

## 2. Vlastnosti stlačeného vzduchu

Stlačený vzduch se musí posuzovat podle fyzikálních zákonů pro stlačený plyn a jeho stav se vyjadřuje v příslušných fyzikálních jednotkách.

### Fyzikální jednotky

Mezinárodní soustava jednotek SI (System Internationale d'Unités) je od jejího zavedení roku 1960 rozšířená po celém světě. USA, Velká Británie a Japonsko ještě zčásti používají jednotky tzv. technické soustavy jednotek. Soustava SI-jednotek má 7 základních jednotek pro 7 základních fyzikálních veličin:

veličina	symbol	jednotka	název	poznámka
délka	l	m	metr	
hmotnost	m	kg	kilogram	
čas	t	s	sekunda	
termodynamická teplota	T	K	kelvin	273,15 K = 0 °C
elektrický proud	I	A	ampér	
svítivost	I <sub>v</sub>	cd	kandela	
látkové množství	n	mol	mol	

**Tabulka 2.1** Základní jednotky soustavy SI.

veličina	symbol	jednotka	název	poznámka
tlak (tah)	p	Pa	Pascal	1 Pa = 1 N/m <sup>2</sup>
síla	F	N	Newton	1 N = 1 kgm/s <sup>2</sup>
tíha	G	N	Newton	1 kg × 9,81 m/s <sup>2</sup> = 9,81 N
plošný obsah	A, S	m <sup>2</sup>	čtverečný metr	
objem	V	m <sup>3</sup>	krychlový metr	
průtok	Q	m <sub>n</sub> <sup>3</sup> /s	normální krychlový metr za sekundu	
rychlost	v	m/s	metr za sekundu	
zrychlení	a	m/s <sup>2</sup>	metr za sekundu na druhou	
moment setrvačnosti	J	kgm <sup>2</sup>	kilogram × metr na druhou	
práce	W	J	Joule	1 J = 1 Nm
polohová energie	E, W	J	Joule	1 J = 1 Nm
kinetická energie	E, W	J	Joule	1 J = 1 Nm
krouticí moment	M	Nm	Newtonmetr	
výkon	P	W	Watt	1 W = 1 Nm/s

**Tabulka 2.2** Odvozené jednotky

## 2. Vlastnosti stlačeného vzduchu

### Předpony SI

Jsou-li jednotky pro praktické výpočty příliš velké nebo malé, můžeme použít jejich násobky nebo podíly, které vyjádříme připojením příslušné předpony. Předpona se spojuje s názvem v jedno slovo.

název	značka	násobek	příklad
mega	M	$10^6$	MPa megapascal
kilo	K	$10^3$	kg kilogram
hekto	H	$10^2$	hl hektolitr
deka	da	$10^1$	daN dekanewton
deci	d	$10^{-1}$	dm decimetr
centi	c	$10^{-2}$	cm centimetr
mili	m	$10^{-3}$	ms milisekunda
mikro	$\mu$	$10^{-6}$	$\mu$ A mikroampér
nano	n	$10^{-9}$	ns nanosekunda
piko	p	$10^{-12}$	pF pikofarad
femto	f	$10^{-15}$	fs femtosekunda
atto	a	$10^{-18}$	am attometr

**Tabulka 2.3** Předpony používané pro jednotky SI

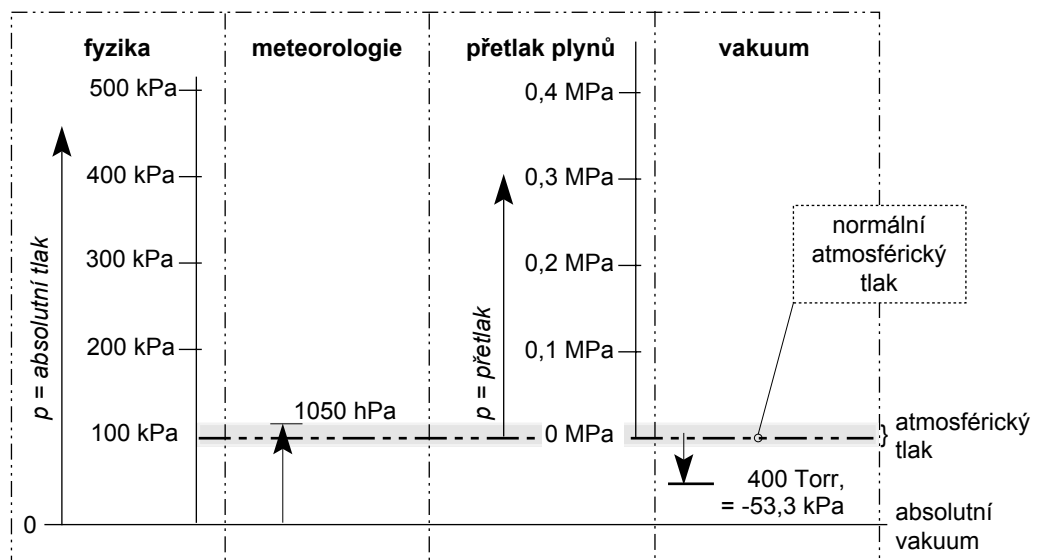
### Tlak

Zeměkoule je obklopena vrstvou vzduchu, tzv. atmosférou. Tlak vzduchu se mění s nadmořskou výškou podle meteorologických podmínek (tlaková výše, tlaková níže). Atmosférický tlak je dán hmotností vzduchu, kterou působí na zemský povrch. Na hladině moře je atmosférický tlak  $p = 101\,325\text{ Pa}$  (1013,25 mbar).

Až do nadmořské výšky 2 000 m klesá atmosférický tlak přibližně o 1 % na každých 100 m výšky. Na vrcholu hory Mount Everest (8 848 m) je atmosférický tlak přibližně  $p = 33\,000\text{ Pa}$  (330 mbar). Ve výšce 1 000 km je atmosférický tlak téměř roven nule ( $p = 0,0\text{ Pa}$ ).

Jako absolutní tlak ( $p_{\text{abs}}$ ) označujeme stav, kdy se jedná o údaj vztažený k hranici absolutního vakua. Vakuum, nebo také podtlak (tlak pod úrovní atmosférického tlaku) se využívá v tzv. vakuové technice, např. pro manipulaci s díly, při výrobě svítidel, termosek a v řadě dalších aplikací. Na obrázku 2.4 jsou znázorněny různé obory a jednotky používané pro měření tlaku, které vychází z normálního atmosférického tlaku vzduchu  $p = 101\,325\text{ Pa}$  (0,101325 MPa).

V praxi se jako referenční tlak používá hodnota  $p = 0,1\text{ MPa}$ .



**Obr. 2.4** Různé obory a jednotky používané pro měření tlaku

## 2. Vlastnosti stlačeného vzduchu

### Jednotky tlaku

	název jednotky	značka	převod jednotek
nové jednotky tlaku	Pascal	Pa	1 Pa = 1 N/m <sup>2</sup>
	megapascal	MPa	1 MPa = 10 <sup>6</sup> Pa = 10 bar
	kilopascal	kPa	1 kPa = 1 000 Pa = 10 mbar
	hektopascal	hPa	1 hPa = 100 Pa = 1 mbar
staré jednotky tlaku	bar	bar	1 bar = 10 <sup>5</sup> Pa = 0,1 MPa
	milibar	mbar	1 mbar = 10 <sup>-3</sup> bar = 100 Pa
	kilopond na čtverečný centimetr	kp/cm <sup>2</sup>	1 kp/cm <sup>2</sup> = 98 066 Pa = 0,981 bar
	metr vodního sloupce	m H <sub>2</sub> O (m v.s.)	1 m H <sub>2</sub> O = 98 066 Pa = 0,981 bar
	technická atmosféra	at	1 at = 98 066 Pa = 0,981 bar
	fyzikální atmosféra	atm	1 atm = 101 325 Pa
	Torr (mm rtuťového sloupce)	Torr (mm Hg)	1 Torr = 133,3224 Pa (1 bar = 750 Torr)
anglosaské jednotky tlaku	libra na čtverečný palec	p.s.i. (lb./sq. in.)	1 p.s.i. = 6 894,74 Pa (1 bar = 14,5 p.s.i.)
	libra na čtverečnou stopu	lb./sq. ft.	1 lb./sq. Ft. = 47,8802 Pa

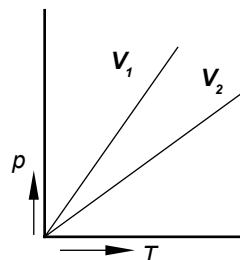
**Tabulka 2.5** Jednotky tlaku

## Vlastnosti plynů

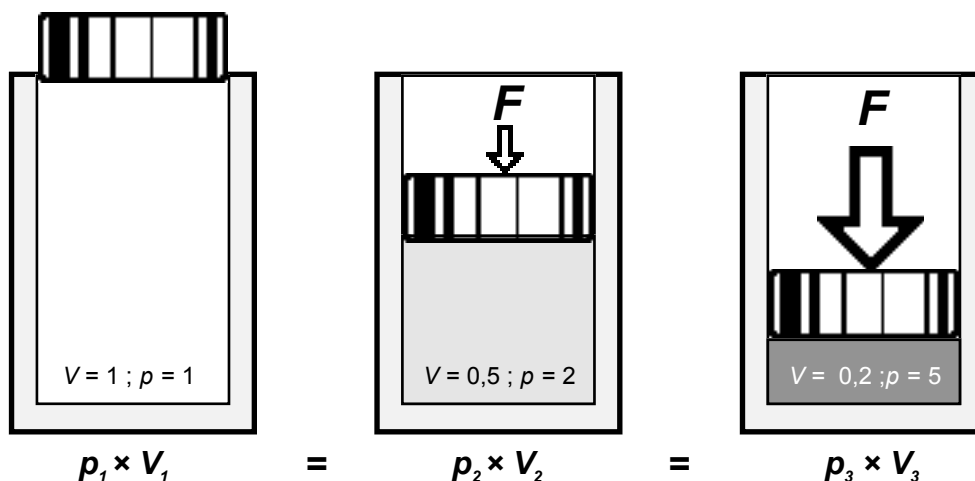
### Izotermická změna stavu plynů (Boyle-Mariottův zákon)

Jedná se o změnu stavu plynu při stálé teplotě ( $T = \text{konst}$ ). Objem daného plynu se při stálé teplotě mění v obráceném poměru se změnou jeho tlaku a součin tlaku a objemu zůstává konstantní.

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_1}{V_2}$$



Vzduch stlačený na určitý objem vydá v něm obsaženou energii změnou na původní objem. Stejně jako je tomu u šroubové pružiny, když se její délka vrátí na délku v zamontovaném, nebo volném stavu.



Obr. 2.6 Grafické znázornění Boyle-Mariottova zákona

#### Příklad:

Vypočtete, jak se změní absolutní tlak vzduchu  $p_1 = 101\,325\text{ Pa}$  změnou objemu  $V_1 = 1\text{ m}^3$  na objem  $V_2 = 0,5\text{ m}^3 \Rightarrow p_2 = ?$

$$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2 \quad \text{z toho} \quad p_2 = \frac{p_1 \cdot V_1}{V_2} = \frac{101\,325 \cdot 1}{0,5} = 202\,650\text{ Pa}$$

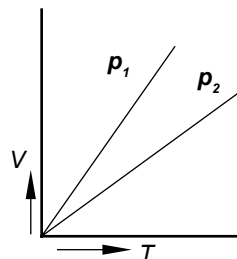
**Poznámka:** Při použití stlačeného vzduchu v pneumatických obvodech nikdy nedojde k izotermické změně stavu plynu – vzduchu ( $T = \text{konstant}$ ). Teplota stlačeného vzduchu se průběžně mění s každým vysunutím a zasunutím pístnice pneumatického válce.

## 2. Vlastnosti stlačeného vzduchu

### Izobarická změna stavu plynů (Gay-Lussacův zákon)

Jedná se o změnu stavu plynu při stálém tlaku ( $p = \text{konst.}$ ). Změnou teploty o  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  se změní objem plynu o  $1/273$ .

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$$



#### Příklad:

Vypočtete, jak se změní objem vzduchu  $V_1 = 100\text{ m}^3$ , zvýšením teploty  $T_1 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$  na teplotu  $T_2 = 20\text{ }^{\circ}\text{C} \Rightarrow V_2 = ?$

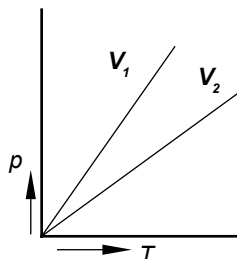
Pozor: teplota je zadaná ve  $^{\circ}\text{C}$ , ale ve vzorci je třeba zadat absolutní teplotu v K. Absolutní teploty budou

$$T_1 = 273 + 0\text{ }^{\circ}\text{C} = 273\text{ K} \quad \text{a} \quad T_2 = 273 + 20\text{ }^{\circ}\text{C} = 293\text{ K}$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad \text{z toho} \quad V_2 = \frac{V_1 \cdot T_2}{T_1} = \frac{100\text{ m}^3 \cdot 293\text{ K}}{273\text{ K}} = 107,326\text{ m}^3$$

### Izochorická změna stavu plynů

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$$



#### Příklad:

Vypočtete, jak se změní absolutní tlak vzduchu  $p_1 = 0,2\text{ MPa}$  zvýšením teploty  $T_1 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  na teplotu  $T_2 = 80\text{ }^{\circ}\text{C} \Rightarrow p_2 = ?$

Pozor: teplota je zadaná ve  $^{\circ}\text{C}$ , ale ve vzorci je třeba zadat absolutní teplotu v K. Absolutní teploty budou

$$T_1 = 273 + 20\text{ }^{\circ}\text{C} = 293\text{ K} \quad \text{a} \quad T_2 = 273 + 80\text{ }^{\circ}\text{C} = 353\text{ K}$$

## 2. Vlastnosti stlačeného vzduchu



$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2} \text{ z toho } p_2 = \frac{p_1 \times T_2}{T_1} = \frac{(0,2 \text{ MPa} + 0,101325 \text{ MPa}) \times 353 \text{ K}}{273 \text{ K}} = 0,363 \text{ MPa}$$

## Obecná rovnice stavu plynů

Z předcházejících rovnic lze jejich sloučením odvodit obecnou rovnici pro stav plynů:

$$\frac{p_1 \times V_1}{T_1} = \frac{p_2 \times V_2}{T_2} = \text{konst}$$

Výpočet podle této rovnice bere v úvahu změny teploty a je teoretickým základem pro konstrukci a výběr pneumatických zařízení. Všechny rovnice stavu plynů uvažují s objemem v **normálních krychlových metrech** ( $m_n^3$ ), který má hmotnost 1,293 kg při teplotě 0 °C.

### Průtok stlačeného vzduchu

Průtok je po tlaku vzduchu druhou veličinou, důležitou k určení velikosti pneumatických prvků. Je to objem vzduchu, který proteče průřezem daného prvku za jednotku času. Průtok se uvádí v l/min, l/s, m³/h nebo v m³/s.

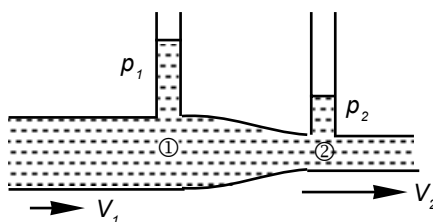
### Bernoulliho rovnice průtoku

Bernoulliho rovnice vyjadřuje zákon zachování energie pro proudění ideální kapaliny ve vodorovném potrubí:

„Součet kinetické a tlakové potencionální energie kapaliny o jednotkovém objemu je ve všech částech vodorovné trubice stejný.“

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho \times v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho \times v_2^2$$

$\rho$  = hustota protékajícího média



**Obr. 2.7** Princip Bernoulliho rovnice průtoku

Tato rovnice se používá také pro ostatní plyny, pokud není překročena kritická rychlost proudění (cca 300 m/s).

Příklady použití této rovnice naleznete u konstrukce Venturiho trubice (viz obr. 2.7) a u regulátorů tlaku s kompenzací průtoku (Q – kompenzace).

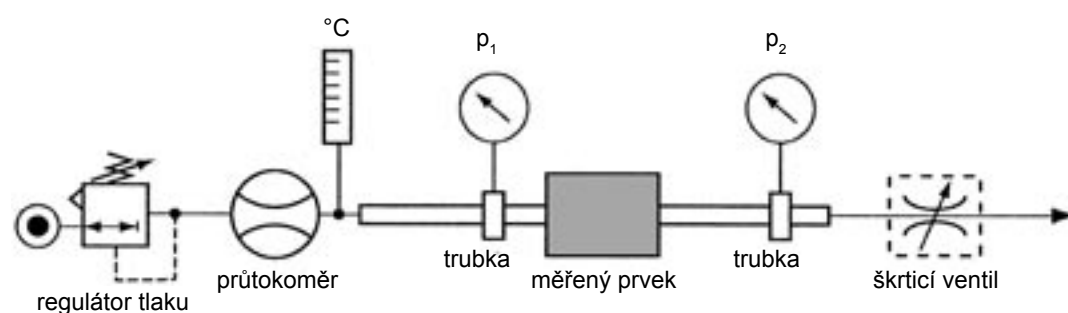


## Jednotky pro vyjádření průtoku vzduchu

### Normální průtok $Q_n$ (ISO 6358)

Firma SMC udává průtok jako „normální průtok  $Q_n$ “ podle normy ISO 6358, který se udává v  $l_n/\text{min}$ . Tím je odpovídající objem vzduchu s atmosférickým tlakem při teplotě 20 °C a relativní vlhkosti 65 %.

Normální průtok  $Q_n$  je definován jako: objem vzduchu, který proteče měřeným prvkem, když tlak vzduchu na vstupu do prvku je  $p_1 = 0,6 \text{ MPa}$  a tlak na výstupu z prvku je  $p_2 = 0,5 \text{ MPa}$ . Na výstupu potrubí je škrticí ventil, kterým se nastaví požadovaný tlakový spád  $\Delta p = p_1 - p_2 = 0,6 \text{ MPa} - 0,5 \text{ MPa} = 0,1 \text{ MPa}$ .



**Obr. 2.8** Měřicí trať pro stanovení normalizovaného průtoku  $Q_n$  podle normy ISO 6358

Trubky měřicí trati na vstupu a na výstupu, označené v obr. 2.8, mají přesně stanovené délky a průměry.

Je-li teplota měřeného média vyšší nebo nižší, jak normou předepsaných 20 °C, je nutné změřený průtok násobit koeficientem pro příslušnou teplotu. Opravné koeficienty jsou uvedeny v tabulce 2.9.

teplota média (°C)	-20	-10	0,0	10	30	40	50	60
koeficient	1,08	1,06	1,04	1,02	0,98	0,97	0,95	0,94

**Tabulka 2.9** Opravné koeficienty

## 2. Vlastnosti stlačeného vzduchu

### kv - faktor

Metrický údaj v „normálních litrech za minutu“ ( $\text{dm}^3/\text{min}$ ). Tento údaj se vztahuje na měření, provedené s vodou o teplotě 5 až 30 °C. Faktor kv je roven 1,0, když při tlakové ztrátě 1,0 baru proteče ventilem za minutu 1,0 litr vody teplé 4 °C. Faktory Kv, kv Cv a f jsou porovnávací faktory.

### Kv - faktor

Odpovídá faktoru kv, ale průtok je vyjádřen v  $\text{m}^3/\text{h}$ .

### Cv - faktor

Obdoba výše uvedených faktorů, ale vyjádřená v anglosaských jednotkách. Údaje jsou vztaženy na průtok 1,0 US galonu (3,79 l) vody za minutu při tlakové ztrátě 1 psi a při teplotě 60 °F ( $\text{libra/palec}^2 = 0,007 \text{ MPa}$  při teplotě 15,6 °C).

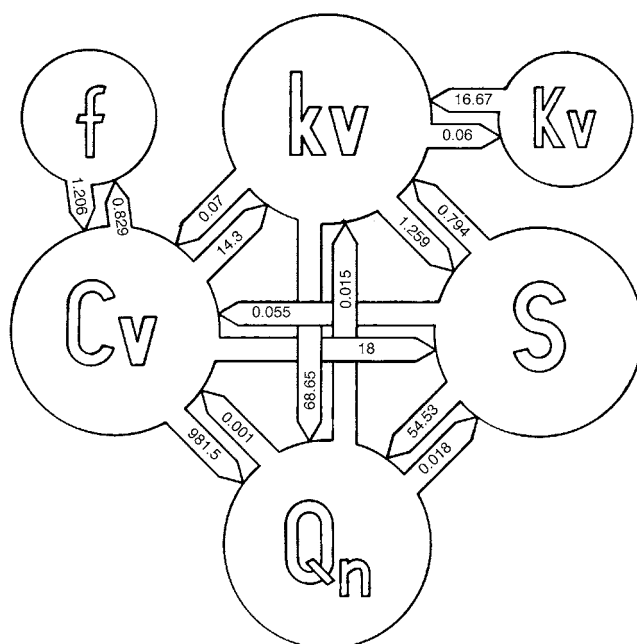
### f - faktor

Měření za stejných podmínek jako Cv-faktor ale s průtokem 1,0 imperiálního (britského) galonu (4,54 vody za minutu při tlakové ztrátě 1 psi a při teplotě 60 °F ( $\text{libra/palec}^2 = 0,007 \text{ MPa}$  při teplotě 15,6 °C).

### Poměrný průřez S ( $\text{mm}^2$ )

Tento údaj, získaný měřením průtoku vzduchu, představuje ventil nebo celou soustavu prvků, jako plochu otvoru měřicí clony, kterou proteče udaný objem vzduchu.

Na obr. 2.10 jsou uvedeny různé faktory, používané k vyjádření objemu vzduchu, který proteče daným prvkem. V šípkách mezi jednotkami jsou uvedeny násobné koeficienty pro jejich vzájemný převod.



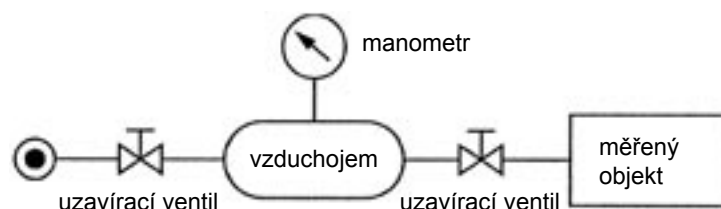
Obr. 2.10 Násobné koeficienty pro jednotky průtoku

### Určení průtoku měřením změny tlaků daného objemu

Jinou metodou pro zjištění průtoku je použití měření rozdílu objemů vzduchu v daném vzduchojemu. Hodí se také pro zjištění spotřeby vzduchu stroje, který má různé druhy a velikosti pneumatických motorů, které pracují v různých časových cyklech. Nejedná se o normalizovanou metodu, ale v praxi ji lze snadno a s vyhovující přesností aplikovat. Stále je třeba respektovat fyzikální vlastnosti vzduchu, tj. že pracujeme se stlačitelným médiem, jehož chování ještě ovlivňují další vlivy (teplota, dynamické odpory atd.).

V průběhu měření se stlačený vzduch do měřeného objektu (např. prvku, stroje) nepřivádí z dílenského rozvodu stlačeného vzduchu, ale ze vzduchojemu určeného pro měření. Rozdíl tlaku ve vzduchojemu, který vznikne ve stanoveném čase, slouží ke stanovení součinitele průtoku respektive objemu vzduchu měřeného objektu.

#### Postup při měření



**Obr. 2.11** Schéma obvodu pro zjištění součinitele průtoku měřením změny tlaků daného objemu

1. Ventil na výstupu ze vzduchojemu je uzavřen, ventil na přívodu do vzduchojemu je otevřen. Do vzduchojemu je vpuštěn vzduch z dílenského rozvodu.
2. Ventil na vstupu do vzduchojemu uzavřeme. Na manometru odečteme a zaznamenáme tlak vzduchu ve vzduchojemu (počáteční tlak).
3. Otevřeme ventil na výstupu ze vzduchojemu. Po 5 až 10 sekundách ventil uzavřeme. Na manometru odečteme a zaznamenáme tlak vzduchu ve vzduchojemu (konečný tlak). Poklesne-li tlak vzduchu po 5 sekundách pod hodnotu 0,15 MPa, musí se použít větší vzduchojem.
4. Zaznamenané hodnoty použijeme pro výpočet podle následujícího vzorce:

$$S = 12,9 \times V \times \frac{1}{t} \times \log \frac{p_1 + 0,1}{p_2 + 0,1}$$

- S - poměrný průřez (mm<sup>2</sup>)  
 V - objem vzduchojemu (dm<sup>3</sup> = l)  
 t - čas měření (s)  
 p<sub>1</sub> - tlak ve vzduchojemu na počátku měření (MPa)  
 p<sub>2</sub> - tlak ve vzduchojemu po skončení měření (MPa)

5. Následně lze s použitím vzorce pro nadkritickou rychlost

$$Q = 111 \times S \times (p_1 + 0,1013 \text{ MPa})$$

vypočítat spotřebu vzduchu měřeného objektu.

### Tlak a průtok

Tlak a průtok média se vzájemně ovlivňují. Jsou to nejdůležitější parametry pro provoz pneumatických obvodů.

Neproudí-li soustavou pneumatického obvodu vzduch, je v každém bodě obvodu stejný tlak. Protéká-li obvodem stlačený vzduch, musí být na výstupu z obvodu nižší tlak než na jeho vstupu. Tomuto rozdílu tlaků říkáme *diferenční tlak* nebo tlakový spád a značíme jej  $\Delta p$ .

Velikost rozdílu tlaků  $\Delta p$  ovlivňují tři veličiny:

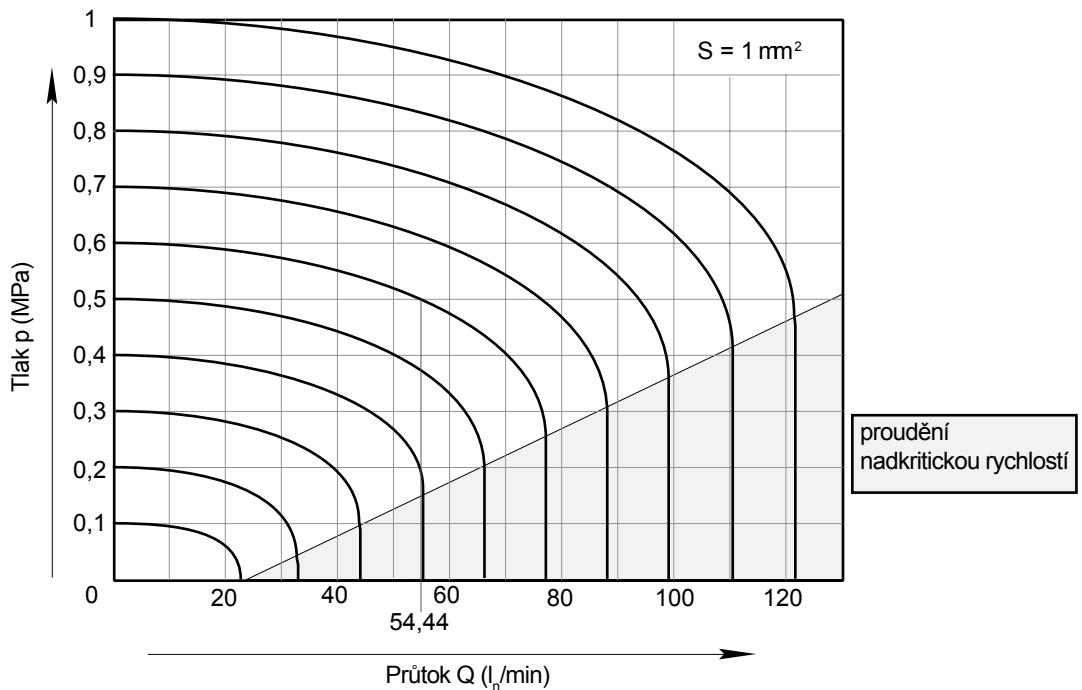
- vstupní tlak
- objem protékajícího vzduchu
- odpory proudění

Pro vyjádření odporu proudění neexistuje jednotka, jakou je v elektrotechnice Ohm. Odpor prvků se vyjadřuje součiniteli průtoku  $k_v$ ,  $K_v$ ,  $C_v$ ,  $Q_n$  nebo poměrným průřezem  $S$ .

Podobné zákonitosti nalezneme také v elektrotechnice. Podle Ohmova zákona platí, že napětí je rovno součinu proudu a odporu. V pneumatických obvodech odpovídá elektrickému napětí tlak vzduchu, elektrickému proudu průtok vzduchu za jednotku času a odpor je dán třením proudu vzduchu ve vedeních a jednotlivých prvcích. V elektrotechnice ale jsou pevné hodnoty a vzájemné vztahy lineární. V pneumatických obvodech lze počítat jako s pevnými hodnotami pouze s tlakem a s průtokem vzduchu. Odpor se mění třením proudu vzduchu v různých prvcích a je dán materiálem, tvarem, kvalitou povrchu a délkou kanálů. Nelze jej vyjádřit jako poměr předcházejících veličin.

## 2. Vlastnosti stlačeného vzduchu

Pro zjištění objemu vzduchu, který proteče jednotlivými prvky (ventily, šroubení atd.) za minutu používáme tzv. „P/Q diagram“, který vyjadřuje závislost mezi vstupním a diferenčním tlakem (tlakovým spádem) a objemem vzduchu.



**Obr. 2.12** Závislost mezi tlakem a objemem vzduchu, který proteče prvkem s poměrným průřezem  $S = 1,0 \text{ mm}^2$

Poměrný průřez pneumatického prvku  $S$  ( $\text{mm}^2$ ) odpovídá kruhovému průřezu měřicí clony, kterou protéká vzduch.

Tmavý podklad pole diagramu ve tvaru klínu vymezuje pole proudění nadkritickou rychlostí. V tomto poli dosahuje proud vzduchu nadzvukové rychlosti. Průtok je možno zvětšit pouze zvýšením vstupního tlaku, tj. zvětšením diferenčního tlaku.

## 2. Vlastnosti stlačeného vzduchu

### Použití diagramu

Na ose „Y“ jsou vyneseny hodnoty vstupních a výstupních tlaků. Pokud neprotéká prvkem vzduch, jsou oba tlaky stejné, tj. na vstupu do prvku a na výstupu z prvku působí statický tlak. Křivky diagramu ukazují, jak při zvětšujícím se průtoku vzduchu klesá tlak na výstupu z prvku.

### Příklad 1:

Určete průtok vzduchu, je-li vstupní tlak  $p_1 = 0,6$  MPa, diferenční tlak  $\Delta p = 0,1$  MPa.

Výstupní tlak  $p_2 = p_1 - \Delta p = 0,6$  MPa –  $0,1$  MPa =  $0,5$  MPa. Od hodnoty  $0,5$  MPa na ose „Y“ vedeme vodorovnou čáru až protne křivku, vycházející z tlaku  $0,6$  MPa. Z průsečíku spustíme kolmici na osu „X“, na které odečteme přibližný průtok  $55,0$  l<sub>n</sub>/min. Podle níže uvedeného vzorce odpovídá zadaným tlakům a poměrnému průřezu průtok  $54,44$  l<sub>n</sub>/min. Tento průtok nazýváme jako normální průtok  $Q_n$  (viz str. 17). Průtok  $Q_n = 54,44$  l<sub>n</sub>/min platí pro všechny prvky (ventily, nástrčné spojky atd.) s poměrným průřezem  $S = 1,0$  mm<sup>2</sup>. Je-li na příklad poměrný průřez prvku  $S = 4,5$  mm<sup>2</sup>, proteče jím také za minutu  $4,5 \times$  větší objem vzduchu. Skutečné množství vzduchu  $Q_n = 54,44$  l<sub>n</sub>/min  $\times 4,5 = 245$  l<sub>n</sub>/min.

### Příklad 2:

Ventil má poměrný průřez  $S = 12,0$  mm<sup>2</sup>, vstupní tlak  $p_1 = 0,7$  MPa, průtok  $Q_n = 600$  l<sub>n</sub>/min. Jaký je výstupní tlak  $p_2$ ?

Abychom mohli použít diagram na str. 21, musíme převést průtok na plochu  $S = 1,0$  mm<sup>2</sup> a to tak, že průtok ventilu dělíme jeho poměrných průřezem  $Q_{n1} = 600 : 12 = 50,0$  l<sub>n</sub>/min. Z hodnoty  $Q_{n1} = 50,0$  l<sub>n</sub>/min na ose „X“ vztyčíme kolmici, až protne křivku, vycházející na ose „Y“ z hodnoty vstupního tlaku  $p_1 = 0,7$  MPa. Z průsečíku vedeme vodorovnou čáru a na jejím průsečíku s osou „Y“ odečteme hodnotu výstupního tlaku  $p_2 = 0,63$  MPa.

### Vzorce pro výpočet průtoku stlačeného vzduchu

Přesné hodnoty průtoku je možné vypočítat podle níže uvedených vzorců.

Z diagramu na obr. 2.12 je zřejmé, že průtok vzduchu prvkem ovlivňuje přímka kritické rychlosti proudění. Nadzvukové rychlosti se dosáhne, je-li absolutní tlak na výstupu  $1,896 \times$  menší než vstupní tlak ( $p_2 = p_1 : 1,896$ ). Pro různé rychlosti proudění platí následující vzorce:

- proudění podzvukovou (podkritickou) rychlostí

$$p_1 + 0,1013 \text{ MPa} < 1,896 (p_2 + 0,1013 \text{ MPa}) \text{ platí } Q = 222 \times S \times \sqrt{\Delta p \times (p_1 + 0,1013 \text{ MPa})}$$

- proudění nadzvukovou (nadkritickou) rychlostí

$$p_1 + 0,1013 \text{ MPa} \geq 1,896 (p_2 + 0,1013 \text{ MPa}) \text{ platí } Q = 111 \times S \times (p_1 + 0,1013 \text{ MPa})$$

## 2. Vlastnosti stlačeného vzduchu



Q	-	průtok vzduchu za jednotku času	(l <sub>n</sub> /min)
p <sub>1</sub>	-	vstupní tlak vzduchu	(MPa)
p <sub>2</sub>	-	výstupní tlak vzduchu	(MPa)
Δp	-	diferenční tlak (p <sub>1</sub> - p <sub>2</sub> )	(MPa)
S	-	poměrný průřez prvku	(mm <sup>2</sup> )

Je-li teplota měřeného média vyšší nebo nižší, jak normou předepsaných 20 °C, je nutné vypočtený průtok násobit koeficientem pro příslušnou teplotu. Opravné koeficienty jsou uvedeny v tabulce 2.13.

teplota média (°C)	-20	-10	0,0	10	30	40	50	60
koeficient	1,08	1,06	1,04	1,02	0,98	0,97	0,95	0,94

**Tabulka 2.13** Opravné koeficienty

## Vlhkost vzduchu

Vzduch dodávaný kompresorem obsahuje velké množství vodních par. Relativní vlhkost vzduchu nasávaného kompresorem závisí na jeho teplotě a povětrnostních podmínkách a určuje množství vyloučeného kondenzátu. Pokud by se kondenzát dostal do potrubí rozvodu vzduchu, mohl by způsobit jeho korozi, nebo jiné škody.

## Rosný bod

Podíl vlhkosti ve stlačeném plynu závisí na jeho teplotě a tlaku. Sníží-li se teplota při konstantním tlaku plynu, dosáhne se kritického bodu nasycení vodními parami, které začnou kondenzovat. Tuto teplotu označujeme jako rosný bod.

Čím je tlak vzduchu nižší, tím vyšší může být obsah vodních par. Se zvýšením tlaku klesá rosný bod. Např. rosný bod 3 °C při tlaku 0,7 MPa (tlakový rosný bod) odpovídá rosnému bodu – 21 °C při atmosférickém tlaku (atmosférický rosný bod). Pro běžné použití je přiměřenou hodnotou rosný bod 3 °C.

V tabulce 2.14 je uveden obsah vodních par v g/m<sup>3</sup> pro různé teploty při atmosférickém tlaku.

teplota (°C)	0	5	10	15	20	25	30	35	40
g/m <sup>3</sup>	4,98	6,86	9,51	13,04	17,69	23,76	31,64	41,83	54,11
teplota (°C)	0	-5	-10	- 5	-20	-25	-30	-35	-40
g/m <sup>3</sup>	4,98	3,42	2,37	1,61	1,08	0,70	0,45	0,29	0,18

**Tabulka 2.14** Obsah vody ve vzduchu při daném rosném bodu

## 2. Vlastnosti stlačeného vzduchu

### Relativní vlhkost vzduchu

Nasycení atmosférického vzduchu vodními parami není téměř nikdy stoprocentní. Vyjimku tvoří stoprocentní nasycení např. při náhlém poklesu teploty. Relativní vlhkost je v procentech vyjádřený poměr mezi skutečným obsahem vody a obsahem vody při dosažení rosného bodu:

$$\text{relativní vlhkost} = \frac{\text{skutečný obsah vody}}{\text{obsah vody rosného bodu}} \times 100$$

**Příklad 1:** Teplota vzduchu 25 °C, r. v. 65 %. Kolik vody obsahuje 1 m<sup>3</sup> vzduchu při atmosférickém tlaku?

Obsah vody rosného bodu při 25 °C a při atmosférickém tlaku je 24 g/m<sup>3</sup>

Skutečný obsah vody v 1 m<sup>3</sup> vzduchu je:  $V_{\text{skut.}} = 24 \text{ g/m}^3 \times 0,65 = \mathbf{15,6 \text{ g/m}^3}$

**Příklad 2:** 10 m<sup>3</sup> vzduchu o teplotě 15 °C s relativní vlhkostí 65 % se stlačí na 0,6 MPa. Teplota za kompresorem bude 25 °C. Kolik se vyloučí kondenzátu?

Obsah vody rosného bodu při 15 °C a při atmosférickém tlaku a r. v. 65 % je:  $13,04 \text{ g/m}^3 \times 10 \times 0,65 = \mathbf{84,8 \text{ g/m}^3 \text{ (a)}}$

Objem vzduchu při tlaku 0,6 MPa se vypočte následovně:

$$p_1 \times V_1 = p_2 \times V_2 \text{ z toho } V_2 = \frac{p_1 \times V_1}{p_2}$$

$$V_2 = \frac{0,1013 \text{ MPa} \times 10 \text{ m}^3}{(0,1013 \text{ MPa} + 0,6 \text{ MPa})} = 1,44 \text{ m}^3$$

Obsah vody v 1,44 m<sup>3</sup> vzduchu při tlaku 0,6 MPa a rosném bodu 25 °C:

$$V_{\text{vody}} = 23,76 \text{ g/m}^3 \times 1,44 = \mathbf{34,2 \text{ g/m}^3 \text{ (b)}}$$

Skutečný obsah vody je rozdíl obsahu vody v daném objemu vzduchu při atmosférickém tlaku (a) a obsah vody v objemu vzduchu po stlačení na požadovaný tlak (b).

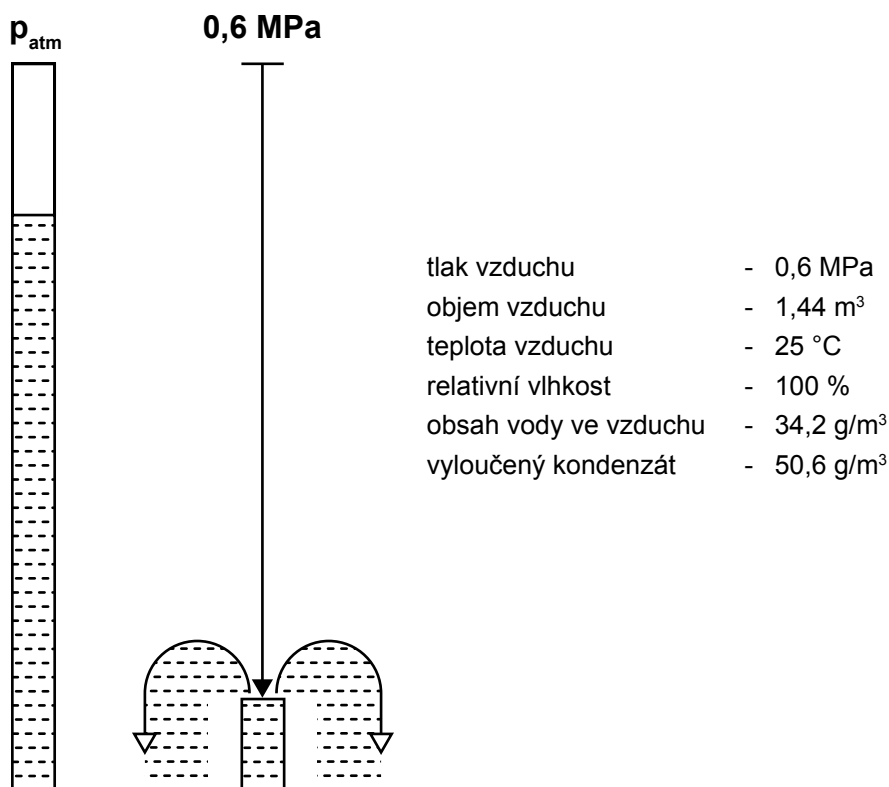
Skutečné množství kondenzátu vyloučené z 1,44 m<sup>3</sup> vzduchu při tlaku 0,6 MPa je:

$$V_{\text{skut.}} = 84,9 \text{ g/m}^3 - 34,2 = \mathbf{50,7 \text{ g}}$$



## 2. Vlastnosti stlačeného vzduchu

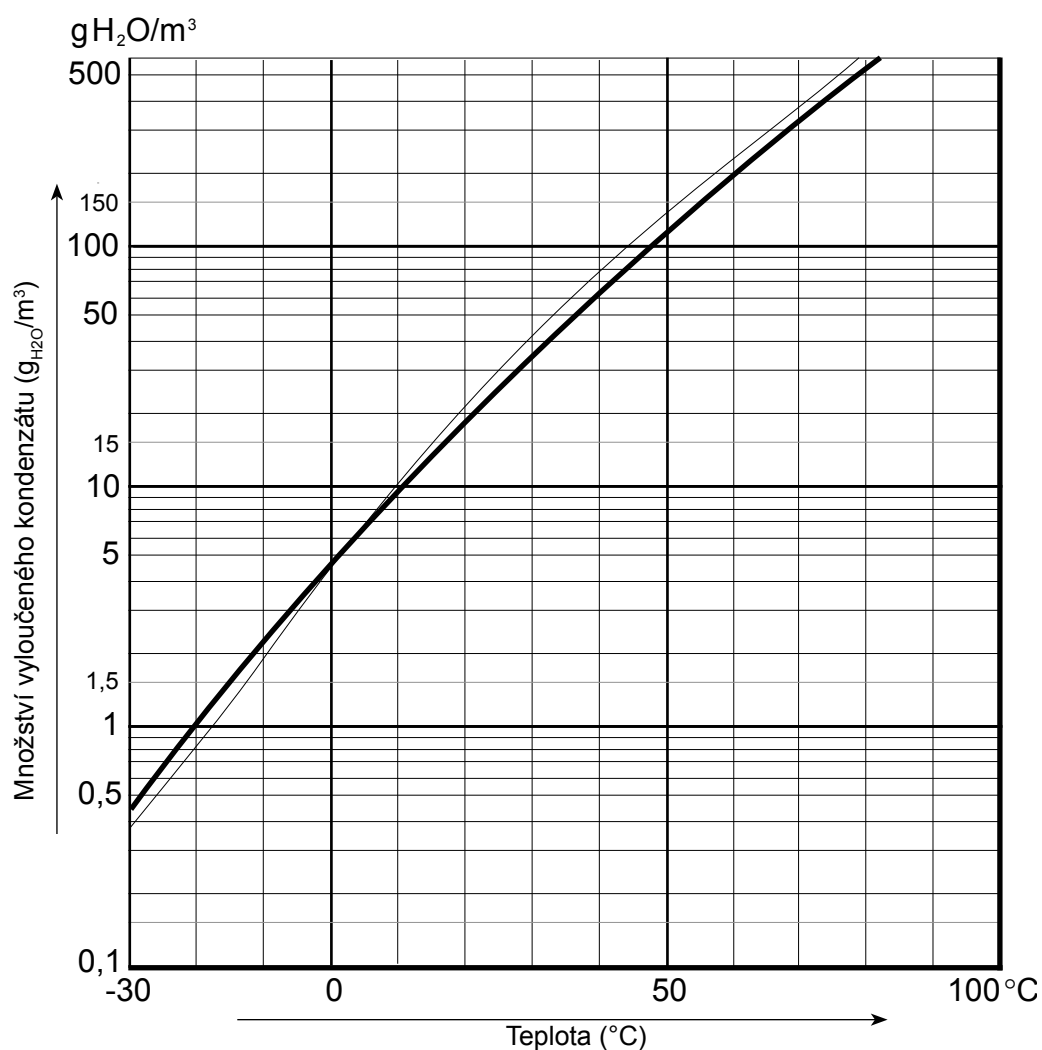
objem vzduchu	- 10 m <sup>3</sup>
teplota vzduchu	- 15 °C
relativní vlhkost	- 65 %
obsah vody ve vzduchu	- 84,8 g/m <sup>3</sup>



**Obr. 2.15** Grafické znázornění poměrů 2 příkladu

Všeobecně platí: čím chladnější je vzduch nasávaný kompresorem, tím méně bude kondenzátu ve stlačeném vzduchu. Extrémní množství kondenzátu se tvoří ve stlačeném vzduchu v tropech. Proto je velmi důležité umístit kompresor na poměrně chladném místě, aby mohl nasávat co nejchladnější vzduch. Více na toto téma bude uvedeno ve 3. kapitole „Kompresory a rozvod stlačeného vzduchu“.

### Křivky rosného bodu



**Obr. 2.16** Křivky průběhu rosného bodu v závislosti na teplotě od - 30 °C do cca + 80 °C. Silná čára platí pro parciální tlak vodních par při dané teplotě, slabá čára platí pro normalizovaný objem.