vzťahu:

$$w_2 = \frac{1}{\sqrt{1 - \mu^2 m^2}} \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} \quad (32)$$

Skutočná rýchlosť  $w_2'$  za škrtiacim orgánom však bude menšia, pretože medzi molekulami prúdiacej tekutiny dochádza ku strate energie (trenie a podobne):

$$w_2' = \xi w_2 \quad (33)$$

$\xi$  - je koeficient, ktorý zahŕňa všetky vplyvy, ktoré sa doteraz neuvažovali, ktoré však ovplyvňujú skutočnú hodnotu rýchlosti prúdenia  $w_2$ ,

$w_2$  - je teoretická rýchlosť prúdiacej kvapaliny za škrtiacim orgánom,  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

$w_2'$  - je skutočná rýchlosť prúdiacej kvapaliny za škrtiacim orgánom,  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

Vzťah pre výpočet objemového prietoku  $q_v$  potom nadobudne tvar:

$$q_v = w_2' S_2 = \xi w_2 \mu S_2 = \frac{\pi}{4} \xi \mu d^2 w_2 \quad (34)$$

Po dosadení rovnice (32) do rovnice (34) dostaneme vzťah pre obj. prietok  $q_v$ :

$$q_v = \frac{\xi \mu}{\sqrt{1 - \mu^2 m^2}} S_2 \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} = \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}} \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (35)$$

$q_v$  - je objemový prietok pretekajúcej tekutiny,  $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$

$C$  - je prietokový koeficient,

$\beta$  - je pomer priemerov,

Pre prietokový koeficient  $C$  a koeficient pomeru priemerov  $\beta$  platí:

$$C = \xi \mu \quad (36)$$

$$\beta = \frac{d}{D} \quad (37)$$

$\mu$  - koeficient kontrakcie (dynamickej viskozity tekutiny),

$d$  - je vnútorný priemer škrtiaceho orgánu,  $\text{m}$

$D$  - je vnútorný priemer potrubia,  $\text{m}$

Hmotnostný prietok  $q_m$  sa teda vypočíta podľa vzťahu:

$$q_m = \frac{\xi \mu}{\sqrt{1 - \mu^2 m^2}} S_2 \sqrt{2\rho(p_1 - p_2)} = \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}} \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2\rho\Delta p} \quad (38)$$

Prietokový koeficient škrtiaceho orgánu  $C$  umožňuje zjednodušené vyjadrenie energetických strát a vplyv kontrakcie prúdu. Jeho veľkosť je funkciou Reynoldsovho čísla a geometrie meradla:

$$C = f(\text{Re}_D, \beta^2, D) \quad (39)$$

$\text{Re}_D$  - je Reynoldsovo číslo vzťahnuté k vnútornému priemeru potrubia  $D$

Hodnota koeficienta  $C$  sa stanovuje experimentálne, pre normalizované škrtiace orgány daného typu sa dajú jeho hodnoty odčítať z tabuliek, alebo určiť z normogramu. Tieto hodnoty platia len od medznej hodnoty Reynoldsovho čísla (24), ktoré sa vzťahuje na daný vnútorný priemer potrubia  $D$ . V prípade, že je hodnota Reynoldsovho čísla  $\text{Re}_D$  menšia ako uvádzajú tabuľky, prietokový koeficient  $C$  sa stanovuje osobitne. Zároveň sa zohľadňujú aj korekcie vplyvu viskozity, drsnosti potrubia, ostrosti hrany clony a pod. Požaduje sa konštantná hodnota prietokového koeficienta  $C$  pre daný typ škrtiaceho orgánu v celom meracom rozsahu.

Rovnice (36), (38) platia pre nestlačiteľné tekutiny, teda pre kvapaliny. Ak je meranou tekutinou plyn alebo para, pri ich prechode cez škrtiaci orgán dochádza k tlakovým zmenám, ktoré spôsobujú zmenu hustoty plynu alebo pary. Ďalšie výpočty objemového, resp. hmotnostného prietoku pre plyny a paru vychádzajú zo vzťahov (36), (38), pričom sa zavádza expanzný koeficient  $\varepsilon$ . V tomto prípade pre objemový prietok  $q_v$  platí:

$$q_v = \frac{C \varepsilon}{\sqrt{1 - \beta^4}} \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho}} \quad (40)$$

resp. pre hmotnostný prietok  $q_m$  platí:

$$q_m = \frac{C \varepsilon}{\sqrt{1 - \beta^4}} \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2 \rho \Delta p} \quad (41)$$

$\varepsilon$  - je expanzný koeficient

Expanzný koeficient  $\varepsilon$  vyjadruje mieru stlačiteľnosti tekutiny. Pre kvapaliny je  $\varepsilon = 1$ , pre pary a plyn je  $\varepsilon < 1$ . Určuje sa z normogramov alebo sa odčíta z tabuliek pre daný typ škrtiaceho orgánu. Empirický vzorec na výpočet expanzného koeficienta  $\varepsilon$  je funkciou pomeru priemerov  $\beta$ , podielu tlakového spádu  $\Delta p$  ku tlaku  $p_1$  a izoentropického koeficienta  $\chi$ , teda:

$$\varepsilon = f(\beta^2, \Delta p / p_1, \chi) \quad (42)$$

#### 1.3.4.2 Normalizovaná clona

Normalizovaná clona patrí medzi najjednoduchšie a najčastejšie používané škrtiace orgány pre kruhové potrubia (Jarkovský, 1955). Je to doska so stredovým kruhovým otvorom a ostrou vstupnou nábehovou hranou, zabudovaná kolmo na os potrubia. Os kotúča clony musí byť súosová s osou potrubia. Aby meranie prietoku pomocou normalizovanej clony nebolo zaťažované systematickými chybami, kladú sa na presnosť výroby vysoké požiadavky. Napríklad os clonového kotúča musí súhlasiť s osou potrubia s presnosťou  $0,0015 D (\beta^{-1} - 1)$ .

Pri návrhu clony sa berie do úvahy:

- a) druh meranej tekutiny,
- b) vlastnosti meranej tekutiny,
- c) predpokladaný prietok,
- d) teplota prúdiacej tekutiny,
- e) požadované tlakové diferencie,
- f) dovolené tlakové straty,
- g) priemer potrubia,
- h) materiál potrubia,
- i) predpokladaný druh a materiál škrtiaceho orgánu,
- j) ekonomické požiadavky.

Rozmery clony sa odvodzujú podľa vnútorného priemeru potrubia  $D$ . Normalizovaná clona sa používa pre potrubia s vnútorným priemerom od 50 mm až do 1 m, pri pomere priemerov  $\beta$  od 0,2 až do 0,75 pri rôznych Reynoldsových číslach. Priemer otvoru clony  $d$  musí byť vo všetkých prípadoch  $d > 12,5$  mm.

Miesta na odber tlaku sú zabudované pred a za clonou. Norma povoľuje tri typy odberu tlaku: s prírubovými odbermi, s kútovými odbermi, s odberovými otvormi vo vzdialenosti  $D$  a  $D/2$ . Norma ďalej uvádza podrobnosti o jednotlivých spôsoboch odberu tlaku ako napríklad o veľkosti priemeru otvorov, ich vzdialenosti od clony, podmienkach ich zabudovania a pod.

Nevýhodou normalizovanej clony je spôsobenie pomerne veľkej trvalej tlakovej straty  $\Delta p_t$ , pre ktorú platí:

$$\Delta p_t = (1 - \beta^2) (p_1 - p_2), \text{ Pa} \quad (43)$$

Priebeh tlakov v blízkom okolí clony znázorňuje obrázok 9. Čím je väčší pomer priemerov  $\beta$ , tým je trvalá strata menšia.

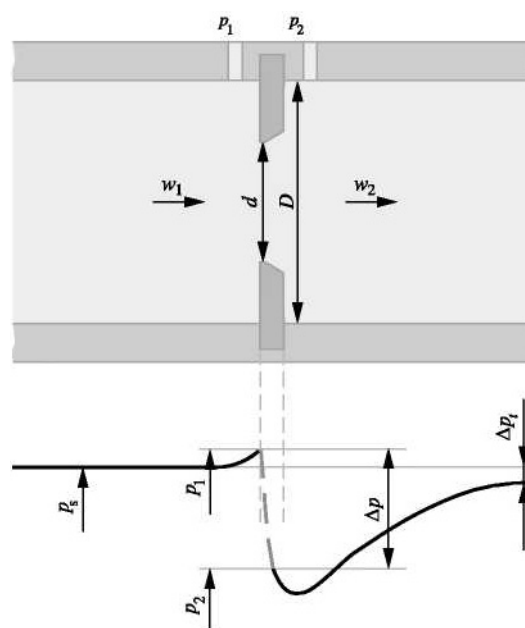
### 1.3.4.3 Tlakové straty a zabudovanie škrtiacich orgánov

Ako už bolo spomenuté, prierezové meradlá využívajú zmenu tlakovej energie prúdiacej tekutiny na kinetickú, ku ktorej dochádza na škrtiacom orgáne. Prúdiaca tekutina tu stráca časť svojej tlakovej energie, pričom dochádza k trvalému poklesu tlaku o hodnotu  $\Delta p$ . Tlaková strata sa definuje ako rozdiel tlakov prúdiacej tekutiny vo vzdialenosti  $1D$  pred škrtiacim orgánom a  $6D$  za ním. Určuje sa experimentálne, uvádza sa v tabuľkách a grafoch, resp. sa dá vyjadriť empirickými vzťahmi. Vzniknutý tlakový rozdiel na škrtiacom orgáne sa najčastejšie meria:

- kapacitnými diferenčnými tlakomermi,
- kvapalinovými diferenčnými tlakomermi,
- plavákovými tlakomermi,
- prstencovými tlakomermi.

Škrtiace orgány sa majú zabudovať do potrubia tak, aby došlo k čo najmenším chybám pri meraní. Preto treba splniť niekoľko požiadaviek:

- potrubie má mať kruhový prierez,
- prúdenie pred škrtiacim orgánom má byť ustálené. Na jeho dosiahnutie sa vyžaduje určitá dĺžka rovného potrubia pred aj za škrtiacim orgánom. Táto dĺžka je stanovená normou pre každý škrtiaci orgán (minimálne v dĺžke  $10D$  pred a  $5D$  za škrtiacim orgánom),
- musí byť zabezpečená súosovosť meradla a osi potrubia,
- podľa veľkosti priemeru potrubia treba zvoliť vhodný typ odberu tlaku,
- treba zvoliť vhodné odberové miesta pre potrubia, v ktorých prúdi pulzujúca tekutina. V prípade plynu sa umiestňujú v hornej časti potrubia, v prípade kvapaliny v dolnej časti potrubia.



Obrázok 9 Priebeh tlakov v okolí clony

## 1.4 Metóda konečných prvkov

Modelovanie metódou konečných prvkov (MKP), alebo FEM (*Finite Element Method*), FEA (*Finite Element Analysis*) predstavuje simuláciu fyzikálneho procesu numerickou metódou konečných prvkov. Zručnosť modelovania je založená na schopnosti posúdiť a vizualizovať fyzikálne správanie sa modelu, ktorá sa postupne získava praxou a kritickým hodnotením vypočítaných výsledkov. Predpokladom úspešnej simulácie procesov je dobrá znalosť MKP, detailné sa oboznámenie sa s fyzikálnou podstatou riešeného problému ako aj rozumná úvaha aký typ výsledkov postačí na kvalitné vyhodnotenie úlohy (Žmindák, 2004).

Z matematického hľadiska MKP chápeme, ako postup na numerické riešenie parciálnych diferenciálnych rovníc. Teda riešenie mnohých fyzikálnych problémov (v našom prípade simulovanie prúdenia tekutiny v okolí zvaru) transformujeme do numerického tvaru a neskôr nám numerické riešenie umožňuje lepšie pochopiť fyzikálny jav. MKP nepracuje priamo s diferenciálnymi rovnicami (ako napríklad MATLAB), ale tieto sú transformované na ekvivalentné variačné tvary. Riešenie získame riešením integrálov cez skúmanú oblasť. Integrály funkcií cez ľubovoľnú oblasť môžeme potom vyčíslit' ako súčet integrálov cez ľubovoľný počet suboblastí, ktoré nazývame konečné prvky. Pokiaľ sú konečné prvky malé, potom vygenerované funkcie dostatočne reprezentujú lokálne správanie sa riešenia. Teda oproti klasickým variačným postupom sa v MKP nehľadajú aproximačné funkcie na celej oblasti riešenia, ale len na jej častiach (konečných prvkoch) so zaručením spojitosti funkcií na hraniciach prvkov.

Možnosť využitia postupov riešenia diskretných úloh aj pre spojité oblasti vedie tiež na jednu z definícií MKP: „Je to približná metóda riešenia úloh kontinua, pri ktorej sa kontinuum rozdelí na určitý počet častí s konečnými rozmermi (na konečné prvky), ktorých vlastnosti určuje určitý počet parametrov; riešenie celého systému, ktorý je tvorený súhrnom jeho prvkov zviazaných v tzv. uzlových bodoch sa vykoná rovnakým postupom ako pri úlohách diskretného charakteru (BENČA, 2004).

### 1.4.1 ANSYS

Dôležitým kritériom pri riešení vzniknutého problému pomocou MKP je výber vhodného programového vybavenia - softvéru. V súčasnosti máme k dispozícii mnoho komerčných programov (ANSYS, NASRAN, ADINA, COSMOS/M,

Pro/MECHANICA, MSC PATRAN a iné). Pre naše potreby sme vybrali program ANSYS, nakoľko počas štúdia na FEI STU sme daný program používali, aj keď len v testovacej verzii a teda máme s ním aspoň základné skúsenosti. Analýza s ANSYSom pozostáva z troch hlavných blokov:

1. Tvorba modelu - materiálové vlastnosti modelu, modelovanie objektu, generovanie uzlov (MESH),
2. Aplikovanie zaťaženií, okrajových podmienok a získavanie riešenia.
3. Prezeranie výsledkov (číselné hodnoty veličín v daných bodoch modelu, grafické závislosti, animácie dejov) a ich interpretácia.

## 1.5 ZHRNUTIE PROBLEMATIKY

Od svojich počiatkov polyetylénový materiál prešiel významným vývojom a mnohé zdroje odhadujú, že takmer 95 % všetkých nových inštalácií plynových rozvodov (s priemerom do 300 mm) v Severnej Amerike bolo realizovaných polyetylénovými rúrami. Výhody, ktoré sa ukázali pri nasadeniach v plynárenskom priemysle viedli k významnému rozšíreniu a používaniu týchto rúr na prepravu akéhokoľvek média, kde sa vyžaduje pevný a zároveň prispôsobivý materiál s dlhou životnosťou. Široké uplatnenie našli tiež pri rozvodoch vody, kanalizácie, zavlažovaní v poľnohospodárstve, ale napríklad aj ako ochrana elektrických a dátových rozvodov.

V prípade potreby nerozoberateľne spojiť polyetylénové potrubia existuje viacero možných spôsobov. Medzi najpopulárnejšie spôsoby patrí zvarenie na tupo, nakoľko je ľahko realizovateľné, lacné a použiteľné v Európe pri rúrach so šírkou steny nad 4 mm.

Princíp tejto technológie spočíva v nahriatí koncov rúr tzv. zváracím zrkadlom, ktorého plochy sú pokryté teflónovou vrstvou, následným spojením pod predpísaným prítlačným tlakom a vychladnutím.

Nevýhodou technológie zvárania na tupo je vznik vonkajších, ako aj vnútorných pretokov. V dôsledku prúdenia tekutiny potrubím dochádza totiž práve na pretokoch k výrazným tlakovým stratám. Pri predpoklade, že vzniknutý pretok sa pri prúdení chová ako škrtiaci orgán, možno pri vyhodnocovaní kvality jednotlivých zvarov, použiť metódu merania prietoku pomocou tlakových strát vznikajúcich pri prúdení tekutiny. Normalizovaná clona resp. pretok ako škrtiaci orgán sú si totiž podobné a spôsobujú tlakové straty.



## **2 CIEĽ DIZERTAČNEJ PRÁCE**

Hlavným cieľom riešenia je optimalizovať proces zvarovania polyetylénových potrubí metódou na tupo, využívaných pri preprave pitnej a teplej úžitkovej vody, sledovaním tlakových strát vznikajúcich pri prúdení prepravovaných tekutín za súčasnej požiadavky dodržania predpisanej kvality zvaru pomocou experimentálneho pracoviska.

V súlade s hlavným cieľom je čiastkovým cieľom návrh a overenie zvaracieho algoritmu podľa novej koncepcie zvarovania na skúšobných zvarených vzorkách.

## **3 METODIKA DIZERTAČNEJ PRÁCE**

### **3.1 Charakteristika pracoviska**

Problematika dizertačnej práce najmä experimentálna časť bude riešená v spolupráci s bývalým Výskumným ústavom spracovania a aplikácie plastických látok, ktorého dlhoročné skúsenosti prevzala na seba spoločnosť VÚSAPL a.s. so sídlom v Nitre. VÚSAPL a.s. sa zaoberá vývojom polymérnych materiálov, ich aplikovaním a spracovaním technológií vytlačovania, vstrekovania a vyfukovania.

VÚSAPL po dohode poskytne nevyhnutné technické, mechanické vybavenie a svoje priestory. Z Katedry elektrotechniky, automatizácie a informatiky na Technickej fakulte SPU v Nitre budú zapožičané nevyhnutné elektrické zariadenia, výpočtová technika a špeciálne meracie prístroje (A/D prevodníky, snímače, atď.).

Kompletné experimentálne pracovisko na zváranie plastových potrubí na tupo bude vyhotovené, merané a prevádzkované v laboratórnych podmienkach. Experimentálne zariadenie na zisťovanie kríповých vlastností bude taktiež prevádzkované v laboratórnych podmienkach a umiestnené v objekte firmy VÚSAPL a.s.

Zariadenie na zisťovanie predbežných tlakových strát bude síce prevádzkované na experimentálnom pracovisku, ale meranie skutočných tlakových strát v plnom rozsahu bude realizované v spolupráci s Výskumným ústavom vodného hospodárstva v Bratislave.

Simulovanie prúdenia tekutín v okolí zvarov zváraných potrubí bude riešené metódou konečných prvkov v spolupráci s Ústavom výrobných systémov a aplikovanej mechaniky STU v Trnave.

Všetky finančné náklady potrebné na vytvorenie, realizáciu, prevádzku a údržbu experimentálnych pracovísk budú pokryté firmou VÚSAPL a.s. a z prostriedkov projektu APVT-99-01420.

### **3.2 Charakteristika súčasného stavu technickej úrovne riešenej problematiky**

Zváranie plastov, podobne ako zváranie kovových materiálov pred niekoľkými desaťročiami je v období rozvoja a hľadania možností širšieho uplatnenia v rôznych priemyselných oblastiach. Tento rozvoj a aplikovateľnosť zvárania sú však podmienené

aj rozširujúcim sa sortimentom vyrábaných polymérnych materiálov a zvyšovaním ich užitkových vlastností rovnako, ako aj zmenami požiadaviek na ich využívanie.

Zváranie vo všeobecnosti predstavuje jednu z metód vytvárania nerozoberateľného spojenia dvoch alebo viacerých konštrukčných prvkov do jedného celku. Vytvorený zvar je pritom schopný prenášať mechanické zaťaženie medzi zvarencami, ktoré je rovné alebo blízke pevnosti zvarencov.

Zvar je rozhranie medzi spojenými zvarovými povrchmi, v rozsahu ktorého dochádza k difúznemu prepletaniu makromolekúl zvarencov. Pevnosť spojenia obstarávajú medziatómové a medzimolekulové súdržné sily, ktoré vznikajú difúziou segmentov makromolekúl v prechodovej vrstve medzi polymérnymi zložkami zúčastňujúcimi sa zvárania. Difúzia nastáva po prechode zvarových povrchov a prídavného materiálu do viskózneho stavu.

Pri zváraní prechádza základný materiál v mieste zvarovej plochy do plastikovaného stavu. Toto nastáva pri zváracej teplote, ktorá je pre každý druh polyméru charakteristická. Na dosiahnutie dokonalého spojenia plastikovaných zvarových plôch je potrebná prítláčna sila, tzv. zvárací tlak. Vzhľadom na nízku teplotnú vodivosť môže zváracia teplota pôsobiť na základný materiál len obmedzený čas, tzv. čas predohrevu a čas ohrevu. Možnosti skrátenia času predohrevu použitím zdroja tepla vyššej teploty sú obmedzené pre pomerne nízku teplotu rozkladu zvarencov. Základné podmienky režimu difúzneho zvárania sú: zváracia teplota  $T_N$ , zvárací čas  $t$  a zvárací tlak  $p$ .

Zváranie na tupo je technikou s využívaním ktorej sa počíta dlhodobu, nakoľko je realizovateľné pri nižších nákladoch oproti iným typom spájania. Nevýhodou zvárania na tupo je vznik pretokov, ktoré spôsobujú nežiaduce tlakové straty a vplyv pretokov na životnosť potrubia, ktorá je skrátená zvýšenou eróziou základného materiálu v okolí pretokov.

Najrizikovejším miestom každého potrubného systému je práve miesto spájania jednotlivých potrubí. Životnosť a teda aj poruchovosť potrubných systémov je potom možné odvodzovať práve z kvality zvaru, jeho vyhotovenia, ak ďalšie možné faktory ako sú kvalita materiálu, kvalita zváracieho aparátu sú parametricky dané.

V krajinách Európskej únie (vrátane Slovenska) existujú viaceré rozdielne technické smernice (predpisy, normy), ktoré sa zaoberajú požiadavkami na vyhotovenie zvarov technikou zvárania. Ako štandard na trhu sa uplatňujú nemecké smernice DSV 2207 *Welding of thermoplastics - Heated tool welding of pipes, pipeline,*

*components and sheets made from PE-HD a DSV 2208 Welding of thermoplastics - Machines and devices for the heated tool welding of pipes, pipeline components and sheets. Z technických noriem implementovaných do slovenskej normalizácie môžeme uviesť ako príklad normy STN EN 12201 *Plastové potrubné systémy z polyetylénu na zásobovanie vodou* a STN EN 12007 *Systémy zásobovania plynom. Plynovody na maximálny prevádzkový tlak do 16 bar vrátane*.*

Normy, resp. smernice, ktoré sa zaoberajú problematikou hodnotenia vplyvu zvaru na charakter prúdenia prepravovaného média absentujú. Turbulentné prúdenie, ktoré vzniká práve v dôsledku existujúcich pretokov na vnútornej strane spájaného polyetylénového potrubia, pritom spôsobuje v oblasti zvaru vypieranie stabilizačného systému, podporuje rast erózie a teda znižuje celkovú životnosť potrubia. V dôsledku pretokov taktiež dochádza ku tlakovým stratám (stratám energie), z čoho vyplýva nutnosť používania výkonnejších čerpadiel a teda automaticky vyšších nákladov na prevádzku. Minimalizovať straty vzniknuté prúdením vody v plastových potrubíach je teda možné dosiahnuť optimalizovaním parametrov zvarovania na tupo (Árendás, 1999; Árendás, 2005).

### **3.3 Vedecké ciele riešenia úlohy**

V súlade so zameraním práce možno stanoviť nasledovné čiastkové ciele:

- charakteristika aktuálneho stavu riešenej problematiky,
- návrh zvaracieho algoritmu podľa novej koncepcie zvarovania,
- návrh blokovej schémy na automatizáciu procesu zvarovania a súvisiaceho meracieho reťazca,
- návrh a realizácia funkčného vzoru experimentálneho pracoviska plastových potrubí zvarovaných na tupo,
- návrh a vývoj zariadení na zisťovanie tlakových strát v plastových potrubíach,
- minimalizácia tlakových strát spôsobených vnútornými pretokmi zvarového spoja,
- simulácia prúdenia kvapalín v okolí vnútorných pretokov,
- návrh režimov zvarovania poskytujúcich vyhovujúce dlhodobé vlastnosti pri minimalizácii vnútorných pretokov,
- zhodnotenie výsledkov jednotlivých meraní, analýza a optimalizovanie minimalizácie prevádzkových strát vznikajúcich prúdením vody a ich možnosti využitia v praxi.

Z meraní a simulácií tlakových strát je možné následne vyvodzovať charakteristiky a závislosti hodnotených parametrov jednotlivých častí experimentov. Pritom netreba v experimentálnych etapách projektu zanedbávať i požiadavky technických predpisov, pokiaľ sú k danej problematike k dispozícii, pričom tieto požiadavky je možno považovať za určité kritéria hodnotenia dosiahnutých výsledkov. Ide predovšetkým o pevnostné vlastnosti zvarových spojov vyhotovených metódou zvárania na tupo. Systematickým vyhodnocovaním dosahovaných parametrov a jednotlivých závislostí, použitím zvolenej vylučovacej metódy je reálne dopracovať sa k cieľu riešenia, ktorým je dosiahnuť také parametre zvárania, pri ktorých bude spojená zostava vykazovať vyhovujúce mechanické krátkodobé a dlhodobé parametre, jej vplyv na energetickú bilanciu bude minimálny a jej životnosť bude vyhovovať požiadavkám praxe s ohľadom na eróziu miesta spoja. Z počiatočných úvah o realizácii experimentálnych meraní je možné odvodiť nasledovné charakteristiky:

- Vplyv tlaku, času a teploty zvárania na veľkosť pretoku  $e, B = f(p, T, t)$
- Vplyv veľkosti pretoku na veľkosť tlakovej diferencie  $\Delta p = f(e, B)$
- Vplyv veľkosti pretoku na rýchlosť prúdenia média potrubím  $v = f(e, B)$

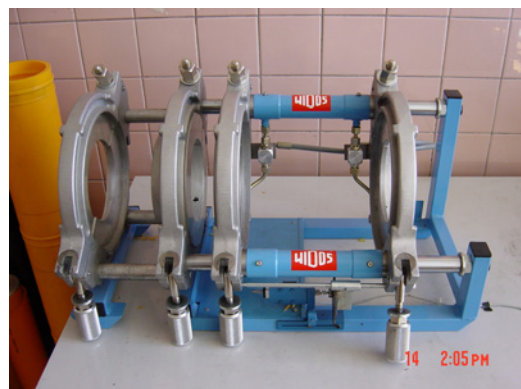
### 3.4 Prístrojové a materiálne zabezpečenie úlohy

#### 3.4.1 Zvárací systém WIDOS 4600

Experimentálne pracovisko bude založené na zváracom zariadení WIDOS 4600, ktoré sa komerčne používa pre zváranie na tupo. Základné teleso (obrázok 10, 11) má na pevnej a pohyblivej strane dvojité upínacie zariadenie s rýchloupínaním, ktoré sa pohybuje pomocou dvoch hydraulických valcov. Dvojité upínacie zariadenie je priskrutkované na podstavec z oceľových rúr.



**Obrázok 10** Umiestnenie zváraných rúr v čelustiach zväračky WIDOS 4600



**Obrázok 11** Upínacie čeluste zväracieho zariadenia WIDOS 4600

Zarovňavací prístroj - hoblík (230 V/1 010 W), ktorý sa zavesí medzi vodiace tyče základného telesa, je opatrený reťazovým pohonom v uzavretom hliníkovom kryte a odvodom triesky smerom von.

Ohrevné teleso - zvaracie zrkadlo (230 V/1 500 W), ktoré sa zavesí medzi vodiace tyče základného telesa, je opatrené termostatickou reguláciou teploty, kontrolkami, spínačom a pripojovacím káblom s elektrickou vidlicou. Na tepelne chránené uloženie ohrevného telesa a zvesenie zarovňavacieho hoblíka je k dispozícii odkladací stojan.

K upnutiu rúr o rozmeroch menších ako DA 250 sú dodávané nasledujúce sady upínacích vložiek pozostávajúcich z 8 polčelústí: DA 75, DA 90, DA 110, DA 125, DA 160, DA 180, DA 200 a DA 225.

Zariadenie sa dodáva tiež v špeciálnych prevedeniach s pracovnými napätiami 110 V a 42 V. Výrobca zariadenia k zvaraciemu zariadeniu dodáva aj nevyhnutné zvaracie tabuľky aj s pracovnými postupmi, pričom odporúča pri procese zvarania dodržiavať nemeckú smernicu DVS 2207.

### **3.4.2 Materiál PE 100**

Polyetylén sa v plynárenstve u nás začal používať v 70-tych rokoch ako materiál z domácej produkcie, deklarovaný ako PE 63, koncom 80-tych rokov sa začal používať materiál PE 80 ( $MRS = 8 \text{ MPa}$ ) a od roku 1997 až do dnešných dní možno pozorovať masové nasadenie materiálu PE 100 ( $MRS = 10 \text{ MPa}$ ;  $MRS$  je minimálna požadovaná pevnosť a vyjadruje dlhodobú pevnosť pri 20 °C nad 50 rokov) po zvážení jeho výhod pri výstavbe plynovodov. Polyetylénové potrubia sa tiež veľmi úspešne používajú v oblasti prepravy vody pre domové prípojky, hlavné distribučné rozvody a rozvody pod vodou. Z vyššie uvedených dôvodov polyetylénové rúry z materiálu PE 100 budú slúžiť ako základný stavebný materiál pri plánovaných experimentoch.

### **3.4.3 Monitorovacie a meracie prístroje**

V rámci inovácie zvaracieho aparátu, pôvodný hydraulický pohon prítlaku zvaraných segmentov bude nahradený pohonom, ktorý bude zrealizovaný lineárnou prevodovkou poháňanou servomotorom. Ako servopohon je navrhnutý synchronný motor TETRA 2,2 85 riadený frekvenčným meničom UNIDRIVE SP 1402 (Hrubý, 2001). Inkrementálny snímač spolu s enkodérom, ktorý je integrovaný priamo v krokovom motore, by mal poskytovať údaje o aktuálnej stave rotora s dostatočnou

presnosťou a citlivosťou. Prínosom novej koncepcie je tiež doplnenie konštrukcie o snímač sily prítlaku segmentov EMS 20 1 kN. Na presné určenie aktuálnej polohy zváracích čelustí bude použitý digitálny odchylkomer TIGRA 0,01 – 50 mm. Snímač sily, snímač polohy a inkrementálny snímač spolu s enkodérom umožňujú realizovať veľkú škálu časových priebehov prítlaku so súčasným sledovaním sily prítlaku (Hrubý, 1999). Použitie PC alebo riadiacej jednotky potom umožňuje voliť, modifikovať a zaznamenávať časový priebeh zvárania a aktuálny stav sledovaných fyzikálnych veličín (Čimo, 2002; Lukáč, 2005). Pri plánovaných pokusoch na jednotlivých experimentálnych pracoviskách sa predpokladá okrem spomínaných zariadení aj nasadenie nasledovných zariadení a prístrojov:

- **Osobný počítač PC.** Celeron 800 MHz, 256 MB RAM, 80 GB HDD (operačný systém MS Windows XP s MS Office 2003 Professional) bude prepájať a riadiť jednotlivé meracie zariadenia. Zároveň sa budú do jeho pamäťových kapacít ukladať všetky namerané dáta, t.j. použije sa aj ako informačná databáza.

- **Softvér.** Na programovanie zvoleného frekvenčného meniča, ktorý sa programuje pomocou „SM Aplicacion lite“ modulu slúži programovací jazyk SYTPRO. Na prehľadnejšie a logickejšie zobrazenie stavu jednotlivých registroch v riadiacej jednotke frekvenčného meniča slúži vizualizačný softvérový nástroj CTSOFT, Vývojárske prostredie MS Visual Studio 2003 bude použité pri vytváraní riadiacich a monitorovacích programoch nevyhnutných v procese automatizácie (Géci, 2007). Softvér určený na simulovanie prúdenia tekutín v okolí zvaru bude vybraný dodatočne.

- **VÚVH.** V rámci zisťovania tlakových strát, ktoré bude prebiehať v spolupráci s Výskumným ústavom vodného hospodárstva v Bratislave (VÚVH), nevyhnutné prístroje (tlakomery, prietokomery, ventily, ...) zapožičia VÚVH.

### 3.5 Vykonanie funkčných skúšok

S ohľadom na zameranie práce budú zrealizované jednotlivé etapy riešenia:

- inovácia zváracieho aparátu s možnosťou presného monitorovania vstupných parametrov procesu zvárania,
- vytvorenie vzoriek skúšobných zvarov,
- hodnotenie mechanických vlastností pri dlhodobých skúškach – zisťovanie kríповých vlastností spojených rúr,
- simulovanie prúdenie tekutín v okolí vytvorených zvarov,

- meranie tlakových strát vznikajúcich pri prúde ní tekutín,
- vyhodnotenie optimálnych parametrov zvárania.

### **3.6 Návrhy na využitie výsledkov**

Optimalizovaním prúde ní kvapalín, zmenou parametrov zvárania metó dou na tupo, sa môžu dosiahnuť energetické úspory v dôsledku menších tlakových strát pri prečerpávaní prepravovaných médií. Zníženie energetickej náročnosti prenosu kvapalín znamená aj zníženie čerpania surovínovej základne. Zlepšením charakteru prúde ní (menšie turbulencie) kvapalín sa dosiahne aj zvýšená životnosť potrubí, takže tým sa oddiali potreba ich výmeny, zníži sa teda aj množstvo odpadu, ktoré predstavuje poškodená časť potrubia.

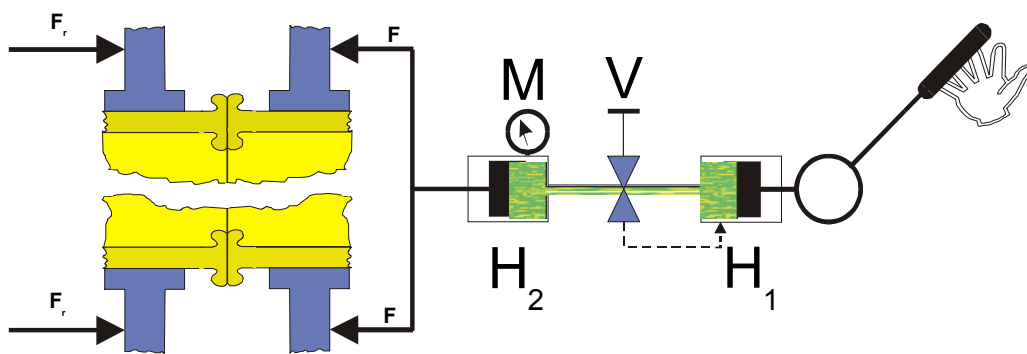


## 4 VÝSLEDKY

### 4.1 Automatizované zváracie zariadenie

#### 4.1.1 Dôvody zmeny koncepcie zváracieho algoritmu

Klasická koncepcia zvárania metódou na tupo (obrázok 12) má svoje nedostatky, ktoré sú uvedené v stati 1.2.2.3. Z tohto dôvodu sa v priebehu riešenia problému optimalizácie procesu zvárania v rámci riešenia projektu APVT-99-01420 pristúpilo k zmene pôvodného zváracieho algoritmu (kroky 4,5 v zmysle ISO 11414: 1996, obrázok 3) na nový zvárací algoritmus, ktorý je zobrazený na obrázku 13. Nové kroky 4,5 vo zváracom diagrame sú založené na empirickom postupe, ktorého koncepcia vychádza zo schémy priebehu zvárania v zmysle obrázka 14.



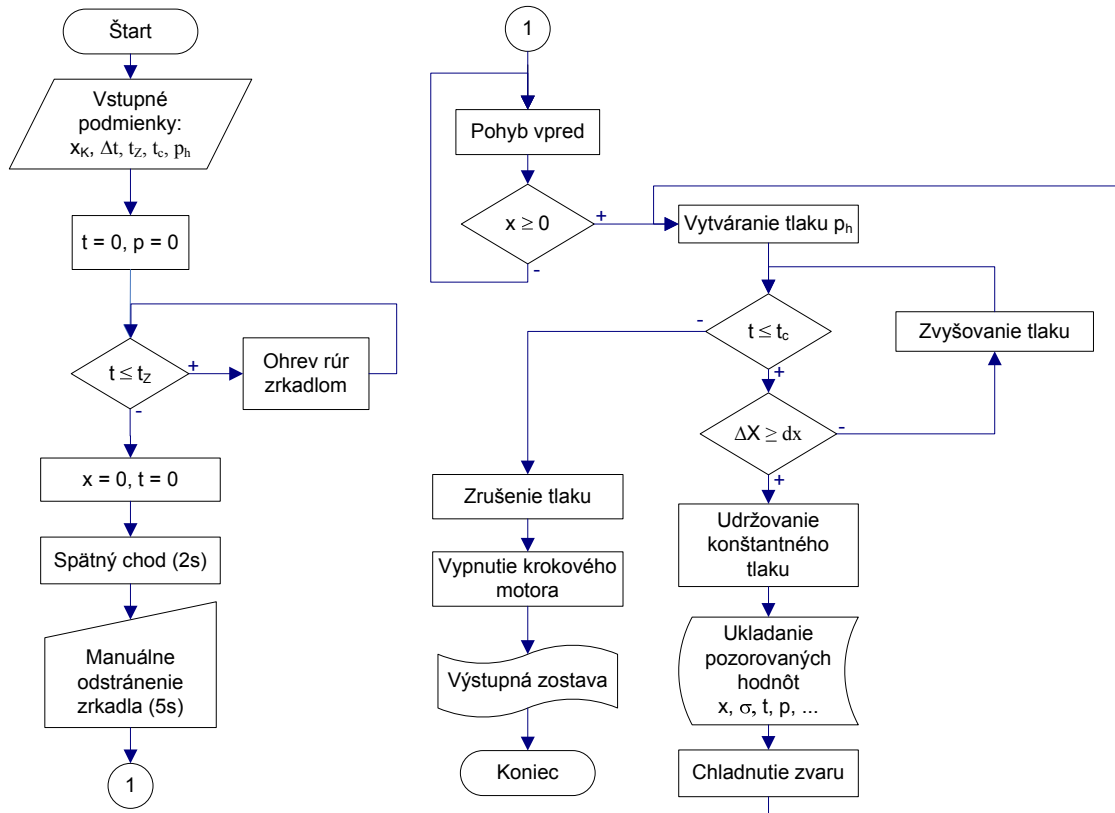
Obrázok 12 Koncepcia pôvodného zváracieho zariadenia s hydraulickým pohonom

#### 4.1.2 Upravená koncepcia zváracieho algoritmu

Pri návrhu novej koncepcie sa vychádzalo z nasledovných kritérií:

- zabezpečenie opakovateľnosti a reprodukovateľnosti procesu zvárania,
- úplná možnosť kontroly stláčania čelusti zváračky v každom okamihu priebehu zvárania,
- dosiahnutie dostatočnej citlivosti stláčacieho mechanizmu tak, aby sa dala regulovať požadovaná hodnota prítlačnej sily  $F$ ,
- použitie akčných prvkov, ktoré zabezpečia dostatočnú veľkosť stláčacej sily,
- možnosť nastavenia jednotlivých parametrov zvárania ( $\Delta t$ ,  $p_1$ ),

- možnosť zobrazenia a záznamu vybraných parametrov zvárania v reálnom čase (napr.: hodnota aktuálnej stláčacej sily  $F$ , hodnota stlačenia rúr ( $\Delta x$ )).

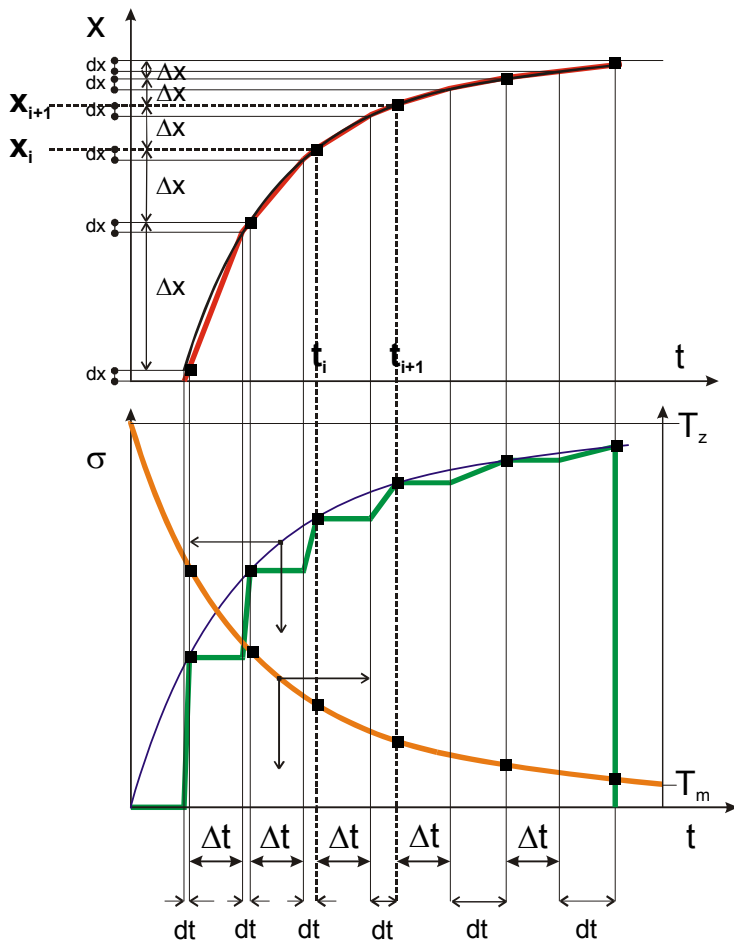


Obrázok 13 Algoritmus zvárania plastových rúr

### 4.1.3 Popis zváracieho zariadenia

Po definovaní a analýze vyššie uvedených kritérií sa pôvodný zvárací systém WIDOS 4600 uvedený v stati 3.4.1 pozmenil.

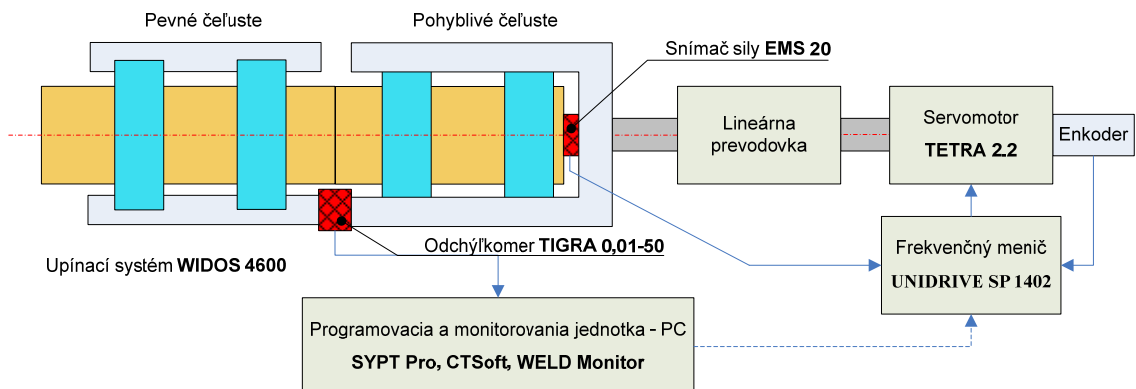
Pôvodné zváracie zrkadlo zváračky WIDOS 4600, ktoré slúži pre ohrev koncov rúr ako aj zarovnávací prístroj (hoblík), ktorý slúži na zarovnanie koncov odrezaných rúr zostali zachované bezo zmien.



**Obrázok 14** Časový priebeh napätia  $\sigma$ , absolútnej krípovej deformácie  $x$  a teploty taveniny  $T$  v priebehu neizotermického procesu zvarovania

#### 4.1.3.1 Bloková schéma zvaracieho zariadenia

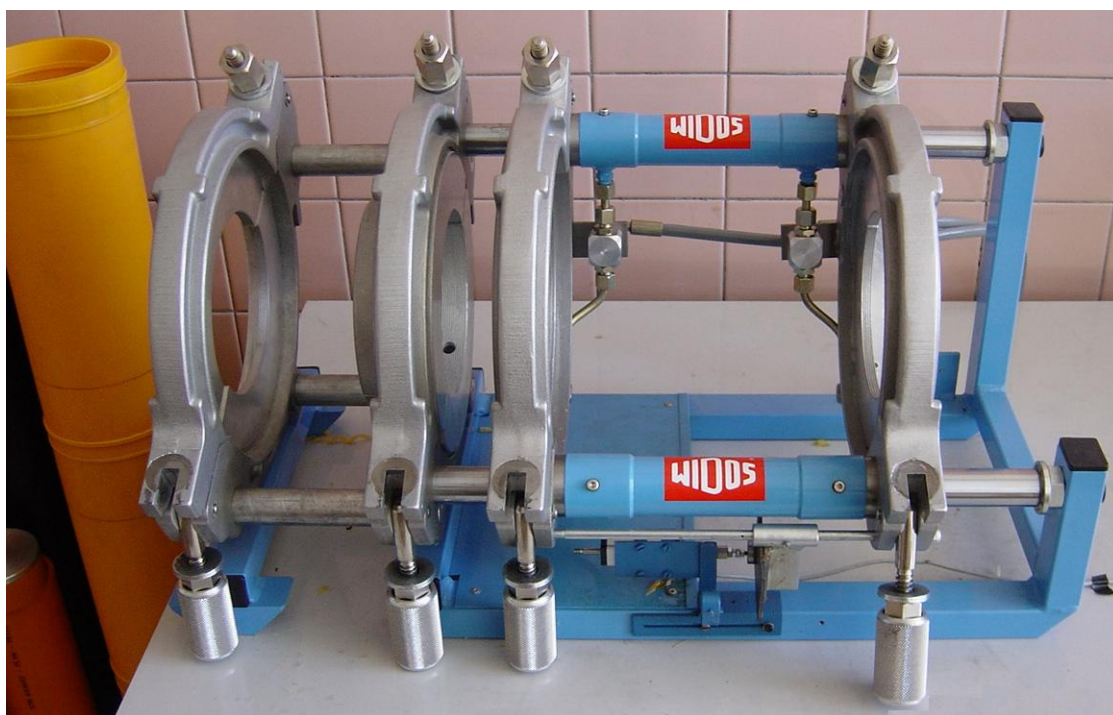
Bloková schéma novovzniknutého experimentálneho zvaracieho pracoviska je zobrazená na obrázku 15.



**Obrázok 15** Konceptia nového zvaracieho zariadenia

#### 4.1.3.2 Upínacie zariadenie

Upínacie zariadenie vychádza zo zváracieho systému WIDOS 4600. Hydraulické valce (na obrázku 16 ešte zobrazené) pochádzajúce z pôvodného systému boli nahradené guľôčkovými ložiskami. Použitie guľôčkových ložísk odstránilo nežiaduci odpor trenia vznikajúci v hydraulických valcoch. Samotné upínacie čeľuste zostali zachované.



**Obrázok 16** Upínacie zariadenie, pevné čeľuste vľavo, pohyblivé čeľuste vpravo

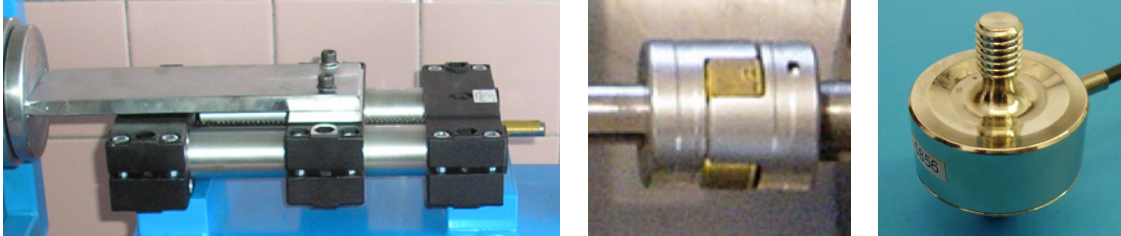
#### 4.1.3.3 Pohonový mechanizmus

Hydraulický pohon, ako výkonový prvok pôvodného zváracieho zariadenia, ktorý zabezpečoval stláčanie upínacích čeľusti, bol nahradený navrhnutým synchronným motorom TETRA 2.2 v kombinácii s frekvenčným meničom UNIDRIVE SP 1402 od firmy EMERSON a.s. Control Techniques (obrázok 17).



**Obrázok 17** Krokový motor TETRA 2.2 (vľavo), frekvenčný menič UNIDRIVE SP 1402 (v strede) a plastový rozvádzač - istenie motora (vpravo)

Krútiaci moment je vyvolaný krokovým (synchronným) motorom, ktorý je spojený s lineárnou prevodovkou cez pružnú spojku (obrázok 18). Lineárna prevodovka EP 40x300 prevádza krútiaci moment na axiálnu silu  $F$ , ktorá zabezpečuje stláčania upínacích čelustí. Použitie pružnej spojky eliminuje prudké zábery krokového motora a zároveň slúži aj ako mechanická poistka.



**Obrázok 18** Lineárna prevodovka (vľavo), pružná spojka (v strede) a snímač sily (vpravo)

#### 4.1.3.4 Snímače a ovládací panel

Hodnota axiálnej sily  $F$  je snímaná tenzometrickým snímačom sily EMS 20 (obrázok 18 vpravo). Rozsah hodnôt použitého snímača je od 0 do 1000 N. Snímač pre svoju činnosť potrebuje napájanie 10 V DC, ktoré je cez prevodník 24/10 V odoberané z výstupov frekvenčného meniča. Analógový výstup snímača cez spomínaný prevodník je privádzaný na vstup frekvenčného meniča ako spätná väzba pre riadiaci program.

Aktuálna poloha pohyblivých čelustí je monitorovaná pomocou odchylkomera TIGRA 0.01-50 (obrázok 19 vľavo). Okamžitá poloha odchylkomera slúži na indikovanie hodnoty stlačenia  $\Delta x$  taveniny zváraných koncov rúr. Snímač umožňuje merať až do hodnoty  $50 \pm 0.01$  mm. Plní funkciu iba monitorovacieho (pasívneho) prvku, nie je potrebný pre samotný proces zvárania, ale je nevyhnutný pre analýzy a spracovanie výsledkov. S nadriadeným riadiacim PC komunikuje pomocou rozhrania RS232C.



**Obrázok 19** Odchylkomer TIGRA 0.01-50 (vľavo) a ovládací panel zväračky (vpravo)

Ovládací panel (obrázok 19 vpravo) slúži na ovládanie zväracieho zariadenia. Pomocou neho je možné zapnúť/vypnúť/núdzovo vypnúť frekvenčný menič, zvoliť automatický/manuálny režim zvárania, manuálne ovládať polohu čelustí ako aj nastaviť

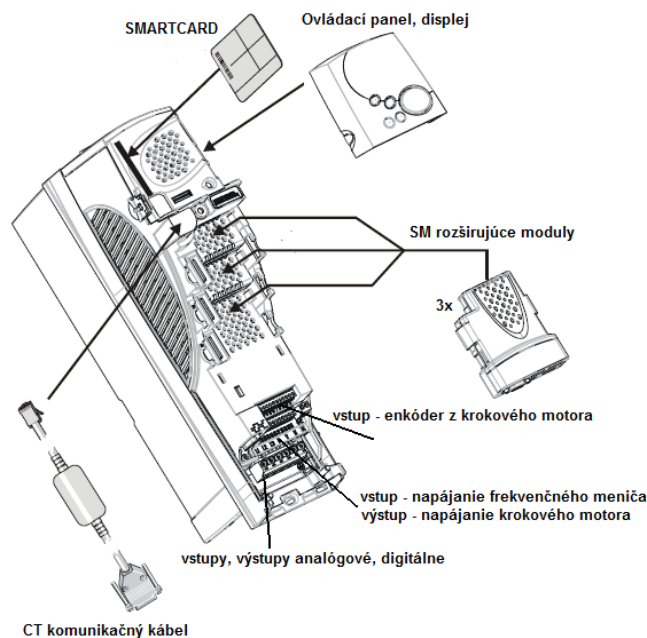
maximálnu prítlačnú silu čeľustí  $F_{zmax}$ . Pomocou LED diód sú jednotlivé zvolené stavy signalizované.

Ovládací panel obsahuje nasledovné ovládacie a indikačné prvky:

1. LED indikácia stavu zapnutia/vypnutia frekvenčného meniča
2. LED indikácia zvolenia voľby automatického režimu zvárania
3. LED indikácia zvolenia voľby manuálneho režimu zvárania
4. Spínač voľby manuálneho režimu zvárania
5. Spínač voľby automatického režimu zvárania
6. Nastavenie hodnoty maximálnej sily stláčania čeľustí  $F_{zmax}$  potenciometrom
7. Spínač - zapnutie/vypnutie frekvenčného meniča
8. STOP tlačidlo - bezpečnostný prvok - okamžité odpojenie napájania zväračky
9. Spínač v prípade voľby manuálneho režimu - posun čeľustí vzad
10. Spínač v prípade voľby manuálneho režimu - posun čeľustí vpred

#### 4.1.3.5 Zapojenie a ovládanie frekvenčného meniča UNIDRIVE SP 1402

Frekvenčný menič je napájaný cez pomocný plastový rozvádzač (obrázok 17) z verejnej rozvodnej siete 3x400/230 V, 50 Hz. V rozvádzači je inštalovaný hlavný napájací spínač ako aj istiaci prvok 3x10A triedy B.



**Obrázok 20** Frekvenčný menič UNIDRIVE SP 1402 – zapojenie SM modulov, vstupov/výstupov

Vlastnosti frekvenčného meniča UNIDRIVE SP 1402:

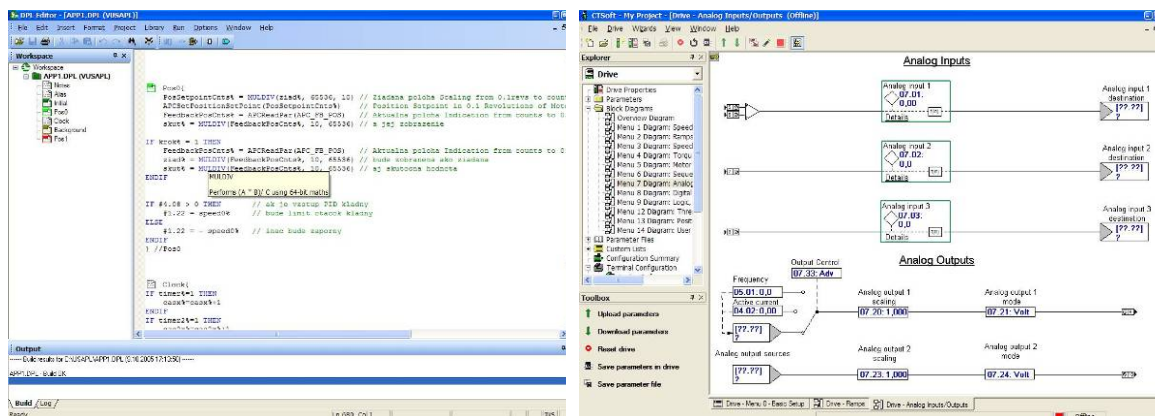
- zdroj energie pre krokový motor, pre pomocné obvody 24 V DC,



- odolný voči skratom a preťaženiam (silový obvod, riadiaci obvod, pomocné obvody),
- uzavretá slučka riadenia pomocou enkodéra zabudovaného priamo v krokovom motore,
- možnosť rozšírenia riadiacej jednotky o ďalšie moduly SM (SM Lite modul, SM Ethernet modul, SM aplikačný modul) nutné pre jeho programovanie cez PC,
- komunikácia s PC pomocou sériového portu RS 232 C, USB portu 2.0 (pomocou prevodníka PL 2303), LAN, WI-FI, ...
- vnútorná nezávislosť od PC (vlastný operačný systém).

Frekvenčný menič môže spolupracovať s krokovým motorom nasledovnými spôsobmi:

- ručné riadenie pomocou analógových, alebo digitálnych vstupov/výstupov,
- riadenie zmenou registrov v jednotlivých menu, zadávanie do registrov pomocou displeja priamo na motore,
- automatické riadenie cez vytvorený a nahratý program pomocou programu SYPTPro (nezávislé od PC, obrázok 21 vľavo),
- ručné riadenie pomocou vizualizačného prostredia CTSOft (závislé na PC),
- kombinovanie jednotlivých postupov.

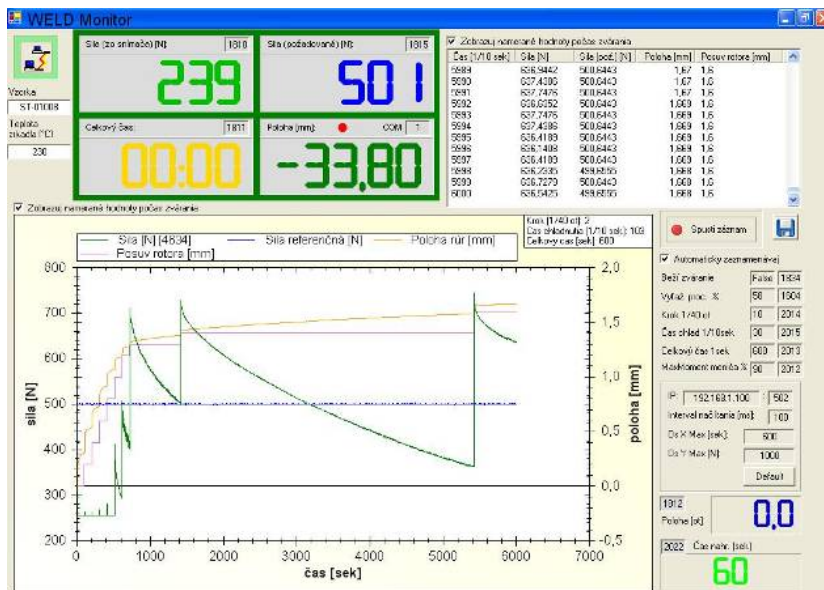


**Obrázok 21** SYPTPro - DPL editor (vľavo), vizualizačný softvér CTSOft (vpravo)

Riadiaca jednotka frekvenčného meniča sa programuje pomocou SM aplikačného modulu a programuje sa pomocou vlastného programovacieho jazyka SYTPRO. Stav jednotlivých registrov v riadiacej jednotke frekvenčného meniča je možné prezeráť, ale aj podľa potreby konfigurovať priamo vo frekvenčnom meniči pomocou zabudovaného displeja a ovládacích prvkov. Na prehľadnejšie a logickejšie zobrazenie slúži vizualizačný softvérový nástroj CTSOft (obrázok 21 vpravo).

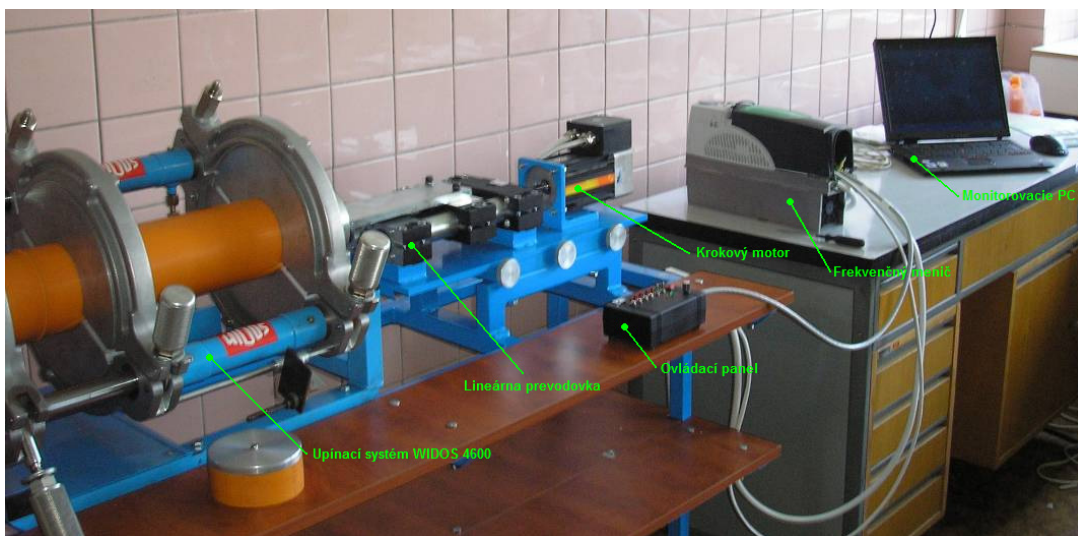
#### 4.1.4 Monitorovanie činnosti zváracieho zariadenia

Zvárací systém je plne automatizovaný, nepotrebuje k svojej práci žiadne ďalšie pomocné systémy. Ak je ale potrebné zaznamenávať samotný priebeh procesu zvárania, ktorý je nevyhnutný pre ďalšie analýzy, je už nutné pripojiť monitorovaciu jednotku (PC). Na monitorovanie procesu zvárania je určený program WELD Monitor. Aplikácia WELD Monitor (obrázok 22) bola naprogramovaná v programovacom prostredí MS Visual Studio 2003 a umožňuje online sledovať dáta z procesu zvárania. Dáta je možné zobrazovať buď vo forme tabuliek, grafov alebo exportovať do súboru \*.csv, ktorý sa dá priamo importovať do excelu a následne štatisticky spracovávať.



Obrázok 22 Monitorovací program WELD Monitor pre sledovanie a záznam procesu zvárania

Celkový pohľad na vytvorené experimentálne pracovisko na zváranie PE rúr metódou na tupo (obrázok 23).



Obrázok 23 Experimentálne pracovisko na zváranie plastových rúr na tupo



## 4.2 Optimalizácia procesu zvárania na tupo vzhľadom na vybrané vlastnosti zvarov

### 4.2.1 Špecifikácia použitých vzoriek rúr a podmienok experimentu

Vzorky rúr, ktoré boli určené pre plánované experimenty boli z materiálu PE 100. Jedná sa o materiál na báze polyetylénov HDPE tzv. tretej generácie. Bližší opis použitého materiálu je uvedený v stati 1.1.1.

Rúry pochádzali od firmy BP SOLVAY POLY ETHYLENE EUROPE (neskôr pôsobiaca pod názvom INEOS POLYOLEFINS) (Belgicko), pričom sa komerčne na trhu predávajú pod označením Eltex TUB 121 a Eltex TUB 125. Typ rúr Eltex TUB 121 má čiernu farbu a prednostne sa používa v tlakových rozvodoch pitnej vody. Typ rúr Eltex TUB 125 má rovnaké chemické zloženie, ale jeho farba je namiesto čiernej oranžová. Spomenutý typ sa používa v plynárenských potrubných sieťach.

Rozmerovo boli rúry typu DN 110 SDR 11, t.j. ich vonkajší nominálny priemer *DN (diameter nominal)* bol 110 mm a parameter štandardizovaný rozmerový pomer *SDR (standard dimension ratio)* bol 11.

Pri definovaní premenných vstupných parametrov sa uvažovalo s nasledovnými vymedzujúcimi a okrajovými podmienkami:

- experimentálne pracovisko na zváranie rúr sa prevádzkuje v laboratórnych podmienkach s udržiavanou teplotou ( $T_{prac} = 20\text{ °C}$ ). Nie sú teda zohľadnené poveternostné vplyvy (kolísanie teploty, vlhkosti) v reálnych podmienkach a ani vplyv infračervenej zložky slnečného žiarenia na tepelné a dilatačné pomery zvarencov v priebehu zvárania,
- navrhnuté zvaracie pracovisko je prototyp a je zhotovené iba na použitie v laboratórnych podmienkach,
- v konštrukcii zvaračky sa neuvažuje s vplyvom osových síl rúr. V reálnych podmienkach (dĺžka rúr 6 - 12 m) osovú silu z dôvodu pôsobenia momentov vlastnej tiaže (hmotnosti) nie sú zanedbateľné.

### 4.2.2 Vyhodnocovanie výsledkov pomocou aplikácie MESOS

V rámci riešenia projektu APVT-99-01420 pri vyhodnocovaní plánovaných pokusov bol používaný softvér MESOS. Aplikácia MESOS (*Methode zur empirisch-statistischen Offline-Systemanalyse*) od SKZ (*Süddeutsches Kunststoff-Zentrum*)

Würzburg (Nemecko) tvorí verifikovaný prostriedok na spoľahlivé vyhodnotenie riešeného optimalizačného problému. Program vychádza z matematického modelu vybraného typu plánu pokusov. Jeho princíp a bližší opis je uvedený v literatúre (MESOS, 2010). Stručný spôsob jeho použitia:

- a) Návrh plánovaného pokusu. Špecifikácia vstupných parametrov pokusu a rozpätia jeho hodnôt (teplota zrkadla  $T_z$ , čas ochladzovania zvaru  $\Delta t$ ).
- b) Po určení vstupných parametrov sa vyberie najvhodnejší typ pokusu, čím sa zároveň určí aj kombinácia hodnôt vstupných parametrov (tabuľka 11). V našom prípade bol vybraný typ pokusu 2<sup>2</sup>. Realizáciou zvoleného plánovaného pokusu sa dajú získať regresné vzťahy medzi nezávisle premennými veličinami s ľubovoľným počtom  $j$  závisle premenných veličín (odoziev) typu  $Y_j=f(T_z, \Delta t)$ .
- c) Vytvorenie rozpisu plánovaného pokusu. Program po vytvorení rozpisu plánovaného pokusu vytvorí maticu prázdnych prvkov (A1-A4, I5-I8, Z), ktorá sa v priebehu postupu experimentov naplňa výsledkami jednotlivých odoziev priradených k jednotlivým kombináciám hodnôt faktorov.
- d) Zadanie typu požadovaného výsledku (maximum, minimum, lokalizovanie extrému, stanovanie tvaru príslušnej regresnej závislosti).
- e) Spustenie optimalizačného výpočtu, v prípade ak je matica naplnená výsledkami jednotlivých odoziev.
- f) Analýza výsledkov (výber z možností):
  - regresné rovnice závislosti jednotlivých odoziev  $Y_j$  od hodnôt faktorov (vstupných parametrov) plánovaného pokusu,
  - štatistické charakteristiky,
  - grafické zobrazenia roviny odozvy v závislosti od hodnôt vstupných parametrov so zvýraznením lokálnych extrémov,
  - superponované zobrazenie rovín všetkých uvažovaných odoziev v podobe ako bol zadaný optimalizačný cieľ.

Po dokončení posledného kroku optimalizačného výpočtu je už k dispozícii konečný výsledok, ktorý postačuje na jednoznačné definovanie hodnôt vstupných parametrov zvarovania ( $T_z, \Delta t$ ) voči sledovaným hodnotám výstupných charakteristík zvarov.

S ohľadom na skutočnosti získané z analýzy poznatkov o procese zvarovania (kapitola 1.2.2) a navrhovanú koncepciu zvarovania (kapitola 4.1.2) sa dospelo k záveru,

že proces zvárania sa dá ovládať zmenami hodnôt teploty zrkadla  $T_z$  a času ochladzovania zvaru  $\Delta t$ , ktoré sú zároveň definované ako vstupné faktory v plánovanom experimente. Ako výstupné veličiny (odozvy  $Y$ ) boli vybrané:

- dlhodobý zvärací koeficient  $f_s$
- výška vnútorného pretoku  $h$
- relatívne prietokové číslo  $F$

V zmysle vyššie uvedeného bol pomocou aplikácie MESOS zostavený plán pokusov, ktorý je uvedený v tabuľke 11.

**Tabuľka 11** Plán pokusov plánovaného experimentu navrhnutý aplikáciou MESOS

Označenie pokusu MESOS	Faktory plánovaného pokusu		Označenie pokusu VÚVH	Poradové číslo	
	$X_1=T_z, ^\circ\text{C}$	$X_2=\Delta t, \text{s}$			
Axiálne body	<b>A1</b>	280	10	VH – 001	1
	<b>A2</b>	280	0,5	VH – 002	2
	<b>A3</b>	180	10	VH – 003	3
	<b>A4</b>	180	0,5	VH – 004	4
Faktorové body	<b>I5</b>	247	6,8	VH – 005	5
	<b>I6</b>	247	3,7	VH – 006	6
	<b>I7</b>	213	6,8	VH – 007	7
	<b>I8</b>	213	3,7	VH – 008	8
Centrálny bod	<b>Z</b>	230	5,3	VH – 009	9

#### 4.2.3 Postup zhotovenia zvarov

Stručný postup zhotovenia vzoriek zvarov pomocou upravenej koncepcie zväracieho algoritmu (obrázok 13):

1. Definovanie hodnôt riadených parametrov zvárania. Jednotlivé parametre sa zadávajú priamo do registrov v menu frekvenčného meniča s výnimkou hodnoty  $F_{zmax}$ , ktorá sa nastavuje potenciometrom na ovládacom paneli zväračky
  - doba ochladzovania,  $\Delta t$  v sek. z tabuľky 11
  - teplota zrkadla  $T_z$  °C z tabuľky 11
  - krok stlačenia  $\Delta x = 0,2$  mm
  - doba nahrievania zrkadlom  $t_2 = 100$  s
  - celková doba zvárania  $t_c = 600$  s
  - maximálna prítlačná sila  $F_{zmax} = 500$  N
2. Upevnenie jednotlivých koncov rúr do čelustí zväračky a ich očistenie.
3. Zarovnanie uchytených koncov rúr pomocou zarovnávacieho prístroja (hoblíka). Zväračka sa prepne ovládacím panelom do manuálneho ovládania čelustí vpred/vzad. Vypnutý hoblík sa vloží medzi obrábané konce rúr a posunom vpred sa dotlačí pohyblivý koniec rúr na zapnutý hoblík tak, aby došlo k ofrézovaniu oboch

- koncov rúr. Po dokončení procesu zarovňavania koncov rúr sa vypnutý hoblík odloží bezpečne do odkladacieho stojana.
4. Nastavenie nuly. Posunom vpred sa zarovnané konce dotlačia k sebe tak, aby došlo k ich jemnému dotyku. Následne sa stlačením tlačidla nulovať na odchytkomeri TIGRA 0.001-50 vynuluje ukazovateľ vzájomnej polohy koncov rúr.
  5. Opätovným stlačením manuálneho ovládania na ovládacom paneli sa vynuluje poloha rotora krokového motora. (Poloha rotora sa cez zabudovaný enkodér v krokovom motore prenáša do príslušného registra v menu frekvenčného meniča a program WELD Monitor ju automaticky načíta.) Týmto úkonom sa zvaračka v prípade automatického režimu dostane do nastavenej východiskovej polohy.
  6. Ohrev. Manuálnym ovládaním - posun vzad sa čeluste oddialia, vloží sa zohriate ohrievacie teleso (zrkadlo) vyhriate na požadovanú teplotu  $T_z$ . Posunom vpred sa tlačia čeluste až kým sa nedosiahne požadovaná hodnota prítlačnej sily  $F_{zmax} = 500$  N. Zohriate zrkadlo ostáva v kontakte so zváranými koncami rúr počas celej predpísanej doby  $t_z = 100$  s.
  7. Zvolenie automatického režimu zvárania. Po uplynutí doby dokonalého kontaktu sa stlačením tlačidla „automatické zváranie“ spustí automatický proces zvárania.
  8. V momente začiatku automatického zvárania dôjde ku automatickému krátkemu posunu čelusti vzad z dôvodu prerušenia pôsobenia prítlačnej sily  $F_{zmax}$ . Od tohto okamihu začne plynúť doba  $t_z$  nahrievania koncov rúr zrkadlom. Zrkadlo aj napriek krátkemu posunu vzad je stále v kontakte s koncami rúr, ale už nie je dotláčané žiadnou silou.
  9. Po uplynutí doby  $t_z$  nahrievania koncov rúr zrkadlom dôjde k automatickému oddialeniu čelusti na predpísanú dobu. Obsluha je na tento proces upozornená dopredu zvukovým signálom (pípaním). Počas tejto doby je potrebné vybrať zrkadlo zo zvaračky, vypnúť jeho ohrev a odložiť ho bezpečne do odkladacieho stojana.
  10. Proces zvárania pokračuje automatickým riadeným prisunutím koncov rúr do nulovej polohy definovanej v kroku 5.
  11. Zváranie pokračuje naprogramovaným algoritmom v zmysle obrázku 14. Čeluste sa stlačením posúvajú o nastavený krok  $\Delta x$ . Po dokončení kroku stlačenia dochádza k fixácii ich polohy. Po uplynutí doby ochladzovania  $\Delta t$  (čeluste držia nemennú polohu) sa čeluste opäť pritlačia o krok  $\Delta x$ . Tento cyklus sa opakuje až do uplynutia celkovej doby zvárania  $t_c = 600$  s. Počas celého cyklu sa neustále

vyhodnocujú podmienky neprekročenia maximálnej prítlačnej sily  $F_{zmax}$  a celkovej doby zvárania  $t_c = 600$  s.

12. Po uplynutí  $t_c = 600$  s obsluha zväračky prepne zväračku do manuálneho režimu ovládania, po uplynutí ochranného času zváraného spoja (6. fáza podľa štandardu ISO 11414) môže manipulovať so zvarom a pripraviť zväračku na ďalší zvar.

### 4.3 Meranie tlakových strát vznikajúcich pri prúdení vody v polyetylénových potrubíach

#### 4.3.1 Predbežné meranie tlakových strát

Meranie tlakových strát vychádza z predpokladu, že vnútorný pretok zvaru sa prejavuje pri prúdení tekutín ako clona. Prvé predbežné pokusné merania (obrázok 24) boli vykonané v laboratóriách firmy VÚSAPL. Ako sa neskôr ukázalo, dostupné technické prostriedky boli nedostačujúce pre daný rozsah meraní a preto sa nadviazala spolupráca s Výskumným ústavom vodného hospodárstva v Bratislave (VÚVH BA), ktorého technické vybavenie je na vyspelejšej úrovni.

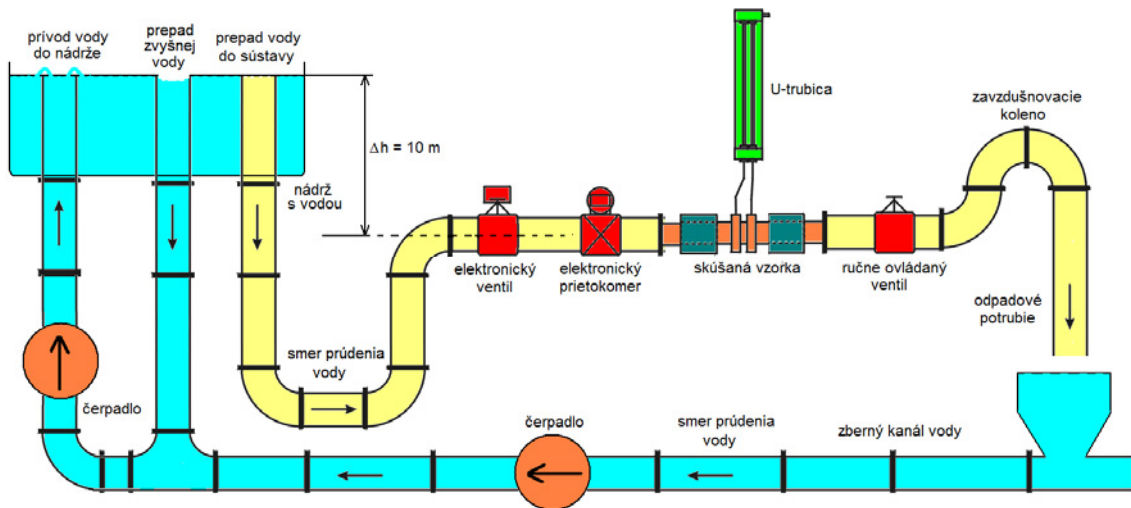


Obrázok 24 Meracia sústava slúžiaca na predbežné merania tlakových strát realizovaná vo VÚSAPLi

## 4.3.2 Meranie tlakových strát

### 4.3.2.1 VÚVH BA meracie pracovisko

Na základe vyššie uvedeného sa po dohode s VÚVH BA vytvorilo v ich priestoroch meracie pracovisko na zisťovanie tlakových strát. Princíp zariadenia na meranie tlakových strát je zobrazený na obrázku 25.

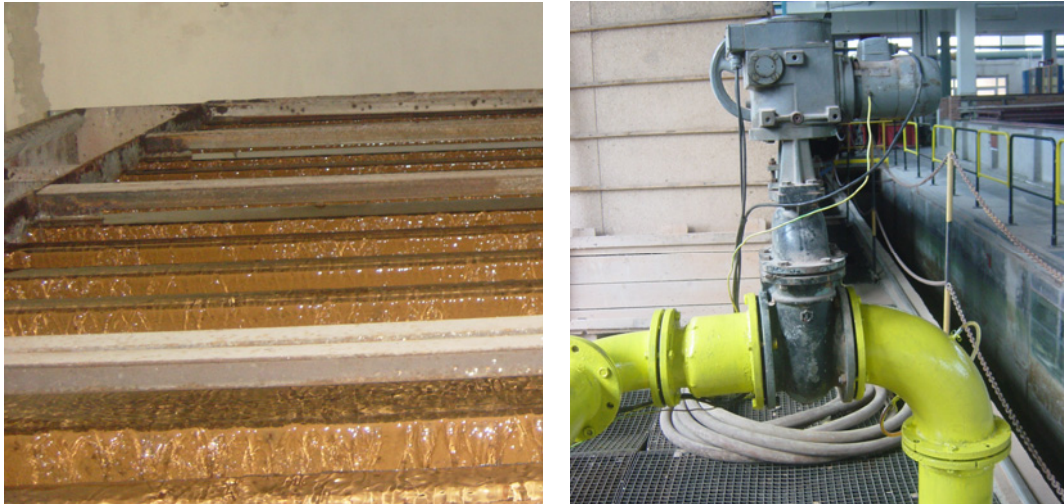


Obrázok 25 Princíp meracieho pracoviska na meranie tlakových strát vo VÚVH BA

Vymedzené meracie pracovisko obsahuje nasledovné prvky: zdroj prúdu vody, elektronický ventil na vstupe, elektronický prietokomer, U-trubica, skúšobné teleso so zvarovanou vzorkou, ručne ovládaný ventil, zavzdušňovacie koleno, odvod vody.

### 4.3.2.2 Zdroj prúdu vody

Na vytvorenie čisto hydrostatického tlaku nie je možné použiť čerpadlá, ale zdroj vody, z ktorého do meracej sústavy voda prúdi samospádom. Čerpadlá totiž pri svojej činnosti lopatkami spôsobujú nežiaduce tlakové rázy, ktoré by nepriaznivo ovplyvnili meranie. Preto ako zdroj vody poslúžili nádrže (obrázok 26 vľavo) umiestnené 10 m nad meracou sústavou. Do nádrži sa neustále dočerpáva voda čerpadlom a nespotrebovaná (nadbytočná) voda prepadá samovoľne prepadom do spodnej nádrže, odkiaľ je znova vytláčaná do hornej nádrže. Toto riešenie zaručuje stálu hodnotu hydrostatického tlaku vstupnej vody až do prietoku  $600 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  bez tlakových rázov.

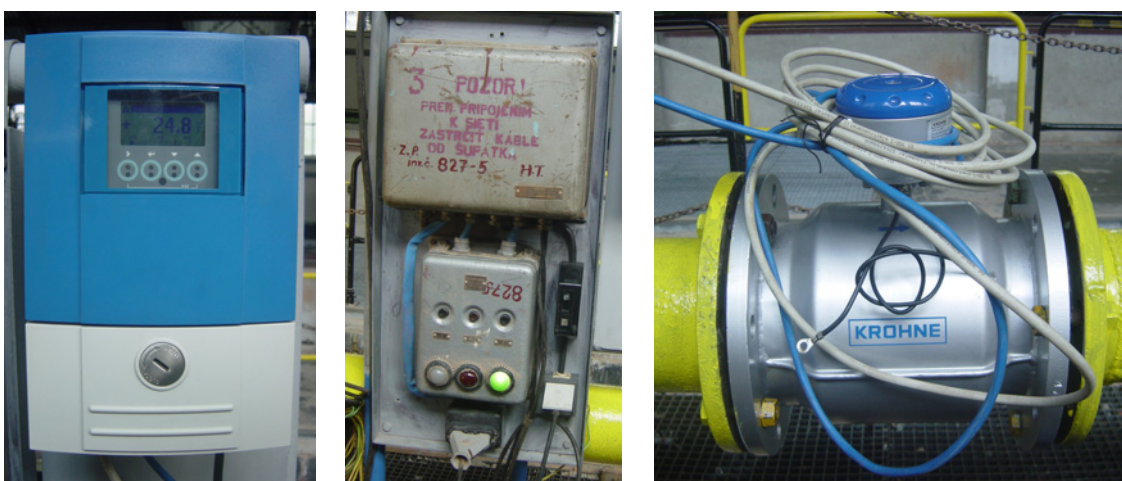


**Obrázok 26** Detail na prepad vody v horných nádržiach (vľavo), elektronický uzatvárateľný ventil umiestnený na vstupe meracej sústavy (vpravo)

#### 4.3.2.3 Ovládacie prvky

Na regulovanie prietoku vody slúžili dva uzatvárateľné ventily. Elektronicky uzatvárateľný ventil zabudovaný na vstupe do meracej sústavy a ručne uzatvárateľný ventil umiestnený za meracou sústavou.

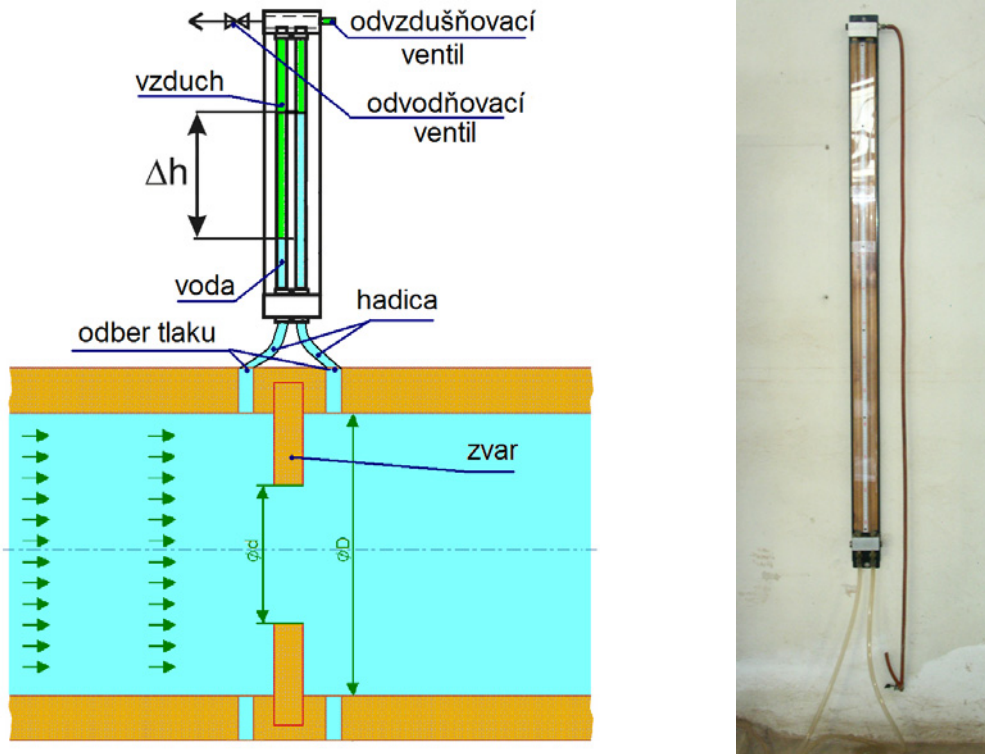
Elektronický ventil (obrázok 26 vpravo) plnil funkciu hlavného uzáveru vody. Pri meraniach bol otvorený na maximum a po skončení merania sa zakaždým uzavrel. Ventil bol riadený elektrickým panelom (staršieho typu), ktorý obsahoval tri tlačidlá na jeho ovládanie: otváranie ventilu, zatváranie ventilu a STOP otvárania/zatvárania. Pomocou zabudovaných svetelných indikátorov (žiaroviek) bolo signalizované jeho úplné otvorenie, resp. úplne uzavretie (obrázok 27 v strede).



**Obrázok 27** Informačný panel prietokomera KROHNE (vľavo), panel ovládania elektricky uzatvárateľného ventilu aj s indikačnými prvkami (v strede) a prietokomer KROHNE (vpravo)



Ručne ovládaný ventil (obrázok 29 vpravo) slúžil na nastavenie požadovaného prietoku vody meracou sústavou. Z princípu samotného merania tlakových strát je dôležité dodržať zásadu, že regulovanie prietoku musí byť realizované za meracou sústavou, teda na jej konci.



**Obrázok 28** Princíp diferenciálneho trubicového manometra (vľavo) a skutočná U-trubica (vpravo)

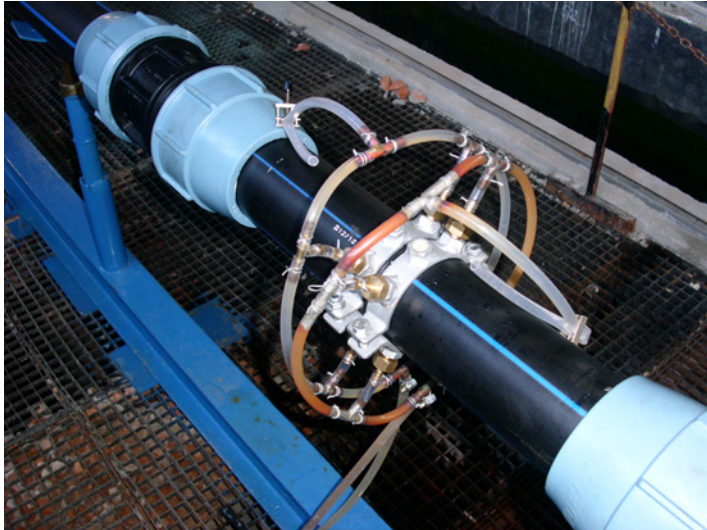
Pred samotným ventilom (regulácia prietoku vody) sa ešte nachádza malý pomocný ventil (výpust), ktorý slúži na vyprázdnenie vody z meracej sústavy od prebytočnej vody v prípade, keď sa vymieňajú skúšobné vzorky v meracej sústave.

Za ručne ovládaním ventilom (regulácia prietoku vody) nasleduje zavzdušňovacie koleno, ktorého úlohou je zabrániť nežiaducemu zavzdušneniu meracej sústavy pri regulácii prietoku vody a jej odtokaní do odpadového kanála (obrázok 29).

#### 4.3.2.4 Monitorovacie prvky

Na meranie aktuálneho prietoku v meracej sústave slúžil elektronický prietokomer KROHNE. Spomenutý prietokomer umožňuje merať prietoky  $Q$  v rozsahu  $5 - 500 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  a aktuálnu hodnotu prietoku zobrazuje na informačnom paneli (obrázok 27 vľavo) priamo v  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ .





**Obrázok 29** Detail na miesta odberu tlaku pred a za zvarom pomocou špeciálneho kovového prípravku (vľavo), ručne ovládaný ventil používaný na regulovanie prietoku; zavzdušňovacie koleno (vpravo)

Na zistenie rozdielu hodnôt tlakov pred a za zvarom slúžila U-trubica, ktorá funguje na princípe obráteného diferenciálneho manometra (obrázok 28). Hodnota tlakového rozdielu  $\Delta p$  sa vypočíta z rozdielu výšky hladín  $\Delta h$  podľa vzťahu 44.

$$\Delta p = \Delta h \rho g \quad (44)$$

$\Delta p$  - rozdiel hodnôt tlakov pred a za zvarom, Pa

$\Delta h$  - rozdiel výšky jednotlivých hladín v U-trubici, m

$\rho$  - je objemová hustota meranej tekutiny,  $\text{kg.m}^{-3}$

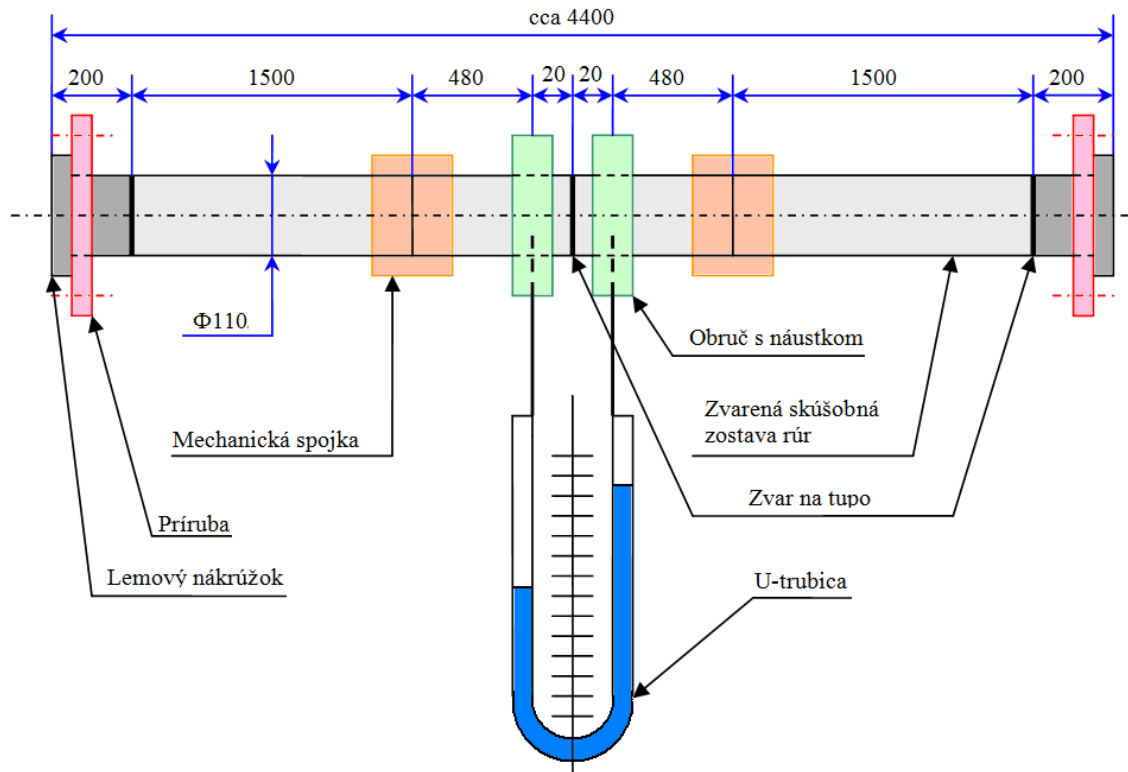
$g$  - je tiažové zrýchlenie,  $g = 9,80665 \text{ m.s}^{-2}$

V našom prípade sa hodnota diferenciálneho tlaku merala priamo prúdiacou tekutinou (vodou). Priestor nad vodným stĺpcom sa vyplňa pomocou pumpy (na bicykel) vzduchom. Ventil nad vodným stĺpcom zakončený gumenou hadicou, slúžil na odvzdušnenie U-trubice. Pri samotnom meraní, najmä pri vyšších prietokoch dochádzalo ku kmitaniu výšok vodných hladín v rúrkach U-trubice. Z tohto dôvodu bolo potrebné odčítať strednú hodnotu  $\Delta h$  pri eliminovaní vplyvu kapilarity vody v rúrkach U-trubice.

### 4.3.3 Kompletná meracia sústava

Meracia sústava bola realizovaná podľa obrázka 30. Skúšobné telesá vzoriek rúry o dĺžke 1 m boli zhotovené zvarom na tupo podľa metodiky opísanej v kapitole 4.2.3. Zvar bol realizovaný v strede skúšobného telesa. Skúšobné teleso v meranej sústave bolo spojené pomocou mechanických spojok. Za mechanickými telesami nasledovali (z oboch strán) pomocné telesá o dĺžke 1,5 m, ktoré boli na jednom konci privarené na tupo k lemovým nákrúžkom a pomocou príruby sa pripájali do meracej

sústavy. Z hľadiska merania tlakových strát je dôležité, aby dĺžka potrubia pred, ako aj za meraným objektom bola minimálne 2 m (dĺžka závisí od vnútorného priemeru rúry) bez regulačných prvkov. Na odber tlaku pre pripojenie U-trubice boli vyrobené špeciálne kovové meracie prípravky, ktoré boli umiestnené 20 mm od roviny zvaru pred a za zvarom (obrázok 29).



**Obrázok 30** Umiestnenie skúšobných telies so zvarovou vzorkou v strede v rámci meracej sústavy

Pôvodne mal každý merací prípravok jedno miesto na odber tlaku, ale počas merania sa zistilo, že jedno odberné miesto je nedostačujúce a preto sa ich počet zvýšil na štyri, rovnomerne rozmiestnené po obvode meracieho prípravku. Jednotlivé odberné miesta tlaku v rámci každého prípravku boli vzájomne prepojené (obrázok 29) a spoločný vývod bol privedený na vstup U-trubice.

#### 4.3.4 Postup merania tlakových strát

Meranie tlakových strát vznikajúcich pri prúdení vody v okolí zvaru prebiehalo nasledovne (prípravné operácie):

- uzatvorenie elektronického ventilu (na vstupe do meracej sústavy) pred vložením novej zvaranej vzorky, alebo pred opakovaním merania,
- umiestnenie zvaranej vzorky (skúšobného telesa) do meracej sústavy pomocou mechanických spojok do strednej časti meracej sústavy,



**Obrázok 31** Meracie pracovisko na meranie tlakových strát vo VÚVH Bratislava

- pri postupnom otváraní elektronického ventilu (ručný ventil za skúšobným telesom úplne otvorený) sa odvzdušní U-trubica otvorením ručného ventilu na U-trubici. Po dôkladnom odvzdušení U-trubice sa ventil uzavrel. Zároveň sa dôkladne odvzdušnila aj celá meracia sústava prúdením vody regulovaním prietoku vody ručným ventilom pri úplne otvorenom elektronickom ventile.
- pomocou pumpy (hustilky) sa nastavila nulová poloha na U-trubici, stredná poloha meranej kvapaliny sa má nachádzať približne v strede stupnice,
- skontrolovanie tesnosti meracej sústavy, najmä v miestach odberu tlaku na meracom prípravku a spojoch.

Po prípravných operáciách nasledovalo samotné hydraulické meranie (obrázok 31). Spočívalo v nastavovaní prietoku  $Q$  pomocou ručného ventilu umiestneného za skúšobnou vzorkou a súčasnom odčítaní rozdielu hladín na stupnici U-trubice. Elektronický ventil musí byť otvorený na maximum. Prietok sa odčítaval z prietokomera. Nevyhnutným predpokladom pre získanie správnych údajov ( $Q$ ,  $\Delta p$ ) po zmene (nastavení) prietoku je ustálenie prietoku vody sústavou, ktoré trvá približne 10 - 15 minút. Pre každú skúšobnú vzorku sa meranie opakovalo 3x. Prietok  $Q$  sa reguloval v rozsahu 0 - 200 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup> po krokoch približne 15 - 20 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>. V prípade merania na nezvárannej rúre sa opakovanie realizovalo 5x. Stredná hodnota z piatich meraní slúžila ako referenčná hodnota pri vyhodnocovaní tlakových strát pomocou relatívneho prietokového čísla  $\Gamma$ .

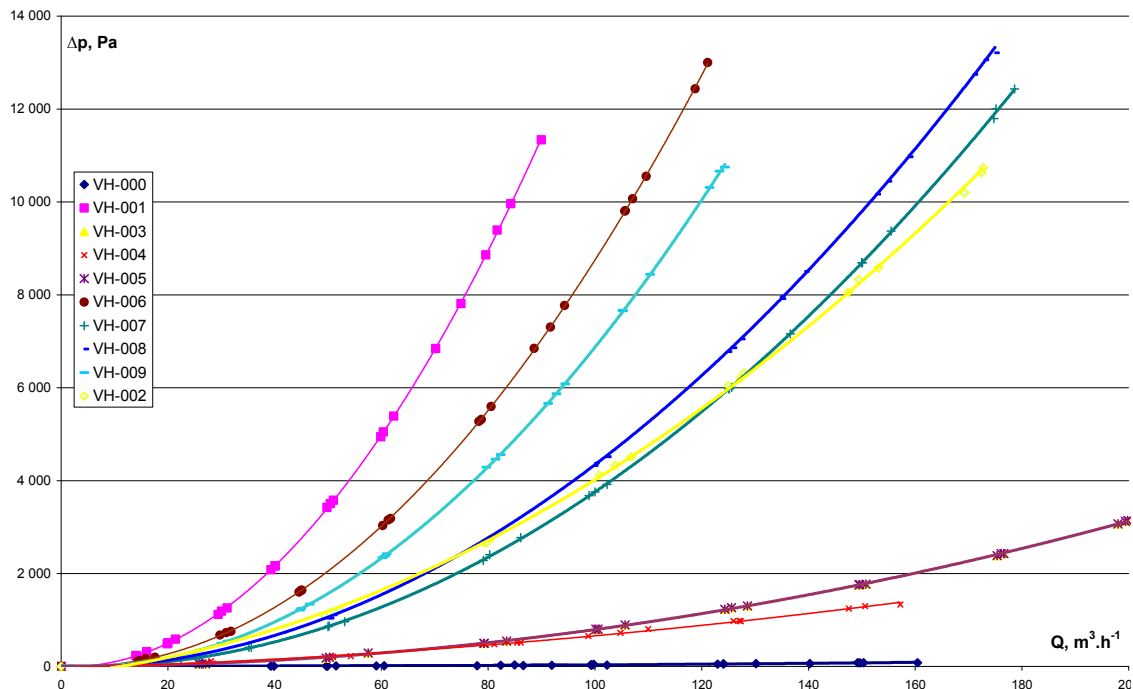
### 4.3.5 Výsledky a vyhodnotenie meraní tlakových strát

Pri úvahe, že vzniknutý zvar možno považovať za škrtiaci orgán v zmysle obrázku 28 a v zmysle teórie prúdenia tekutín popísanej v kapitole 1.3.4 je možné zadefinovať prietokové číslo  $\alpha$  zo vzťahu 45:

$$Q = \alpha S \sqrt{\frac{2g}{\rho} (p_1 - p_2)} \quad (45)$$

- Q - objemový prietok prúdiacej tekutiny,  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
- $\alpha$  - prietokové číslo,
- S - plošný obsah prierezu potrubia,  $\text{m}^2$
- g - je tiažové zrýchlenie,  $g = 9,80665 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$
- $\rho$  - je objemová hustota meranej tekutiny,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- $p_1, p_2$  - tlaky v daných odberných miestach (pred a za škrtiacim orgánom), Pa

Aplikovaným vzťahu 45 na namerané hodnoty  $\Delta p = f(Q, \text{zvar})$  (obrázok 32) bolo pre každú vzorku rúry VH-000 až VH-009 získané prietokové číslo  $\alpha$ , ktoré charakterizuje absolútny tokový odpor potrubia. Relatívne prietokové číslo  $\Gamma$  pre daný zvar sa vypočítalo ako podiel prietokového čísla  $\alpha$  pre daný zvar a prietokového čísla  $\alpha$  pre nezávanú rúru. Hodnoty  $\Delta p = f(Q, \text{zvar})$  sú uvedené v prílohe A5-A14.

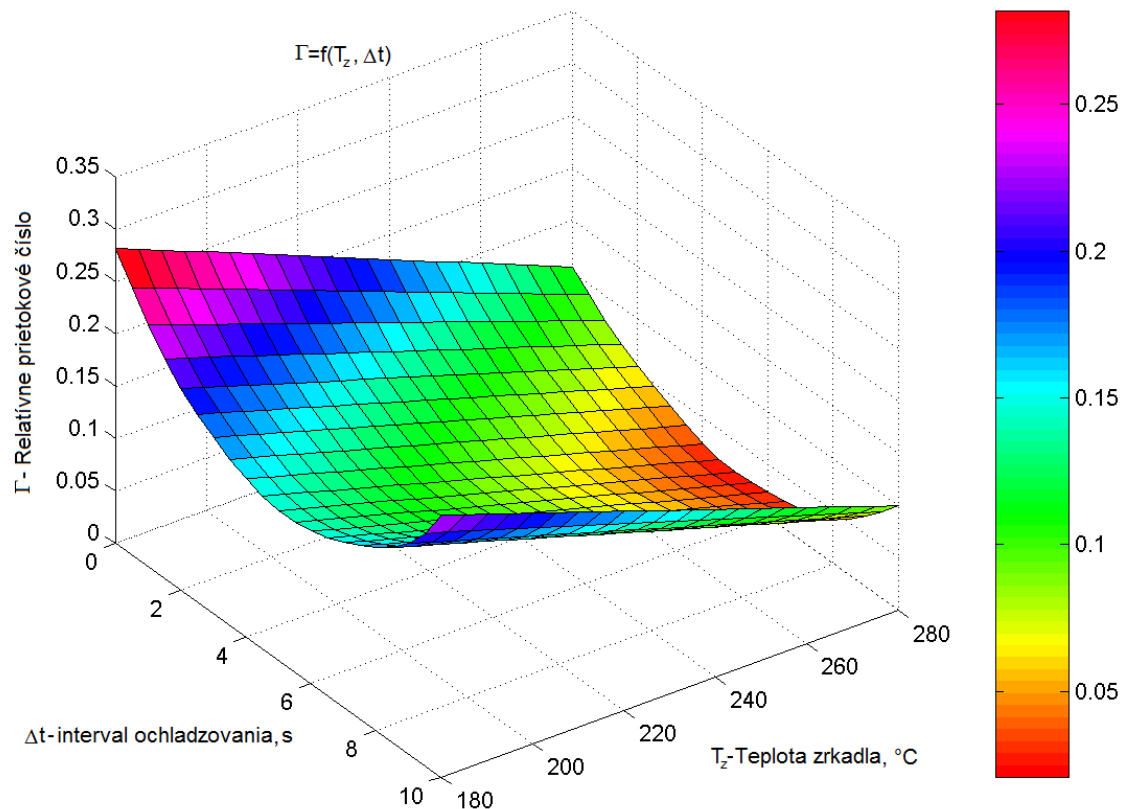


Obrázok 32 Závislosť tlakových strát  $\Delta p$  vznikajúcich pri prúdení vody na jednotlivých kombináciách zvarných vzoriek od hodnôt prietoku  $Q$

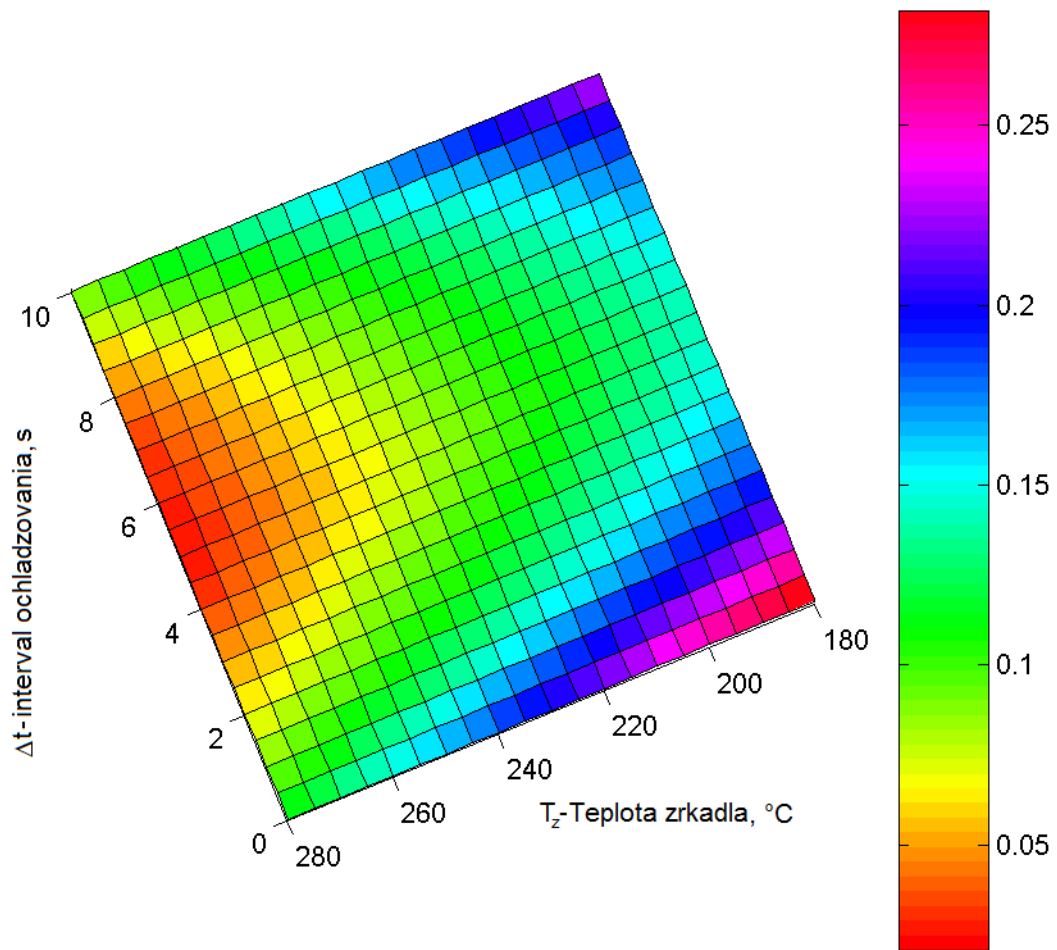
Hodnoty jednotlivých prietokových čísel sú uvedené v tabuľke 12. Závislosť relatívneho prietokového čísla  $\Gamma$  od vstupných parametrov zvarovania ( $T_z$ ,  $\Delta t$ ) najlepšie vystihujú obrázky 42, 43.

**Tabuľka 12** Závislosť relatívneho prietokového čísla  $\Gamma$  od parametrov zvarovania  $\Gamma=f(T_z, \Delta t)$ .

Označenie pokusu MESOS	Poradové číslo	Faktory plánovaného pokusu		Označenie pokusu VÚVH	$\Gamma$	
		$X_1=T_z, ^\circ\text{C}$	$X_2=\Delta t, \text{s}$			
Axiálne body	A1	1	280	10	VH – 001	0,0577
	A2	2	280	0,5	VH – 002	0,1154
	A3	3	180	10	VH – 003	0,2308
	A4	4	180	0,5	VH – 004	0,2692
Faktorové body	I5	5	247	6,8	VH – 005	0,1500
	I6	6	247	3,7	VH – 006	0,0769
	I7	7	213	6,8	VH – 007	0,1154
	I8	8	213	3,7	VH – 008	0,0962
Centrálny bod	Z	9	230	5,3	VH – 009	0,0769



**Obrázok 33** Axonometrický pohľad na rovinu odozvy Y závislosti relatívneho prietokového čísla  $\Gamma=f(T_z, \Delta t)$ .  $T_z$  - teplota zrkadla,  $\Delta t$  - interval ochladzovania



**Obrázok 34** Pôdorysný pohľad na závislosť relatívneho prietokového čísla  $\Gamma=f(T_z, \Delta t)$ ,  $\uparrow\Gamma \Rightarrow \downarrow\Delta p$

Ako vidno z obrázkov 33, 34, najnižšie tlakové straty boli namerané na vzorkách zvarov, ktoré boli zvarené pri teplote  $T_z=180$  °C, čo dokazujú aj hodnoty relatívneho prietokového čísla  $\alpha$ .



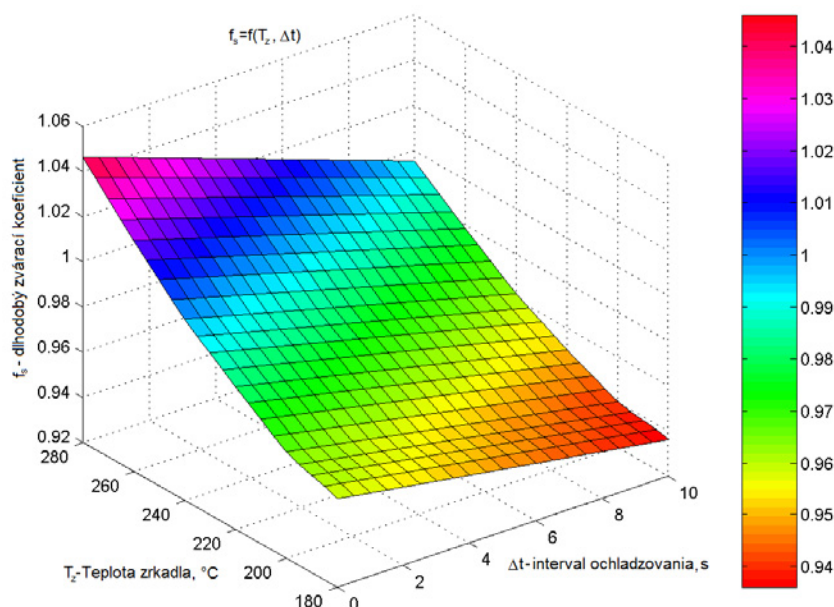
## 4.4 Meranie a vyhodnotenie kríповých vlastností

V rámci riešenia projektu APVT-99-01420 sa zisťovali aj kríповé vlastnosti vytvorených zvarov. Metóda riešenia ako aj dosiahnuté výsledky kríповých pokusov sú uvedené podrobne v prácach (Arendás, 2008 a Tóth, 2009). Nakoľko sa v mojej práci nezaobieram kríповými vlastnosťami, ale získané výsledky sú nevyhnutné na zadefinovanie optimálnych podmienok zvarovania na tupo PE rúr, výsledky sú iba prezentované bez širšieho popisu. V tabuľke 13 sú uvedené hodnoty dlhodobého koeficientu zvarovania  $f_s$ , ktorý je konečným výsledkom získaným z kríповých pokusov.

Tabuľka 13 Závislosť dlhodobého koeficientu zvarovania  $f_s$  od parametrov zvarovania  $f_s=f(T_z, \Delta t)$ .

Označenie pokusu MESOS	Poradové číslo	Faktory plánovaného pokusu		m	B	$f_s$	
		$X_1=T_z, ^\circ\text{C}$	$X_2=\Delta t, \text{s}$				
Axiálne body	A1	1	280	10	20,867	5,05E-26	1,005
	A2	2	280	0,5	25,524	1,42E-30	1,055
	A3	3	180	10	17,052	2,95E-22	0,942
	A4	4	180	0,5	17,746	6,47E-23	0,952
Faktorové body	I5	5	247	6,8	18,013	3,66E-23	0,955
	I6	6	247	3,7	21,931	8,55E-27	0,990
	I7	7	213	6,8	21,674	1,82E-26	0,978
	I8	8	213	3,7	22,511	3,54E-27	0,979
Centrálny bod	Z	9	230	5,3	18,083	2,59E-23	0,966

Axonometrický pohľad na rovinu odozvy dlhodobého koeficientu zvarovania je zobrazený na obrázku 35. Ako vidno z obrázka 35, najpevnejšie zvary na základe kritéria  $f_s = \max$  sa pravdepodobne dajú dosiahnuť pri najvyššej teplote zrkadla  $T_z = 280 ^\circ\text{C}$  a s nulovou dobou určenou na ochladnutie zvaru  $\Delta t = 0 \text{ s}$ .



Obrázok 35 Axonometrický pohľad na rovinu odozvy Y závislosti dlhodobého koeficientu zvarovania  $f_s = f(T_z, \Delta t)$ .  $T_z$  – teplota zrkadla,  $\Delta t$  – interval ochladzovania

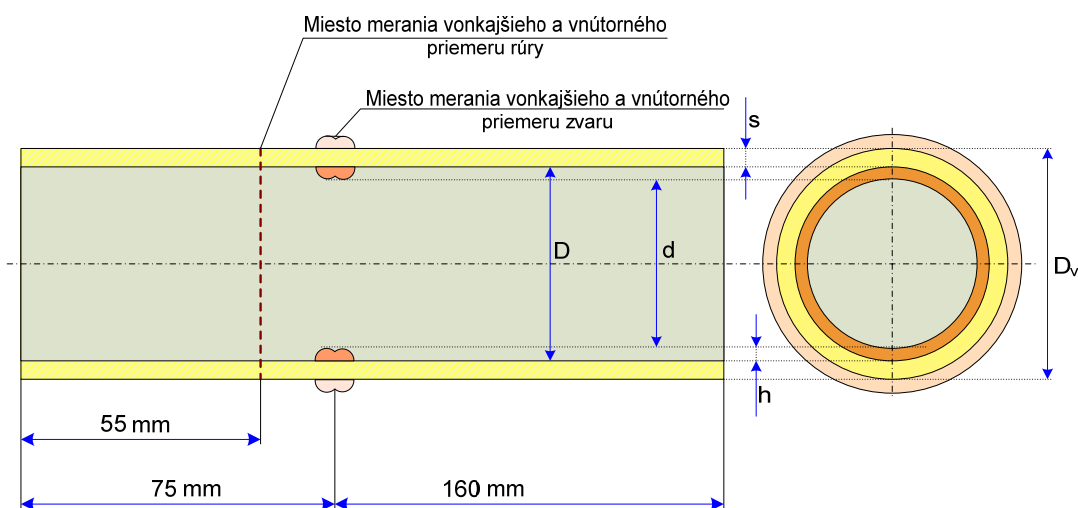
## 4.5 Vyhodnotenie závislosti výšky pretokov od parametrov zvarania

### 4.5.1 Metodika merania pretokov zvarov

Hodnota šírky  $B$  a výšky  $h$  vnútorného pretoku zvaru (a aj vonkajšieho pretoku) sa pri jednotlivých vzorkách zvarov merala pomocou posuvného meradla. Pre ďalšie použitie vzorky zvaru bolo totiž možné vzorku rozrezať pozdĺž jej vlastnej osi a k pretokom bol možný prístup. Vzorky zvarov, ktoré boli použité pri meraní tlakových strát vo VÚVH BA boli ešte určené pre ďalšie pevnostné testy a preto nebolo možné rúru rozrezať. Zmeranie rozmerov  $B$  a  $h$  posuvným meradlom nebolo možné z dôvodu neprístupnosti k vnútorným pretokom, nakoľko vzorka rúry mala dĺžkový rozmer 1 m.

Na zistenie rozmerov v tomto prípade sa použil iný postup, ktorý bol založený na japonskom meracom prístroji MITUTOYO 3D. Merací systém umožňuje merať rozmery objektov v 3D priestore.

Pre ďalšie pevnostné testy bol celkový rozmer rúr určený na 235 mm a teda práve na túto dĺžku boli skrátene jednotlivé zvarované vzorky. Jednotlivé miesta merania popisuje obrázok 36, z ktorého zároveň vidno aj význam jednotlivých rozmerov rúry.



**Obrázok 36** Určenie miest merania pomocou meracieho systému MITUTOYO 3D

Jednotlivé hodnoty ( $d$ ,  $D$ ,  $D_v$ ) boli zmerané 30x rovnomerne po obvodě rúry. Hodnota výšky vnútorného pretoku sa stanovila nasledovným vzťahom:

$$h = \frac{D - d}{2} \quad (46)$$

- $h$  - je výška vnútorného pretoku zvaru, m
- $D$  - vnútorný priemer vzorky zvaranej rúry, m



- d - vnútorný priemer zváratej rúry v mieste pretoku zvaru, m
- $D_v$  - vonkajší priemer rúry, m
- s - hrúbka steny rúry, m

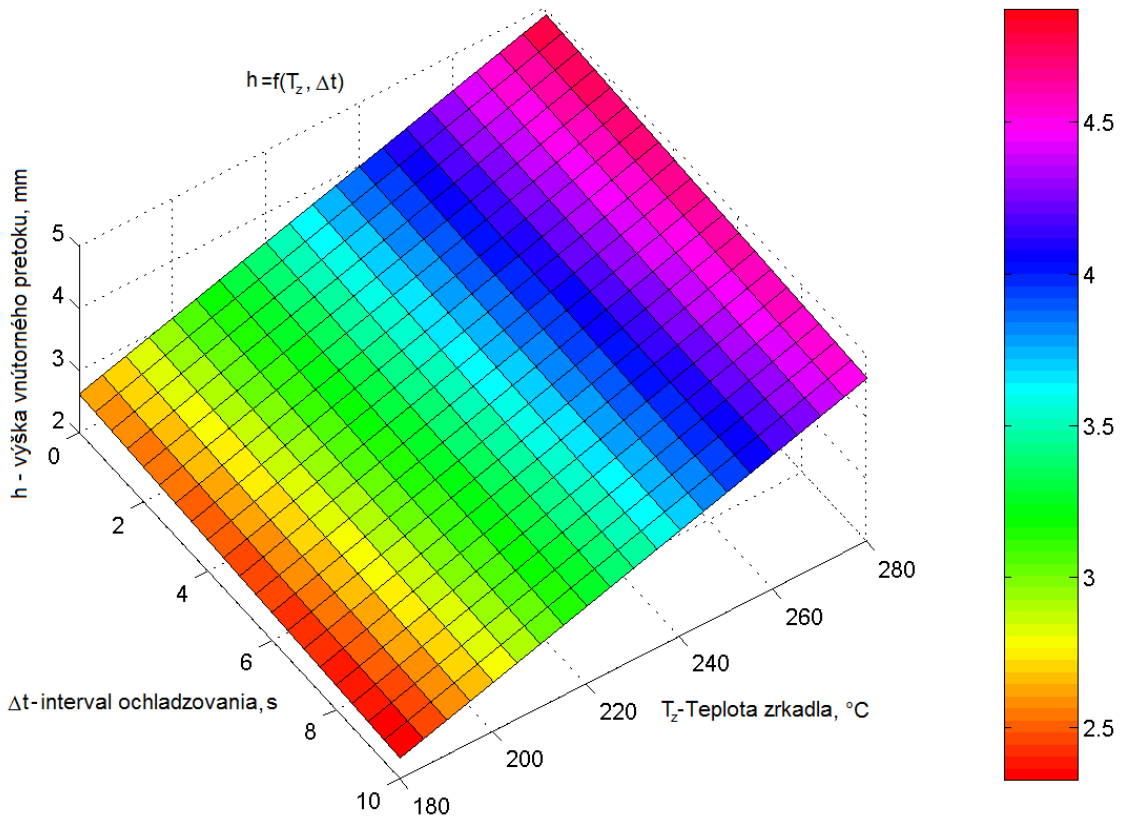
#### 4.5.2 Vyhodnotenie výsledkov

Namerané stredné hodnoty sú uvedené v tabuľke 14.

Tabuľka 14 Závislosť výšky vnútorného pretoku  $h$  od parametrov zvárania  $h=f(T_z, \Delta t)$

Označenie pokusu MESOS	Poradové číslo	Faktory plánovaného pokusu		d, mm	D, mm	$D_v$ , mm	h, mm	
		$X_1=T_z, ^\circ\text{C}$	$X_2=\Delta t, \text{s}$					
Axiálne body	A1	1	280	10	81,264	90,464	110,342	4,600
	A2	2	280	0,5	81,010	90,749	110,569	4,870
	A3	3	180	10	85,990	90,652	110,489	2,231
	A4	4	180	0,5	85,220	90,651	110,428	2,716
Faktorové body	I5	5	247	6,8	82,749	90,657	110,316	3,954
	I6	6	247	3,7	82,203	90,643	110,332	4,220
	I7	7	213	6,8	84,459	90,512	110,406	3,177
	I8	8	213	3,7	83,583	90,651	110,359	3,534
Centrálny bod	Z	9	230	5,3	83,152	90,697	110,437	3,773

Vyhodnotenie závislosti výšky vnútorného pretoku  $h$  od vstupných parametrov zvárania ( $T_z, \Delta t$ ) je znázornené na obrázku 37.



Obrázok 37 Axonometrický pohľad na rovinu odozvy Y závislosti výšky vnútorného pretoku  $h = f(T_z, \Delta t)$ .  $T_z$  - teplota zrkadla,  $\Delta t$  - interval ochladzovania

Ako vidno z obrázku 37 najmenšia výška pretoku sa dá dosiahnuť pri najnižšej teplote zvarania  $T_z=180$  °C a takmer nezávisí od intervalu ochladzovania  $\Delta t$ .

### **4.5.3 Porovnanie závislostí relatívneho prietokového čísla od výšky vnútorného pretoku**

Pri určovaní prietokového čísla  $\alpha$ , respektíve relatívneho prietokového čísla  $\Gamma$  sa vychádzalo z predpokladu, že vnútorný pretok sa správa ako clona. Ak je výška vnútorného pretoku  $h$  jedným z parametrov clony, potom samotná výška  $h$  bude mať vplyv na veľkosť prietokového čísla  $\alpha$ , resp. relatívneho prietokového čísla  $\Gamma$ . Keďže závislosti  $\Gamma = f(T_z, \Delta t)$  a zároveň  $h = f(T_z, \Delta t)$  už poznáme, bola zisťovaná závislosť  $\Gamma = f(h)$ . Programom MESOS bola vzájomná závislosť zistená v nasledovnom tvare:

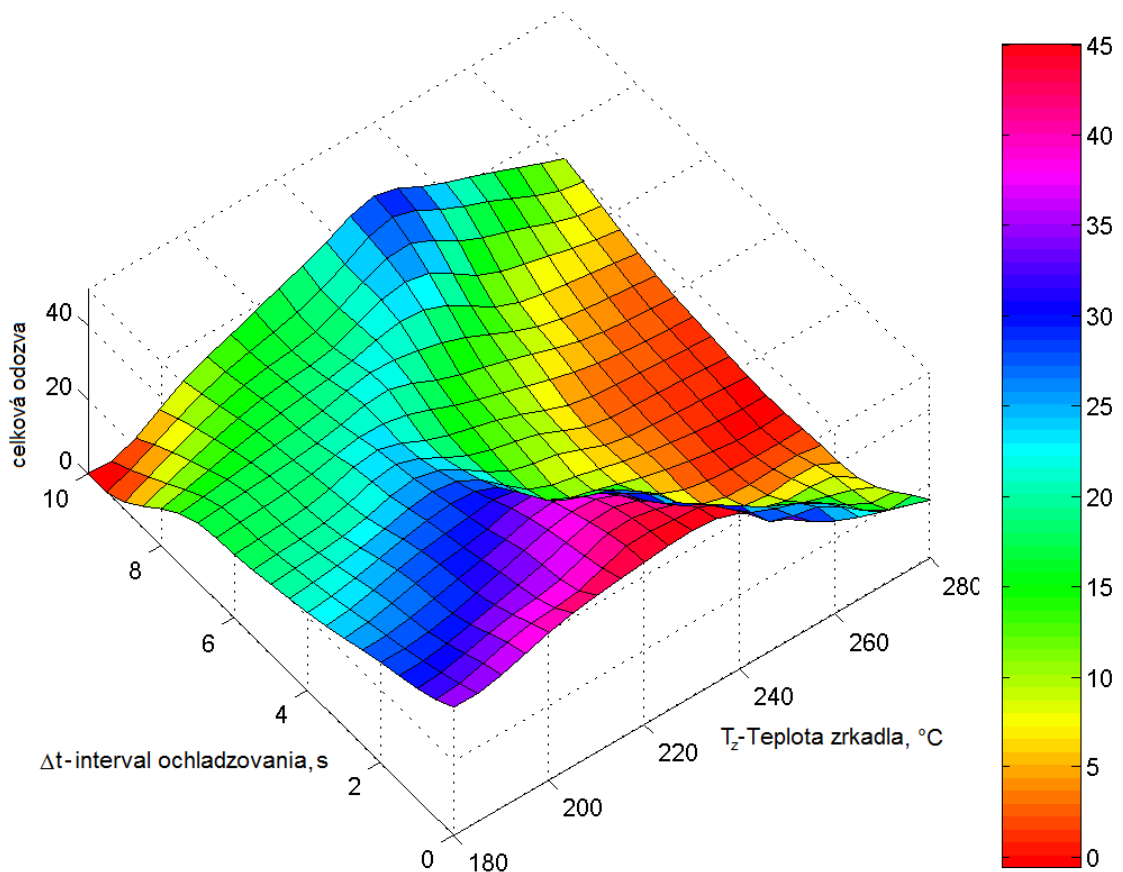
$$\Gamma = 0,0738 h^2 - 0,06135 h + 1,3398 \quad (47)$$

S koeficientom spoľahlivosti 0,9974 medzi hodnotami  $\Gamma$  a hodnotami  $h$ , teda relatívne prietokové číslo  $\Gamma$  je závislé na výške vnútorného pretoku  $h$ .

## 4.6 Definovanie optimálnych podmienok zvárania

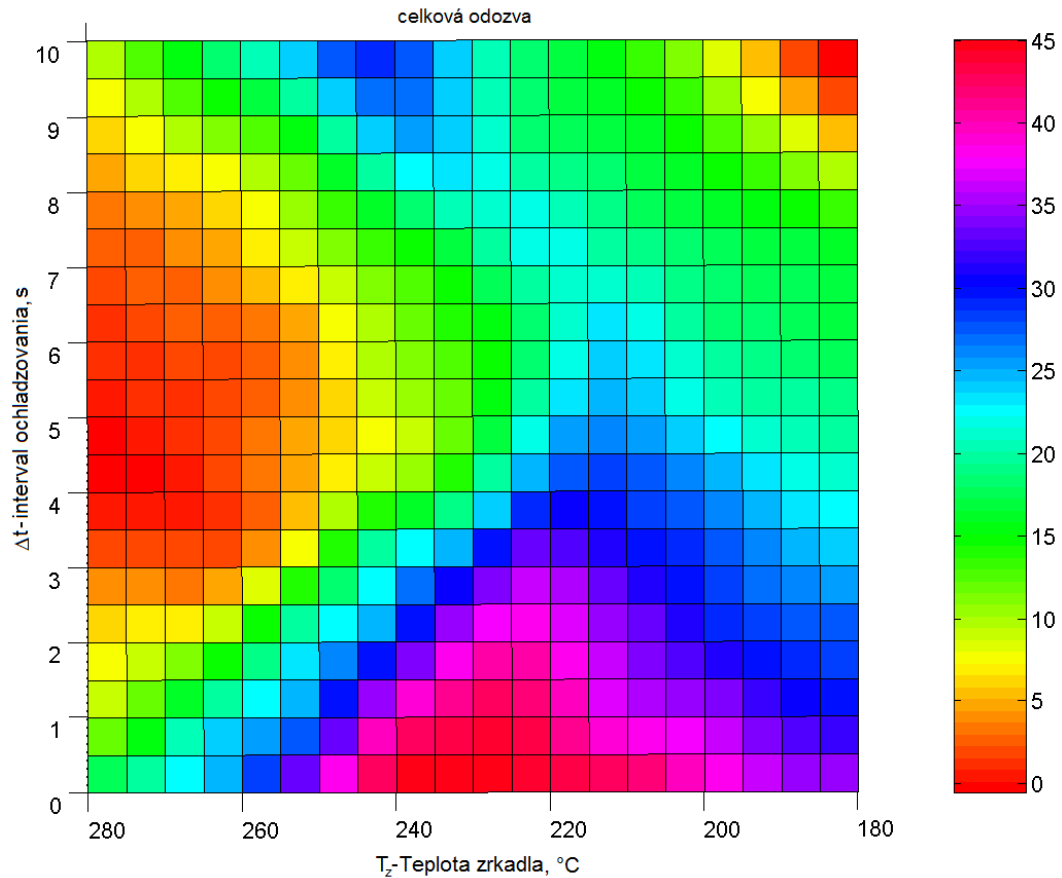
Komplexná optimalizácia zvárania polyetylénových rúr PE 100 v zmysle kapitoly 4.2.2 pomocou programu MESOS bola vykonaná za nasledovných predpokladov:

- poznáme nasledovné odozvy
  - dlhodobého zváracieho koeficientu  $f_s = (T_z, \Delta t)$ ,
  - výšky vnútorného pretoku  $h = (T_z, \Delta t)$ ,
  - relatívneho prietokového čísla  $\Gamma = (T_z, \Delta t)$ .
- každej zo sledovanej odozvy  $Y$  sa priradila rovnaká váha (33%), t.j. do komplexnej optimalizácie vstupujú ako rovnako závažné veličiny,
- po zrelativizovaní hodnôt jednotlivých odoziev  $f_s$ ,  $h$ , a  $\Gamma$  sa superpozíciou závislostí  $f_s = (T_z, \Delta t)$ ,  $h = (T_z, \Delta t)$ ,  $\Gamma = (T_z, \Delta t)$  vytvorila komplexná rovina odozvy, ktorá je zobrazená na obrázku 38.



**Obrázok 38** Axonometrický pohľad na rovinu komplexnej odozvy ako funkcie  $f(f_s, h, \Gamma, T_z, \Delta t)$ .  
 $T_z$  - teplota zrkadla,  $\Delta t$  - interval ochladzovania

Pôdorysný pohľad na komplexnú odozvu je zobrazený na obrázku 39.



**Obrázok 39** Pôdorysný pohľad na rovinu komplexnej odozvy ako funkcie  $f(f_s, h, \Gamma, T_z, \Delta t)$ .  
 $T_z$  - teplota zrkadla,  $\Delta t$  - interval ochladzovania

Pri pohľade na obrázok 38 resp. obrázok 39 je zrejmé, že optimálna kvalita zvaru za predpokladu zvolenej metódy zvarovania pri metodike uplatnenia maximálnej hodnoty dlhodobého zvaracieho koeficientu  $f_s$ , maximálnej hodnoty relatívneho prietokového čísla  $\Gamma$  a minimálnej hodnoty výšky vnútorného prietoku  $h$  sa dá dosiahnuť pri súčasnom nastavení nasledovných hodnôt zvarovania:

- teplota zrkadla  $T_z = 231 \pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}$
- interval ochladzovania  $\Delta t = 0,5 \pm 0,09 \text{ s}$

## 4.7 Simulovanie prúdenia tekutín v okolí zvarov v PE potrubíach metódou konečných prvkov

Počas merania tlakových strát vo VÚVH BA sme dospeli k záveru, že merania sú časovo ako aj finančne veľmi náročné. Pre verifikovanie správnosti nameraných výsledkov (tlakové straty v okolí zvaru) sme sa nakoniec rozhodli získané výsledky porovnať s výsledkami, ktoré vzniknú pri simulovaní prúdenia tekutín v okolí zvarových spojov. Ako metóda numerického riešenia bola zvolená metóda konečných prvkov (MKP) pomocou výpočtového programu ANSYS.

### 4.7.1 ANSYS

Zakúpiť licenciu na komerčný program ANSYS iba pre potreby riešenia tejto úlohy by bolo neefektívne, preto bola zvolená spolupráca s Ústavom výrobných systémov a aplikovanej mechaniky STU v Trnave, ktorý licenciu na daný program má zakúpenú a majú s programom dlhoročné odborné skúsenosti.

### 4.7.2 Tvorba modelu

Simulovaný model bol postavený na základe reálneho zvarového potrubia (zvar umiestnený v strede) o celkovej dĺžke rúry 8 m. Boli vytvorené celkovo tri typy základných modelových situácií.

1. malý pretok s rozmermi získanými zo vzorky VH-003 ( $T_z = 180\text{ °C}$ ,  $\Delta t = 10\text{ s}$ )
2. veľký pretok s rozmermi získanými zo vzorky VH-002 ( $T_z = 280\text{ °C}$ ,  $\Delta t = 0,5\text{ s}$ )
3. nezváraná rúra

Stručný postup vytvárania modelu:

1. Výber prostredia. Keďže program ANSYS pokrýva viacero oblastí fyziky (mechanika, tekutiny, elektrické polia, atď.), bolo spresnené prostredie FLOTRAN CFD (*Computational Fluid Dynamics*), ktoré je primárne určené na riešenie problémov v oblasti dynamiky tekutín.

2. Bol zvolený typ prvku FLOTRAN 2D 141, nakoľko bol vytváraný 2D model. Vo vlastnostiach prvku FLOTRAN 2D 141 sa následne zmenil pracovný priestor parametrom K3 na osovo symetrický okolo osi Y (os Y je os symetrie rúry). Symetrickosť zjednodušuje generovaný model na  $\frac{1}{2}$  a teda šetrí výpočtový čas nutný na získanie riešenia.

3. Generovanie (kreslenie) 2D modelu s reálnymi rozmermi. Rúra bola rozdelená na viaceré oblasti s prihliadnutím na kvalitu budúceho MESHovania (0-1 cm, 1 cm - 10 cm, 10 cm - 100 cm, 1 m - 4 m) v oboch smeroch. Stred súradnicového systému WP (*Workplane*)

bol zvolený do prieniku roviny zvaru a osy symetrie rúry Y. Toto riešenie uľahčovalo orientáciu v priestore a zároveň pri zobrazovaní výsledkov umožňuje rozšírenie zobrazenia z 2D symetriou cez os Y na 3D.

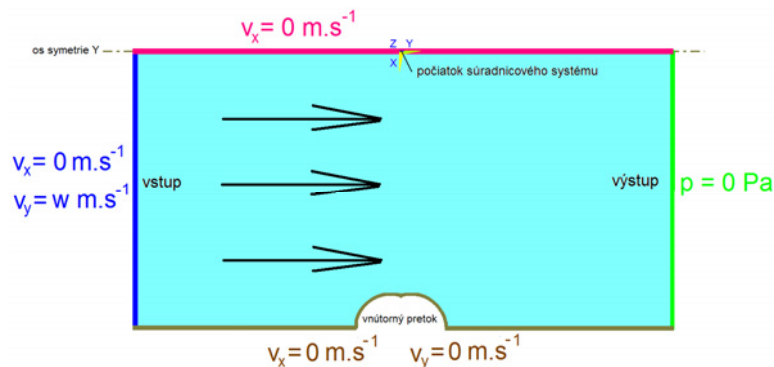
4. Meshovanie. Vytvorenie siete konečných prvkov je časovo najnáročnejšia fáza tvorby modelu MKP. Veľkosť modelu (množstvo uzlov) vplýva priamo na počet vzniknutých rovníc, ktoré z matematického hľadiska opisujú správanie sa fyzikálnej sústavy. Na začiatku pokusov sa sieť vytvára odhadom podľa získaných skúseností a predpokladaných výsledkov, ktoré by mali nastať z teoretického hľadiska. Po spustení numerického riešenia a analýze výsledkov sa sieť upravuje, v oblastiach s vysokým gradientom zmeny sa zjemňuje (zhusťuje). Tento cyklus sa opakuje dovtedy, kým získané výsledky nie sú dostatočne presné a korektné. Pre účely porovnania vplyvu meshovania na kvalitu výsledkov boli vytvorené nasledovné kombinácie:

- a) malý pretok: A - jemný mesh, C - hrubý mesh
- b) veľký pretok: D - jemný mesh, B - hrubý mesh
- c) bez pretoku (nezváraná rúra): E - trojuholníkový mesh, F - obdĺžnikový mesh

5. Počiatočné a okrajové podmienky predpisujú požiadavky správania sa modelu na hraniciach vyšetovaných oblastí. Všetky okrajové podmienky (obrázok 40) boli definované na čiarach jednotlivých oblastí ako aj na ich koncové body. Hodnota  $v_y$  vstupnej strednej rýchlosti  $w$  bola definovaná pre každú simuláciu nezávisle a bola vypočítaná vzťahom 48 z meraného prietoku  $Q$  pri danom vnútornom priemere rúry  $D$ . Nakoľko model bol (kvôli šetreniu výpočtového času) symetrizovaný cez os Y, bolo nutné pridať podmienku symetrie  $v_x = 0 \text{ m.s}^{-1}$ . Hodnota  $w$  strednej rýchlosti na vstupe sa menila v rozsahu  $0 - 10 \text{ m.s}^{-1}$  s krokom  $1 \text{ m.s}^{-1}$ , čomu zodpovedá prietok  $Q$  v rozsahu  $0 - 232 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ .

$$v_y = w = \frac{4Q}{3600\pi \cdot D^2 \cdot 10^{-6}} \quad (48)$$

- $v_y, w$  - je stredná hodnota y-ovej zložky vstupnej rýchlosti vody,  $\text{m.s}^{-1}$
- $Q$  - objemový prietok,  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
- $D$  - vnútorný priemer rúry, mm



**Obrázok 40** Aplikované počiatočné a okrajové podmienky

6. Materiálové vlastnosti a nastavenie parametrov riešenia. Prúdiacou tekutinou bola voda rovnako ako aj v prípade meraní vo VÚVH. Na karte „*flotran setup/fluid properties, solution options*” je potrebné zadať parametre vody: hustota vody (pri danej teplote)  $\rho = 998,2 \text{ kg.m}^{-3}$ , kinematická viskozita  $\nu = 100,45 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ , nestlačiteľná tekutina. Taktiež je potrebné definovať režim prúdenia (laminárny/turbulentný). Použitím vzťahu 24 bola vypočítaná hodnota Reynoldsového čísla, na základe ktorého bol zvolený turbulentný režim, pretože od strednej hodnoty rýchlosti  $w \cong 0,12 \text{ m.s}^{-1}$  je  $Re > 10000$ .

7. Počet krokov iterácií súvisí s matematickou metódou riešenia. Počas prvých desiatich iterácií sa sledovala konvergencia riešenia, stabilita riešenia a správanie sa závisle premenných veličín (najmä  $v_x$ ,  $v_y$ ,  $p$ ). V prípade divergencie riešenia sa zmenou parametra FLDATA34 na karte „*flotran setup/relax-stab-cap/MIR stabilization*” z prednastavených hodnôt 0 na 1 dosiahla úspešná konvergencia riešenia v počiatočných iteráciách. Počet iterácií závisí od priebežných výsledkov a presnosti riešenia. V modeloch s pretokom riešenie po istých počtoch krokoch iterácií oscillovalo a teda vyšší počet iterácií už nemal vplyv na presnosť riešenia, keďže sa sledované hodnoty už nemenili.

8. Výpočet. Po vytvorení geometrického modelu, nastavení okrajových a počiatočných podmienok, parametrov riešenia nastáva fáza hrubého výpočtu. Dĺžka získavania samotného výpočtu závisí od počtu elementov (meshovania), od počtu iterácií a najmä od výpočtového výkonu použitého PC. Napríklad v simulácií D\_6 (hrubý pretok, jemný mesh) riešenie oscillovalo približne po 6000 iteráciách, ktoré na PC (dvojjadrový procesor 2 GHz, 4 GB RAM, WIN XP 32 bit) potrebovalo cca 20 hodín výpočtového výkonu. Z daného dôvodu výpočty prebiehali na PC, ktorý bol spravovaný cez vzdialené ovládanie. V prípade reštartovania výpočtu je potrebné zmazať súbory s priebežnými výsledkami \*.rfl v pracovnom adresári pred spustením výpočtu.

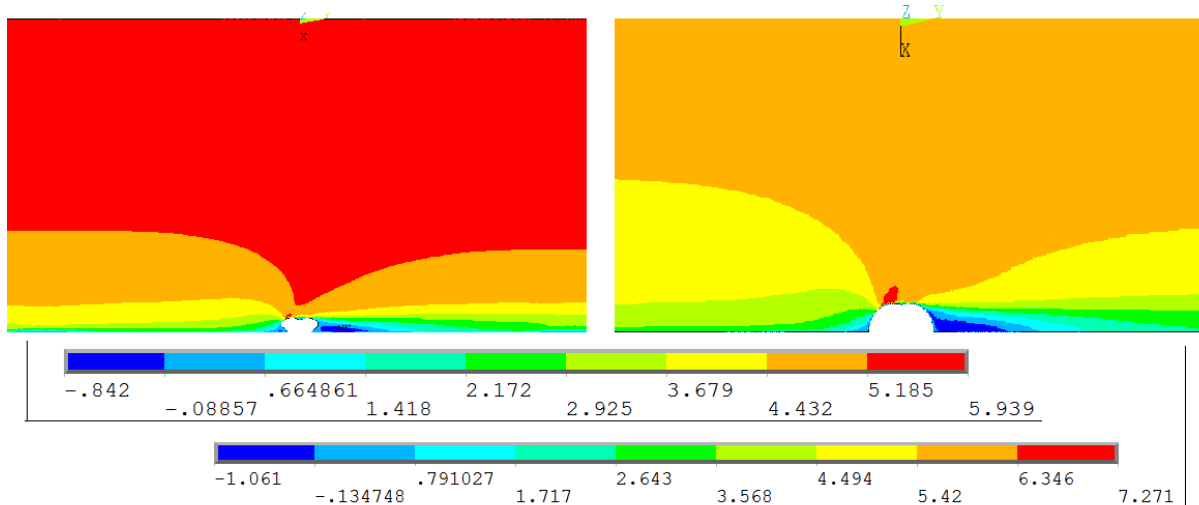
9. Kontrola výsledkov. Po ukončení hrubého výpočtu sa získané výsledky spracujú tzv. „*Postprocesorom*“ a môžu sa interpretovať.

### 4.7.3 Výsledky zo simulácií získané metódou MKP

Prvotným kontrolným výsledkom z každej simulácie bol rozdiel tlakov  $\Delta p$  odčítaný  $\pm 2$  cm od roviny zvaru rúry na stene rúry, teda v rovnakých miestach ako pri odbere tlakov počas meraní vo VÚVH BA.

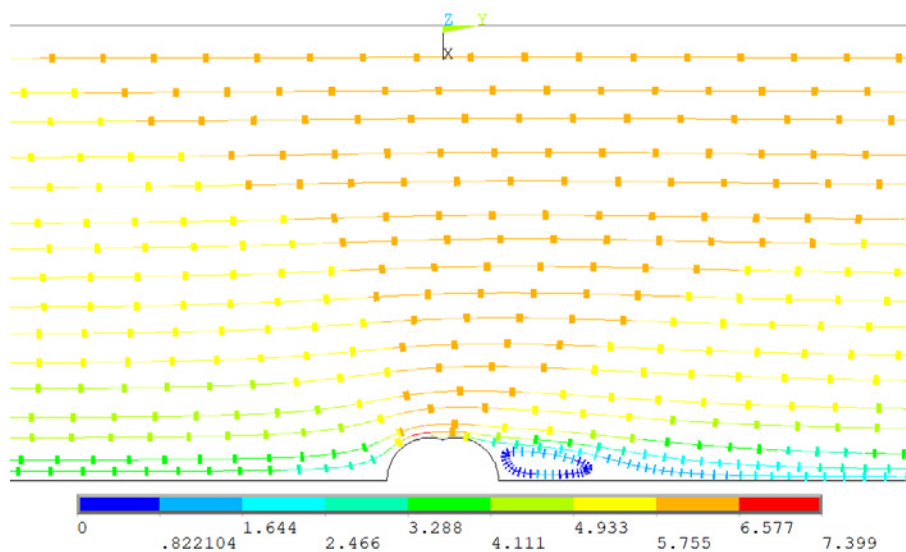
#### 4.7.3.1 Rýchlostné pomery

Jedným z výstupov simulácie sú rýchlostné pomery v potrubí. Zobrazené sú výsledné rýchlosti v  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  v okolí pretoku pri strednej vstupnej rýchlosti  $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (obrázok 41). Ako vidno z obrázkov v zvarom zúženej časti potrubia je nárast celkovej rýchlosti. V priestore za zvarom vzniká obrátený tok vplyvom turbulencie, ktorú spôsobuje zvar.



**Obrázok 41** Rýchlostné pomery v okolí pretokov v izolíniovom zobrazení pri strednej vstupnej rýchlosti  $w = 5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , vľavo malý pretok, vpravo veľký pretok

Turbulencie vidno aj na prúdnicach (obrázok 42) v polovičnom 2D zobrazení.



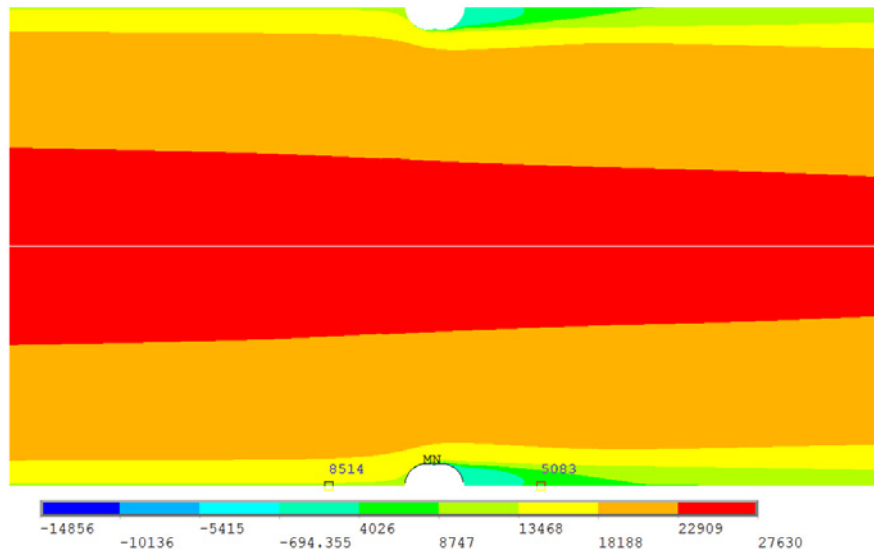
**Obrázok 42** Rýchlostné pomery v okolí veľkého pretoku v prúdnicovom zobrazení pri strednej vstupnej rýchlosti  $w = 5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , za pretokom vidno lokálne turbulentné prúdenie (modrá prúdnic)



Keďže geometrický model je symetrický cez os Y, je možné symetrické rozšírenie zobrazenia výsledkov z polovičného 2D zobrazenia na plné 2D zobrazenie.

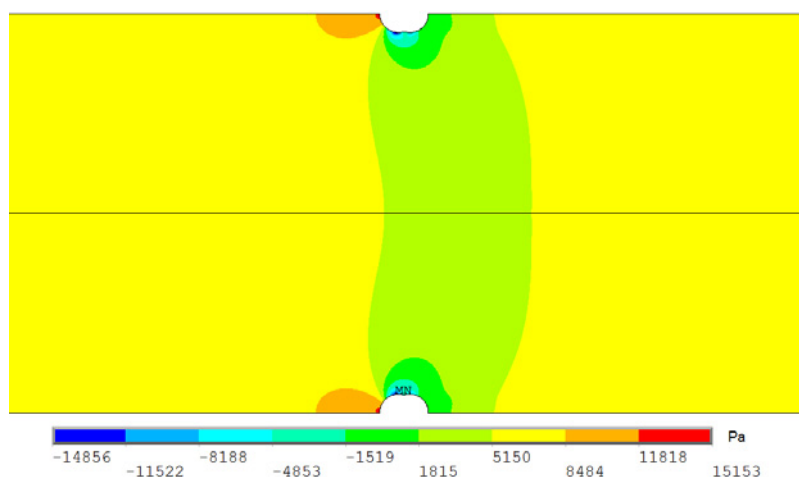
#### 4.7.3.2 Tlakové pomery

Ako už bolo uvedené prvé kritérium posúdenia správnosti získaných výsledkov zo simulovania, bolo založené na rozdiel celkových tlakov  $\Delta p$  v daných odberných miestach, ako opisuje obrázok 43.



**Obrázok 43** Tlakové pomery v okolí veľkého pretoku v izolíniovom zobrazení pri strednej vstupnej rýchlosti  $w = 5 \text{ m.s}^{-1}$ , Hodnoty celkového tlaku sú uvedené v Pa, ako vidno z obrázka, za pretokom vzniká podtlak

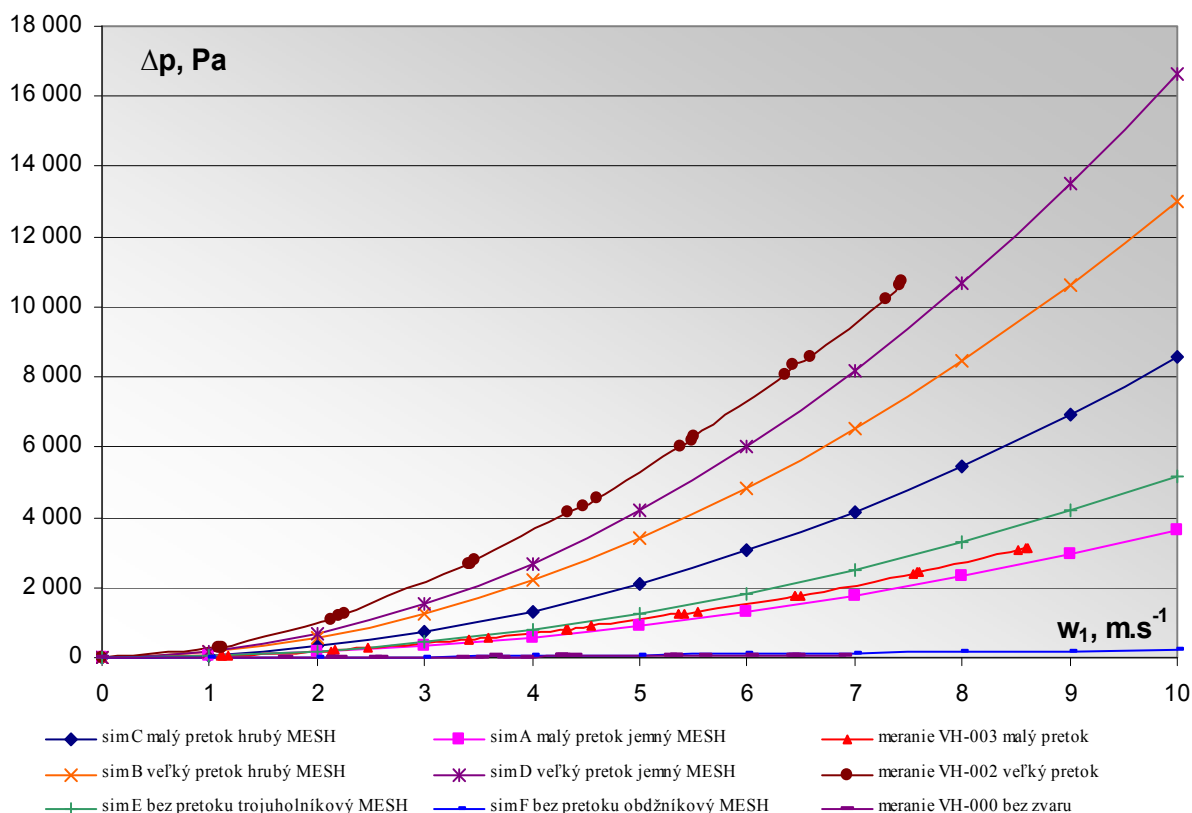
Dôležitým ukazovateľom sú aj hodnoty relatívneho tlaku v okolí zvaru (za predpokladu, že na výstupe potrubia je nulový tlak, ako bolo zadané okrajovými podmienkami na začiatku výpočtu), ktoré sú zobrazené na obrázku 44.



**Obrázok 44** Relatívne tlakové pomery v okolí zvaru v izolíniovom zobrazení pri strednej vstupnej rýchlosti  $w = 5 \text{ m.s}^{-1}$ , Hodnoty relatívneho tlaku sú uvedené v Pa, ako vidno z obrázka pred zvarom vzniká pretlak, za zvarom vzniká podtlak.

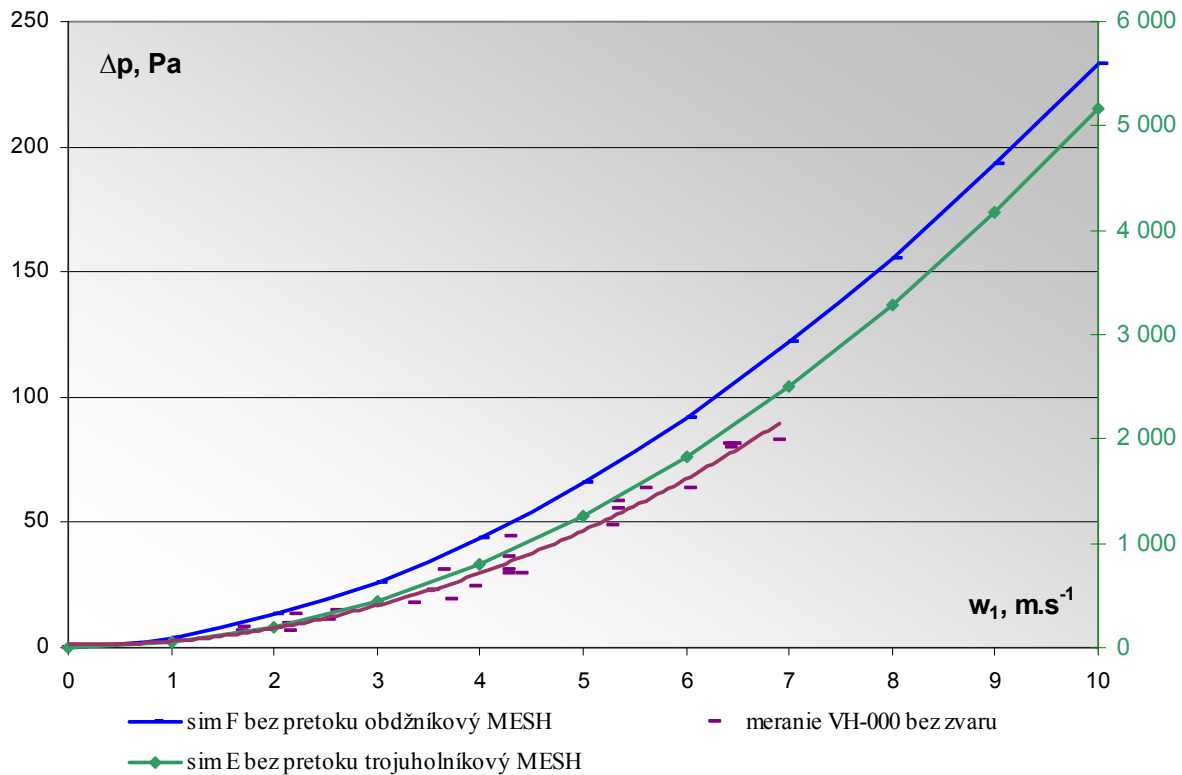
#### 4.7.4 Porovnanie výsledkov získaných z merania tlakových strát vo VÚVH a zo simulácií pomocou programu ANSYS

Hodnoty rozdielu tlakov  $\Delta p$  pred a za zvarom pre simulované vzorky zvarov VH-003 ( $T_z = 180\text{ °C}$ ,  $\Delta t = 10\text{ s}$ , malý pretok), vzorky VH-002 ( $T_z = 280\text{ °C}$ ,  $\Delta t = 0,5\text{ s}$ , veľký pretok) ako aj pre nezváranú rúru sú uvedené v prílohe v tabuľke 14. Grafické zobrazenie závislosti  $\Delta p = f(Q, \text{zvar})$  najlepšie vystihuje obrázok 45.

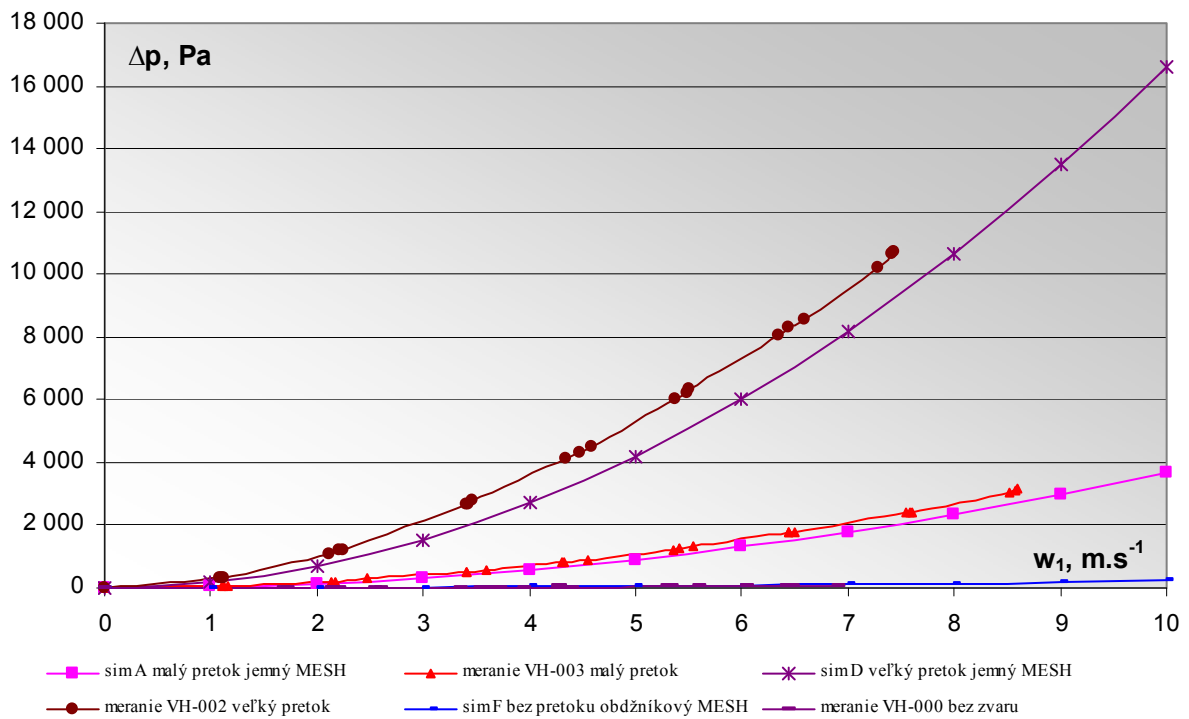


**Obrázok 45** Porovnanie nameraných a odsimulovaných hodnôt  $\Delta p$  od vstupnej strednej rýchlosti  $w$ . Parametrom závislostí je typ vzorky zvaru a kvalita meshovania.

Ako vidno zo zobrazených priebehov, pri vyššej kvalite meshovania (vyšší počet elementov) odsimulované hodnoty sa približujú k nameraným. Namerané hodnoty  $\Delta p$  sú väčšie ako odsimulované hodnoty. Ako dôkaz dôležitosti správnosti typu meshovania slúži porovnanie hodnôt  $\Delta p$  získaných pri trojuholníkovom a pri obdĺžnikovom meshovaní pri simulovaní modelu rúry bez zvaru. Pri trojuholníkovom (nelogickom) meshovaní sú hodnoty  $\Delta p$  o dva rády posunuté smerom hore, ako vidno porovnaním obrázka 45 (zelená krivka) s obrázkom 46 (zelená krivka). Vyselektované správne odsimulované hodnoty  $\Delta p$  získané metódou MKP a namerané hodnoty z merania tlakových strát vo VÚVH BA sú zobrazené na obrázku 47.



**Obrázok 46** Porovnanie vplyvu meshovania na korektnosť odsimulovaných hodnôt. Zelená krivka sú nesprávne získané hodnoty (zelená stupnica) použitím nevhodného spôsobu meshovania.



**Obrázok 47** Porovnanie vyselektovaných nameraných a odsimulovaných hodnôt  $\Delta p$  od vstupnej strednej rýchlosti  $w$  (prietoku  $Q$ )

Pre účely vyčíslenia vplyvu zvaru na veľkosť tlakových strát vo zvaranej rúre a nezvaranej rúre boli definované parametre  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ .

$$\Delta X_{002\ 2cm} = \Delta p_{002\ 2cm} - \Delta p_{000\ 2cm} \quad (49)$$

$\Delta X_{002\ 2cm}$  - rozdiel rozdielov tlakov vo zvaranej rúre (vzorka VH-002) a nezvaranej rúre vo vzdialenosti  $\pm 2$  cm od roviny zvaru, Pa

$\Delta p_{002\ 2cm}$  - rozdiel tlakov na zvaranej rúre (vzorka VH-002) zistený  $\pm 2$  cm od roviny zvaru, Pa

$\Delta p_{000\ 2cm}$  - rozdiel tlakov na nezvaranej rúre (vzorka VH-000) zistený  $\pm 2$  cm od roviny zvaru, Pa

$$\Delta Y_{002\ 2cm} = \frac{\Delta p_{002\ 2cm} - \Delta p_{000\ 2cm}}{\Delta p_{000\ 2cm}} \times 100 \quad (50)$$

$\Delta Y_{002\ 2cm}$  - vplyv typu zvaru (vzorka VH-002) na celkové tlakové straty, %

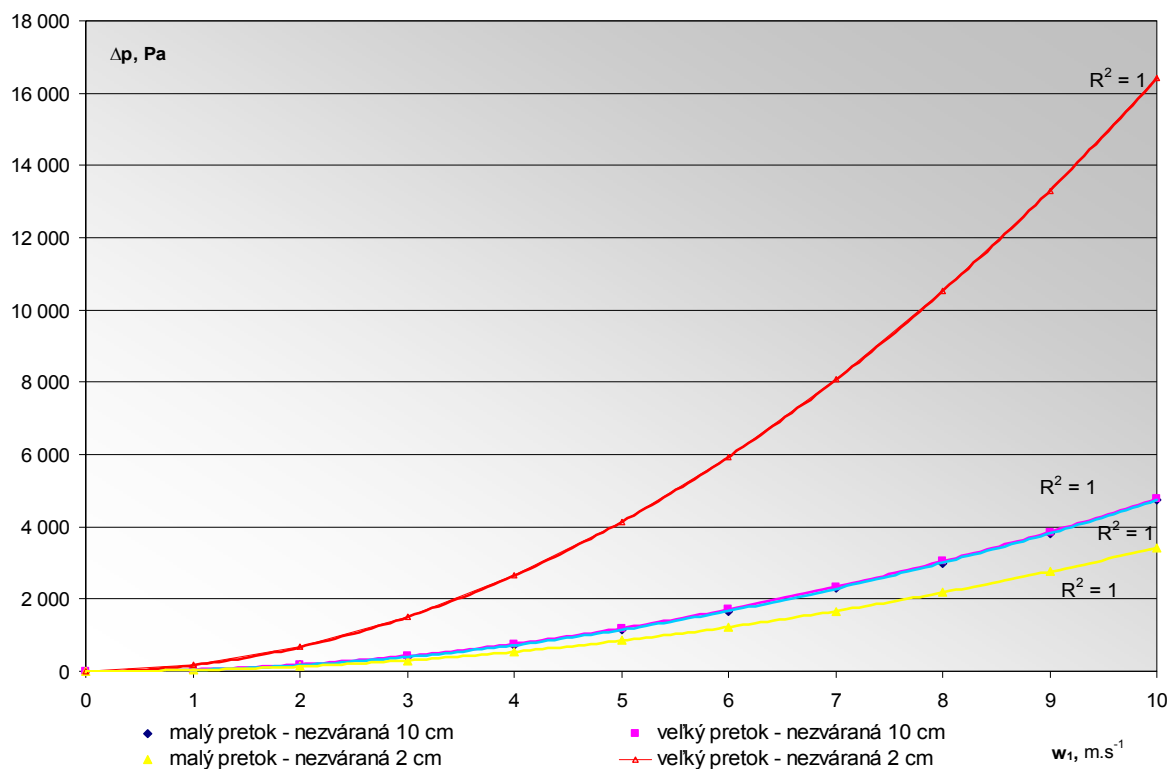
Hodnoty parametrov  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  pre rôzne vzdialenosti ( $\pm 2$  cm;  $\pm 10$  cm;  $\pm 1$  m;  $\pm 4$  m) sú uvedené v prílohe (Tabuľka A.15). Pri analýze parametra vplyvu typu zvaru na celkové tlakové straty  $\Delta Y$  sme dospeli k záverom:

- vo vzdialenosti  $\pm 2$  cm od roviny zvaru má zvar (clona) obrovský vplyv na miestne tlakové straty. Toto zistenie sa v praxi využíva práve v metóde merania prietoku potrubím pomocou clony, keď odberné miesta tlaku sú veľmi blízko clone, ako uvádzajú napr. aj autori (Chudý, 1999; Jarkovský, 1955).  $\Delta Y \approx 10^3$  %

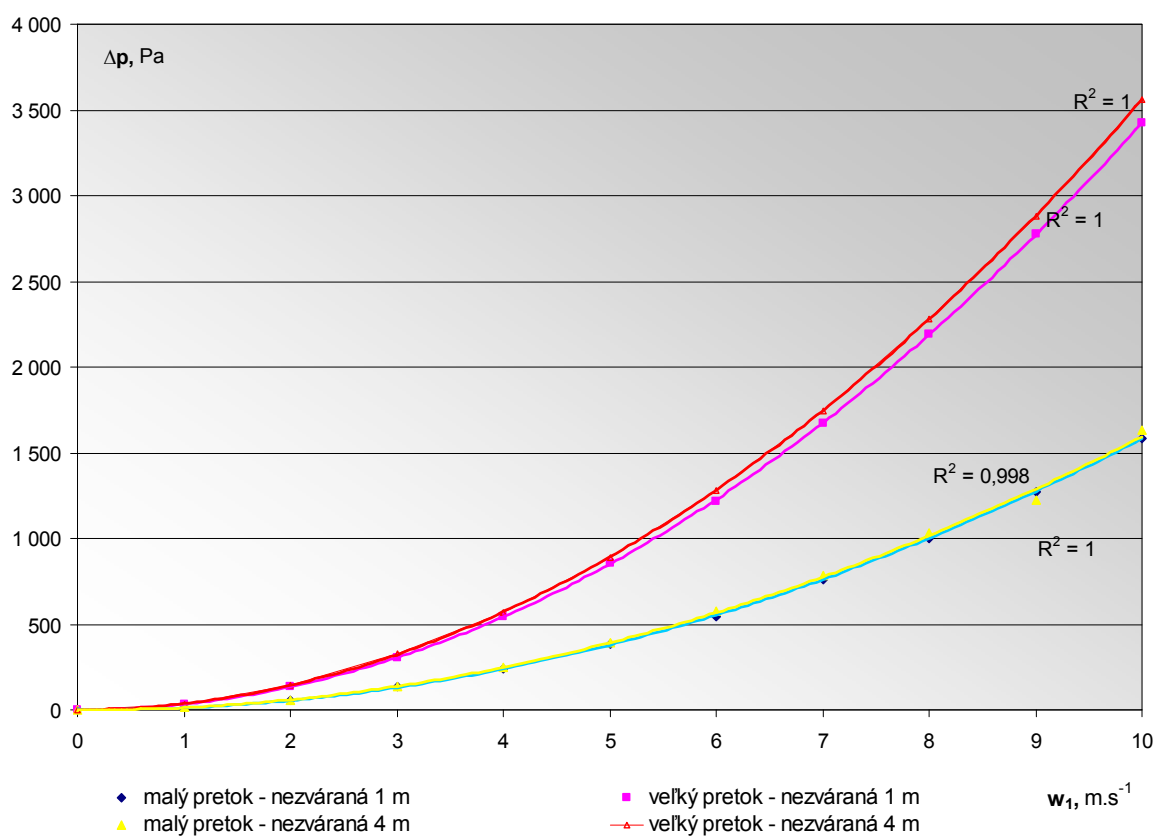
- vo vzdialenosti  $\pm 10$  cm od roviny zvaru, tvar a veľkosť pretoku nemá veľký vplyv na výsledné tlakové straty (obrázok 48). Pravdepodobne je to dôsledok turbulencie, ktorá sa najviac prejavuje za zvarom.  $\Delta Y \approx 10^2$  %

- vo vzdialenosti  $\pm 1$  m od roviny zvaru, tvar a veľkosť pretoku už má opäť vplyv na tlakové pomery (obrázok 49). V prípade vplyvu malého pretoku - zváraná vzorka VH-003, sú výsledné tlakové straty väčšie o 8 až 14 %, ako tlakové straty v nezvaranej rúre v závislosti od prietoku. V prípade veľkého pretoku - zváraná vzorka VH-002, sú tieto straty väčšie o 18 až 29 %.

- vo vzdialenosti  $\pm 4$  m od roviny zvaru, tvar a veľkosť pretoku má vplyv na tlakové pomery. Zvar ako prekážka v prúde sa už ale prejavuje menej, turbulencie za zvarom sa postupne stabilizujú. V prípade malého pretoku sú výsledné tlakové straty väčšie o 2 - 3 %, v prípade veľkého pretoku je to 5 až 7 %.



**Obrázok 48** Porovnanie vplyvu zvaru (tvar a veľkosť prietoku) a miesta odberu ( $\pm 2$  cm,  $\pm 10$  cm) na celkové tlakové straty pri rôznej vstupnej strednej rýchlosti  $w$  (prietoku  $Q$ )



**Obrázok 49** Porovnanie vplyvu zvaru (tvar a veľkosť prietoku) a miesta odberu ( $\pm 1$  m,  $\pm 4$  m) na celkové tlakové straty pri rôznej vstupnej strednej rýchlosti  $w$  (prietoku  $Q$ )

## 5 DISKUSIA

V praxi používaný a zaužívaný spôsob zvárania plastových rúr metódou na tupo je praxou overený a v porovnaní s elektrofúznym zváraním relatívne spoľahlivý. Doterajšia koncepcia zvárania využíva hydraulický systém ako zdroj energie na vytvorenie prítlačnej sily  $F$ , ktorá pôsobí na zvarence zváraných rúr. Ako sa praxou ukázalo slabé miesto v procese zvárania je práve spôsob navodenia a regulovania žiadanej hodnoty prítlačnej sily  $F$ , nakoľko v teréne celý priebeh procesu zvárania závisí od prístupu a skúsenosti operátora zváracieho zariadenia. Navrhnutý nový spôsob zvárania realizovaný pomocou novej koncepcie zváracieho systému odstraňuje hlavné nedostatky ktorými sú:

- navodenie maximálnej hodnoty prítlačnej sily  $F$  hneď na začiatku vlastného zvárania (fáza 4 podľa zváracieho diagramu v zmysle ISO 11414: 1996), čo má za následok nekontrolovateľné vytlačenie časti taveniny a teda aj vznik vonkajších ako aj vnútorných pretokov (Árendás a kolektív, 2002),

- vplyv operátora na proces zvárania. Tento nedostatok je vyriešený zautomatizovaním zváracieho systému, operátor je odbremený od riadiacej funkcie a zostáva iba v pozícii obsluhy, teda jeho riadiaci vplyv je minimálny (Hrubý, 2001). Automatizácia zariadenia zároveň prináša aj výhodu vo forme lepšej opakovateľnosti a reprodukovateľnosti procesu zvárania, pretože nastavením procesným parametrov sa definujú výstupné charakteristiky zvaru a ich rozptyl by mal byť známy a minimálny. V minulosti operátor vypracovával protokol o priebehu zvárania, ktorý bol založený na posúdení rozmerov (šírka, výška) vonkajšieho pretoku, čo bola zároveň aj jediná spätná väzba v procese zvárania. (Tarcsi, 2005). V novej koncepcii je privedením spätnej väzby (snímač sily, enkodér v krokovom motore) riadené rozhodovanie frekvenčného meniča a program teda kontroluje a riadi proces zvárania na základe zvoleného algoritmu (Lukáč, 2005). Operátor iba dohliada na riadený proces, záznam s priebehom definovaných parametrov o vykonanom zváracom procese sa bude generovať automaticky.

Na prototyp nového zváracieho zariadenia boli vykonané pokusné zvary s materiálom PE 100 DN 110 SDR 11 podľa nového zváracieho algoritmu (obrázok 12). Navrhnutý plán pokusov so vstupnými faktormi ( $T_z$ ,  $\Delta t$ ) bol podľa metodiky pokusov realizovaný. Kombináciou výsledkov získaných z merania tlakových strát, z merania kríповých charakteristík a zo simulácií prúdenia tekutín boli navrhnuté nasledovné optimálne hodnoty: stredná hodnota teploty zváracieho zrkadla  $T_z = 231 \pm 1$  °C a navrhnutý interval ochladzovania  $\Delta t = 0,5 \pm 0,09$  s. Podľa dánskej technickej normy DS/INF 70 - 1: 1992 má byť

hodnota teploty zváracieho zrkadla v rozsahu 200 - 220 °C, podľa štandardu ISO 11414: 1996 pre rúry DN 110 má byť hodnota teploty  $210 \pm 10$  °C. Obe normy odporúčajú teda ten istý rozsah teplôt, nami získaná hodnota teploty je mierne vyššia, ale treba pripomenúť, že zváracie pracovisko bolo navrhnuté a testované iba v laboratórnych podmienkach. Nakoľko spomenuté parametre boli získané iba pre rúry PE 110 DN 110 SDR 11, pre iný materiál resp. ten istý materiál odlišného SDR radu, bolo by vhodné v budúcnosti spomenutou metodikou pokusov zadefinovať nové hodnoty parametrov  $T_z$ ,  $\Delta t$ . V praxi síce takéto normy a smernice s tabuľkovými hodnotami parametrov zvárania už existujú, ale tieto sú platné pre starú koncepciu zvárania s maximálnym prítláčnym tlakom vytváraním na začiatku procesu zvárania.

Ako už bolo uvedené, zváracie pracovisko bolo navrhnuté a testované iba v laboratórnych podmienkach. V prípade, že by prototyp zváračky bol uvedený do praxe, je potrebné ho konštrukčne modifikovať. Prototyp je v súčasnom stave konštrukčne navrhnutý na zváranie vzoriek rúr (rádovo desiatky cm) nie na dlhé kusy, ktoré sa v praxi používajú, t.j. rádovo metre (Pipelife, 2008). Prípadná modifikácia musí ešte vyriešiť nasledovné úlohy:

- premiestnenie zdroja energie, ktorý je momentálne umiestnený v osi rúry mimo os rúry. Krokový motor, lineárna prevodovka a zváraná rúra by si totiž vzájomne priestorovo prekážali.

- výkonnejší zdroj energie. Krokový motor, ako zdroj energie pre vyvinutie prítláčnej sily  $F$  je dimenzovaný iba na rozmerovo krátke vzorky rúr. V prípade dlhých rúr sa do výslednej hodnoty sily musia započítať aj ťahové zložky síl z vlastnej tiaže rúr, ktoré sa v prototypy zanedbávali, či axiálne zložky síl v prípade zvárania rúr dodávaných navinutých na cievkach.

Merania tlakových strát vo VÚVH BA dokázali, že na vzniknutých vnútorných pretokoch dochádza k nežiaducim tlakovým stratám. Najnižšie hodnoty tlakových strát boli namerané na vzorkách VH-003 a VH-004, teda pri teplote zváracieho zrkadla  $T_z = 180$  °C. Ako sa počas meraní ukázalo na presnosť merania má veľký vplyv miesto odberu tlaku a aj jeho prevedenie (Jarkovský, 1955). V prípade opakovaní meraní v budúcnosti, presnosť metódy merania by sa zvýšila konštrukčnou úpravou prípravku na odber tlaku tak, aby vždy bola dodržaná rovnaká vzdialenosť odberu tlaku (v našom prípade  $\pm 2$  cm) od roviny zvaru. Simuláciou prúdenia tekutín v okolí zvaru sa totiž dokázalo, že lokálne turbulентné prúdenie má veľký vplyv na miestne tlakové pomery a odchýlka miesta merania v desatinách milimetra má zásadný vplyv na rozdiel tlakov, ako dokumentuje aj obrázok 44. Na chyby merania má obrovský vplyv aj realizovanie procesu prípravy miesta odberu tlaku. Do rúry je totiž

potrebné vyvŕtať otvor, vzniknuté hobliny sa prejavujú ako lokálne nerovnosti a ovplyvňujú miestne tlakové pomery, ako sa zistilo pri prvých pokusných meraniach. Tvorba hoblín bola eliminovaná správnym spôsobom vŕtania. Ak aj nejaké predsa vznikli, boli dôkladne odstránené pomocou jemného brúsneho papiera.

Pri simulovaní prúdenia tekutín v okolí zvaru pri procese meshovania - tvorby siete konečných prvkov bolo dokázané, ako vplýva typ siete na vypočítané hodnoty (Blejchar, 2009). Pri nesprávne zvolenom trojuholníkovom type sieťovania v prípade nezváratej rúry, aj keď veľmi hustom - jemnom, boli získané výsledky, ktorých fyzikálna závislosť  $\Delta p = f(Q)$  síce bola kvadratická - správna, ale s nesprávnymi hodnotami, vyššími až o dva rády. Pri porovnaní tlakových strát medzi malým a veľkým pretokom, bol pozorovaný zaujímavý jav, keď tlakové straty odčítané vo vzdialenosti  $\pm 10$  cm od roviny zvaru boli takmer rovnaké, t.j. ako keby nezáviselo na veľkosti a tvare vnútorného prietoku. Tento jav je pravdepodobne spôsobený turbulenciou tekutiny za zvarom (Drábková, 2007).



## 6 ZÁVERY

Navrhnuté experimentálne zariadenie na zváranie plastových rúr metódou na tupo využívajúcu novú koncepciu zváracieho algoritmu je funkčné, aj keď ide iba o prototyp zariadenia. Zo získaných výsledkov vyplýva, že reguláciou stláčacej sily  $F$  počas kroku 4 vo zváracom algoritme sa dajú získať rovnako pevné zvary, ako v prípade klasickej koncepcie zváracieho zariadenia. Navyše vzniknuté pretoky majú menšie vonkajšie, ale najmä vnútorné rozmery, ktoré spôsobujú hydrodynamické odpor (tlakové straty). Automatizácia zariadenia navyše minimalizuje ľudský faktor v procese zvárania a teda výsledné zvary by mali byť spoľahlivejšie, ako pri klasickej koncepcii. Zvary získané metódou na tupo pravdepodobne nikdy nebudú rovnako spoľahlivé, ako zvary získané elektrofúznym zváraním, ale oproti elektrofúznemu spôsobu zvárania sú cenovo výhodnejšie.

Prototyp zariadenia založený na kombinácii krokového motora, lineárnej prevodovky a frekvenčného meniča je plne funkčný ako je dokázané získanými výsledkami, ale je navrhnutý iba pre použitie v laboratórnych podmienkach a jeho hlavným poslaním bolo odskúšať novú koncepciu zváracieho algoritmu. Už pri jeho návrhu sa vedelo, že v danom konštrukčnom zhotovení sa dajú získať iba vzorky zvarov a teda nie je konštrukcia aplikovateľná priamo do praxe. Na zhotovených pokusných vzorkách zvarov (deviatich typoch) bol analyzovaný vplyv zváracieho teploty  $T_z$  a intervalu ochladzovania  $\Delta t$  na výsledné parametre zvarov podľa plánovaného pokusu. Pri vyhodnocovaní výsledkov pomocou aplikácie MESOS sa uvažovalo so závislosťami:

- dlhodobý zvárací koeficient  $f_s = f(T_z, \Delta t)$ . Pomocou kríповých pokusov sa zistilo, že pri ľubovoľnej kombinácii vstupných faktorov ( $T_z, \Delta t$ ), dlhodobý zvárací koeficient neklesol pod hodnotu 0,9. Najpevnější zvary podľa obrázku 35 boli zhotovené pri teplote  $T_z = 280$  °C a pri nulovom intervale ochladzovania. Pri tejto teplote boli zároveň aj zistené najväčšie rozmery vnútorných pretokov negatívne vplyvajúce na tlakové straty.

- relatívne prietokové číslo  $\Gamma = f(T_z, \Delta t)$ . Na základe pomeru tlakových strát zistených na vzorke zváranj rúry ku meraným tlakovým stratám na vzorke nezváranj rúry bola nepriamo vyhodnotená súvislosť medzi rozmermi vnútorných pretokov na tlakové straty vznikajúce pri prúde. Ako sa ukázalo, navrhnutá metóda tlakových strát obrátenou metódou merania tlakových strát pri známom prietoku, je v praxi aplikovateľná. Najnižšie tlakové straty  $\Delta p$  (najvyššie prietokové číslo  $\Gamma$ ) boli zmerané pri teplote zrkadla  $T_z = 180$  °C, kedy ešte hodnota dlhodobého zváracieho koeficientu  $f_s$  neklesla pod prijateľnú hodnotu 0,9.

- relatívne prietokové číslo  $\Gamma = f(h)$ . Analýzou súvislostí medzi závislosťou tlakových strát a vnútornými rozmermi zmeranými dodatočne sa preukázalo, že prietokové číslo je takmer výlučne závislé na výške vnútorného prietoku. Získané vnútorné rozmery boli zároveň použité v geometrickom modeli zvaru v prípade simulácií pomocou metódy konečných prvkov.

Celkovou optimalizáciou sa dospelo k výsledným hodnotám zváracích parametrov  $T_z$  a  $\Delta t$ . Optimálny zvar sa dá na prototyp zváracieho zariadenia v laboratórnych podmienkach dosiahnuť pri teplote zváracieho zrkadla  $T_z = 231 \pm 1$  °C a intervale ochladzovania  $\Delta t = 0,5 \pm 0,09$  s. Je to optimálny kompromis podľa zvoleného plánu pokusov medzi pevnosťou zvaru (vysoká teplota  $T_z$ ) a tlakovými stratami (nízka teplota  $T_z$ ).

Simuláciou prúdenia tekutín pomocou metódy konečných prvkov sa verifikovala teória prúdenia tekutín v uzavretých potrubiach v okolí prekážok, ktoré v našom prípade tvorili vnútorné pretoky. Na modeloch vytvorených podľa získaných geometrických rozmerov boli dokázané súvislosti medzi rozmermi vnútorných pretokov a tlakovými stratami. Ako sa ukázalo simulovaním na dvoch modelových situáciách pomocou novej koncepcie sa dajú znížiť tlakové straty vhodným nastavením zváracích parametrov až o niekoľko percent v závislosti na zvolenom prietoku. Za uváženie by stálo odsimulovať tlakové straty vznikajúce na zvaroch, ktoré by vznikli na pôvodnom zváracom zariadení WIDOS 4600 s hydraulickým pohonom, teda klasickou metódou a porovnať ich s novými zvarmi získanými novou koncepciou. Toto uvažovanie by bolo ale čisto teoretické, nakoľko pomocou klasickej koncepcie každý získaný zvar mal iné náhodné rozmery.

## 7 NÁVRH NA VYUŽITIE VÝSLEDKOV

Hlavným výsledkom je prototyp zariadenia na zváranie polyetylénových rúr, ktorý je plne funkčný, aj keď len v laboratórnych podmienkach. V ďalšej etape riešenia zvoleného problému by bolo vhodné experimentálne zariadenie upraviť tak, aby bol prototyp použiteľný aj praxi. Nemenej dôležitým výsledkom je aj nová koncepcia zvárania, ktorá bola odskúšaná na materiáli PE 100 DN 110 SDR 11 na spomenutom zariadení. Bolo by vhodné na základe zvolenej metodiky odskúšať novú koncepciu aj na iných rúrových radách SDR, prípadne na príbuznom polyetylénovom materiáli PE 80, či na rúrach PPR z polypropylénu. V rámci novej koncepcie sú definované nové optimálne parametre zvárania  $T_z = 231 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$  a interval ochladzovania  $\Delta t = 0,5 \pm 0,09 \text{ s}$ , ktoré v budúcnosti môžu slúžiť ako základ pre nové zvaracie tabuľky, ak by sa v praxi presadilo zváranie na tupo novou koncepciou.

Navrhnutá metóda na meranie tlakových strát pomocou U-trubice použitá vo VÚVH BA bola tiež praktickými meraniami overená a je použiteľná aj pre iné úlohy, kde treba zisťovať tlakové straty vznikajúce v potrubiach pri prúde tekutiny. Z výsledkov praktických meraní vo VÚVH, ako aj z výsledkov získaných simulovaním prúdenia pomocou metódy konečných prvkov vyplýva, že zmenou koncepcie zvárania sa dajú znížiť tlakové straty aj o niekoľko percent, záleží na type zvaru a hodnote prietoku. V prípade konštrukčnej úpravy prototypu zariadenia tak, aby sa dali zvarovať nielen vzorky rúr, ale celé kusy rúr, by bolo vhodné zistiť výsledné tlakové straty navrhnutou metódou.

Nová koncepcia zvaracieho zariadenia zároveň aj zautomatizovaním pracoviska vylučuje vplyv ľudského faktora na kvalitu zvarového spoja. Priamo z priebehu procesu zvárania sa dá pomocou zvolených priebehov vyhodnotiť, či zvarací proces bol realizovaný podľa zadaných parametrov, dá sa teda overiť, či je v súlade s predpokladaným priebehom. Dodržanie predpísanej kvality spoja má významný vplyv na zvýšenej životnosti potrubia, ktorá sa v budúcnosti ekonomicky prejaví na znížených nákladoch na údržbe, znížených nákladoch na likvidáciu poškodeného potrubia a ekologicky na znížení množstva plastového odpadu, či znížení vplyvu údržby na životné prostredie pri procese údržby. Z hľadiska energetickej bilancie zníženie tlakových strát pri nezmenenej pevnosti zvarov šetrí energetické zdroje nutné na kompenzovanie strát nevyhnutne vznikajúcich pri preprave médií.

Skutočnosť, či sa prípadné modifikované zväracie zariadenie, resp. nová koncepcia zvärania v praxi zavedie a presadí, bude overená až po dlhšej dobe. Predpoklady na ich uplatnenie existujú.

## 8 ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

1. ANSYS, Inc. CFX 11.0 - Tutorials, ANSYS CFX, Release 11.0
2. ÁRENDÁS, P. - TÓTH, J. - BEDNÁR, Š. - KUCHARA, A - PAULOVÍČ, S. 2008. *Vplyv parametrov zvarania na tupo na prúdenie kvapalín v plastových potrubiach*. Záverečná správa riešenia projektu APVT-99-01420. VÚSAPL, a.s. Nitra, 2008
3. ÁRENDÁS, P. 2005. *Návrh nových metód skúšania pevnosti elektrofúzných zvarov* [online]. 2007 Dostupné na internete <<http://www.sgoa.sk/Casopis/>>
4. ÁRENDÁS, P. a kol. 2002. *Vývoj vedomostnej základne a know-how na optimalizáciu techniky zvarania na tupo pre suroviny PE*. VÚSAPL, a.s. Nitra, 2002
5. ÁRENDÁS, P. a kol. 1999. *Pokračovanie rozvoja technického informačného systému pre monitorovanie plastových prvkov plynovodov*. VÚSAPL, a.s. Nitra, 1999
6. ASTM F876-63 *Standard Specification for Crosslinked Polyethylene (PEX) Tubing*
7. ASTM D1248 *Standard Specification for Polyethylene Plastics Extrusion Materials for Wire and Cable*
8. BENČA, Š. 2004. *Výpočtové postupy MKP*. [online]. 2007 Dostupné na internete <<http://mkp-fem.sk/STRA01/Uvod1.pdf>>
9. BEZÁK, J. 2005. *Využitie plastov v plynárenstve* [online]. 2007 Dostupné na internete <<http://www.sgoa.sk/Casopis/>>
10. BLEJCHAR, T. 2009. *Návody do cvičení "Modelování proudění" - CFX*. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Ostrava, 2009. ISBN 978-80-248-2050-7, 133 s.
11. BONET, J. - WOOD, R. 1997. *Nonlinear continuum mechanics for finite element analysis*. Cambridge University Press, 1997. ISBN 0-521-57272-X, 279 s.
12. ČIMO, J. - BÚS, Z. - HRUBÝ, D. 2002. *Návrh monitorovacieho zariadenia na meranie fyzikálnych veličín*. In *Elektroenergetické, automatizační a řídicí systémy: Sborník z mezinárodního vědeckého semináře: Praha 11.6-12.6.2002*. Praha: Česká zemědělská univerzita, 2002. ISBN 80-213-0902-4, s. 23-28.
13. DIN 8075: 1999-08 *Rohre aus Polyethylen (PE) - PE 63, PE 80, PE 100, PE-HD - Allgemeine Güteanforderungen, Prüfungen*

14. DIN 16932 *Glass in building. Destructive-windstorm-resistant security glazing. Test and classification*
15. DRÁBKOVÁ, S a kol. 2007. *Mechanika tekutín*. VŠB - Technická univerzita Ostrava, Ostrava, 2007. ISBN 978-80-248-1508-4, 257 s.
16. DS/INF 70-1: 1992 *Plastic pipes - Butt fusion of polyolefine pipe systems - Information, scope and definitions*
17. DVS 2207 *Welding of thermoplastics - Heated tool welding of pipes, pipeline, components and sheets made from PE-HD*
18. DVS 2208 *Welding of thermoplastics - Machines and devices for the heated tool welding of pipes, pipeline components and sheets*
19. EN 1555 *Plastics piping systems for the supply of gaseous fuels. Polyethylene (PE). General*
20. EUSALENKO, G.B., KONDRATENKO, V. 1992. *Morphology and properties of semicrystalline polymer butt welds*, DVS- Berichte, Bd.147, 1992, p. 3-5.
21. GÉCI, T. - HRUBÝ, D. 2007. *Využitie virtualizácie pre testovanie programového vybavenia prenosných meracích prístrojov*. In Informačné a automatizačné technológie v riadení kvality produkcie: medzinárodný vedecký seminár, 5. - 7. septembra 2007 Nitra. Nitra: SPU, 2007. s. 31-36.
22. GROM, J. 1990. *Teória a technológia spracovania plastov*. Trnava: STU MfF Trnava, 1990
23. HILCOVSKÁ, E. - GALLIK, R. 2008. *Počítačová podpora projektovania EZ pomocou ANSYS CFX*. Strojnícka fakulta TU v Košiciach, Košice, 2008, ISBN 978-80-553-0135-8, 129 s.
24. HRUBÝ, D. - BAJLA, J. 1999. *Kalibrácia optoelektronických snímačov sily*. In Acta technologica agriculturae. ISSN 1335-2555, 1999, roč. 2, č. 1, s. 24-25.
25. HRUBÝ, D. - OLEJÁR, M. *Optimalizácia parametrov PID regulátora v procese tepelného spracovania mäsových výrobkov*. In Acta technologica agriculturae. - Nitra: Slovenská Poľnohospodárska Univerzita, 1998. ISSN 1335-2555, 2005, roč. 8, č. 3, s. 81-84
26. HRUBÝ, D. - POKORNÝ, K. 2001. *Aplikácie jednočipových mikropočítačov na automatizáciu merania*. Nitra: Slovenská poľnohospodárska univerzita, 2001. 100 s.

27. CHUDÝ, V. - PALEŇČÁR, R - KUREKOVÁ, E. - HALAJ, M. 1999. *Meranie technických veličín*, Slovenská technická univerzita v Bratislave, 1999, ISBN 80-227-1275-2
28. ISO 4433-1: 1997 *Thermoplastics pipes -- Resistance to liquid chemicals -- Classification -- Part 1: Immersion test method*
29. ISO 4433-2: 1997 *Thermoplastics pipes -- Resistance to liquid chemicals -- Classification -- Part 2: Polyolefin pipes*
30. ISO 11414: 1996 *Plastics pipes and fittings -- Preparation of polyethylene (PE) pipe/pipe or pipe/fitting test piece assemblies by butt fusion*
31. ISO 13953 *Polyethylene (PE) pipes and fittings -- Determination of the tensile strength and failure mode of test pieces from a butt-fused joint*
32. JARKOVSKÝ, E. 1955. *Základy praktického výpočtu clon, dýz a Venturiho trubíc*. SNTL Praha, 1955.
33. LUKÁČ, O. - HRUBÝ, D. 2005. *Meranie teploty a vlhkosti inteligentným snímačom*. In Sekel 2005: Mezinárodní odborní seminář kateder zajišťujících výuku elektrotechnických předmětů na neelektrotechnických fakultách. - Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2005
34. LUNAPLAST, 2008. *Typy a vlastnosti polyetylénu* [online]. 2008 Dostupné na internete <<http://www.lunaplast.cz>>
35. MARTINEC, L. 1995. *Štruktúra a vlastnosti zvarových spojov polyolefínov*. Zborník z prednášok 1. Medzinárodnej konferencie Využitie plastov v slovenskom plynárstve. 18. – 19. máj 1995 Vysoké Tatry – Stará Lesná
36. MATNET, 2008. *Polyetylén* [online]. 2008 Dostupné na internete [www.matnet.sav.sk/index.php?ID=504](http://www.matnet.sav.sk/index.php?ID=504)
37. MESOS, 2010. *MESOS for Windows – manual only- handbuch\_mesos.pdf* [online]. 2010 Dostupné na internete < [www.skz.de/content/Joo/index.php?option=com\\_content&task=view&id=265&Itemid=118](http://www.skz.de/content/Joo/index.php?option=com_content&task=view&id=265&Itemid=118)>
38. METALNET, 2007. *Technický manuál: Zváranie a inštalácia tlakových vodovodných potrubí z polyetylénu (PE)* [online]. 2008 Dostupné na internete <<http://www.metalnet.eu>>
39. MŽP SR č. 284/2001 z. z. *Kategorizácia odpadov*
40. PIPECO, 2007. *Zváranie a inštalácia tlakových vodovodných potrubí z polyetylénu (PE)* [online]. 2007 Dostupné na internete <<http://www.pipeco.sk>>

41. PIPELIFE, 2008. *Potrubia z polyetylénu* [online]. 2008 Dostupné na internete <<http://www.pipelife.cz>>
42. PLASTIKA, 2007. *Tlakový potrubný systém z PE* [online]. 2007 Dostupné na internete <<http://www.plastika.sk>>
43. POTOČAN, J. 1984. *Mechanika tekutín*. Slovenská vysoká škola technická, Bratislava, 1984.
44. RATAJ, V. 2010. *Metodika písania záverečných prác na SPU v Nitre*, Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre, Nitra marec 2010, 84 s, ISBN 978-80-552-0361-4
45. STN EN 12201 *Plastové potrubné systémy z polyetylénu na zásobovanie vodou*
46. STN EN 12007 *Systémy zásobovania plynom. Plynovody na maximálny prevádzkový tlak do 16 bar vrátane*
47. STN EN 13067 *Personál pre zváranie plastov*
48. STN EN 13100-1 *Nedeštruktívne skúšanie zváraných spojov polotovarov z termoplastov časť 1 - Vizuálna kontrola*
49. STN EN ISO 1133 *Plasty. Stanovenie hmotnostného indexu toku taveniny (MFR) a objemového indexu toku taveniny (MVR) termoplastov (ISO 1133: 2005)*
50. STN ISO 31-3 *Mechanika*
51. STN 730823 *Požiarno - technické vlastnosti*
52. TARCSI, A. 2005. *Vzdelávanie, skúšanie a certifikácia zvaračov plastov a technológia zvárania* [online]. 2007 Dostupné na internete <<http://www.sgoa.sk/Casopis/>>
53. TÓTH, J. 2009. *Optimalizácia procesu zvárania na tupo v plastových potrubiach vzhľadom na vybrané charakteristiky toku tekutín*. Dizertačná práca. SPU Nitra, september 2009. 150 s.
54. ŽMINDÁK, M. - GRAJCIAR, I. - NOZDROVICKÝ, J. 2004. *Modelovanie a výpočty v metóde konečných prvkov. Diel I – Modelovanie v ANSYS*. Vedeteckotechnická spoločnosť pri Žilinskej univerzite v Žiline, Žilina, 2004. ISBN 80-968823-5-X, 208 s.



## 9 ZOZNAM PUBLIKOVANÝCH PRÁČ K DANEJ TÉME

1. PAULOVICH, S. - TÓTH, J.: Návrh experimentálneho pracoviska na zváranie plastových rúr na tupo. In: Zborník prednášok z medzinárodnej vedeckej konferencie "VIII. Medzinárodná vedecká konferencia mladých 2006", Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 12, - 14.6.2006. ISBN 80-228-1596-9, s. 194 – 199

2. TÓTH, J. - PAULOVICH, S.: Optimalizácia procesu zvárania na tupo vzhľadom na pretok zvaru a jeho pevnosť. In: Zborník prednášok z medzinárodnej vedeckej konferencie "VIII. Medzinárodná vedecká konferencia mladých 2006", Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 12, - 14.6.2006. ISBN 80-228-1596-9, s. 247 – 252

3. PAULOVICH, S. - TÓTH, J. – OLEJÁR. M.: Ovládanie krokového motora pri zváraní plastových rúr na tupo. In: Zborník prednášok z medzinárodnej vedeckej konferencie "IRES '06 – Informačné, riadiace a energetické systémy", Praha: Česká zemědělská univerzita, TF, 4. - 6. 9. 2006. ISBN 80-213-1520-2, s. 137 – 142

4. TÓTH, J. - PAULOVICH, S.: Automatizované ovládanie zvaračky plastových rúr na tupo. In: Zborník prednášok z medzinárodnej vedeckej konferencie " IRES '06 – Informačné, riadiace a energetické systémy", Praha: Česká zemědělská univerzita, TF, 4. - 6. 9. 2006. ISBN 80-213-1520-2, s. 177 – 182

5. PAULOVICH, S. - TÓTH, J. – BERNÁT. R.: Riadenie procesu zvárania plastových rúr na tupo pomocou frekvenčného meniča. In: Zborník prednášok z medzinárodnej vedeckej konferencie „Topical Questions of Instruction of Electrical Engineering Subjects at Faculties with Non-electrical Orientation SEKEL 2006“, Vrátna: Žilinská univerzita, 12. -14. 9. 2006 ISBN 80-8070-584-4, s. 5 – 9

6. PAULOVICH, S. - TÓTH, J.: Automatizovanie zvaracieho systému WIDOS 4600 pomocou frekvenčného meniča a krokového motora. In: IX. Medzinárodná vedecká konferencia mladých 2007, Nitra: Slovenská poľnohospodárska univerzita, MF, 10. – 11.10.2007. ISBN 978-80-8069-946-8, s. 161 - 167

7. TÓTH, J. - PAULOVICH, S.: Návrh automatizovaného systému pre monitorovanie rýchlosti krípu pomocou odchytkomerov. In: IX. Medzinárodná vedecká konferencia mladých 2007, Nitra: Slovenská poľnohospodárska univerzita, MF, 10. – 11.10.2007. ISBN 978-80-8069-946-8, s. 207 - 213

8. PAULOVICH, S. - TÓTH, J. - MAKVA, M. - HRUBÝ, D.: Optimalizácia procesu zvárania na tupo pomocou automatizovaného zvaracieho systému WIDOS

4600. In: Acta technologica agriculturae 3/4 2007 Nitra: Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre, december 2007. ISSN 1335-2555, s. 100 - 103

9. TÓTH, J. - PAULOVÍČ, S. - HRUBÝ, D.: Návrh automatizovanej sústavy temperácie vzoriek na zisťovanie kríповých vlastností materiálu. In: Acta technologica agriculturae 3/4 2007 Nitra: Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre, december 2007. ISSN 1335-2555, s. 97 - 99

10. PAULOVÍČ, S - TÓTH, J. - HRUBÝ, D. - PALKOVÁ, Z.: Nové možnosti riadenia zvaracieho systému WIDOS 4600. In: Medzinárodná konferencia učiteľov elektrotechniky, Košice-Herľany-Slovensko, SEKEL 2008, 16. - 18. september 2008, ISBN 978-80-553-0065-8, s. 121 - 124

11. TÓTH, J. - PAULOVÍČ, S - HRUBÝ, D. - OLEJÁR, M.: Návrh komunikácie medzi mobilnými zariadeniami a PC. In: Medzinárodná konferencia učiteľov elektrotechniky, Košice-Herľany-Slovensko, SEKEL 2008, 16. - 18. september 2008, ISBN 978-80-553-0065-8, s. 136 - 138

12. PAULOVÍČ, S. - TÓTH, J. - TIROL, J. - HRUBÝ, D.: Návrh zariadenia na zisťovanie tlakových strát v plastových potrubiach zvaraných na tupo. In: Informační a řídicí systémy v zemědělské a potravinářské výrobě ICS 2008, Sborník z mezinárodního vědecké konference, Praha, 23. - 24. 9. 2008, Česká zemědělská univerzita v Praze, ISBN 978-80-213-1829-8, s. 100 - 106

13. TÓTH, J. - PAULOVÍČ, S. - HRUBÝ, D. - PAP, M.: Meranie tlakových strát v plastových potrubiach zvaraných na tupo. In: Informační a řídicí systémy v zemědělské a potravinářské výrobě ICS 2008, Sborník z mezinárodní vědecké konference, Praha, 23. - 24. 9. 2008, Česká zemědělská univerzita v Praze, ISBN 978-80-213-1829-8, s. 119 - 125

14. TIROL, J. - VIŠŤÁZEK, I. - PAULOVÍČ, S. – TÓTH, J.: Optimalizácia prúdenia teplotného média v sušiarňi. In: Power system engineering thermodynamics & fluid flow, Plzeň, 18. 6. 2009, Západočeská univerzita v Plzni, ISBN 978-80-7043-804-9, s. 203 - 208

## 10 PRÍLOHY

Tabuľka A.1 Dovoľené prevádzkové tlaky pre rúry z materiálov PE 80, PE 100 pri bezpečnostnom faktore C = 1,25 podľa DIN 8074:1999-08

Teplota, °C	Doba prevádzky, rok	Dovoľený prevádzkový tlak pre SDR - bezpečnostný faktor C=1,25, bar							
		PE 80				PE 100			
		17,6	17	11	7,4	17,6	17	11	7,4
10	5	9,4	10,1	15,8	25,3	12,1	12,6	20,2	31,5
	10	9,3	9,9	15,5	24,8	11,9	12,4	19,8	31,0
	20	9,0	9,7	15,1	24,2	11,6	12,1	19,3	30,2
	50	8,9	8,5	14,8	23,8	11,4	11,9	19,0	29,7
	100	8,7	9,3	14,6	23,3	11,2	11,6	18,7	29,2
20	5	7,9	8,5	13,2	21,2	10,2	10,6	16,9	26,5
	10	7,8	8,3	13,0	20,8	10,0	10,4	16,6	26,0
	20	7,6	8,1	12,7	20,3	9,8	10,1	16,2	25,4
	50	7,5	8,0	12,5	20,0	9,6	10,0	16,0	25,0
	100	7,3	7,8	12,2	19,6	9,4	9,8	15,7	24,5
30	5	6,7	7,2	11,2	18,0	8,6	9,0	14,4	22,5
	10	6,6	7,0	11,0	17,7	8,5	8,8	14,1	22,1
	25	6,4	6,9	10,8	17,3	8,3	8,6	13,6	21,6
	50	6,3	6,7	10,6	16,9	8,1	8,4	13,5	21,2
40	5	5,8	6,2	9,6	15,5	7,4	7,7	12,3	19,3
	10	5,7	6,0	9,5	15,2	7,3	7,6	12,1	19,0
	25	5,5	5,9	9,2	14,8	7,1	7,4	11,8	18,5
	50	5,4	5,8	9,1	14,5	7,0	7,2	11,6	18,2
50	5	5,0	5,3	8,4	13,4	6,4	6,7	10,7	16,7
	10	4,8	5,1	8,1	12,9	6,2	6,5	10,4	16,2
	15	4,3	4,5	7,1	11,4	5,7	5,9	9,5	14,8
60	5	3,3	3,6	5,6	9,0	4,6	4,6	7,7	12,1
70	2	2,6	2,7	4,3	6,9	3,7	3,7	6,2	9,8

Tabuľka A.2 Dovoľené prevádzkové tlaky pre rúry z materiálov PE 80, PE 100 pri bezpečnostnom faktore C = 1,6 podľa DIN 8074:1999-08

Teplota, °C	Doba prevádzky, rok	Dovoľený prevádzkový tlak pre SDR - bezpečnostný faktor C=1,6, bar							
		PE 80				PE 100			
		17,6	17	11	7,4	17,6	17	11	7,4
10	5	7,6	7,9	12,6	19,4	9,5	9,8	15,7	24,2
	10	7,4	7,7	12,4	19,1	9,3	9,6	15,5	23,8
	20	7,3	7,5	12,1	18,6	9,1	9,4	15,1	23,3
	50	7,1	7,4	11,9	18,3	8,9	9,3	14,8	22,8
	100	7,0	7,3	11,6	17,9	8,8	9,1	14,6	22,4
20	5	6,4	6,6	10,6	16,3	7,9	8,2	13,2	20,4
	10	6,2	6,5	10,4	16,0	7,8	8,1	13,0	20,0
	20	6,1	6,3	10,1	15,6	7,6	7,9	12,7	19,5
	50	6,0	6,2	10,0	15,3	7,5	7,8	12,5	19,2
	100	5,9	6,1	9,8	15,1	7,3	7,6	12,2	18,8
30	5	5,4	5,6	9,0	14,4	6,7	7,0	11,2	17,3
	10	5,3	5,5	8,8	14,1	6,6	6,9	11,0	17,0
	25	5,1	5,4	8,6	13,8	6,5	6,7	10,8	16,6
	50	5,0	5,3	8,4	13,5	6,3	6,6	10,6	16,3
40	5	4,6	4,8	7,7	11,9	5,8	6,0	9,6	14,8
	10	4,5	4,7	7,6	11,7	5,7	5,9	9,5	14,6
	25	4,4	4,6	7,4	11,4	5,5	5,8	9,2	14,2
	50	4,3	4,5	7,2	11,2	5,4	5,6	9,1	14,0
50	5	4,0	4,2	6,7	10,3	5,0	5,2	8,3	12,8
	10	3,9	4,0	6,4	9,9	4,8	5,0	8,1	12,5
	15	3,4	3,5	5,7	8,8	4,4	4,6	7,4	11,4
60	5	2,7	2,8	4,5	6,9	3,6	3,8	6,0	9,3
70	2	2,1	2,1	3,4	5,3	2,9	3,0	4,9	7,5

**Tabuľka A.3** Priemery rúr (tvaroviek) podľa STN EN 12201

	SDR 26S 12,5	SDR 17S 8	SDR 11S 5	SDR 7,4S 3,2
PE 80	PN 5	PN 8	PN 12,5	PN 20
PE 100	PN 6	PN 10	PN 16	PN 25

dn, mm	Menovitá hrúbka steny - en, mm			
20	--	--	2,0	3,0
25	--	--	2,3	3,5
32	--	2,0	3,0	4,4
40	--	2,4	3,7	5,5
50	2,0	3,0	4,6	6,9
63	2,5	3,8	5,8	8,6
75	2,9	4,5	6,8	10,3
90	3,5	5,4	8,2	12,3
110	4,2	6,6	10,0	15,1
125	4,8	7,4	11,4	17,1
140	5,4	8,3	12,7	19,2
160	6,2	9,5	14,6	21,9
180	6,9	10,7	16,4	24,6
200	7,7	11,9	18,2	27,4
225	8,6	13,4	20,5	30,8
250	9,6	14,8	22,7	34,2
280	10,7	16,6	25,4	38,3
315	12,1	18,7	28,6	43,1
355	13,6	21,1	32,3	48,5
400	15,3	23,7	36,4	54,7

**Tabuľka A.4** Meranie tlakových strát  $\Delta p=f(Q)$  pre vzorku VH-000 (nezváraná rúra)

VH-000			
Q, m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	X=v <sub>0</sub> <sup>2</sup> , m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>	Δh <sub>H<sub>2</sub>O</sub> , mm	Y=Δp, Pa
0,0	0,00	0,00	0,00
39,3	2,86	0,67	6,53
39,8	2,94	0,83	8,16
49,7	4,58	1,00	9,79
49,9	4,62	0,67	6,53
51,5	4,92	1,33	13,05
59,1	6,47	1,17	11,42
60,5	6,79	1,50	14,68
77,9	11,26	1,83	17,95
82,3	12,57	2,33	22,84
85,0	13,39	3,17	31,00
86,6	13,89	2,00	19,58
91,9	15,67	2,50	24,47
99,2	18,26	3,17	31,00
99,3	18,29	3,67	35,89
99,4	18,32	3,00	29,37
99,8	18,45	4,50	44,05
102,3	19,39	3,00	29,37
123,0	28,05	5,00	48,94
124,1	28,54	6,00	58,73
124,1	28,55	5,67	55,47
130,2	31,43	6,50	63,63
140,3	36,48	6,50	63,63
149,2	41,29	8,33	81,57
149,6	41,51	8,17	79,94
150,3	41,90	8,33	81,57
160,4	47,72	8,50	83,21

**Tabuľka A.5** Meranie tlakových strát  $\Delta p=f(Q)$  pre vzorku VH-001 (zváraná rúra)

VH-001			
Q, m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	X=v <sub>0</sub> <sup>2</sup> , m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>	Δh <sub>H<sub>2</sub>O</sub> , mm	Y=Δp, Pa
0,0	0,00	0,00	0,00
14,0	0,57	24,00	234,93
14,3	0,59	22,67	221,88
16,1	0,75	32,50	318,14
19,9	1,15	49,67	486,18
20,0	1,17	52,00	509,03
21,4	1,33	60,00	587,34
29,4	2,52	114,33	1 119,20
30,1	2,63	121,33	1 187,73
31,1	2,81	128,67	1 259,51
39,3	4,49	212,67	2 081,78
40,1	4,67	220,67	2 160,09
40,1	4,68	221,67	2 169,88
49,8	7,20	349,67	3 422,87
50,5	7,40	358,33	3 507,71
51,0	7,56	365,33	3 576,23
59,9	10,41	505,33	4 946,68
60,4	10,60	516,00	5 051,10
62,3	11,29	550,83	5 392,08
70,2	14,30	699,00	6 842,47
74,9	16,31	798,00	7 811,58
79,6	18,39	905,17	8 860,63
81,7	19,39	959,67	9 394,13
84,3	20,62	1 017,67	9 961,89
90,0	23,53	1 158,33	11 338,86

**Tabuľka A.6** Meranie tlakových strát  $\Delta p=f(Q)$   
pre vzorku VH-002 (zváraná rúra)

VH-002			
Q, m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	X=v <sub>0</sub> <sup>2</sup> , m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>	Δh <sub>H2O</sub> , mm	Y=Δp, Pa
0,0	0,00	0,00	0,00
25,3	1,84	29,17	285,51
25,7	1,89	29,67	290,41
26,0	1,94	31,00	303,46
49,3	6,98	112,00	1 096,36
51,1	7,50	120,33	1 177,94
52,2	7,83	125,17	1 225,25
79,3	18,02	273,00	2 672,38
79,6	18,17	271,50	2 657,70
80,5	18,60	282,33	2 763,75
100,8	29,14	420,67	4 117,88
103,8	30,92	442,67	4 333,24
106,8	32,70	461,33	4 515,97
125,0	44,82	617,17	6 041,41
127,3	46,48	634,00	6 206,19
128,0	46,99	645,67	6 320,40
147,5	62,37	823,00	8 056,30
149,4	64,02	850,33	8 323,87
153,1	67,26	877,00	8 584,91
169,2	82,12	1 041,33	10 193,56
172,4	85,22	1 086,00	10 630,80
172,8	85,61	1 096,33	10 731,95

**Tabuľka A.8** Meranie tlakových strát  $\Delta p=f(Q)$   
pre vzorku VH-004 (zváraná rúra)

VH-004			
Q, m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	X=v <sub>0</sub> <sup>2</sup> , m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>	Δh <sub>H2O</sub> , mm	Y=Δp, Pa
0,0	0,00	0,00	0,00
25,7	1,51	7,67	75,05
25,9	1,54	5,67	55,47
27,1	1,68	5,83	57,10
49,7	5,64	18,33	179,46
50,3	5,78	20,33	199,04
57,5	7,56	30,00	293,67
79,2	14,35	50,67	495,97
79,3	14,37	51,00	499,24
83,5	15,94	56,00	548,18
100,2	22,95	82,00	802,69
100,6	23,15	82,00	802,69
105,6	25,53	91,17	892,43
124,3	35,37	125,67	1 230,14
125,6	36,09	129,33	1 266,04
128,6	37,82	133,33	1 305,19
149,5	51,11	179,67	1 758,75
149,6	51,20	179,83	1 760,38
150,8	52,03	181,33	1 775,06
175,3	70,33	244,00	2 388,50
176,1	70,95	248,33	2 430,92
176,6	71,35	248,33	2 430,92
198,0	89,69	313,67	3 070,47
199,4	90,96	319,00	3 122,67
199,8	91,33	321,00	3 142,25

**Tabuľka A.7** Meranie tlakových strát  $\Delta p=f(Q)$   
pre vzorku VH-003 (zváraná rúra)

VH-003			
Q, m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	X=v <sub>0</sub> <sup>2</sup> , m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>	Δh <sub>H2O</sub> , mm	Y=Δp, Pa
0,0	0,00	0,00	0,00
25,7	1,51	7,67	75,05
25,9	1,54	5,67	55,47
27,1	1,68	5,83	57,10
49,7	5,64	18,33	179,46
50,3	5,78	20,33	199,04
57,5	7,56	30,00	293,67
79,2	14,35	50,67	495,97
79,3	14,37	51,00	499,24
83,5	15,94	56,00	548,18
100,2	22,95	82,00	802,69
100,6	23,15	82,00	802,69
105,6	25,53	91,17	892,43
124,3	35,37	125,67	1 230,14
125,6	36,09	129,33	1 266,04
128,6	37,82	133,33	1 305,19
149,5	51,11	179,67	1 758,75
149,6	51,20	179,83	1 760,38
150,8	52,03	181,33	1 775,06
175,3	70,33	244,00	2 388,50
176,1	70,95	248,33	2 430,92
176,6	71,35	248,33	2 430,92
198,0	89,69	313,67	3 070,47
199,4	90,96	319,00	3 122,67
199,8	91,33	321,00	3 142,25

**Tabuľka A.9** Meranie tlakových strát  $\Delta p=f(Q)$   
pre vzorku VH-005 (zváraná rúra)

VH-005			
Q, m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	X=v <sub>0</sub> <sup>2</sup> , m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>	Δh <sub>H2O</sub> , mm	Y=Δp, Pa
0,0	0,00	0,00	0,00
25,7	1,76	7,67	75,05
25,9	1,79	5,67	55,47
27,1	1,96	5,83	57,10
49,7	6,58	18,33	179,46
50,3	6,74	20,33	199,04
57,5	8,82	30,00	293,67
79,2	16,73	50,67	495,97
79,3	16,76	51,00	499,24
83,5	18,59	56,00	548,18
100,2	26,77	82,00	802,69
100,6	27,00	82,00	802,69
105,6	29,77	91,17	892,43
124,3	41,24	125,67	1 230,14
125,6	42,09	129,33	1 266,04
128,6	44,10	133,33	1 305,19
149,5	59,60	179,67	1 758,75
149,6	59,71	179,83	1 760,38
150,8	60,67	181,33	1 775,06
175,3	82,02	244,00	2 388,50
176,1	82,73	248,33	2 430,92
176,6	83,20	248,33	2 430,92
198,0	104,59	313,67	3 070,47
199,4	106,08	319,00	3 122,67
199,8	106,50	321,00	3 142,25

**Tabuľka A.10** Meranie tlakových strát  
 $\Delta p=f(Q)$  pre vzorku VH-006 (zváraná rúra)

VH-006			
Q, m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	X=v <sub>0</sub> <sup>2</sup> , m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>	Δh <sub>H2O</sub> , mm	Y=Δp, Pa
0,0	0,00	0,00	0,00
14,4	0,57	14,00	137,05
15,8	0,69	17,33	169,68
17,6	0,85	20,00	195,78
29,7	2,42	69,00	675,44
30,9	2,62	74,33	727,65
31,8	2,78	77,50	758,64
44,6	5,44	163,50	1 600,49
44,9	5,53	167,33	1 638,02
45,1	5,57	167,67	1 641,28
60,2	9,94	310,00	3 034,57
61,3	10,28	322,00	3 152,04
61,7	10,43	325,33	3 184,67
78,3	16,78	539,00	5 276,24
78,7	16,98	543,33	5 318,66
80,6	17,78	571,67	5 596,02
88,6	21,52	699,33	6 845,74
91,7	23,02	746,33	7 305,82
94,3	24,38	793,67	7 769,16
105,6	30,55	1 001,33	9 802,00
105,7	30,61	1 002,33	9 811,79
107,1	31,40	1 028,67	10 069,56
109,6	32,93	1 078,00	10 552,49
118,8	38,66	1 270,33	12 435,23
121,1	40,20	1 328,00	12 999,72

**Tabuľka A.11** Meranie tlakových strát  
 $\Delta p=f(Q)$  pre vzorku VH-007 (zváraná rúra)

VH-007			
Q, m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	X=v <sub>0</sub> <sup>2</sup> , m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>	Δh <sub>H2O</sub> , mm	Y=Δp, Pa
0,0	0,00	0,00	0,00
19,8	0,98	9,67	94,63
22,5	1,26	15,33	150,10
25,8	1,66	18,33	179,46
35,2	3,09	42,00	411,14
35,6	3,17	42,00	411,14
50,0	6,23	87,33	854,90
50,2	6,28	89,00	871,22
53,1	7,03	98,33	962,58
79,1	15,60	233,33	2 284,09
80,3	16,07	246,00	2 408,08
86,1	18,48	283,33	2 773,54
98,9	24,39	375,67	3 677,38
100,0	24,95	384,00	3 758,96
102,3	26,08	400,33	3 918,84
125,1	39,02	610,33	5 974,52
125,2	39,07	611,00	5 981,05
125,6	39,36	613,67	6 007,15
136,6	46,53	731,67	7 162,25
150,0	56,08	887,67	8 689,32
150,1	56,18	887,67	8 689,32
155,5	60,29	957,67	9 374,55
174,7	76,13	1 205,00	11 795,68
175,1	76,48	1 226,33	12 004,51
178,6	79,54	1 270,00	12 431,96

**Tabuľka A.12** Meranie tlakových strát  
 $\Delta p=f(Q)$  pre vzorku VH-008 (zváraná rúra)

VH-008			
Q, m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	X=v <sub>0</sub> <sup>2</sup> , m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>	Δh <sub>H2O</sub> , mm	Y=Δp, Pa
0,0	0,00	0,00	0,00
24,5	1,53	21,33	208,83
25,7	1,69	23,83	233,30
26,3	1,77	28,00	274,09
49,9	6,37	106,00	1 037,63
50,3	6,48	106,33	1 040,89
50,9	6,64	113,33	1 109,41
79,2	16,09	277,67	2 718,06
79,3	16,12	278,00	2 721,33
80,5	16,62	285,83	2 798,01
99,8	25,51	441,67	4 323,45
100,0	25,63	447,00	4 375,66
102,2	26,79	461,33	4 515,97
124,9	39,96	692,33	6 777,22
125,8	40,56	701,00	6 862,05
127,3	41,56	720,33	7 051,31
134,8	46,55	813,00	7 958,41
135,0	46,69	808,67	7 916,00
139,4	49,78	868,67	8 503,33
152,7	59,76	1 039,00	10 170,72
154,8	61,42	1 067,00	10 444,81
158,8	64,63	1 120,67	10 970,15
170,9	74,86	1 302,00	12 745,21
173,0	76,68	1 334,00	13 058,46
175,0	78,46	1 349,33	13 208,55

**Tabuľka A.13** Meranie tlakových strát  
 $\Delta p=f(Q)$  pre vzorku VH-009 (zváraná rúra)

VH-009			
Q, m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	X=v <sub>0</sub> <sup>2</sup> , m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>	Δh <sub>H2O</sub> , mm	Y=Δp, Pa
0,0	0,00	0,00	0,00
14,9	0,58	9,83	96,26
15,3	0,62	10,33	101,15
16,4	0,71	12,67	123,99
30,0	2,36	51,00	499,24
31,1	2,54	55,00	538,39
31,2	2,55	55,33	541,66
44,8	5,24	124,00	1 213,83
45,0	5,29	127,33	1 246,46
46,6	5,68	137,00	1 341,09
60,2	9,48	239,00	2 339,56
60,7	9,63	242,67	2 375,45
61,0	9,74	247,67	2 424,40
79,7	16,61	438,00	4 287,56
81,4	17,34	455,67	4 460,50
82,4	17,75	465,83	4 560,02
91,2	21,78	578,67	5 664,54
92,8	22,52	599,67	5 870,11
94,4	23,33	621,33	6 082,20
105,1	28,92	783,00	7 664,75
105,3	29,01	782,00	7 654,96
110,3	31,85	862,33	8 441,34
121,5	38,63	1 053,33	10 311,03
123,3	39,80	1 089,33	10 663,43
124,4	40,47	1 098,00	10 748,27

**Tabuľka A.14** Odsimulované hodnoty tlakových strát  $\Delta p$  v závislosti od vstupnej strednej rýchlosti  $w_1$

malý pretok		jemný MESH		odber $\pm 2$ cm			
Simulácia	$Q, \text{l.s}^{-1}$	$Q, \text{m}^3.\text{h}^{-1}$	$w_1, \text{m.s}^{-1}$	$p_1, \text{Pa}$	$p_2, \text{Pa}$	$\Delta p, \text{Pa}$	$w_1^2, \text{m}^2.\text{s}^{-2}$
A_0	0,00	0,00	0	0	0	0	0
A_1	6,45	23,22	1	433	394	39	1
A_2	12,90	46,45	2	1 472	1 324	148	4
A_3	19,35	69,67	3	3 126	2 798	328	9
A_4	25,80	92,90	4	5 255	4 672	583	16
A_5	32,26	116,12	5	7 997	7 078	919	25
A_6	38,71	139,34	6	10 441	9 129	1 312	36
A_7	45,16	162,57	7	14 392	12 606	1 786	49
A_8	51,61	185,79	8	18 754	16 420	2 334	64
A_9	58,06	209,02	9	22 043	19 089	2 954	81
A_10	64,51	232,24	10	26 779	23 130	3 649	100

veľký pretok		hrubý MESH		odber $\pm 2$ cm			
Simulácia	$Q, \text{l.s}^{-1}$	$Q, \text{m}^3.\text{h}^{-1}$	$w_1, \text{m.s}^{-1}$	$p_1, \text{Pa}$	$p_2, \text{Pa}$	$\Delta p, \text{Pa}$	$w_1^2, \text{m}^2.\text{s}^{-2}$
B_0	0,00	0,00	0	0	0	0	0
B_1	6,45	23,22	1	523	379	144	1
B_2	12,90	46,45	2	1 592	1 014	578	4
B_3	19,35	69,67	3	3 362	2 098	1 264	9
B_4	25,80	92,90	4	5 702	3 494	2 208	16
B_5	32,26	116,12	5	8 514	5 083	3 431	25
B_6	38,71	139,34	6	12 050	7 209	4 841	36
B_7	45,16	162,57	7	15 931	9 422	6 509	49
B_8	51,61	185,79	8	20 539	12 095	8 444	64
B_9	58,06	209,02	9	25 564	14 961	10 603	81
B_10	64,51	232,24	10	30 948	17 960	12 988	100

malý pretok		hrubý MESH		odber $\pm 2$ cm			
Simulácia	$Q, \text{l.s}^{-1}$	$Q, \text{m}^3.\text{h}^{-1}$	$w_1, \text{m.s}^{-1}$	$p_1, \text{Pa}$	$p_2, \text{Pa}$	$\Delta p, \text{Pa}$	$w_1^2, \text{m}^2.\text{s}^{-2}$
C_0	0,00	0,00	0	0	0	0	0
C_1	6,45	23,22	1	421	341	80	1
C_2	12,90	46,45	2	1 488	1 163	325	4
C_3	19,35	69,67	3	3 134	2 392	742	9
C_4	25,80	92,90	4	5 332	4 000	1 332	16
C_5	32,26	116,12	5	8 063	5 966	2 097	25
C_6	38,71	139,34	6	11 313	8 275	3 038	36
C_7	45,16	162,57	7	15 071	10 917	4 154	49
C_8	51,61	185,79	8	19 330	13 881	5 449	64
C_9	58,06	209,02	9	24 082	17 160	6 922	81
C_10	64,51	232,24	10	29 320	20 747	8 573	100

veľký pretok		jemný MESH		odber ± 2 cm			
Simulácia	Q, l.s <sup>-1</sup>	Q, m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	w <sub>1</sub> , m.s <sup>-1</sup>	p <sub>1</sub> , Pa	p <sub>2</sub> , Pa	Δp, Pa	w <sub>1</sub> <sup>2</sup> , m <sup>2</sup> .s <sup>-2</sup>
D_0	0,00	0,00	0	0	0	0	0
D_1	6,45	23,22	1	456	285	171	1
D_2	12,90	46,45	2	1 628	948	680	4
D_3	19,35	69,67	3	3 448	1 927	1 521	9
D_4	25,80	92,90	4	5 887	3 193	2 694	16
D_5	32,26	116,12	5	8 925	4 727	4 198	25
D_6	38,71	139,34	6	12 549	6 519	6 030	36
D_7	45,16	162,57	7	16 747	8 557	8 190	49
D_8	51,61	185,79	8	21 511	10 835	10 676	64
D_9	58,06	209,02	9	26 835	13 342	13 493	81
D_10	64,51	232,24	10	32 710	16 074	16 636	100

bez zvaru		trojuholníkový MESH		odber ± 2 cm			
Simulácia	Q, l.s <sup>-1</sup>	Q, m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	w <sub>1</sub> , m.s <sup>-1</sup>	p <sub>1</sub> , Pa	p <sub>2</sub> , Pa	Δp, Pa	w <sub>1</sub> <sup>2</sup> , m <sup>2</sup> .s <sup>-2</sup>
E_0	0,00	0,00	0	0	0	0	0
E_1	6,45	23,22	1	395	349	46	1
E_2	12,90	46,45	2	1 383	1 192	191	4
E_3	19,35	69,67	3	2 895	2 455	440	9
E_4	25,80	92,90	4	4 902	4 108	794	16
E_5	32,26	116,12	5	7 383	6 129	1 254	25
E_6	38,71	139,34	6	10 326	8 505	1 821	36
E_7	45,16	162,57	7	13 720	11 224	2 496	49
E_8	51,61	185,79	8	17 555	14 276	3 279	64
E_9	58,06	209,02	9	21 869	17 691	4 178	81
E_10	64,51	232,24	10	26 520	21 349	5 171	100

bez zvaru		obdĺžnikový MESH		odber ± 2 cm			
Simulácia	Q, l.s <sup>-1</sup>	Q, m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	w <sub>1</sub> , m.s <sup>-1</sup>	p <sub>1</sub> , Pa	p <sub>2</sub> , Pa	Δp, Pa	w <sub>1</sub> <sup>2</sup> , m <sup>2</sup> .s <sup>-2</sup>
F_0	0,00	0,00	0	0	0	0	0
F_1	6,45	23,22	1	376	372	4	1
F_2	12,90	46,45	2	1 293	1 280	13	4
F_3	19,35	69,67	3	2 692	2 666	26	9
F_4	25,80	92,90	4	4 531	4 487	44	16
F_5	32,26	116,12	5	6 793	6 727	66	25
F_6	38,71	139,34	6	9 463	9 371	92	36
F_7	45,16	162,57	7	12 530	12 408	122	49
F_8	51,61	185,79	8	15 984	15 829	155	64
F_9	58,06	209,02	9	19 817	19 624	193	81
F_10	64,51	232,24	10	24 023	23 790	233	100

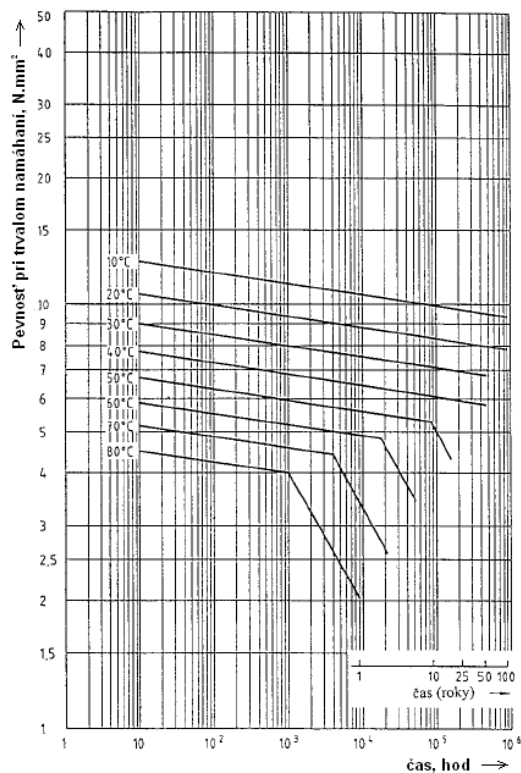


**Tabuľka A.15** Porovnanie vplyvu zvaru (veľkosť a tvar) a miesta odberu ( $\pm 2$  cm;  $\pm 10$  cm;  $\pm 1$  m;  $\pm 4$  m) na celkové tlakové straty (simulácia)

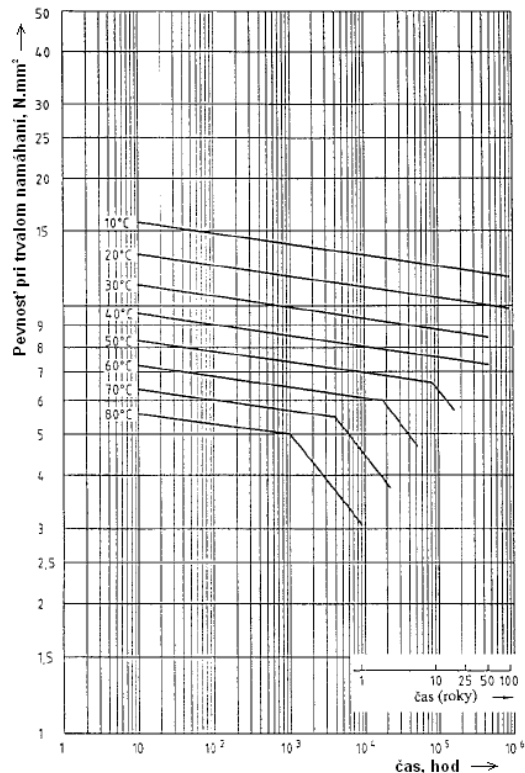
bez zvaru		obdĺžnikový mesh		$\pm 2$ cm	$\pm 10$ cm	$\pm 1$ m	$\pm 4$ m
Typ zvaru	$w_1, m.s^{-1}$	$Q, l.s^{-1}$	$Q, m^3.h^{-1}$	$\Delta p_{000}, Pa$	$\Delta p_{000}, Pa$	$\Delta p_{000}, Pa$	$\Delta p_{000}, Pa$
F_0	0	0,00	0,00	0	0	0	0
F_1	1	6,45	23,22	4	19	185	775
F_2	2	12,90	46,45	13	64	637	2 673
F_3	3	19,35	69,67	26	132	1 318	5 561
F_4	4	25,80	92,90	44	222	2 213	9 363
F_5	5	32,26	116,12	66	331	3 313	14 041
F_6	6	38,71	139,34	92	461	4 620	19 567
F_7	7	45,16	162,57	122	610	6 099	25 916
F_8	8	51,61	185,79	155	777	7 775	33 070
F_9	9	58,06	209,02	193	961	9 634	41 012
F_10	10	64,51	232,24	233	1 165	11 673	49 729

VH-003 jemný mesh		$\pm 2$ cm			$\pm 10$ cm			$\pm 1$ m			$\pm 4$ m		
Zvar	$w_1, m.s^{-1}$	$\Delta p, Pa$	$\Delta X, Pa$	$\Delta Y, \%$	$\Delta p, Pa$	$\Delta X, Pa$	$\Delta Y, \%$	$\Delta p, Pa$	$\Delta X, Pa$	$\Delta Y, \%$	$\Delta p, Pa$	$\Delta X, Pa$	$\Delta Y, \%$
A_0	0	0	0	-	0	0	-	0	0	-	0	0	-
A_1	1	39	35	954	61	42	221	200	15	8	790	15	2
A_2	2	148	135	1 038	238	174	272	694	57	9	2 727	54	2
A_3	3	328	302	1 162	533	401	304	1 451	133	10	5 699	138	2
A_4	4	583	539	1 225	947	725	327	2 454	241	11	9 612	249	3
A_5	5	919	853	1 292	1 477	1 146	346	3 694	381	12	14 435	394	3
A_6	6	1 312	1 220	1 326	2 126	1 665	361	5 164	544	12	20 140	573	3
A_7	7	1 786	1 664	1 364	2 892	2 282	374	6 860	761	12	26 701	785	3
A_8	8	2 334	2 179	1 406	3 777	3 000	386	8 776	1 001	13	34 102	1 032	3
A_9	9	2 954	2 761	1 431	4 780	3 819	397	10 910	1 276	13	42 236	1 224	3
A_10	10	3 649	3 416	1 466	5 901	4 736	407	13 257	1 584	14	51 359	1 630	3

VH-002 jemný mesh		$\pm 2$ cm			$\pm 10$ cm			$\pm 1$ m			$\pm 4$ m		
Zvar	$w_1, m.s^{-1}$	$\Delta p, Pa$	$\Delta X, Pa$	$\Delta Y, \%$	$\Delta p, Pa$	$\Delta X, Pa$	$\Delta Y, \%$	$\Delta p, Pa$	$\Delta X, Pa$	$\Delta Y, \%$	$\Delta p, Pa$	$\Delta X, Pa$	$\Delta Y, \%$
D_0	0	0	0	-	0	0	-	0	0	-	0	0	-
D_1	1	171	167	4 522	66	47	247	219	34	18	810	35	5
D_2	2	680	667	5 131	254	190	297	772	135	21	2 819	146	5
D_3	3	1 521	1 495	5 750	559	427	323	1 624	306	23	5 891	330	6
D_4	4	2 694	2 650	6 023	981	759	342	2 758	545	25	9 933	570	6
D_5	5	4 198	4 132	6 261	1 520	1 189	359	4 166	853	26	14 932	891	6
D_6	6	6 030	5 938	6 454	2 173	1 712	371	5 840	1 220	26	20 850	1 283	7
D_7	7	8 190	8 068	6 613	2 940	2 330	382	7 773	1 674	27	27 663	1 747	7
D_8	8	10 676	10 521	6 788	3 822	3 045	392	9 964	2 189	28	35 351	2 281	7
D_9	9	13 493	13 300	6 891	4 818	3 857	401	12 407	2 773	29	43 889	2 877	7
D_10	10	16 636	16 403	7 040	5 928	4 763	409	15 097	3 424	29	53 293	3 564	7



**Obrázok B.1** Krivky minimálnej pevnosti v závislosti na čase a teplote pre PE 80 - pevnostné izotermy podľa DIN 8075:1999-08 (vľavo)



**Obrázok B.2** Krivky minimálnej pevnosti v závislosti na čase a teplote pre PE 100 - pevnostné izotermy podľa DIN 8075:1999-08 (vpravo)