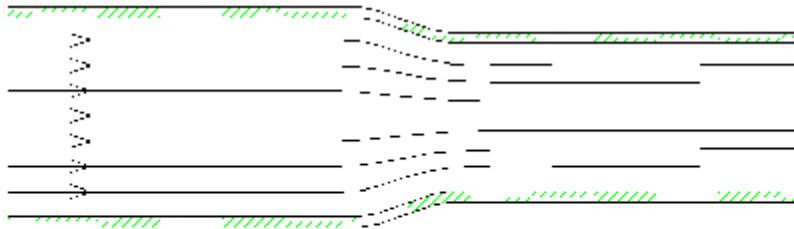


Vznik vztlaku a Aerodynamika rotoru větrné elektrárny

Ing. Jiří Špičák
ČSVE

Vznik vztlaku

Abychom si mohli vysvětlit vznik vztlakové síly, musíme si připomenout fyzikální podstatu proudění.



$$v_1 < v_2$$

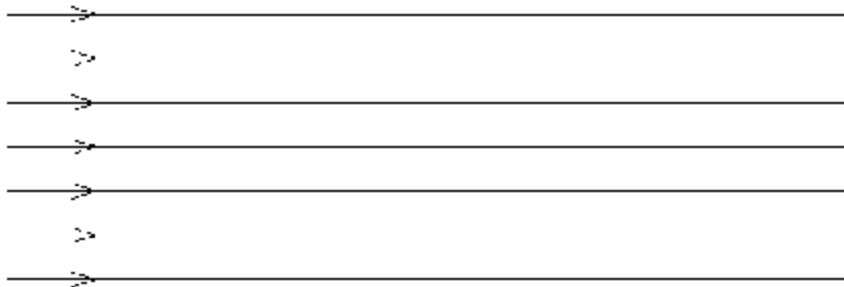
$$p_1 > p_2$$

Proudění v zúžené trubici. V zúžení roste rychlost proudění a snižuje se tlak.

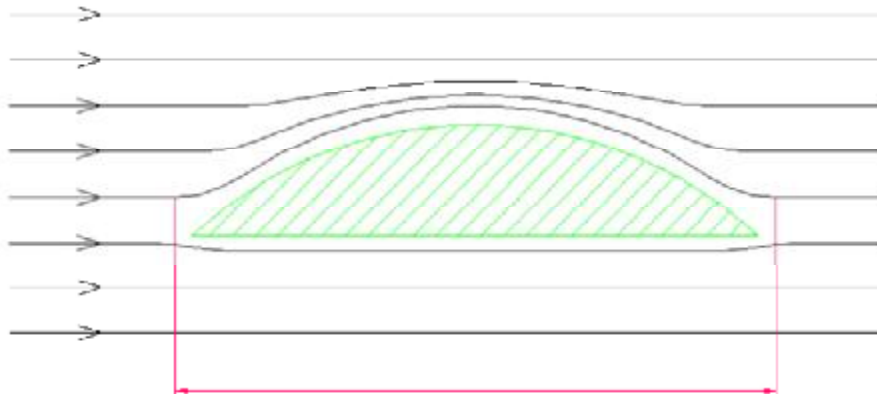
Mějme trubici se zúžením, ve které proudí plyn. K jakým změnám dochází v zúžení? V užším místě trubice je větší rychlost proudění a menší tlak, než v širším místě trubice. Neboli: kde je větší rychlost proudění, tam je nižší tlak. Tuto větu si zapamatujeme, ještě se k ní vrátíme.

Na tomto principu například pracuje fixírka. U aerodynamického profilu to funguje následovně:

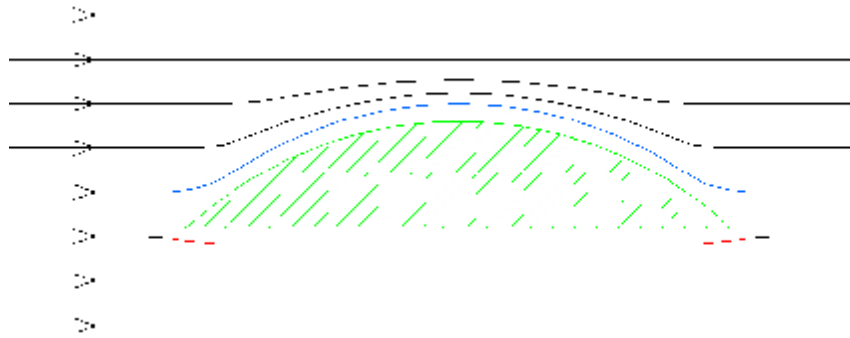
Mějme nerozrušený proud vzduchu. Zde znázorněno proudnicemi.



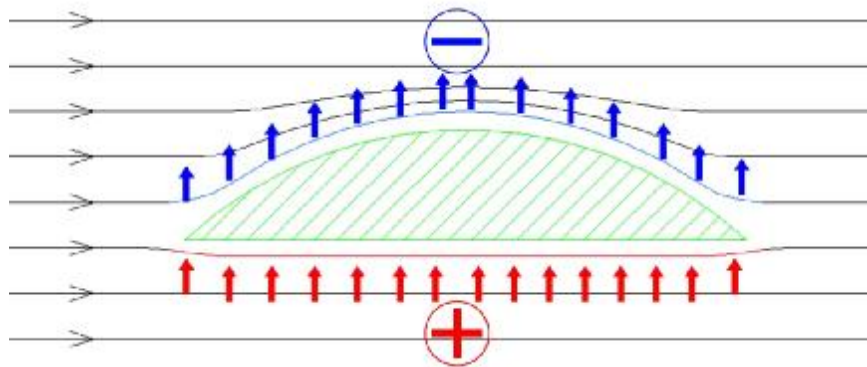
Umístíme do proudu vzduchu těleso např. ve tvaru kruhové výseče. A zkoumejme na ohraničeném úseku (zde ohraničeno červenou kótou), proudění v okolí tělesa.



Pro lepší orientaci barevně označme horní a spodní proudnici přiléhající k tělesu.

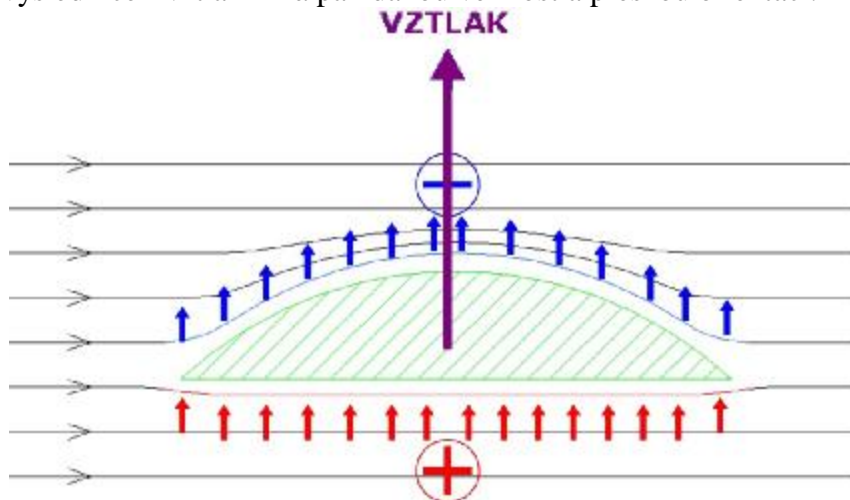


Porovnejme nyní červenou a modrou proudnici. Červená proudnice je kratší, než modrá. Proud vzduchu se ve stejný okamžik před tělesem rozděluje a za stejný časový úsek se za tělesem spojuje. Při rozdílné délce proudnice je tedy potom nasnadě, že rychlost v proudění nad profilem (modrá proudnice), musí být větší, než u červené proudnice pod profilem. U prvního obrázku jsme si ale řekli, že kde je vyšší rychlost proudění, tak tam je i nižší tlak. Z toho důvodu se nám tedy vytváří pod a nad tělesem oblasti s rozdílným tlakem. Nad profilem vzniká podtlak, pod profilem pak přetlak.



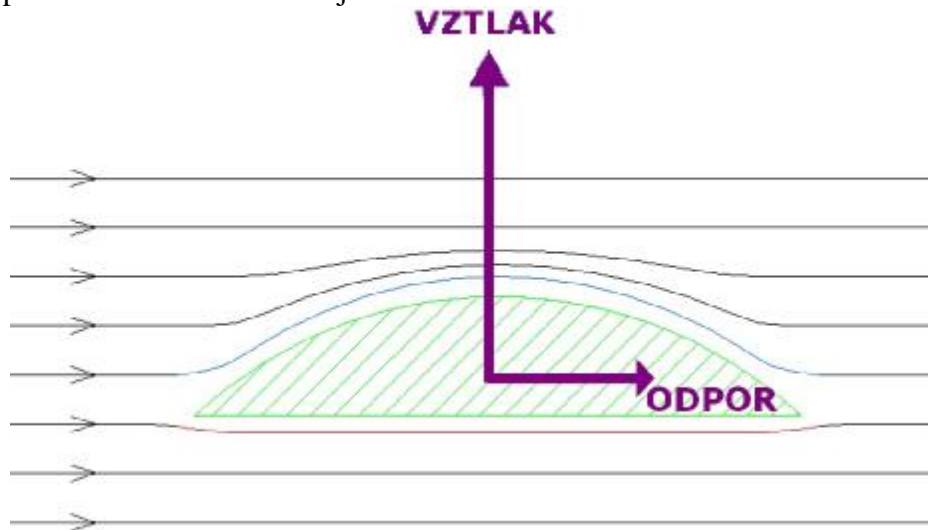
Nad profilem vzniká podtlak, pod profilem pak přetlak. Na obrázku je také znázorněna orientace tlakových polí.

Výslednicí těchto dvou tlakových polí je pak jedna síla, která se nazývá vztlak. Silová výslednice - vztlak - má pak danou velikost a přesnou orientaci.



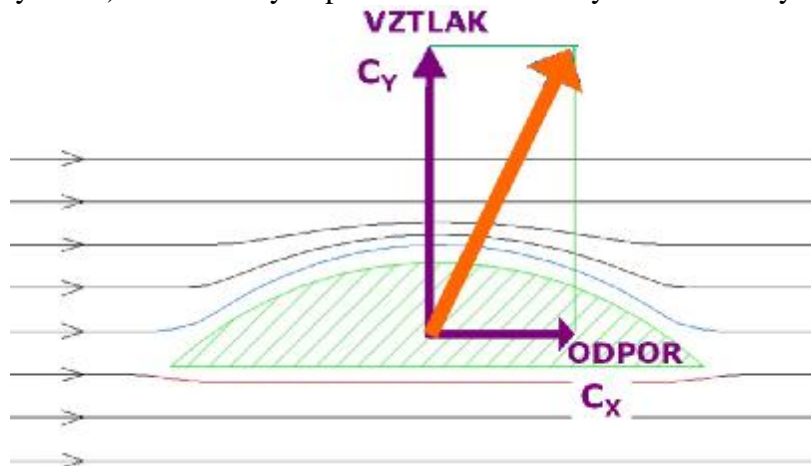
Výslednicí těchto dvou tlakových polí je pak jedna síla, která se nazývá vztlak.

Samozřejmě, že na profilu, který je umístěn v proudu vzduchu, vzniká i odporová síla, ale poměrově vůči vztlaku se jedná o menší sílu.



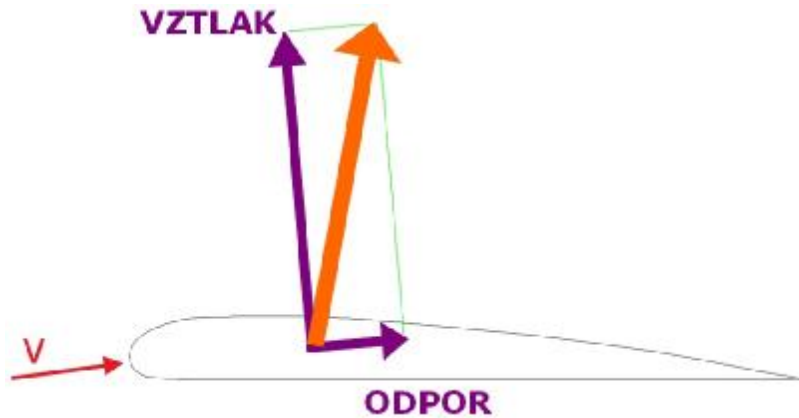
Na profilu, který je umístěn v proudu vzduchu vzniká i odporová síla.

Výslednicí těchto dvou sil je pak jedna, která se nazývá výslednice sil (zde značena oranžově) na profilu. V praxi se pro označení vztlaku a odporu užívá označení x a y (dle souřadného systému). Koeficienty odporu a vztlaku se tedy značí C_x a C_y .

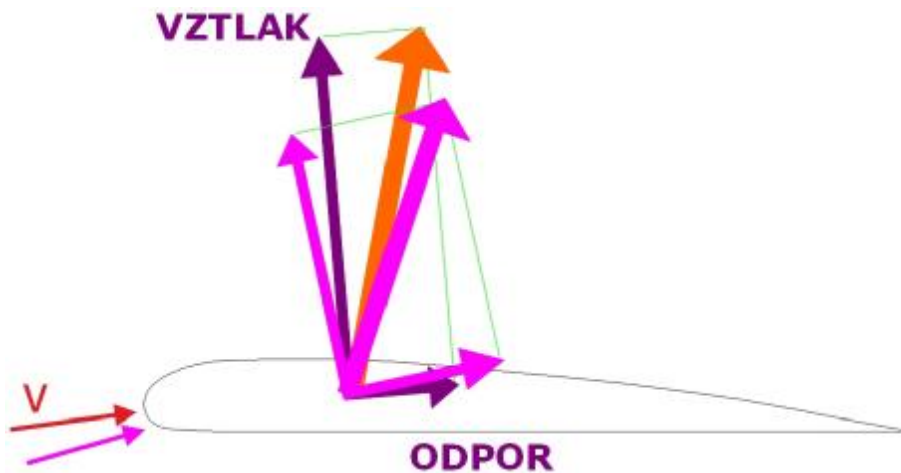


Výslednicí vztlakové a odporové síly je výslednice sil na profilu.

Skutečný aerodynamický profil listu může mít třeba tvar jako na obrázku. Vztlaková síla, která vzniká na profilu, je vždy kolmá k nabíhajícímu proudu vzduchu. Aerodynamický profil je citlivý na to, pod jakým úhlem je ofukován. Se změnou úhlu nabíhajícího proudu vzduchu se mění i velikost vztlaku a odporu. Vztlaková síla dosáhne svého maxima pouze tehdy, když je profil ofukován pod jedním konkrétním úhlem náběhu. Každý profil má tento úhel jiný.



Vztlak je vždy kolmý na nabíhající proud vzduchu. Vztlaková síla dosáhne svého maxima pouze pokud je profil ofukován pod jedním určitým úhlem. Pak dosahuje maxima i výsledná síla vznikající na profilu.



Pokud se jen trochu změní úhel nabíhajícího proudu vzduchu (světle fialová), mění se směr působení vztlaku (vztlak je vždy kolmý na nabíhající proud vzduchu), jeho velikost a také směr a velikost odporu. Výsledná síla má pak při stejném působišti jiný směr a velikost. Nyní jste se dozvěděli o vzniku vztlakové síly za pomoci termínů, které jsou srozumitelné pro širokou veřejnost. Je to ale vyjádření, které je zjednodušené. Při hlubším zkoumání takto podaná teorie vztlaku dostává své trhliny. Např. u souměrných profilů (horní i spodní strana profilu jsou zrcadlově stejné, tedy jsou stejně dlouhé) by rychlost po obou stranách byla stejná a tak by tedy nemohl vzniknout rozdíl tlaků a tedy i vztlak. Ale přesto vzniká.

Odpověď na tyto otázky se skrývá ve vírové teorii křídla založené na cirkulaci kolem něho. Základy této teorii dali p. Navier a p. Stokes, kteří popsali proudění skutečných tekutin. Pánové tuto teorii vytvořili již v 19. století. Zahrnuli do svých teorií vazkost tekutin, která má významný vliv na vznik a průběh proudu kolem pevných těles, tedy i listů rotoru. Teorie byla ale tak složitá, že se v praxi začala používat až od 60. let 20. století.

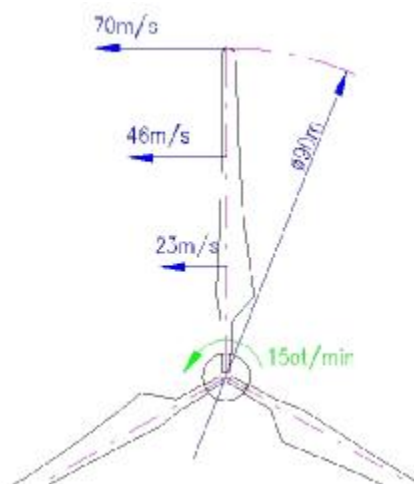
Ale letectví a profily křídel se mezitím vyvíjely i bez této teorie, většinou na základě experimentálních pokusů a měření. A tak si již na počátku 20. století začali odborníci všimnout vírů, tvořících se v okolí obtékaných těles. Nakonec tyto experimenty vyústily až ve vírovou teorii křídla konečného rozpětí, jež je v podstatě používána stále. Byl to Němec Kutta a Rus Žukovskij, kteří pomocí „skládanky“ vírů, nalézajících se kolem pohybujícího se křídla, stvořili tuto metodu, umožňující stanovit velikost jeho vztlaku. Pak nastoupili další, kteří ji zdokonalili, např. Prandtl atd.

Ale to jsou již složité teorie, které není reálné zde popsat a ani to není cílem. Kdo chce hlouběji proniknout do Žukovského věty o vztlaku (vztlak je úměrný cirkulaci), Kuta-Žukovského transformace či Navier-Stokesovských rovnic proudění, musí zapátrat ve vysokoškolské literatuře oborů aerodynamika či hydromechanika.

Aerodynamika rotoru větrné elektrárny

V následujícím textu budeme aerodynamiku rotoru větrné elektrárny přibližovat na skutečném rotoru. Jedná se o rotor větrné elektrárny Vestas V90 o výkonu 2MW. Průměr rotoru je 90m a pracovní otáčky 15 ot/min, při rychlosti větru 13m/s.

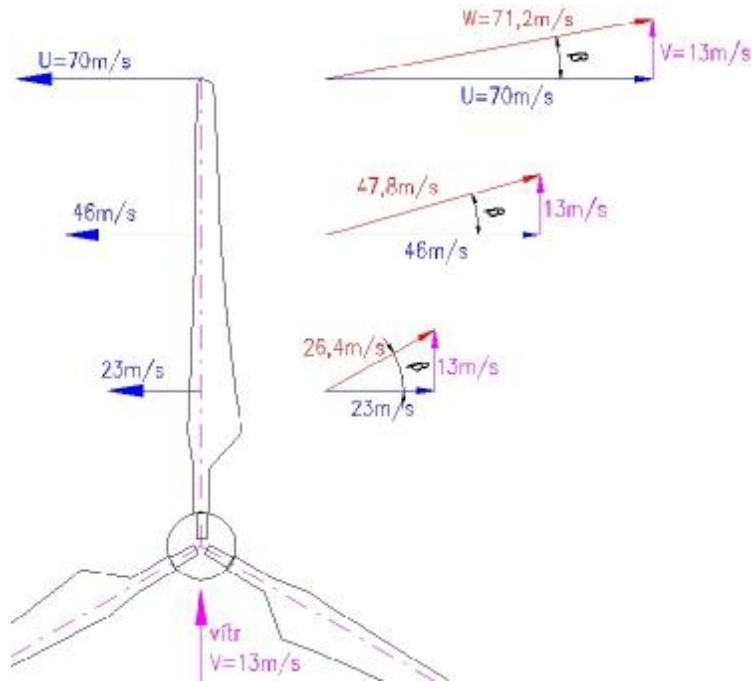
Na obrázku jsou zobrazeny rychlosti pohybu rotorového listu – obvodové rychlosti v její 1/3 délky, 2/3 délky a na konci listu.



Obvodové rychlosti, které jsou v 1/3, 2/3 a na konci listu, při pracovních otáčkách 15ot/min

Z předchozího obrázku nám vyplývá, že po délce rotorového listu se nám mění obvodová rychlost. Nás ale zajímá rychlost a směr, pod kterým proud vzduchu nabíhá na rotorový list.

Nabíhající rychlost vzduchu se nám vektorově skládá z rychlosti pohybu rotorového listu U (rychlost se mění po délce listu) a rychlosti větru V (konstantní pro celou délku listu). Viz. následující obrázek.



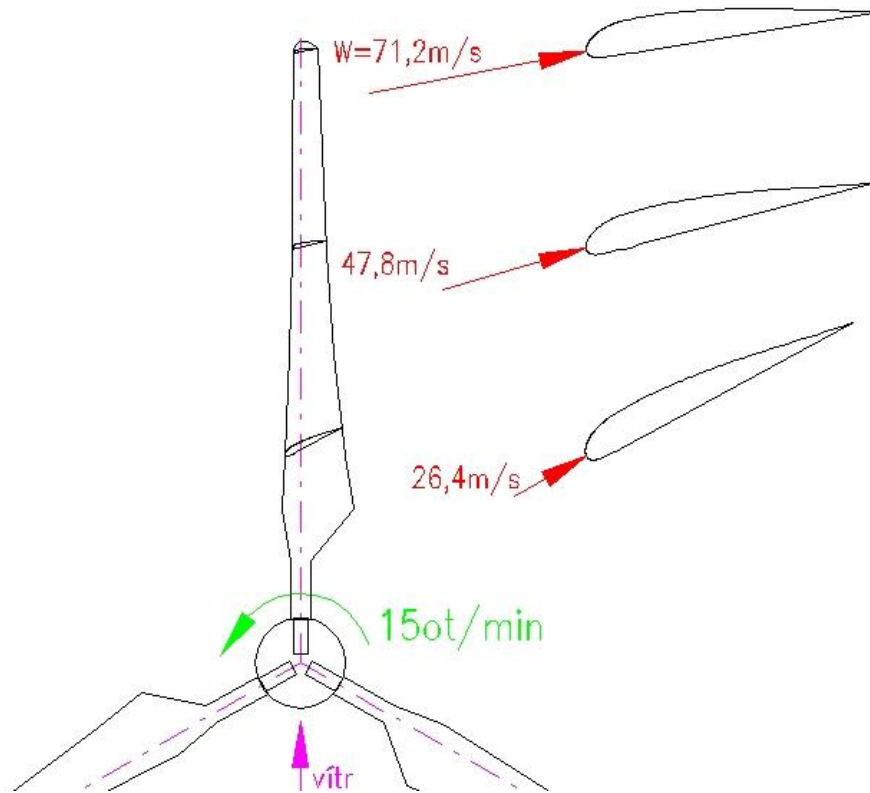
Výsledná rychlost nabíhajícího proudu vzduchu na list větrné elektrárny se nám vektorově skládá

Vektorovým součtem výše uvedených rychlostí získáme výslednou rychlost nabíhajícího proudu vzduchu na rotorový list W pro konkrétní vzdálenost od středu rotoru. Po délce listu se nám mění jak velikost výsledné rychlosti obtékání W , tak úhel β (úhel nabíhajícího proudu vzduchu na rotorový list k rovině rotoru).

Vysvětlivky k rychlosti pohybu rotoru „ U “. Obrázek výše, rotor se otáčí doleva, proto je rychlost pohybu listu značena šipkou směřující doleva. Pokud ale řešíme obtékání rotorového listu, tak list je brán jako stacionární a rychlost proudění vzniklou od pohybu listu značíme šipkou s opačnou orientací.

Jak bylo uvedeno v předchozí kapitole, aerodynamický profil dosahuje svých max hodnot vztlaku pouze pod jediným úhlem náběhu proudícího vzduchu.

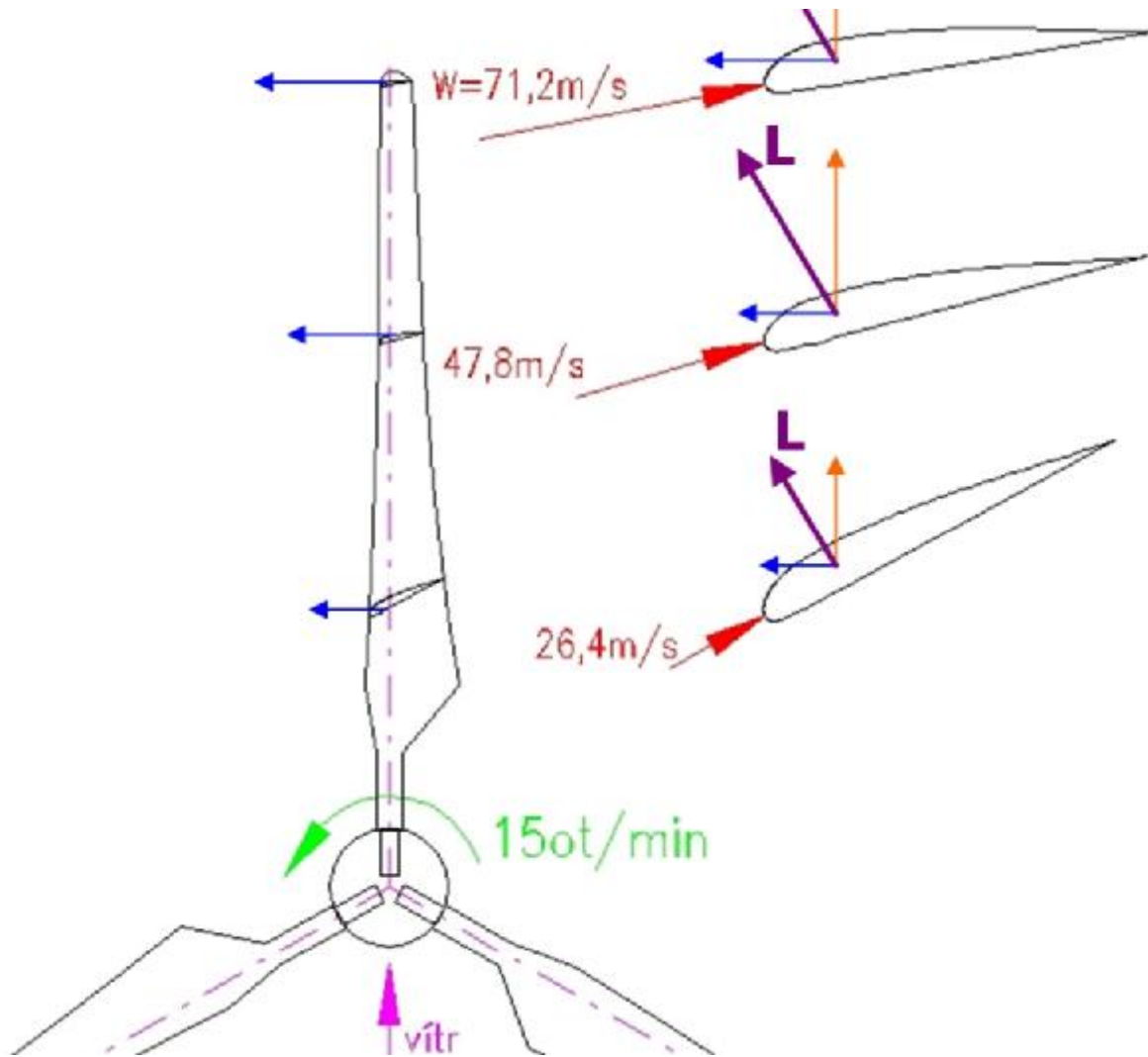
Jak jsme si odvodili v předchozím obrázku, směr nabíhajícího proudu vzduchu se nám po délce listu mění. Pokud ale chceme, aby aerodynamický profil pracoval po celé délce listu nejefektivněji, musíme tento profil natočit tak, aby byl stále optimálně ofukován. Viz. následující obrázek.



Optimální natočení aerodynamického profilu vůči nabíhajícímu proudu vzduchu po délce rotorového listu

Jak jsme si již vysvětlili v kapitole o vzlaku, výslednice vzlaku je vždy kolmá na nabíhající proud vzduchu. Na následujícím obrázku si pro jednoduchost ukážeme jak je to ze vzlakem u aerodynamického profilu ve 3 místech po délce rotorového listu.

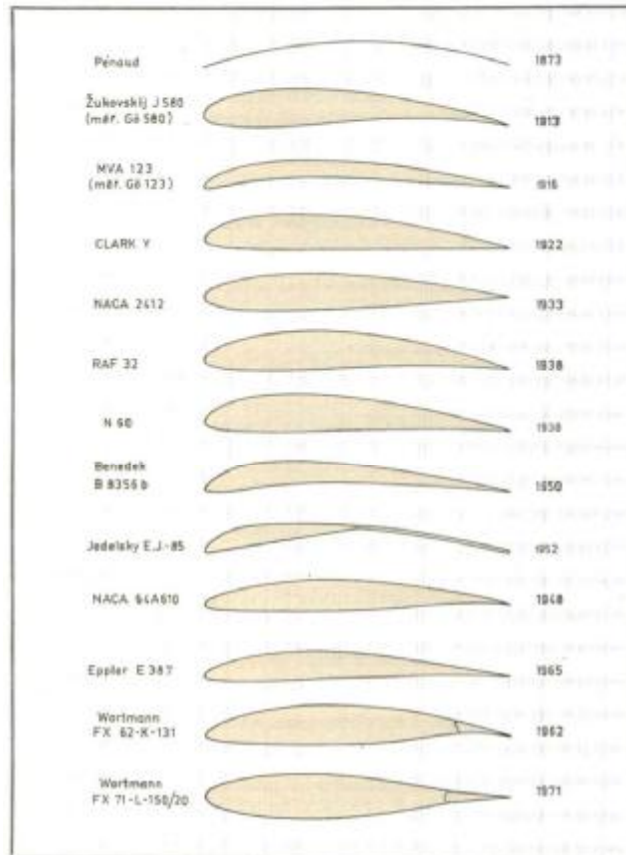
Již jsme si odvodili velikost a směr proudu vzduchu v daném řezu. Dle směru tohoto proudu jsme vhodně orientovali aerodynamický profil listu v daném řezu. Při ofukování tohoto profilu vzniká vzlak, kolmý na nabíhající proud vzduchu (fialová šipka, značeno L). Tento vzlak si ještě vektorově rozložíme do osy x a osy y. Složka vzlaku v ose x (značeno modře) je složka vzlaku, která nám otáčí rotorem (pro názornost modré šípky, x-ové složky vzlaku značeny i v rotoru).



Vznik vzlaku na profilu rotorového listu

Vlastní aerodynamický profil rotorového listu je vždy velmi utajovanou věcí každého výrobce větrných elektráren. Aerodynamická profiláž listů totiž významně ovlivňuje výkon větrné elektrárny a také hlukové emise, které větrná elektrárna vydává. Zde tedy pouze mohou ukázat obrázek s aerodynamickými profily, jak se vyvíjeli v průběhu času.

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



STRUČNÝ PŘEHLED VÝVOJE PROFILŮ DO ROKU 1971