

---

# AERODYNAMIKA PROFILŮ

---

*Jiří Škorpík, skorpik.jiri@email.cz*

<b>Obsah článku:</b>	Úvod	2.3
	Odpor profilu	2.3
	Vztlak profilu	2.4
	Průběh tlaku kolem profilu	2.5
	Průběh rychlosti kolem profilu	2.6
	Tření v mezní vrstvě a jeho dopady	2.6
	Výpočet sil působící na profil od proudu tekutiny	2.7
	Odkazy	2.8
	Přílohy	2.9

---

**Autor:** ŠKORPÍK, Jiří

**Datum vydání:** Červen 2022

**Název:** Aerodynamika profilů

**Název periodika:** Transformační technologie (on-line pokračující zdroj  
natransformacni-technologie.cz; turbomachinery.education;  
stirling-engine.education; fluid-dynamics.education)

**ISSN:** 1804-8293

Copyright©Jiří Škorpík, 2023

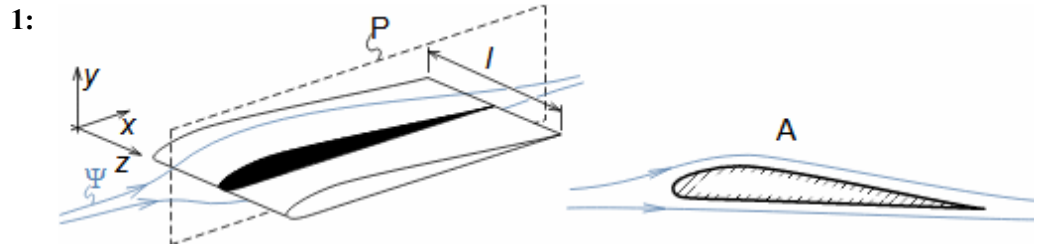
Všechna práva vyhrazena.

---

## Úvod

Aerodynamika  
Definice profilu

Aerodynamika vyšetřuje silové účinky proudění na obtékaná tělesa nebo kanál, ve kterém se nachází. Aerodynamika profilu je speciální oblast aerodynamiky, která zkoumá 2D obtékání těles, které mají proměnné rozměry pouze ve dvou směrech – jedná se o profilovanou desku, viz Obrázek 1. Profilem je nazýván řez tímto tělesem. Popis geometrie profilů a pravidel pro jejich kreslení je uveden například v článku *Tvary lopatek a průtočných částí lopatkových strojů* [Škorpík, 2023].



P-rovina řezu;  $\Psi$ -proudnice ve vyšetřované rovině; A-znázornění vyšetřovaného profilu.  $l$  [m] délka profilové desky;  $x, y, z$  [m] souřadnice.

Nestlačitelné proudění  
Rychlost zvuku  
Machovo číslo

Při nízkých rychlostech se plyn chová podobně jako kapalina, která je nestlačitelná, ale s rostoucí rychlostí se začíná projevovat vliv nízké *rychlosti zvuku*<sup>3</sup> v plynech, které jsou v kapalinách mnohem vyšší. Rychlost zvuku je totiž rychlostí šíření tlakových poruch v tekutině. Navíc při nadzvukových rychlostech proudění může docházet k jevům souvisejícím se skokovými změnami stavových veličin plynu, ke kterým při nižších rychlostech nedochází. Nicméně stlačitelnost plynu se na proudění významně projevuje až od rychlosti cca 0,3 Mach [Kadrnožka, 1991, s. 27]. Z toho důvodu je v tomto článku popsána teorie proudění nestlačitelného proudění a teorie stlačitelného proudění v článku *Machovo číslo a efekty při proudění vysokými rychlostmi*<sup>3</sup>.

## Odpor profilu

Definice odporu profilu

Při obtékání jakéhokoliv tělesa proudem tekutiny působí tato tekutina na těleso silou. Tato síla vzniká kvůli změně hybnosti tekutiny v důsledku vloženého tělesa, změny tlaku v okolí tělesa a tření tekutiny o plochu tělesa. Složka síla ve směru nátokové rychlosti (směr volného proudu před tělesem) se nazývá odpor.

Třecí odpor  
Tvarový odpor

Odpor vzniká třením tekutiny o jeho povrch a případně dalšími efekty, které způsobují tlakovou diferenci mezi protilehlými stranami profilu. Příspěvek od třecích sil se nazývá zkráceně třecí odpor, a od tlakových tlakový odpor nebo tvarový odpor, který vzniká vždy, protože tlakové difference  $\Delta p$  mezi

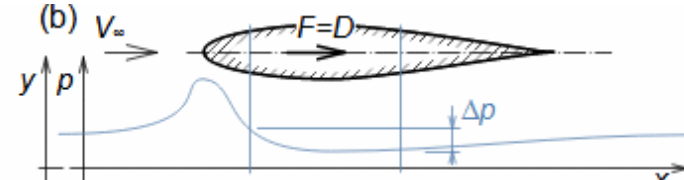
čelní a zadní plochou profilu vzniknou i při proudění bez tření. Výsledný odpor profilu je jen přibližně součtem obou dvou odporů, viz Rovnice 2(a), protože se vzájemně ovlivňují.

Na Obrázku 2(b) je příklad vzniku odporu při obtékání symetrického profilu. V tomto případě veškeré síly ve směru osy- $z$  mají nulovou výslednici, ve směru osy- $x$  nikoliv. Tlakový odpor v tomto směru vznikne tak, že na nátokové straně profilu je vyšší tlak než na odtokové.

2: (a) 
$$\vec{F}_p = -\oint_A p \cdot d\vec{S}$$
  

$$\vec{F}_F = -\oint_A d\vec{F}_F$$
  

$$\vec{F} = \vec{F}_p + \vec{F}_F$$

(b) 

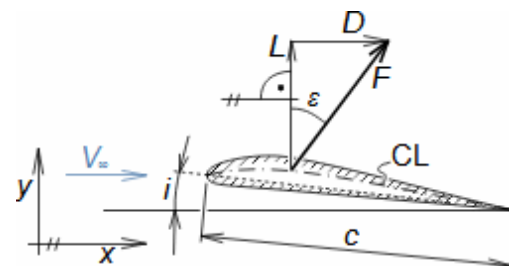
(a) rovnice síly působící na profil od proudu tekutiny; (b) příklad vzniku sil působící na profil od proudu tekutiny při obtékání symetrického profilu.  $V_\infty$  [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ] nátoková rychlost (rychlost před obtékaným profilem);  $p$  [Pa] statický tlak u profilu;  $S$  [ $\text{m}^2$ ] povrch profilové desky;  $F$  [N] síla (index  $p$  od tlaku, index  $F$  od tření);  $D=F_x$  [N] odpor;  $x$  [m] souřadnice ve směru proudění.

### Vztlak profilu

Definice vztlaku profilu

Nátokový úhel

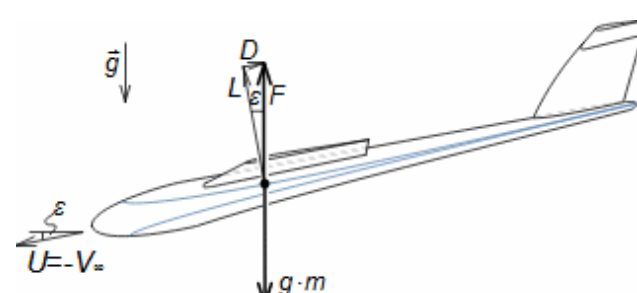
V případě, že nátoková rychlost nemá směr osy profilu nebo je profil nesymetrický, pak má výsledná síla  $F$  působící na profil dvě na sebe kolmé složky. Složka ve směru nátokové rychlosti se nazývá opět odporem a složka kolmá na směr proudění vztlakem, viz Obrázek 3.

3: 

CL-střední čára profilu (osa profilu) (ang. camber line);  $\varepsilon$  [°] klouzavý úhel;  $c$  [m] tělivo profilu;  $i$  [°] nátokový úhel;  $L=F_y$  [N] vztlak.

Klouzavý úhel

Úhel mezi vztlakem a odporem profilu nazýváme klouzavým úhlem. Název pochází z klouzavého letu letounu (ustálený bezmotorový let), kdy síla  $F$  působí proti směru gravitačního zrychlení a  $\varepsilon$  označuje sklon vztlaku vůči gravitačnímu zrychlení, viz Obrázek 4.

4: 

$U$  [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ] rychlost letounu;  
 $m$  [kg] hmotnost letounu;  
 $g$  [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ] gravitační zrychlení.

## Průběh tlaku kolem profilu

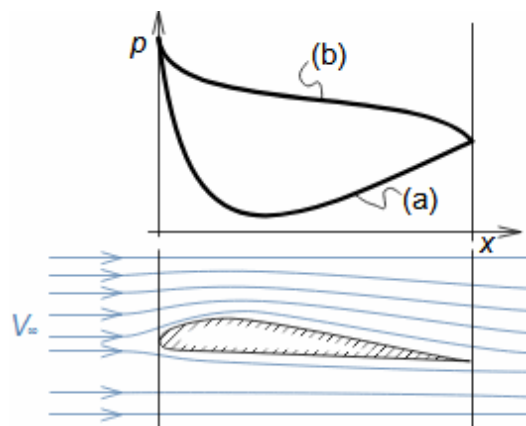
Přetlaková strana

Sací strana

Vztlak

Jestliže při obtékání profilu vznikne vztlak  $L$ , pak to znamená, že tlaková diference mezi dvěma body profilu, které leží proti sobě kolmo na směr nátokové rychlosti, je různá od nuly. Na Obrázku 5 je průběh tlaku kolem profilu, u kterého vzniká vztlak. Proto rozlišujeme přetlakovou stranu a sací stranu profilu, tedy stranu profilu v průměru s vyšším tlakem a stranu v průměru s nižším tlakem. Na sací straně profilu je nižší tlak, protože proudění na této straně má delší trajektorie v okolí profilu než na přetlakové straně profilu, proto musí mít na sací straně vyšší průměrnou rychlost (takový trend lze odvodit z Bernoulliho rovnice).

5:



V okolí profilu je nejvyšší tlak u nátokové hrany profilu, jejíž stěna je téměř kolmá na nátokovou rychlost a proto v těchto místech dojde k prudkému snížení hybnosti ve směru nátoku a tedy poklesu dynamického tlaku a nárůstu tlaku statického. (a) průběh tlaku na sací straně; (b) průběh tlaku na přetlakové straně.

Základní profil

Symetrický profil

Program Xfoil

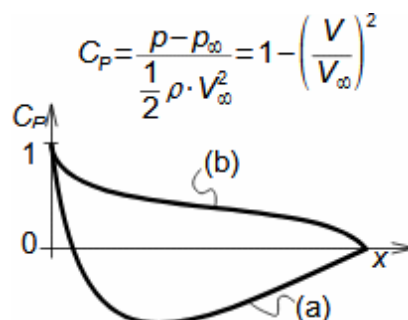
I symetrický neboli základní profil může vytvořit přetlakovou a sací stranu, pokud je vložen do proudu šikmo, respektive nátokový úhel je různý od nuly.

Změnu tlaku po profilu se měří pomocí otvorů v profilu. Konkrétní hodnoty tlakového součinitele z měření jsou uvedeny např. v [Kousal, 1980, s. 142]. Existují ale i velmi přesné numerické modely profilu, které dokaží měření nahradit, například software Xfoil.

Tlakový součinitel

Při proudění se tedy část kinetické energie tekutiny transformuje na tlakovou energii, takže velikost tlaku v okolí profilu se může maximálně zvýšit o hodnotu dynamického tlaku před profilem podle vzorce  $p_{\max} = p_{\infty} + 0,5 \cdot \rho \cdot V_{\infty}^2$ . Pro popis změn statického a dynamického profilu byla zavedena veličina tlakový součinitel (Vzorec 6). Tlakový součinitel profilu  $C_p$  popisuje jak

6:



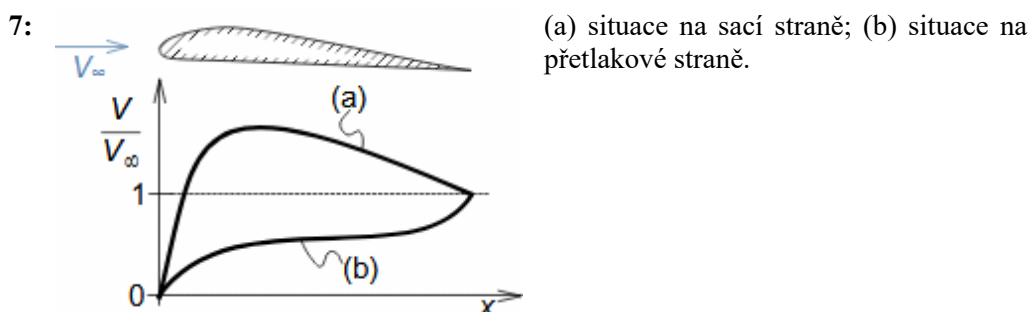
(a) průběh tlakového součinitele na sací straně; (b) průběh tlakového součinitele na přetlakové straně.  $C_p$  [1] tlakový součinitel profilu [Nožička, 1967, s. 27];  $\rho$  [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ] hustota;  $V$  [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ] rychlost ve vyšetřovaném místě v okolí profilu;  $p_{\infty}$  [Pa] tlak před profilem.

se mění statický tlak v okolí profilu na úkor dynamického před profilem. Tlakový součinitel profilu může dosahovat maximální hodnoty 1 a jestliže je záporný, pak to znamená, že ve vyšetřovaném bodě poklesl tlak pod tlak před profilem  $p_\infty$ , respektive rychlost proudění v tomto bodě je větší než nátoková rychlost (obrázek u Vzorce 6).

### Průběh rychlosti kolem profilu

Rychlostní sonda

Průběh rychlosti kolem profilu lze měřit přímo rychlostní sondou a nebo vypočítat z průběhu podílu rychlosti ve vyšetřovaném bodě  $V$  a nátokové rychlosti  $V_\infty$ , viz Obrázek 7, který lze stanovit z průběhu tlaků podle Rovnice 6.



### Tření v mezní vrstvě a jeho dopady

Mezní vrstva

Tření tekutiny o plochy profilové desky nevytváří pouze odpor, ale také tzv. *mezní vrstvu*<sup>7</sup>, ve které dochází ke ztrátě tlakové a kinetické energie tekutiny. Tato disipace energie má dva dopady na proud v okolí profilu:

Deviační úhel

Protože rychlosti na sací a přetlakové straně profilu jsou různé, je různá i jejich disipace energie a tedy hybnost na odtokové hraně, kde by se oba proudy slévají. To znamená, že směr proudění těsně za profilem nemusí mít směr daný tvarem profilu, respektive směrem střední čáry profilu, protože převáží směr proudu s vyšší hybností. Odklon tohoto směru od střední čáry profilu CL se nazývá deviační úhel, Obrázek 8.



Održení mezní vrstvy

V blízkosti odtokových hran, kde má proudění v mezní vrstvě nejnižší energii, může dojít k odtržení mezní vrstvy (kolaps mezní vrstvy v důsledku průniku okolní tekutiny do

mezní vrstvy) od profilu a tedy i ke změně sil působící na profil – dokonce i ke ztrátě potřebného vztlaku, viz Obrázek 9. K nějakému odtržení dojde téměř vždy. Velikost odtržení se zvětšuje s nakloněním profilu vůči směru nátokové rychlosti, respektive se zakřivením profilu. Samotný proces odtržení je často přetržitý (nestacionární), po odtržení se může mezní vrstva opět stabilizovat (sníží se tlak v oblasti odtokové hrany) a záhy odtrhnout.

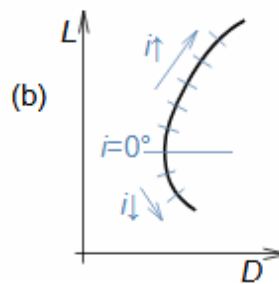
- 9:  Hlavní toky pracovní tekutiny při odtržení mezní vrstvy od profilu

### Výpočet sil působící na profil od proudu tekutiny

Odpor profilu  
Vztlak profilu  
Součinitel vztlaku  
Součinitel odporu  
Polára profilu  
Reynoldsovo číslo

Vztahy pro výpočet odporu a vztlaku profilu lze odvodit z definice tlakového součinitele, viz Vzorce 10. Odpor i vztlak profilové desky jsou přímo úměrné její velikosti, dynamického tlaku před deskou aerodynamickými součinitely zvanými součinitel odporu  $C_D$  a součinitel vztlaku  $C_L$ , které zohledňují tvar profilu desky, nátokový úhel a charakter proudění viz Vzorce 10. Pro použití těchto vzorců je nutné mít naměřeny hodnoty součinitele odporu a vztlaku vyšetřovaného profilu a to pro různé nátokové úhly  $i$  a *Reynoldsova čísla*<sup>7</sup>  $Re$ . Tato aerodynamická data se publikují ve formě tabulek nebo grafu.

- 10: (a)  $L = C_L \frac{1}{2} \rho \cdot V_\infty^2 \cdot c \cdot l$ ;  $D = C_D \frac{1}{2} \rho \cdot V_\infty^2 \cdot c \cdot l$  (a) vztahy pro výpočet odporu a vztlaku profilové desky; (b) graf závislosti  $L(D, i)$ , tzv. polára profilu.  $C_D$  [1] součinitel odporu;  $C_L$  [1] součinitel vztlaku. Odvození vzorců pro odpor a vztlak profilu je v Příloze 1.



Aerodynamická data

V současné době již existují rozsáhlé katalogy naměřených aerodynamických dat pro různé tvary profilu nebo projektilů, začít lze třeba zde: [Abbott, 1959], [Hošek, 1949, s. 390], [Kneubuehl, 2004, s. 76]. Existují i neveřejné, soukromé katalogy firem. U profilů se zároveň měří i další aerodynamické charakteristiky (např. profilový moment [Hošek, 1949, s. 278], [Abbott, 1959, s. 4], který je důležitý pro návrh polohy těžiště letounu a pro pevnostní výpočet délky křídla/lopatky lopatkových strojů na krut).

### Odkazy

---

- ŠKORPÍK, Jiří, 2021, Machovo číslo a efekty při proudění vysokými rychlostmi, *Transformační technologie*, Brno, [on-line], ISSN 1804-8293.
- ŠKORPÍK, Jiří, 2022, Tvary lopatek a průtočných částí lopatkových strojů, *Transformační technologie*, Brno, [on-line], ISSN 1804-8293. Dostupné z <https://turbomachinery.education/tvary-lopatek-a-prutocnych-casti-lopatkovych-stroju.html>.
- ABBOTT, Ira, DOENHOFF, Albert, 1959, *Theory of wing sections, including a summary of airfoil data*, Dover publications, inc., New York, ISBN-10:0-486-60586-8.
- FLEISCHNER, Petr, 1990, *Hydromechanika*, Vysoké učení technické v Brně, Brno, ISBN 80-214-0226-1.
- HOŠEK, Josef, 1949, *Aerodynamika vysokých rychlostí*, Naše vojsko, Praha.
- KADRNOŽKA, Jaroslav, 1991, *Teorie lopatkových strojů*, Vysoké učení technické, Brno, ISBN 80-214-0275-X.
- KNEUBUEHL, Beat, 2004, *Balistika střely, přesnost střelby, účinek*, Naše vojsko, Praha, ISBN 80-206-0749-8.
- KOUSAL, Milan, 1980, *Spalovací turbíny*, Nakladatelství technické literatury n. p., Praha.
- NOŽIČKA, Jiří, 1967, *Analogové metody v proudění*, Academia, Praha.
-