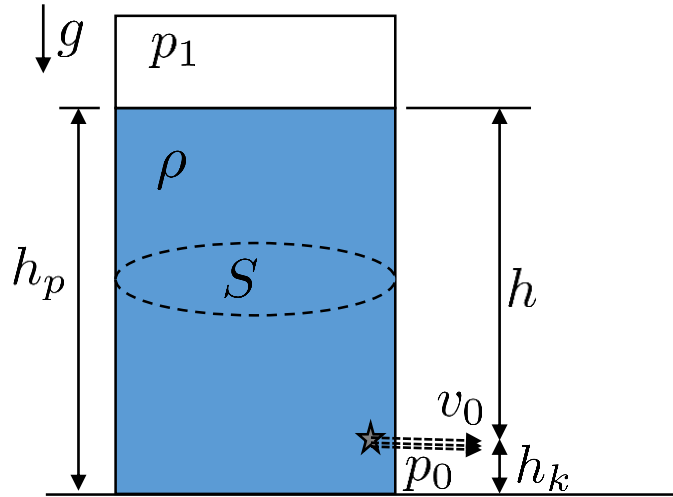


# Bezpečnostní inženýrství

- výtok tekutin ze zásobníků -
- šíření emisí ve volném prostoru -

## Ze zásobníku úzkým otvorem



Předpoklady  $S_1 \gg S_0$   
 $\rho = \text{konst.}$

$$\dot{m}_0 = -\frac{dm}{dt} \quad \text{pouze výtok}$$

$$\dot{V}_0 = -\frac{dV_s}{dt} \quad (\rho = \text{konst.})$$

$$v_0(h) S_0 dt = -S(h) dh$$

$$t = -\int_{h_p}^{h_k} \frac{S(h)}{v_0(h) S_0} dh$$

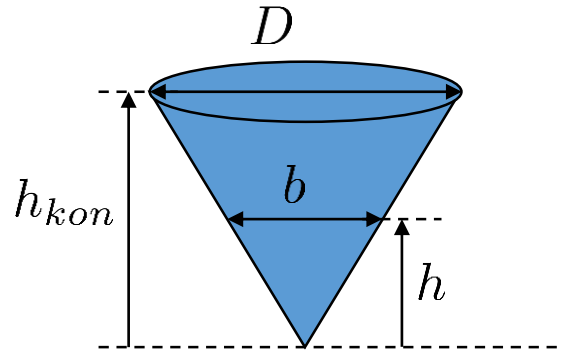
Výtokový součinitel

$\mu = 1$  v případě bezpečnostních výpočtů

$\mu = 0,7$  ostrá hrana

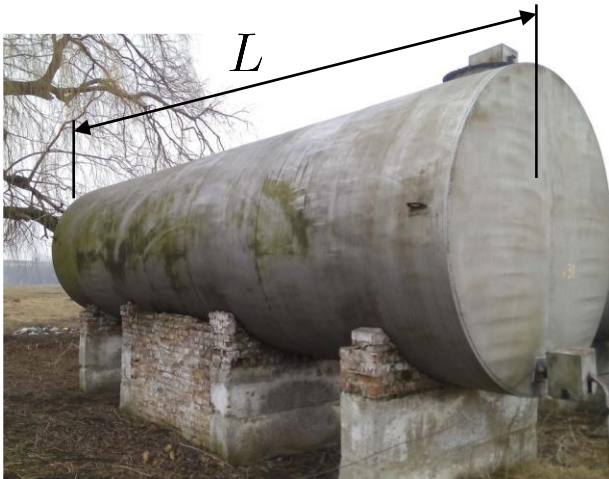
$$t = \frac{1}{\mu S_0 \sqrt{2}} \int_{h_k}^{h_p} \left( \frac{1 - \left( \frac{S_0}{S(h)} \right)^2}{\frac{p_1 - p_0}{\rho} + g h} \right)^{0,5} S(h) dh$$

## Z nádoby úzkým otvorem

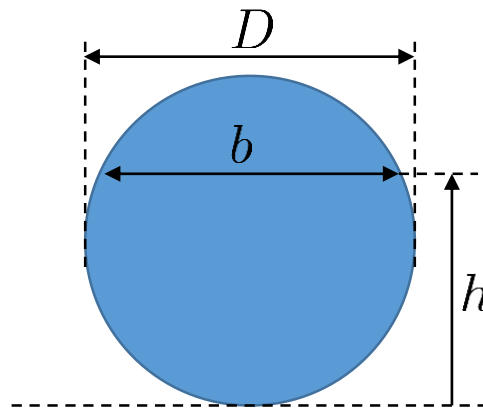


$$S(h) = \frac{\pi b^2}{4}$$

$$b = \left( \frac{D}{h_{kon}} \right) h$$



$$S(h) = L b$$



$$b = 2 \sqrt{h(D - h)}$$



$$S(h) = \frac{\pi b^2}{4}$$

## Bernoulliova rovnice – ideální plyn

$$\frac{v^2}{2} + \int \frac{dp}{\rho(p)} + g z = konst.$$

$$\rho = \rho(p, T)$$

adiabata (Q = konst.):  $n = \frac{c_p}{c_v}$

$$p = C \rho^n$$

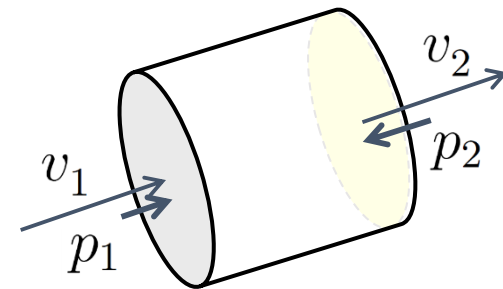
$$dp = n C \rho^{n-1} d\rho$$

$$\int_1^2 \frac{dp}{\rho} = n C \int_{\rho_1}^{\rho_2} \rho^{n-2} d\rho = \frac{n}{n-1} C \rho^{n-1} \Big|_1^2 = \frac{n}{n-1} \frac{p}{\rho} \Big|_1^2$$

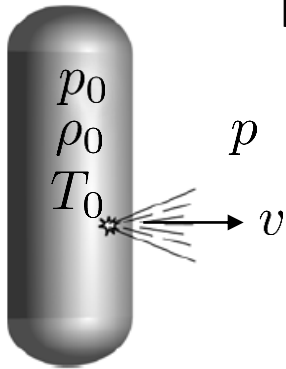
$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{n}{n-1} \frac{p_1}{\rho_1} = \frac{v_2^2}{2} + \frac{n}{n-1} \frac{p_2}{\rho_2}$$

stlačitelnost  $\frac{p}{\rho^n} = konst.$

polytropický exponent



## Rychlost výtoku



Rychlost v nádobě  $v_0 = 0$

$$\frac{n}{n-1} \frac{p_0}{\rho_0} = \frac{v^2}{2} + \frac{n}{1-n} \frac{p}{\rho}$$

$$\frac{p}{\rho^n} = \frac{p_0}{\rho_0} \Rightarrow \rho = \rho_0 \left( \frac{p}{p_0} \right)^{1/n}$$

$$v = \sqrt{2 \frac{n}{n-1} \frac{p_0}{\rho_0} \left[ 1 - \left( \frac{p}{p_0} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]}$$

st. Véntant-Waltrova rovnice

$$v_{max} = \sqrt{2 \frac{n}{n-1} \frac{p_0}{\rho_0}}$$

Teoretická maximální rychlost, výtok do vakua,  $p = 0$

## Rychlost výtoku

Machovo číslo

$$\text{Ma} = \frac{v}{a}$$

← lokální rychlost proudění  
← rychlost zvuku (pro vzduch = 331,3 ms<sup>-1</sup>)

Ma < 1 podzvuková rychlost

Ma > 1 nadzvuková rychlost

0,3 < Ma < 0,6 subsonická

0,7 < Ma < 1,2 transsonická

1,2 < Ma < 5 supersonická

5 < Ma hypersonická

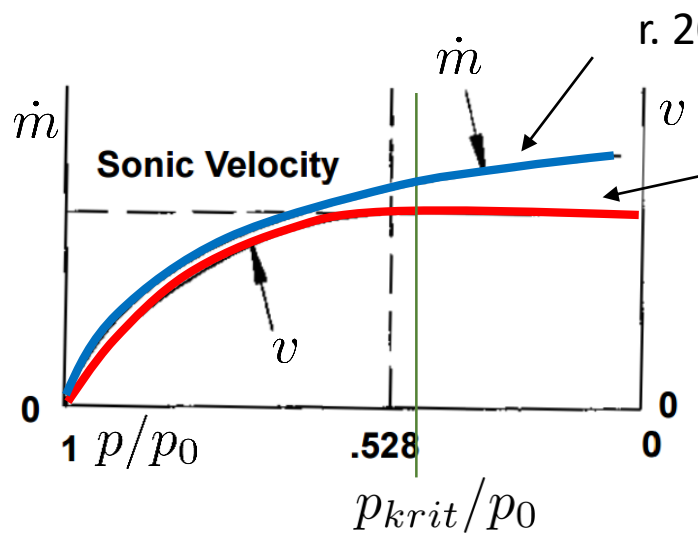
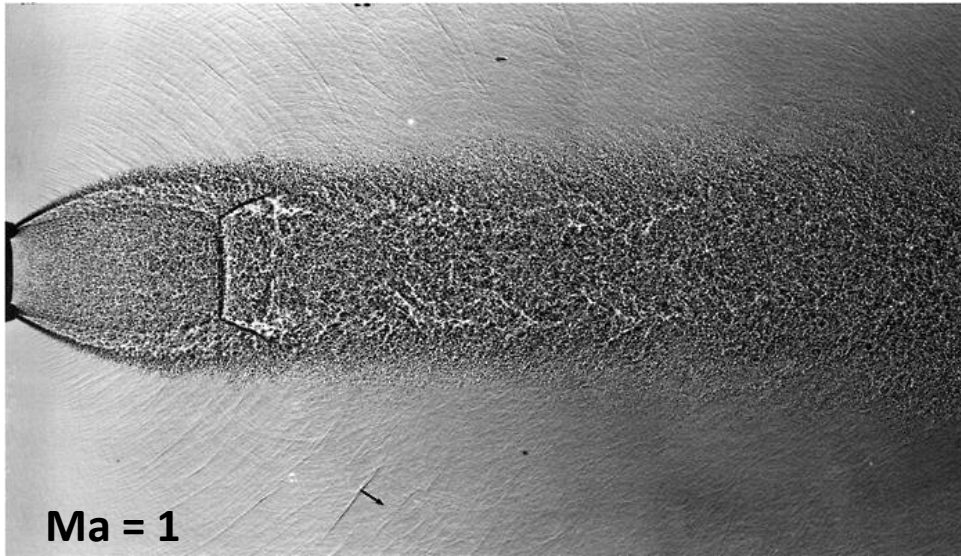
Ma < 0,3 zanedbatelný vliv stlačitelnosti

- konst. hustota
- kapaliny
- plyny při “nízké rychlosti”, ~ 100 m/s, 360 km/h

**Kritická rychlost (Ma = 1)** lokální rychlost zvuku a lokální rychlost proudu se rovnají.

- v nadkritické oblasti se ve výtokovém proudu vytváří složitá soustava rázových a expanzních vln (výtok již není izoentropický)

## Rychlost výtoku – kritická rychlost



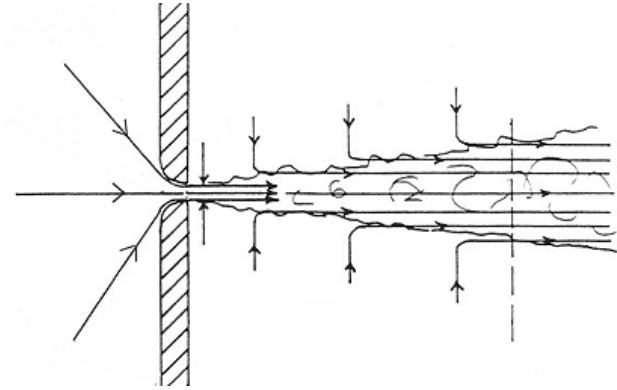
r. 2003,  $\dot{m}$  se mění díky změně hustoty

- rychlost se již dále nemění (zahlcení trysky)
- experimentálně potvrzeno r. 1875 Filegner
- v řadě článků se nemění ani  $\dot{m}$

## Doba výtoku z tlakového zásobníku

### Základní teorie

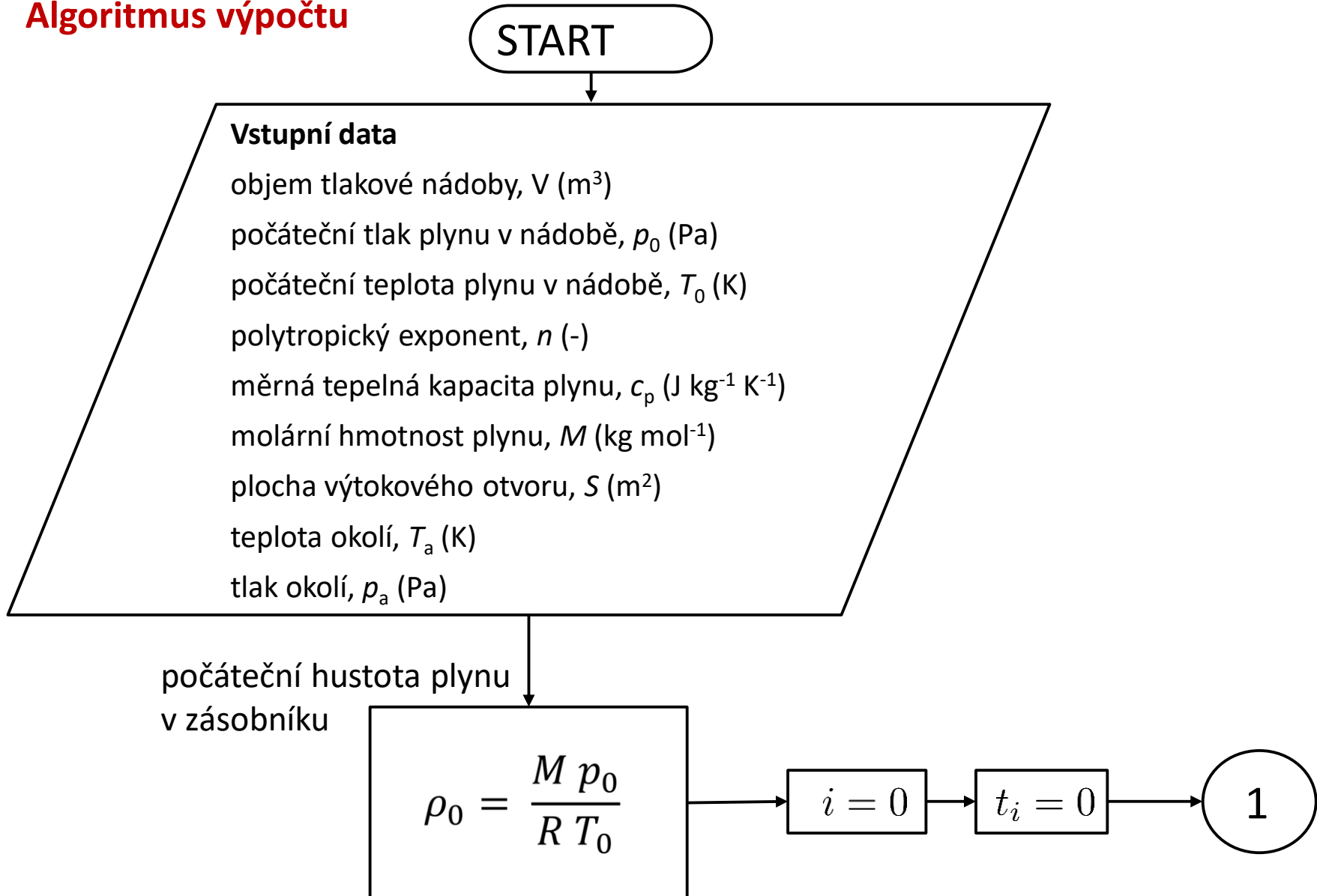
- výtok plynů z tlakových nádob  
malým otvorem



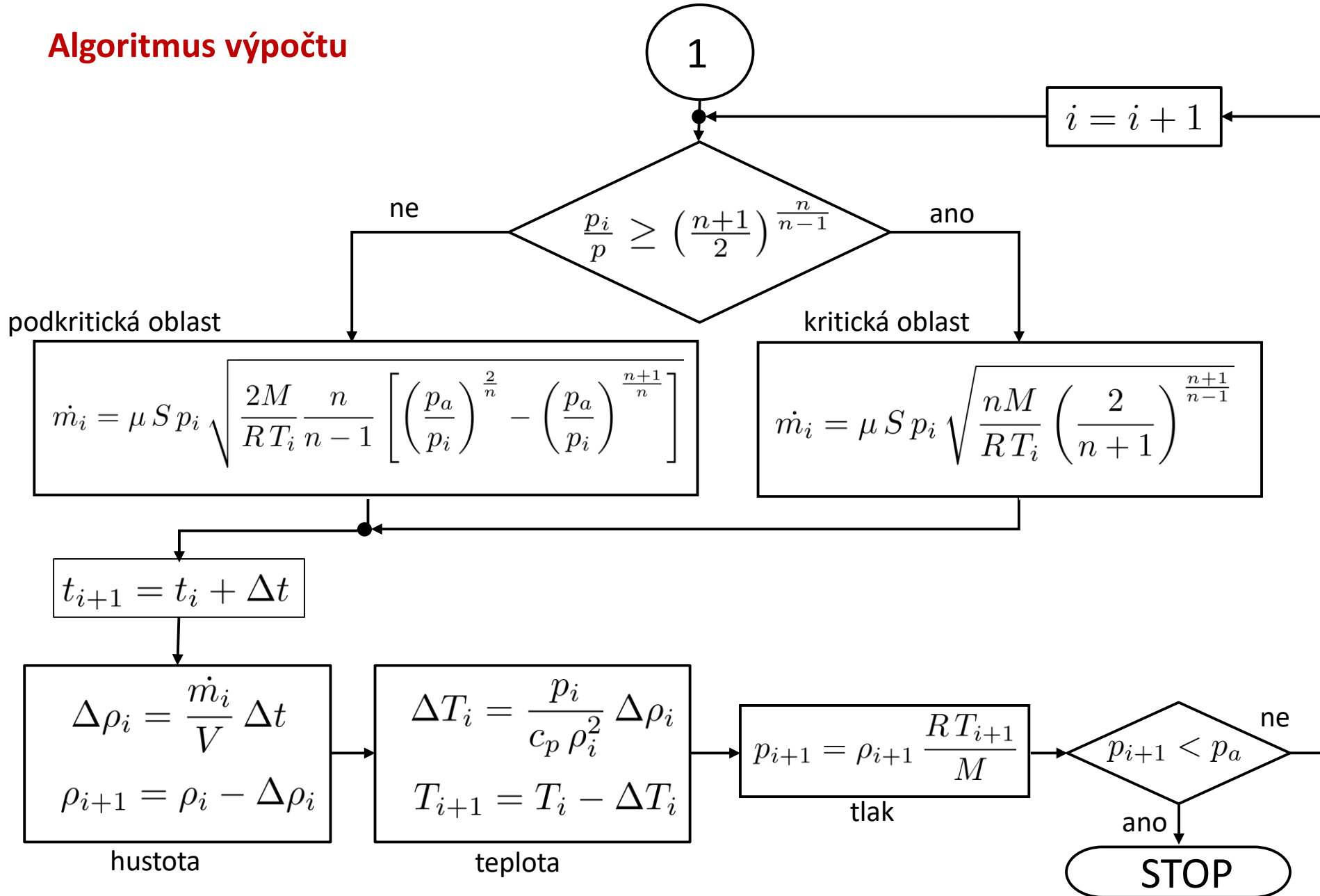
- polytropický model
    - jednorozměrné izoentropické proudění ideální stlačitelné tekutiny
    - výtoková rychlost: Saint Vénant–Wantzelova rovnice
  - maximální hmotnostní průtok plynu
    - při dosažení lokální rychlosti zvuku
  - nestacionární výpočet
    - časový krok:  $\Delta t$
    - uvnitř tlakové nádoby s pevnými stěnami dochází k časové změně:
      - tlaku
      - teploty
      - hustoty plynu
- }  $\Rightarrow$  změna hmotnostního toku plynu s časem



## Algoritmus výpočtu

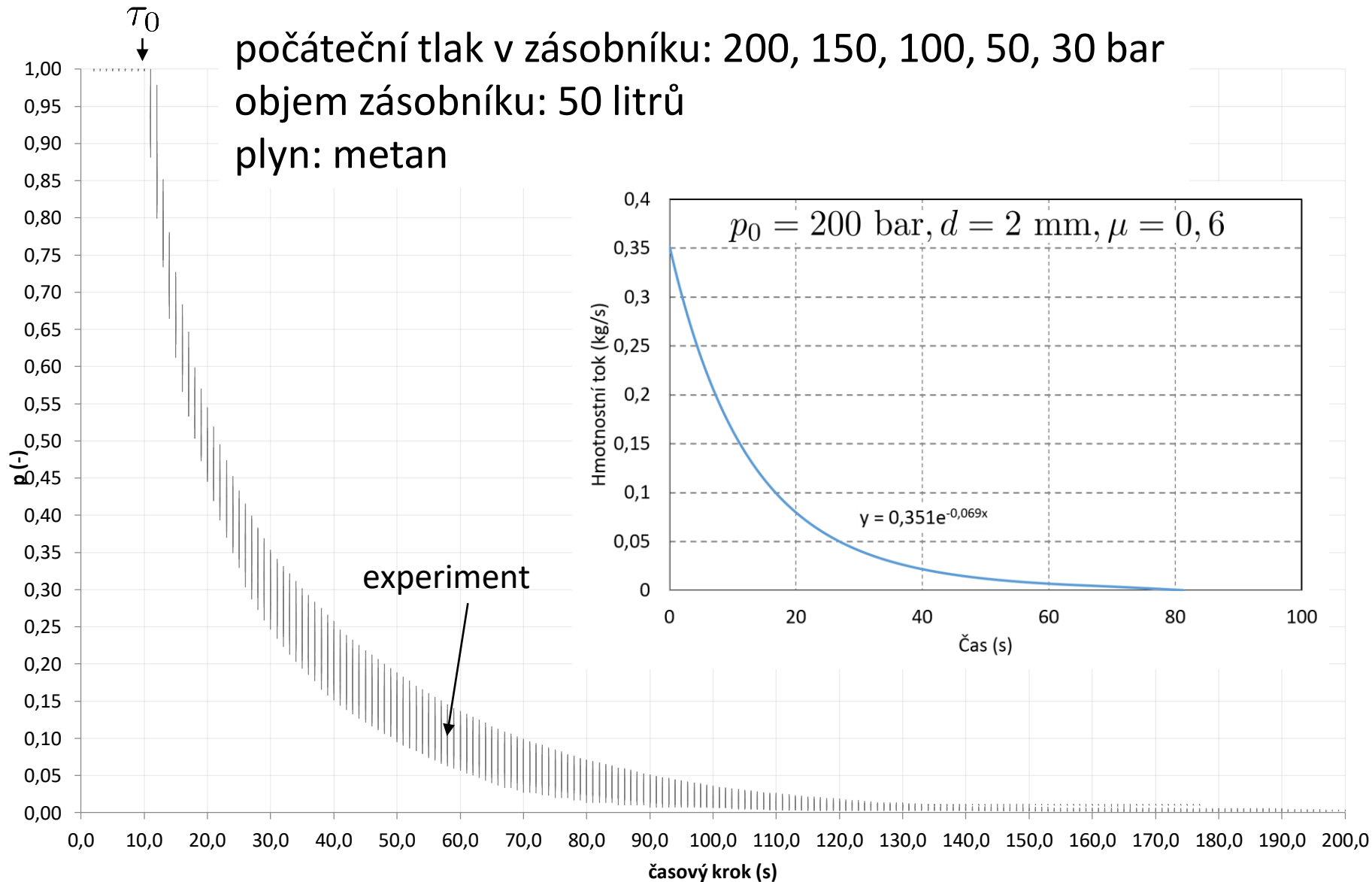


## Algoritmus výpočtu

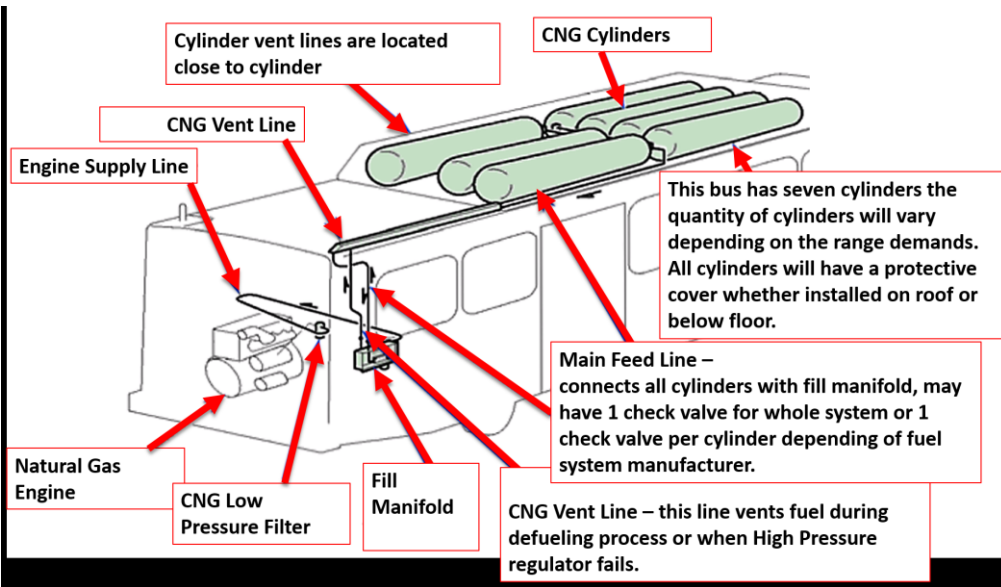
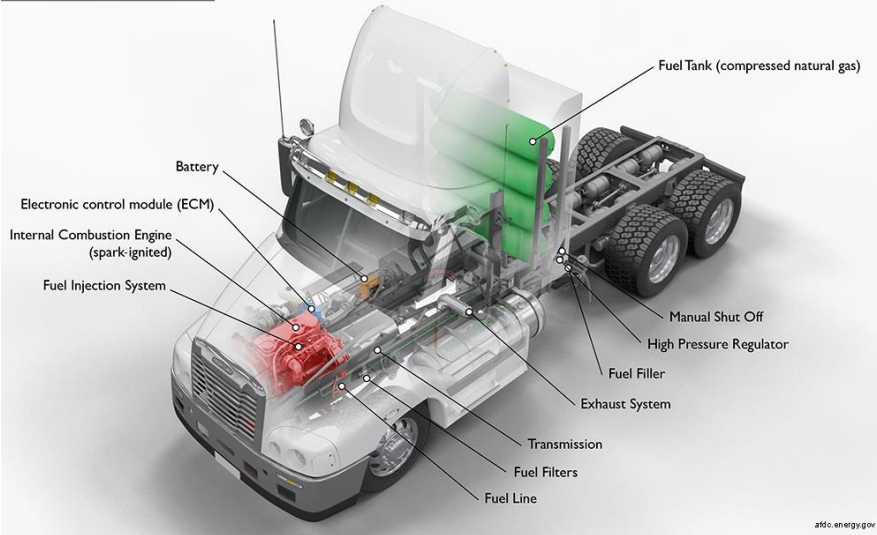


## Změna tlaku v nádobě

počáteční tlak v zásobníku: 200, 150, 100, 50, 30 bar  
 objem zásobníku: 50 litrů  
 plyn: metan

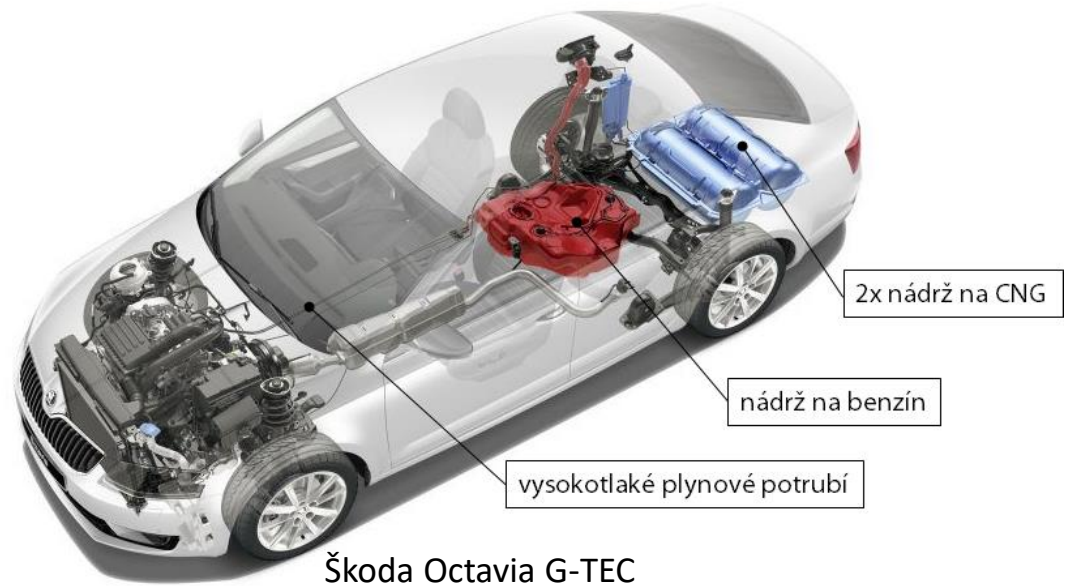


Natural Gas Vehicle



## Palivová soustava

- CNG tlaková nádoba
  - tlak až 200 bar
  - objem 35 ~ 50 litrů
  - počet 2 (3)
  - materiál:
    - ocel
    - kompozit
- vysoký tlak až k motoru  
+ nádrž na benzín (10 až 50 litrů)



Ocelové nádrže (127 kg)



Kompozitové nádrže (37 kg)

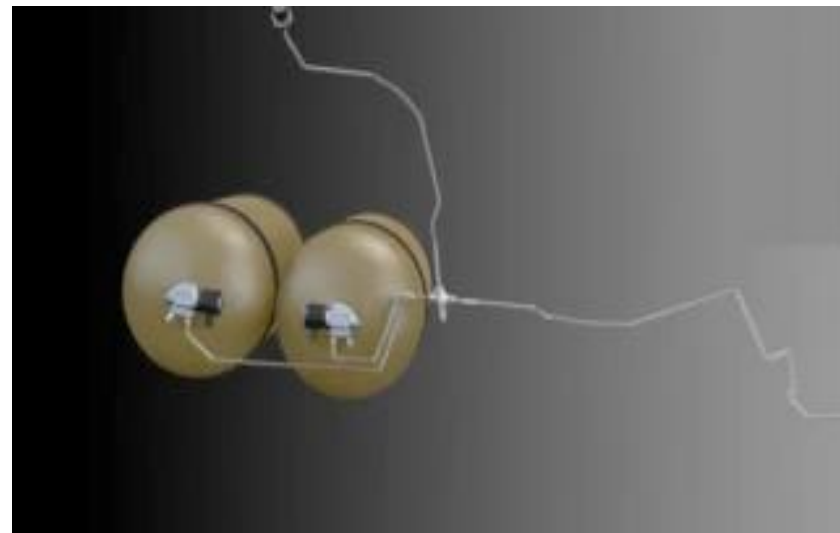
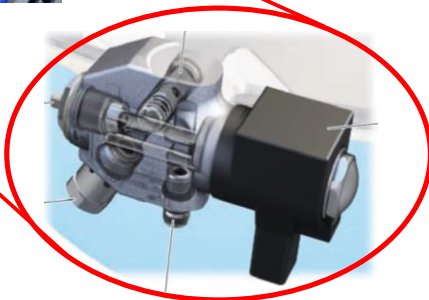
Škoda auto



## Palivová soustava: bezpečnost



Tlaková láhev je osazena multifunkčním ventilem s přetlakovým zařízením spouštěným teplotou (Temperature triggered Pressure Relief Device, TPRD) – bezpečnostní pojistka



### TPRD

- Chrání tlakovou láhev před destrukcí díky nárůstu tlaku vlivem vysoké teploty okolí
- Teplota, při které se pojistka spustí je  $110 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$
- Dvě rozdílná řešení
  - Skleněná trubička naplněná kapalinou, která se při zahřívání rozpíná (praskne)
  - Nízko-teplotně tavitelná slitina (vyteče)



## Palivová soustava: bezpečnost

### Tlaková nádoba

- mechanické poškození
- koroze (ocelové nádoby)

### Bezpečnostní pojistka (TPRD)

- Žádoucí
  - při požáru
- Nežádoucí
  - opotřebení/stárnutí/poškození

### Potrubní systém/regulátor tlaku

- špatná instalace/údržba
- poškození při provozu – vibrace, mechanické opotřebení



Roztržení zásobníku při plnění CNG (pardubice.idnes.cz)

## Co může nastat po úniku CNG

1. Unikající plyn ve směsi se vzduchem **se vznítí** ihned, nebo malou chvíli po úniku
  - plyn hoří, a proto nedochází ke vzniku výbušné koncentrace
2. Plyn uniká, ale **nedojde k zahoření**
  - možný vznik výbušné/hořlavé směsi se vzdušným kyslíkem
    - uzavřený prostor (např. garáž, tunel)
      - akumulace metanu v podstropních prostorech
    - otevřený prostor
      - snadnější rozptýl směsi do okolí

## Požárně technické charakteristiky, metan - vzduch

Vlastnost	Hodnota	Vlastnost	Hodnota
Spodní mez hoření	5,3 obj. %	Rychlost plamene při výbuchu	1 800 m/s
Horní mez hoření	15,0 obj. %	Výbuchový tlak	16 bar
Spodní mez výbušnosti	8 obj. %	Minimální iniciační energie	0,33 mJ
Horní mez výbušnosti	14,5 obj. %	Výbuchová teplota	2 460 °C
Teplota vznícení	540 °C	Maximální teplota plamene	1 960 °C

## Posouzení rizika spojeného s únikem CNG

Existuje mnoho různých faktorů

- rychlost úniku plynu
- velikost mraku plynu (koncentrace metanu)
- pohyb okolního vzduchu (přirozený, nucený – odvětrávání)
- přítomnost iniciačních zdrojů (požár/výbuch)

Příklad – legislativní požadavky pro stavbu a provoz hromadných garáží:

- Posouzení garáže z hlediska možnosti vytvoření výbušné koncentrace?
- Vybavení garáže účinným větráním
- Vybavení garáže plynovými detektory, počet umístění



## Velkorozměrná požární zkouška



## Velkorozměrná požární zkouška

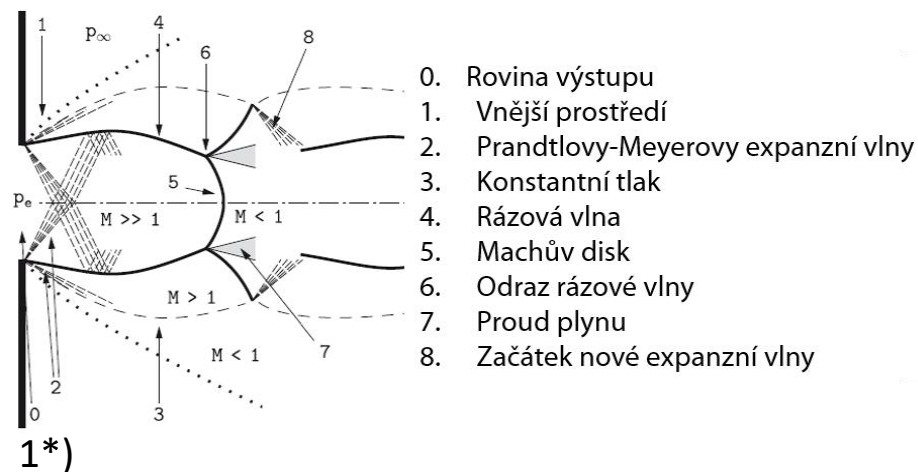
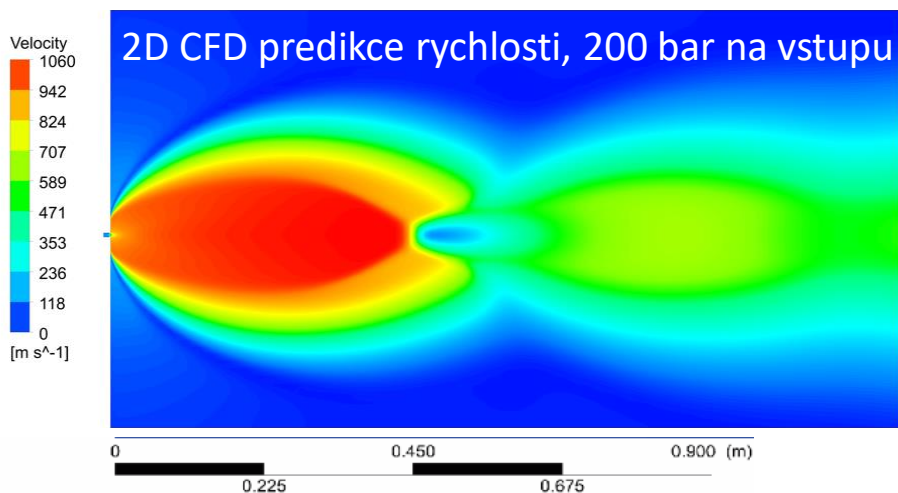
+ 1 minuta





## Dynamika proudění plynu z trysky - jet

- Rychlost proudění plynu je v nadkritické oblasti.
- Maximální rychlost až kolem Mach 5 při 200 barech – rychlost řádově stovky m/s



➤ Rychlostní pole ➤ Tlakové pole ➤ Koncentrační pole – meze hořlavosti/výbušnosti

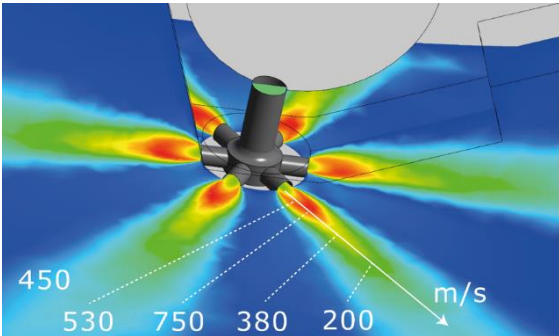
1\*) Franquet, E., Perrier, V., Gibout, S., Bruel, P.: Free underexpanded jets in a quiescent medium: A review, Progress in Aerospace Sciences 77, 25-53, 2015



## Proudění plynů po otevření bezpečnostní pojistky

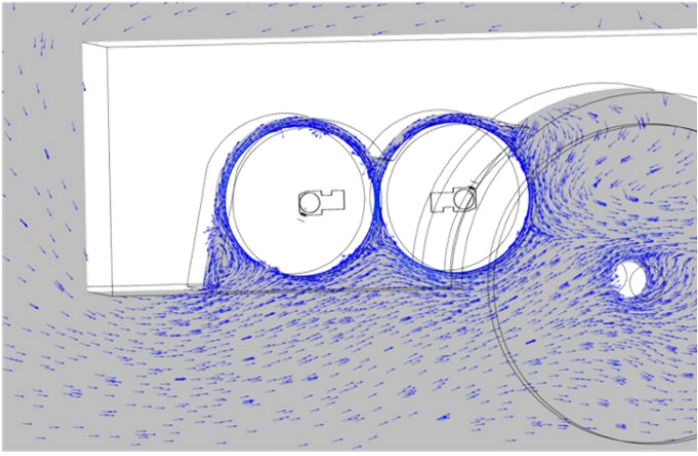
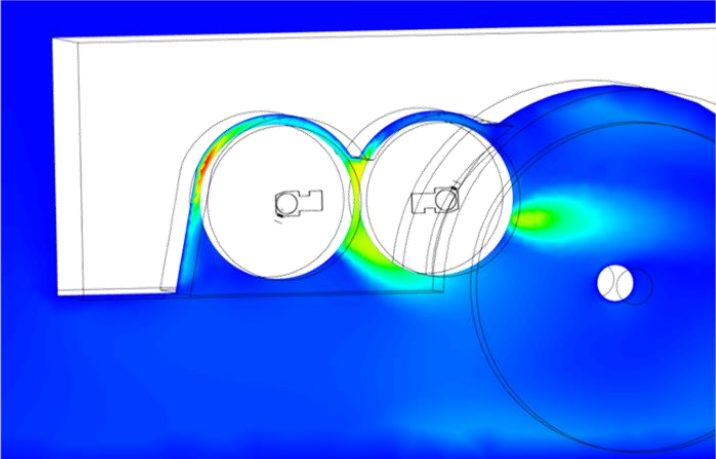
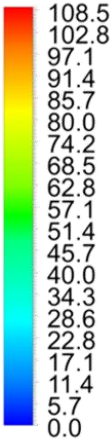


100 bar



200 bar

Velocity



## Dynamika proudění – zadní část vozidla – vizualizace



## Dynamika proudění – boční jet – vizualizace





## Požár autobusu na CNG



## Ovlivnění šíření plynných látek v atmosféře

Disperze plynu může být v souvislosti s rychlostí úniku plynu

- laminární (difúzní)
- turbulentní (únik plynné fáze nadkritickou rychlostí).

Podle relativní hustoty plynu (vzhledem k vzduchu) mohou být disperze

- vznášivé („lehké“ plyny)
- pasivní („neutrální“ = plyny s podobnými vlastnostmi jako vzduch nebo velmi zředěné látky ve vzduchu)
- disperze „těžkých“ plynů.

Pohyb a rozptýlení disperze = role atmosférických podmínek (rychlost větru a typ atmosférické stálosti) + vliv drsnosti terénu.

Hustota plynu (a tím i vztlak) záleží nejen na jeho vnitřních vlastnostech, ale i také na jeho teplotě, a proto změna teploty může změnit jeho charakter z negativního do pozitivního vztlaku a naopak.



## Činitelé ovlivňující rozptyl plynů a par

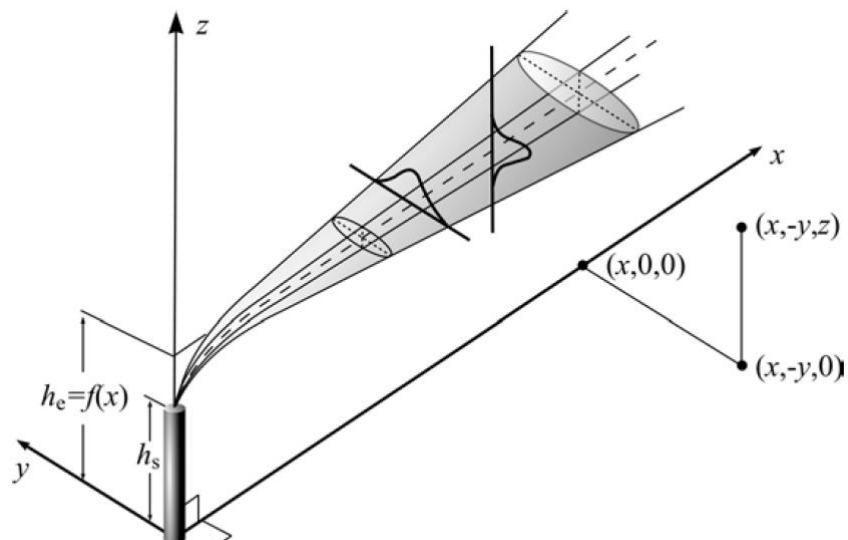
**1. Rychlost větru:** čím je větší rychlost větru, tím je oblak plynů a par delší a užší. Chemické látky se dostanou rychleji do větší vzdálenosti od jejich zdroje, ale oblak je zředěn větším množstvím vzduchu.

**2. Atmosférická stabilita:** týká se především vertikálního promíchávání oblaku plynů a par. Během dne jsou velké rozdíly mezi vyšší teplotou u povrchu země a nižší teplotou ve vyšších vrstvách atmosféry. V noci je tomu naopak s tím, že asi 500 m nad povrchem země je již teplota ve dne i v noci stejná. Někdy je ve dne teplota v této výšce vyšší než na povrchu země a vzniká inverze.

**3. Podmínky na povrchu země:** ovlivňují promíchávání v důsledku obtékání překážek. Na povrchu země je rychlost nulová. Rychlostní gradienty jsou nad otevřeným povrchem např. vodními plochami větší, tzn. že rychlost výškového větru je dosažena při nižší výšce než nad zastavěnou či hornatou respektive zalesněnou plochou.

**4. Výška na povrchu:** ovlivňuje proudový obrazec na základě vztlaku a hybnosti jen na počátku vzniku oblaku v blízkosti zdroje. Ve větší vzdálenosti od zdroje převládá vliv turbulentního promíchávání.

## Gaussian Plume Model



zdroj, kg/s

$$C = \frac{Q_c}{u_s} \frac{10^9}{2\pi\sigma_y} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] \frac{1}{\sigma_z} \left\{ \exp\left[-\frac{(h_e - z)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(h_e + z)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\}$$

horizontální rychlost větru, m/s

koncentrace polutantu,  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Třídy stability jsou pro kontinuální únik typu vlečka

Rychlost větru [ m/s ]	Den			Noc	
	Intenzita slunečního záření			Oblačnost	
	Silná	Střední	Slabá	Zataženo	Jasno
0 – 2	A	A – B	B		
2 – 3	A – B	B	C	E	F
3 – 5	B	B – C	C	D	E
5 – 6	C	C – D	D	D	D
nad 6	C	D	D	D	D

A – extrémně nestabilní podmínky  
 B – středně nestabilní podmínky  
 C – mírně nestabilní podmínky  
 D – neutrální podmínky  
 E – mírně stabilní podmínky  
 F – středně stabilní podmínky

## Disperzní koeficienty, Pasquill-Giffordův model

Pasquill (1961) proposed the following empirical equations for the calculation of the dispersion coefficients  $\sigma_z$  (m) and  $\sigma_y$  (m), as a function of the distance  $x$  (m) for

$$\text{urban areas} \quad \sigma_y = e x (1 + c_1 x)^{-1/2} \quad \sigma_z = f x (1 + g x)^h$$

$$\text{rural areas} \quad \sigma_y = c_2 x \tan(TH) \quad \sigma_z = a (c_3 x)^b$$

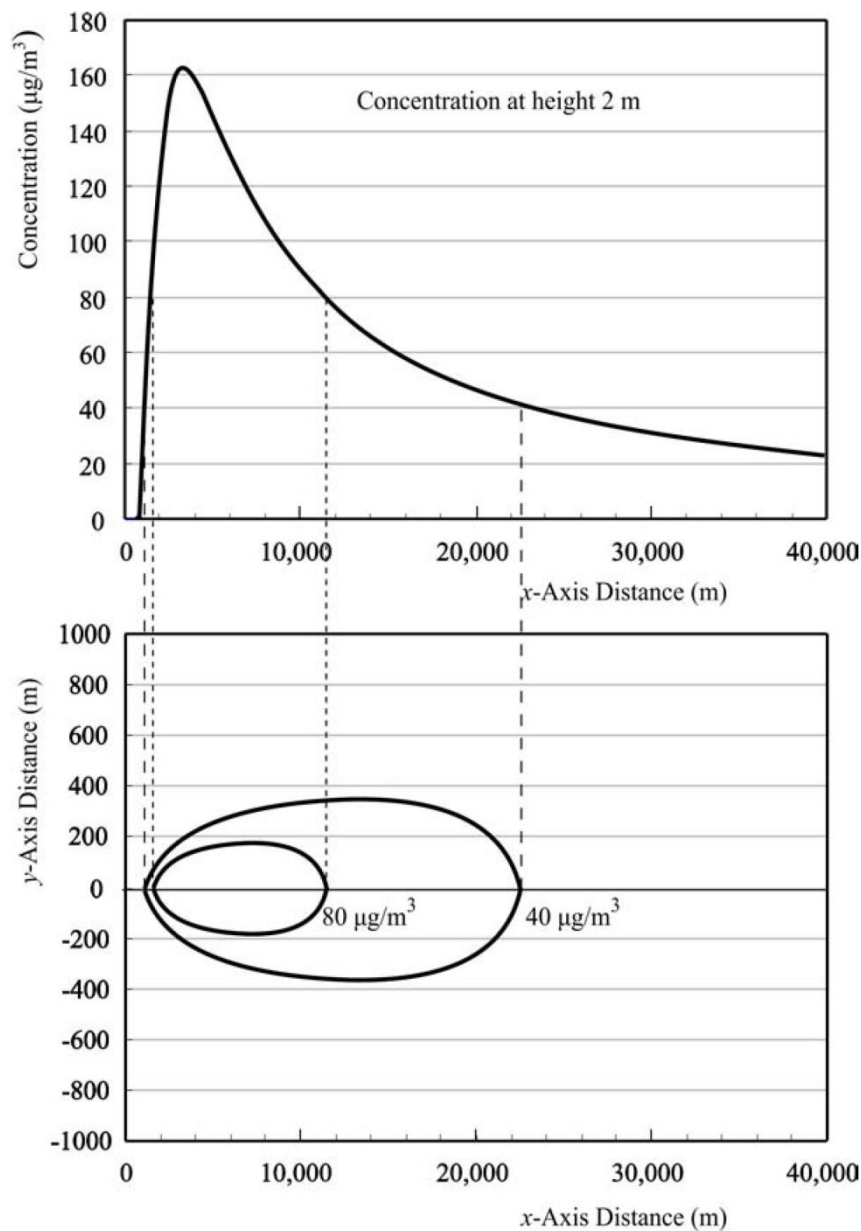
where  $TH = c_4 [c - d \ln(c_3 x)]$ . Values for parameters  $a, b, c, d, e, f, g, h$  are given in Table C5.8 [EPA-454/B-95-003a 1995, Turner 1994]. Also  $c_1 = 0.0004 \text{ m}^{-1}$ ,  $c_2 = 0.4651$ ,  $c_3 = 0.001 \text{ m}^{-1}$  and  $c_4 = 0.01745$ .

Atm. Stab.	$c$ (-)	$d$ (-)	$e$ (-)	$f$ (-)	$g$ ( $\text{m}^{-1}$ )	$h$ (-)
A	24.1670	2.5334	0.32	0.24	0.001	0.5
B	18.3330	1.8096	0.32	0.24	0.001	0.5
C	12.5000	1.0857	0.22	0.20	0	0
D	8.3330	0.7238	0.16	0.14	0.0003	-0.5
E	6.2500	0.5428	0.11	0.08	0.0015	-0.05
F	4.1667	0.3619	0.11	0.08	0.0015	-0.05

## Disperzní koeficienty, Pasquill-Giffordův model

Atm. Stab.	$x$ (m)	$a$ (m)	$b$ (-)	Atm. Stab.	$x$ (m)	$a$ (m)	$b$ (-)
A	< 100	122.800	0.94470	E	< 100	24.260	0.83660
	100 - 150	158.080	1.05420		101 - 300	23.331	0.81956
	151 - 200	170.220	1.09320		301 - 1,000	21.628	0.75660
	201 - 250	179.520	1.12620		1,001 - 2,000	21.628	0.63077
	251 - 300	217.410	1.26440		2,001 - 4,000	22.540	0.57154
	301 - 400	258.890	1.40940		4,001 - 10,000	24.703	0.50527
	401 - 500	346.750	1.72830		10,001 - 20,000	26.970	0.46713
	501 - 3,110	453.850	2.11660		20,001 - 40,000	34.420	0.37615
> 3,110	-	-	> 40,000	47.618	0.29592		
B	< 210	90.673	0.93196	F	< 200	15.209	0.81558
	211 - 400	98.483	0.98332		201 - 700	14.457	0.78407
	> 400	109.300	1.09710		701 - 1,000	13.953	0.68465
C	Any $x$	61.141	0.91465	1,001 - 2,000	13.953	0.63227	
				2,001 - 3,000	14.823	0.54503	
				3,001 - 7,000	16.187	0.46490	
				7,001 - 15,000	17.836	0.41507	
D	< 310	34.459	0.86974	15,001 - 30,000	22.651	0.32681	
	310 - 1,000	32.093	0.81066	30,001 - 60,000	27.074	0.27436	
	1,001 - 3,000	32.093	0.64403	> 60,000	34.219	0.21716	
	3,001 - 30,000	36.650	0.56589				
> 30,000	44.053	0.51179					

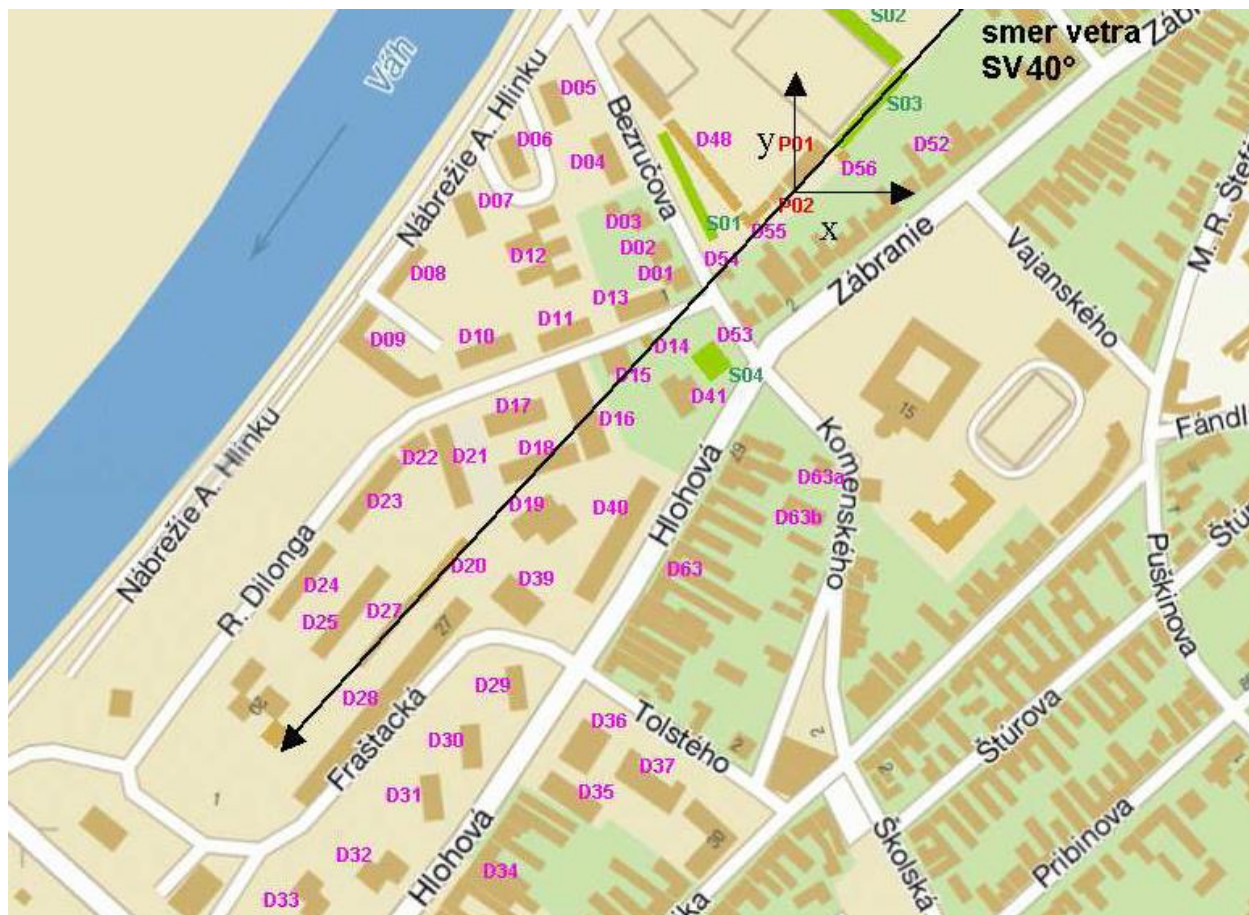
## Ukázka výpočtu, Pasquill-Giffordův model





## Příkladová studie: šíření amoniaku

Cíl: pomocí CFD předpovědět průběh havárie spojené s únikem a následným šířením oblaku toxických plynů (amoniaku) v okolí zimního stadionu.

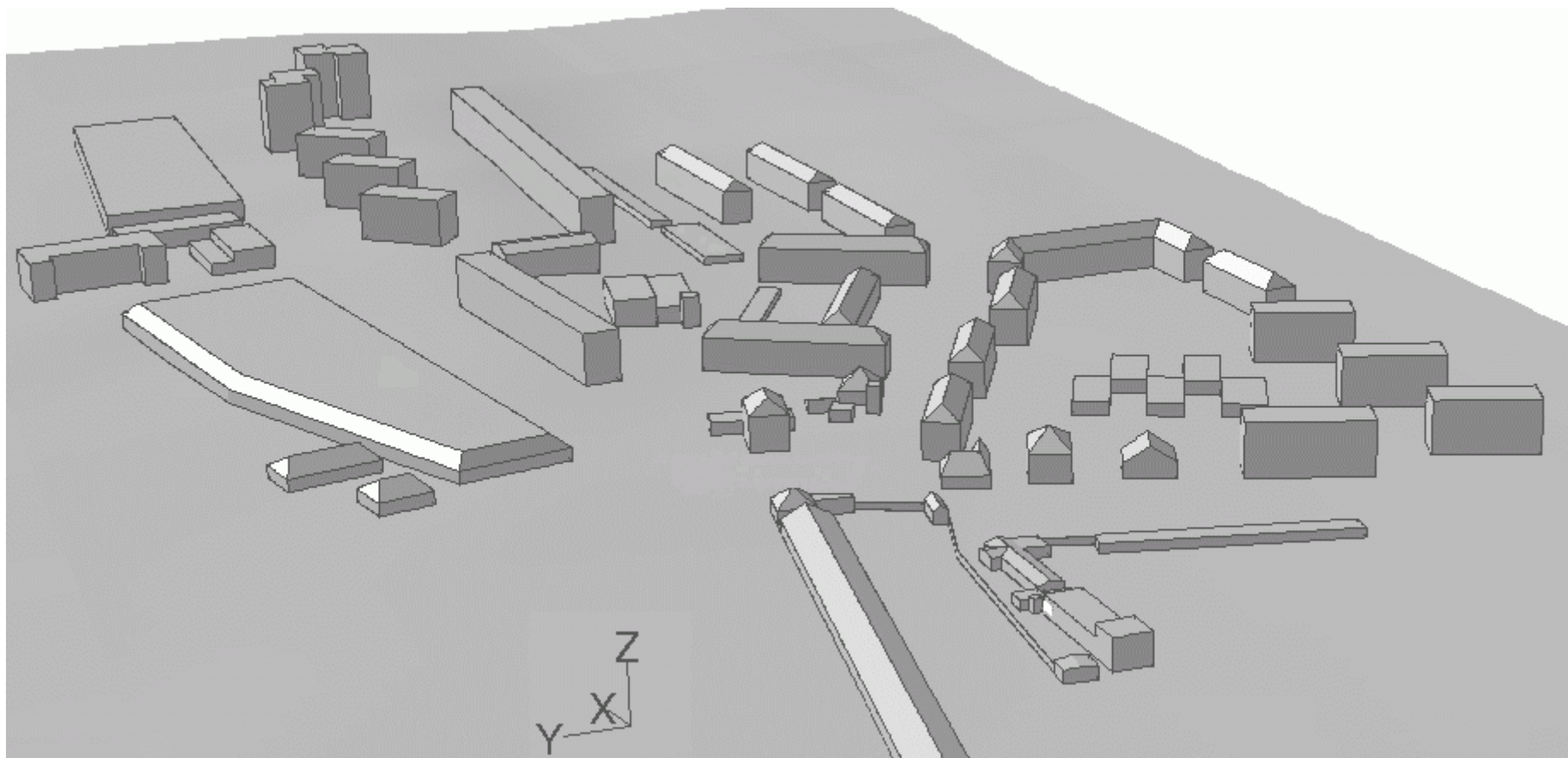


Hlohovec, SK

## Příkladová studie: šíření amoniaku

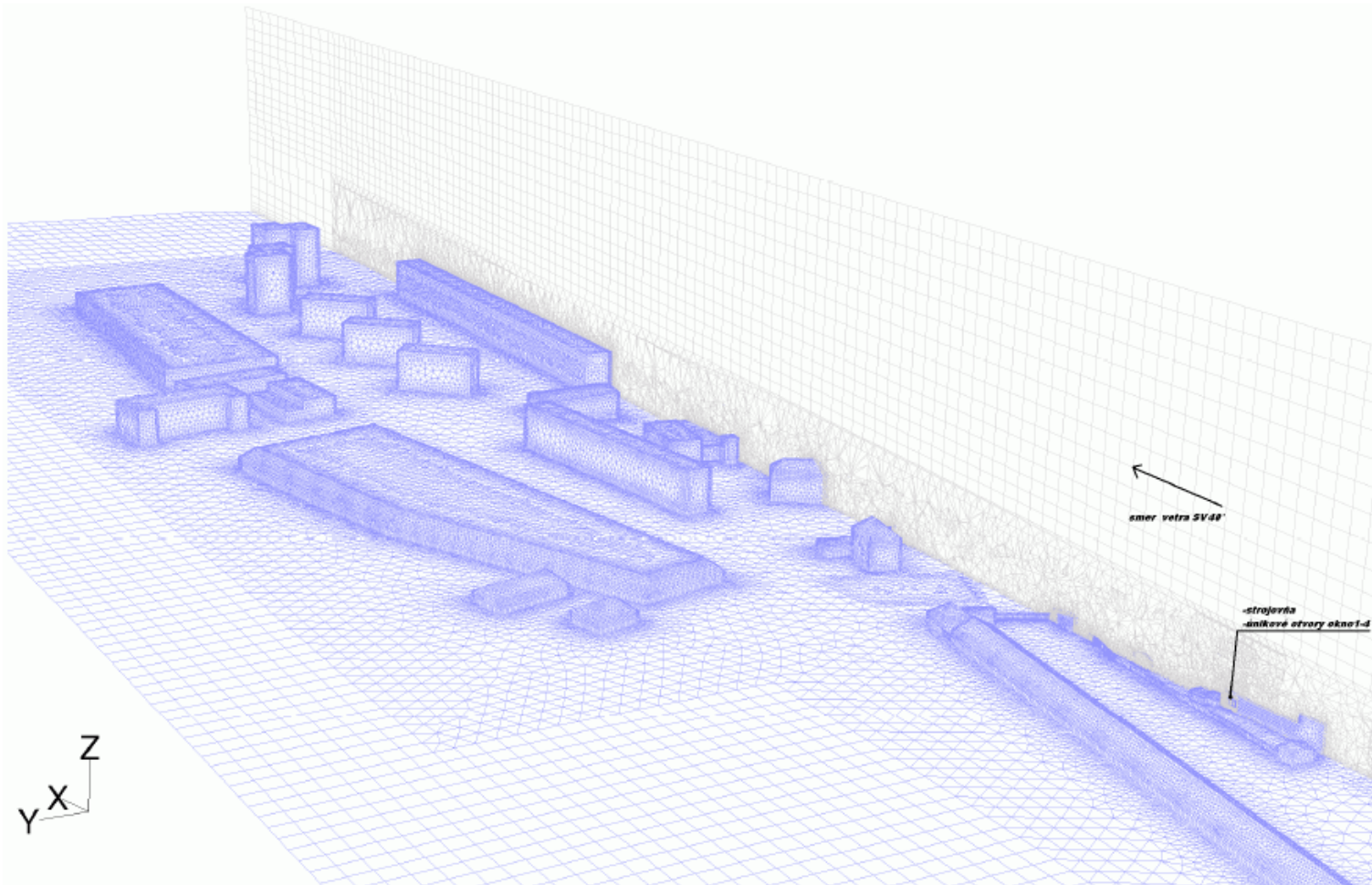
Geometrický model: 870x480x110 m

- návětrná rovinatá strana, volně rostoucí zeleň



## Příkladová studie: šíření amoniaku

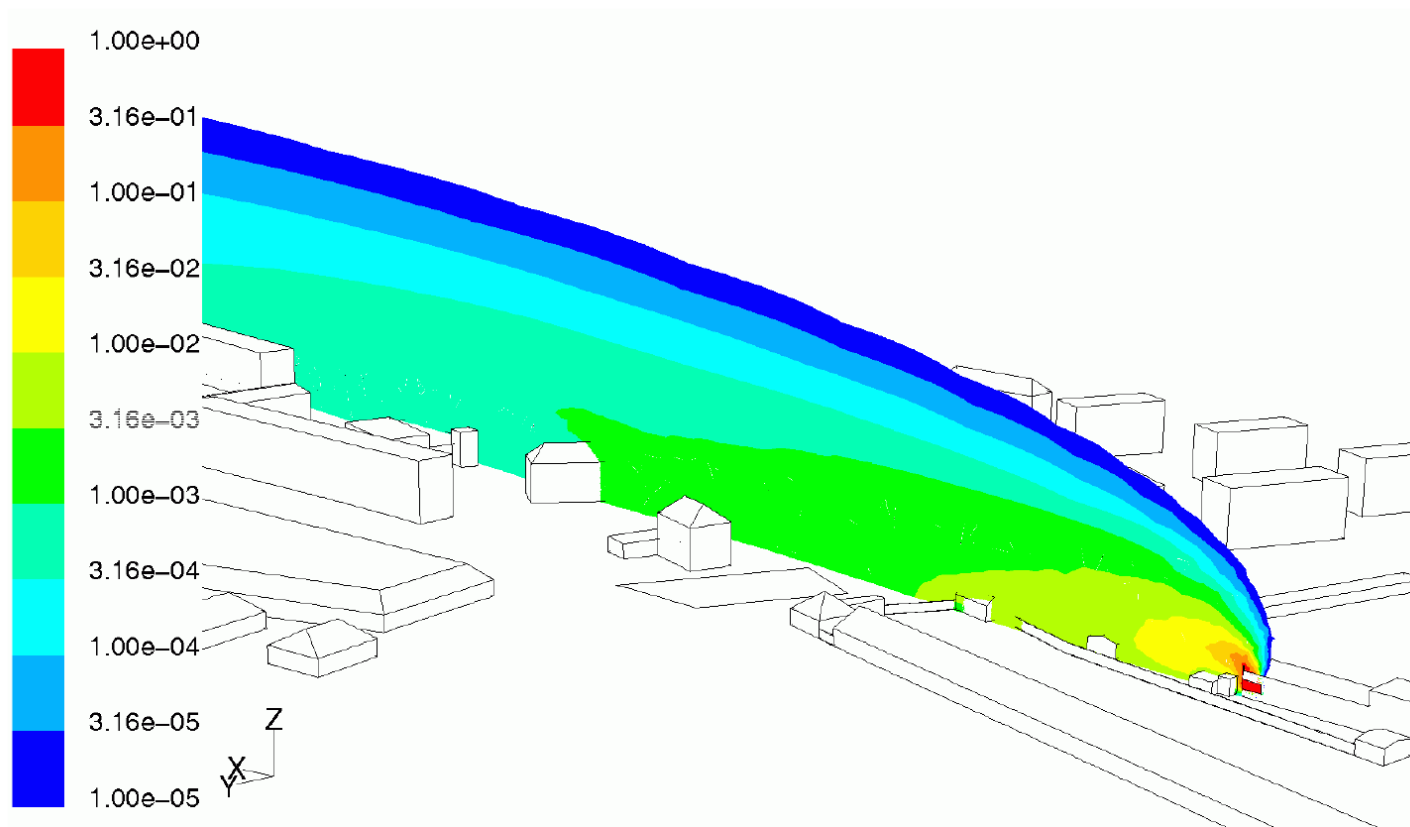
Ukázka výpočetní sítě





## Příkladová studie: šíření amoniaku

Výsledek: koncentrace amoniaku



## Příkladová studie: šíření amoniaku

Výsledek: oblasti zamoření ve výšce 1,6 m s průtokem  $\text{NH}_3$  2 kg/s

