

ULL 1 Aerodynamika a mechanika letu

Leoš Liška, Jan Kánský
www.budupilotem.cz

Požadovaný rozsah znalostí

- 1) Vznik aerodynamických sil při obtékání těles.
- 2) Proudění laminární a turbulentní.
- 3) Rovnice kontinuity, Bernouliho rovnice, statický, dynamický a celkový tlak.
- 4) Které přístroje fungují na základě Bernouliho rovnice.
- 5) Vznik vztlaku na profilu, kritický úhel náběhu a odtržení proudnic na křídle.
- 6) Nakreslete rozložení tlaků na profilu křídla za normálního letu.
- 7) Celkový odpor a jeho složky: tvarový, indukovaný, interferenční, třecí a škodlivý.
- 8) Čím je překonáván odpor u motorového a bezmotorového letadla.
- 9) Jaký podíl má podtlak nad křídlem a přetlak pod křídlem na celkovém vztlaku.
- 10) Co je mezní vrstva.
- 11) Druhy profilů, jejich vlastnosti a použití v konstrukci letadel.
- 12) Prostředky ke zvýšení vztlaku na křídle.
- 13) Charakteristický tvar křivky závislosti součinitele vztlaku a odporu na úhlu náběhu.
- 14) Aerodynamický tunel, schéma, význam, způsoby měření hodnot.
- 15) Polára profilu, křídla a letounu.

Požadovaný rozsah znalostí

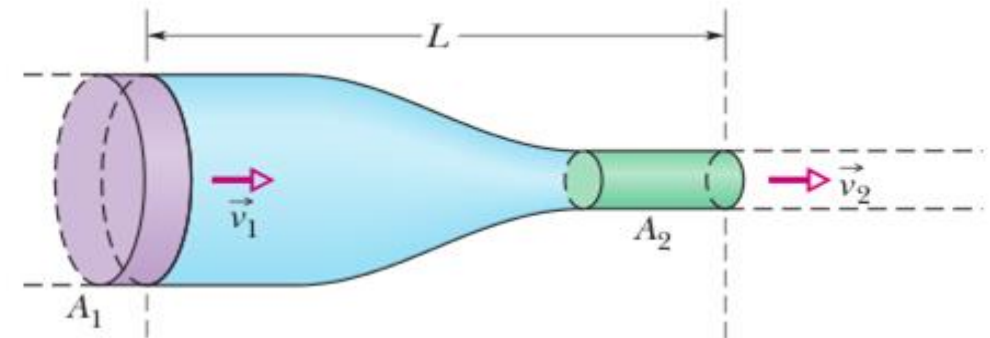
- 16) Rychlostní polára kluzáku.
- 17) Aerodynamické a geometrické zkroucení křídla, odtržení proudu na křídle.
- 18) Stabilita statická a dynamická, podélná a stranová.
- 19) Geometrické charakteristiky křídla, půdorysný tvar, vlastnosti.
- 20) Těžiště letounu, těžištní zásoba, vliv centraže na letové vlastnosti.
- 21) Řízení letounu, druhy kormidel, funkce, výhody a nevýhody.
- 22) Rovnováha sil v ustáleném vodorovném motorovém letu, ve stoupání a v klouzavém letu.
- 23) Aerodynamika vrtule–režimy, otáčky, rychlost letu, stoupání, počet listů, průměr, účinnost.
- 24) Rozdíl mezi prací pevné a stavitelné vrtule, reakční a gyroskopický moment vrtule.
- 25) Jednotlivé fáze vzletu a přistání.
- 26) Vliv vzletové hmotnosti, nadmořské výšky, teploty, směru větru na výkony letounu a potřebnou délku VPD.
- 27) Rovnováha sil v ustálené horizontální zatáčce.
- 28) Skluzová a výkluzová zatáčka.
- 29) Násobek zatížení, letové obálky, provozní a početní zatížení, součinitel bezpečnosti.
- 30) Technika pilotáže v jednotlivých režimech letu, zábrana pádu, max. rychlost, skluz, vývrтка, spirála.

Základní fyzikální zákony

- ▶ Rovnice spojitosti toku
- ▶ Bernouliho rovnice
- ▶ Mezní vrstva
- ▶ Laminární a turbulentní proudění

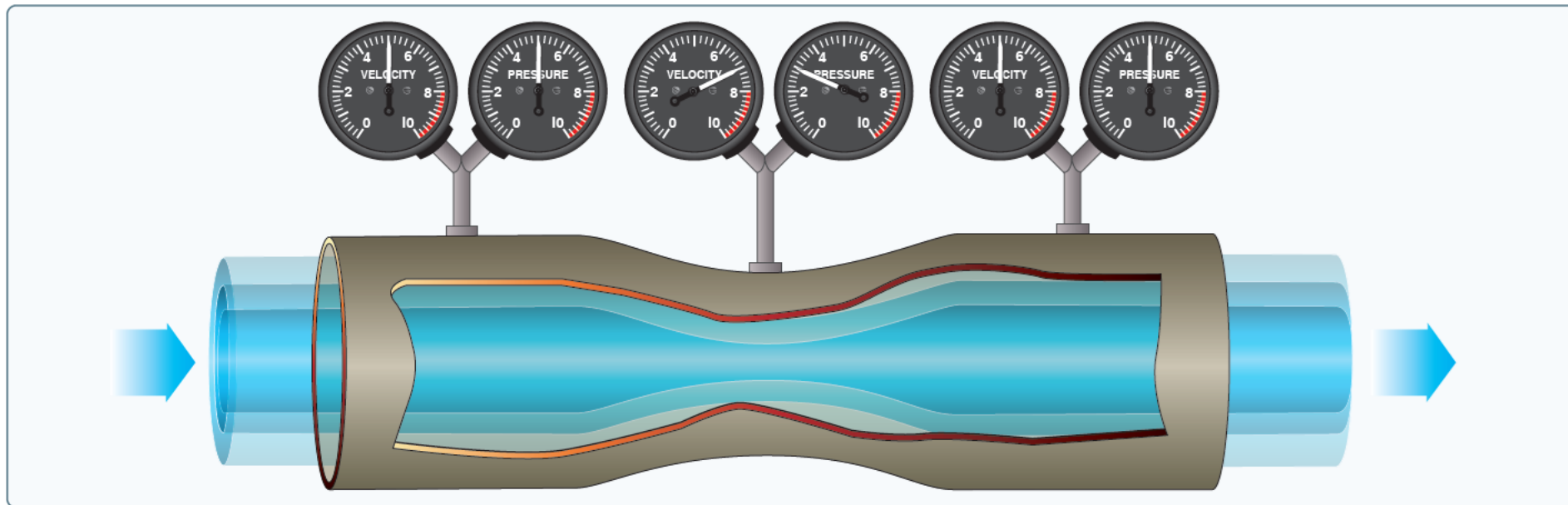
Rovnice spojitosti toku

- ▶ Řeší vztah průměru a rychlosti
- ▶ $A_1 \times V_1 = A_2 \times V_2$
 - A_1 průřez na vstupu
 - A_2 průřez na výstupu
 - V_1 rychlost na vstupu
 - V_2 rychlost na výstupu
- ▶ Když se zužuje průřez, zvyšuje se rychlost

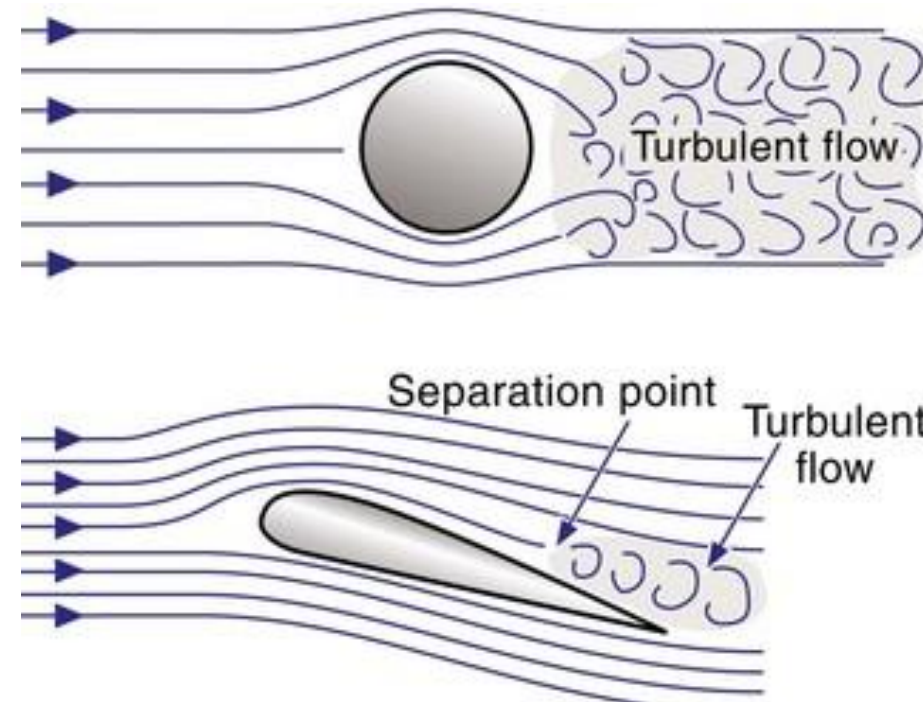
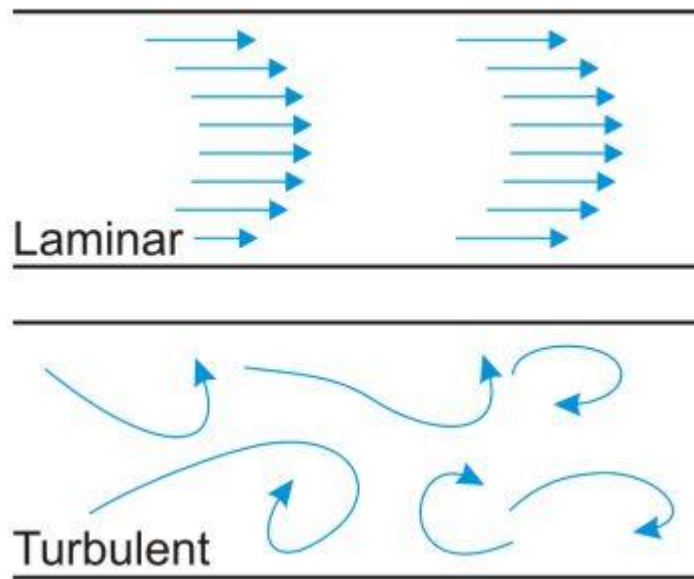


Bernouliho rovnice

- ▶ Řeší tlakové poměry v proudícím vzduchu
- ▶ Součet dynamického a statického tlaku je konstantní
- ▶ S rostoucí rychlostí roste dynamický tlak a klesá statický tlak

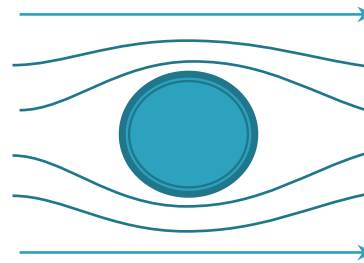
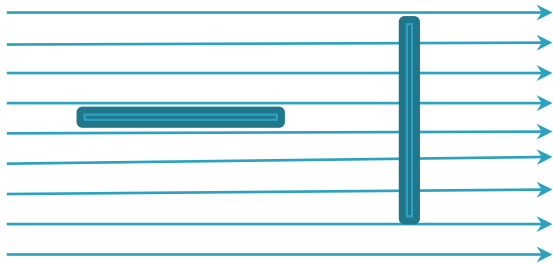


Laminární a turbulentní proudění

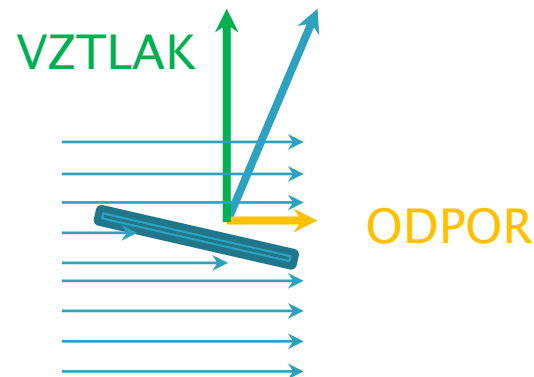
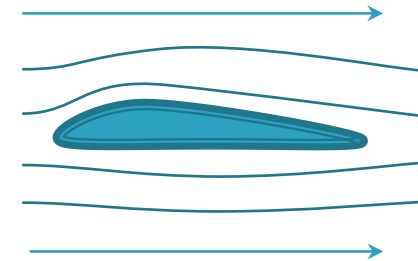


Aerodynamické síly

- ▶ Vztlak a odpor
- ▶ Snaha mít co nejmenší odpor a co největší vztlak



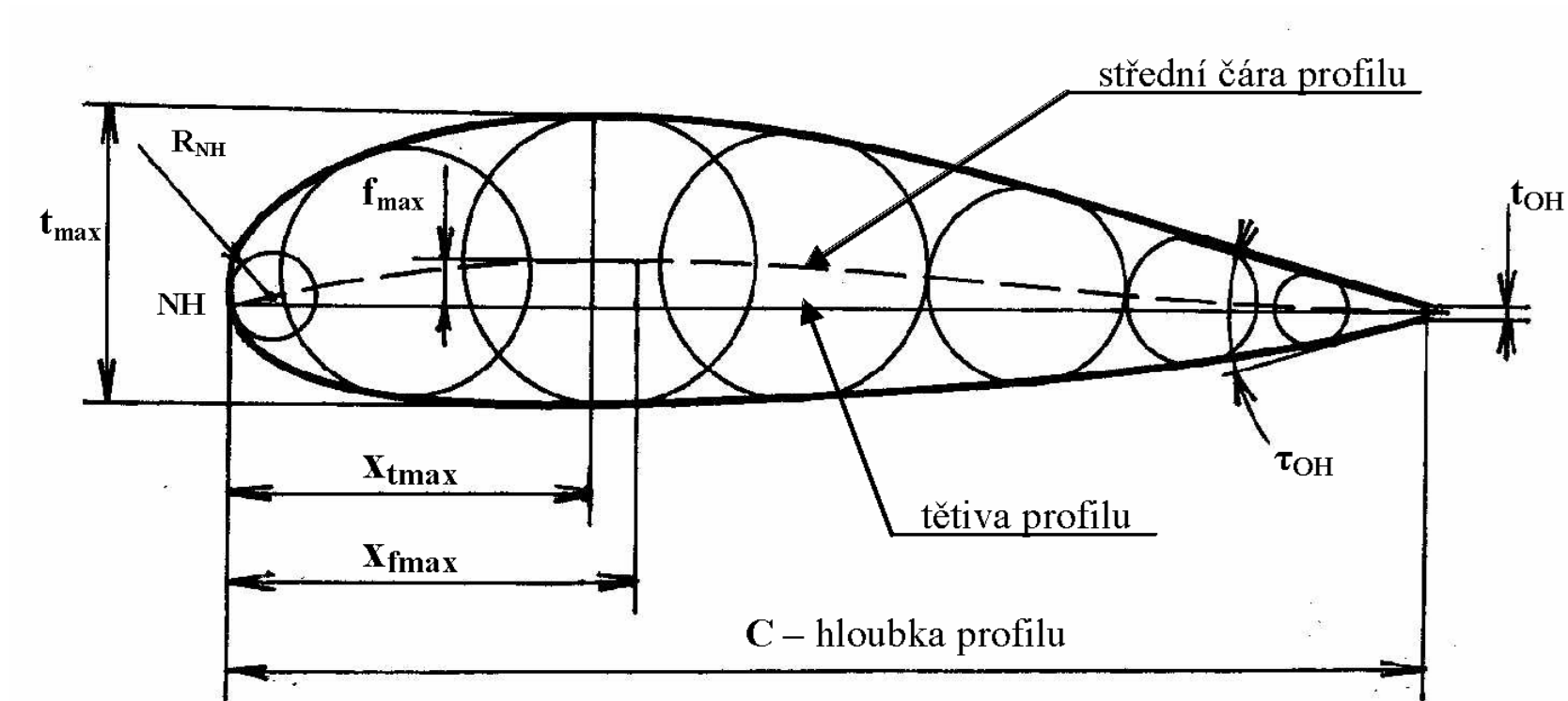
CELKOVÁ SÍLA



Aerodynamické charakteristiky

- ▶ Profilu
 - Základní charakteristiky
- ▶ Křídla
 - Vliv konce křídel
- ▶ Celého letadla
 - Napojení křídel do trupu
 - Vliv trupu a dalšího vybavení
 - Podvozek, motor, vrtule
 - Koncepce letadla

Aerodynamický profil

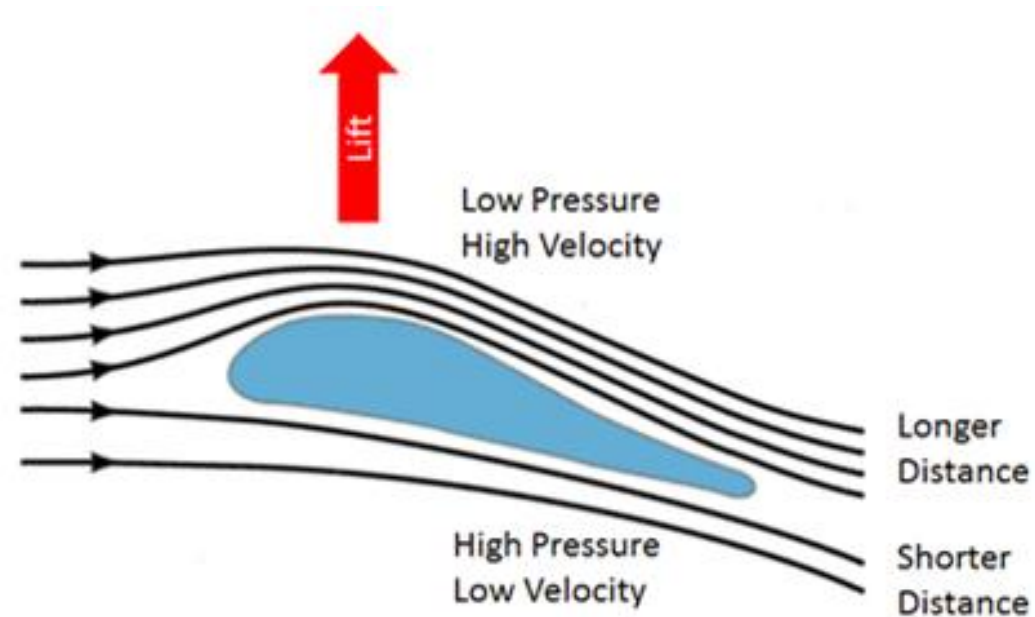


Vznik vztlaku na profilu

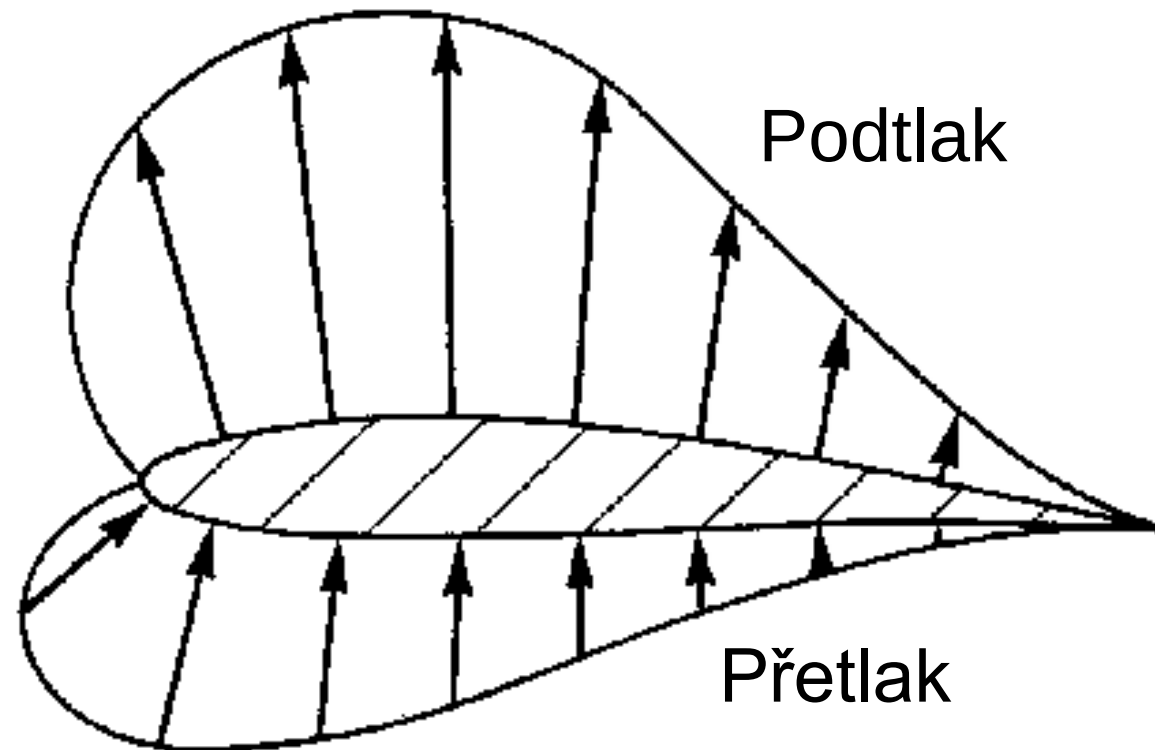
- ▶ Vyšší rychlost na horní straně – podtlak
- ▶ Nižší rychlost na spodní straně – přetlak
- ▶ Výsledná síla – vztlak

$$Y = C_y \frac{\rho V^2}{2} S$$

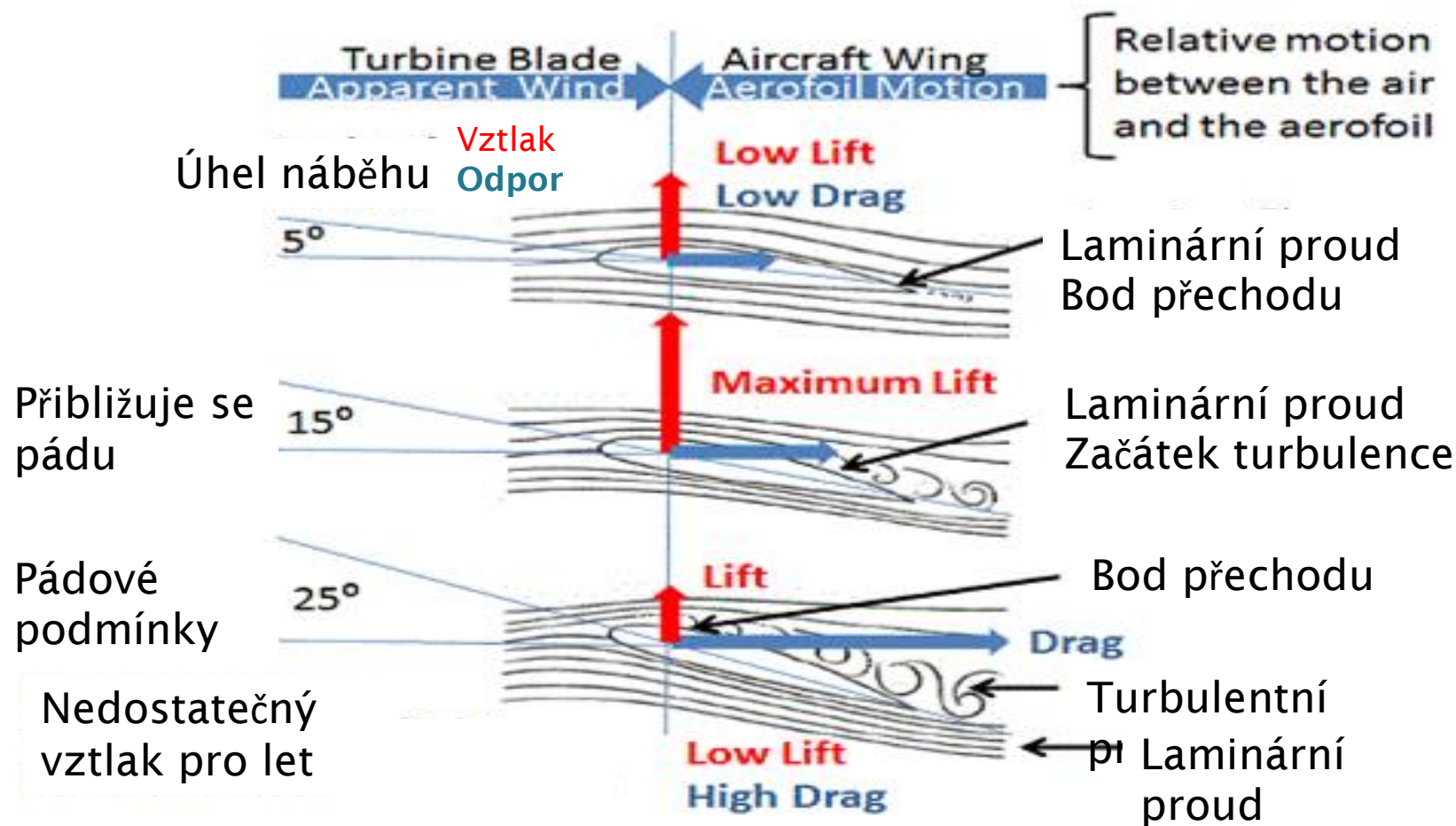
- C_y součinitel vztlak
- ρ hustota
- V rychlost
- S plocha



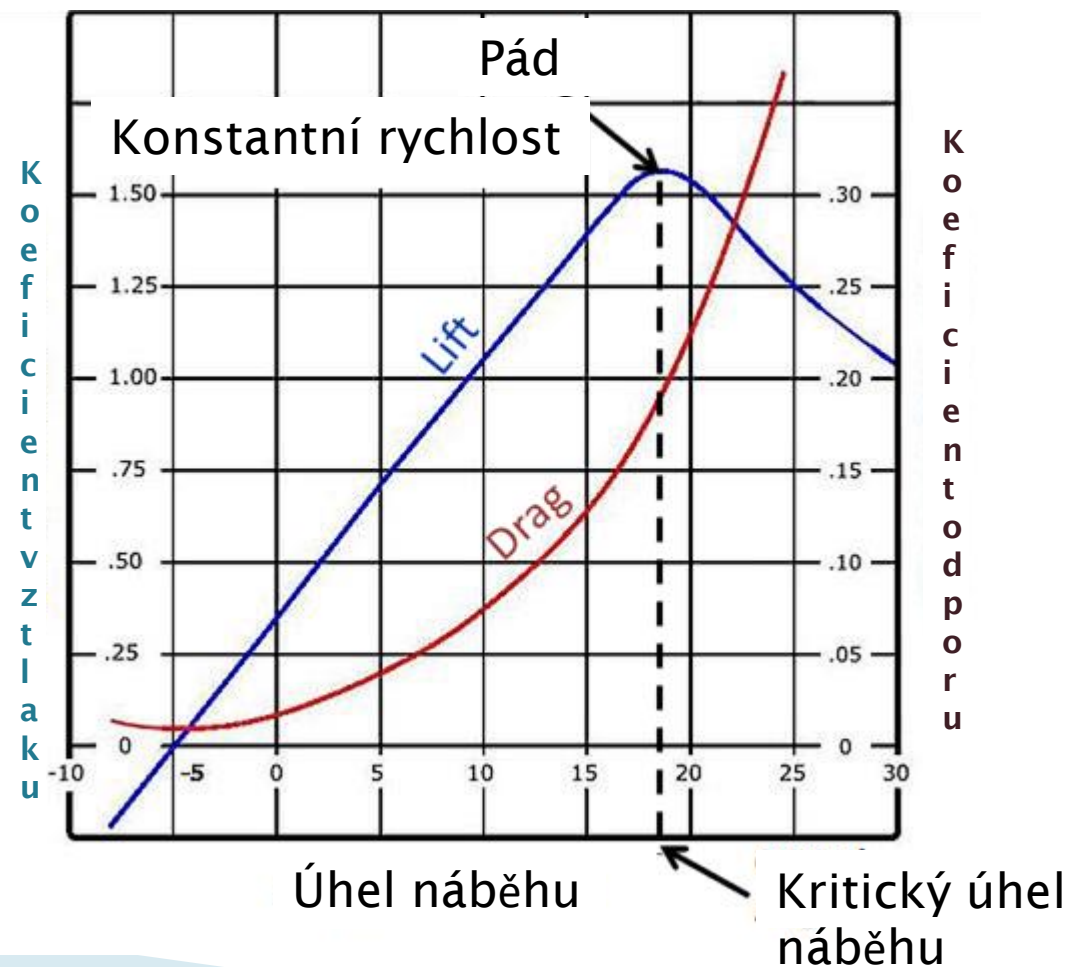
Rozložení tlaků na profilu za normálního letu



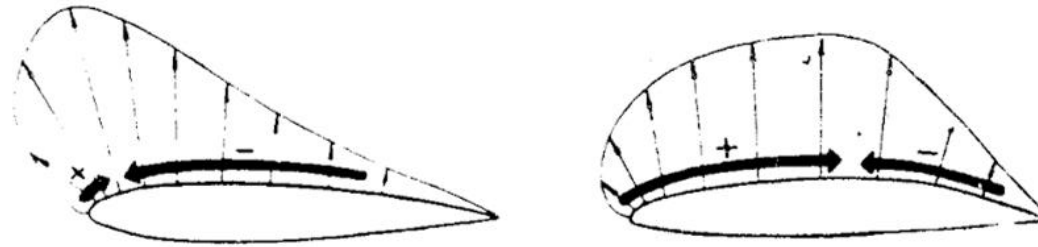
Úhel náběhu



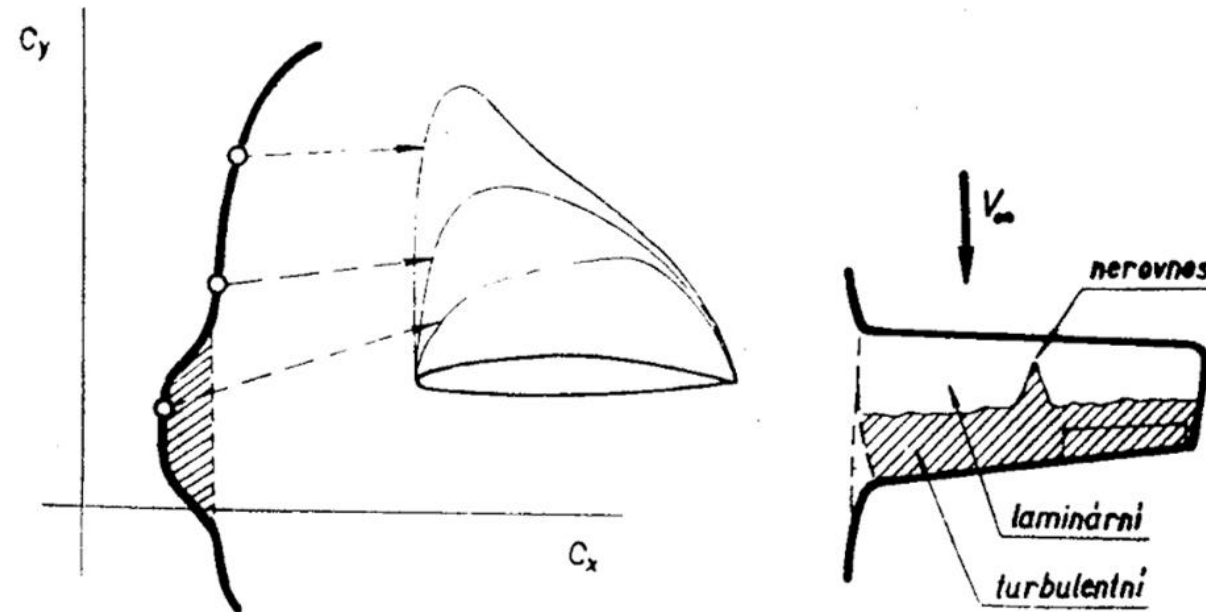
Vztlaková křivka



Běžný a laminární profil

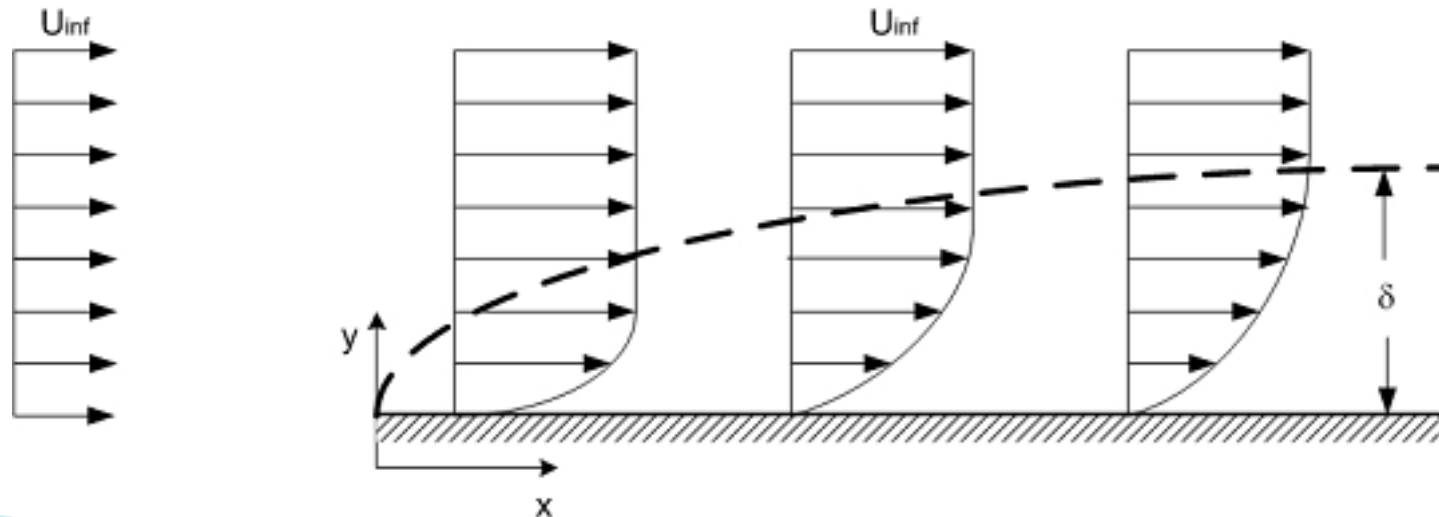


Obr. 1-44. Tlakové spády při běžném provozním režimu na obyčejném a na laminárním profilu.



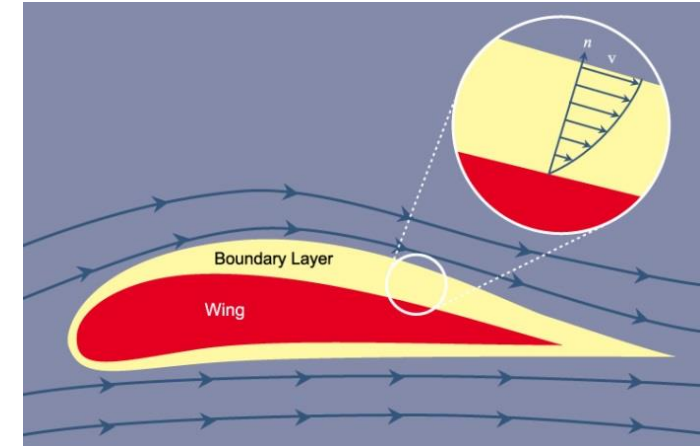
Mezní vrstva

- ▶ Mezi povrchem a nerozrušeným proudem
- ▶ Třecí odpor
- ▶ Bod přechodu do turbulentního proudu



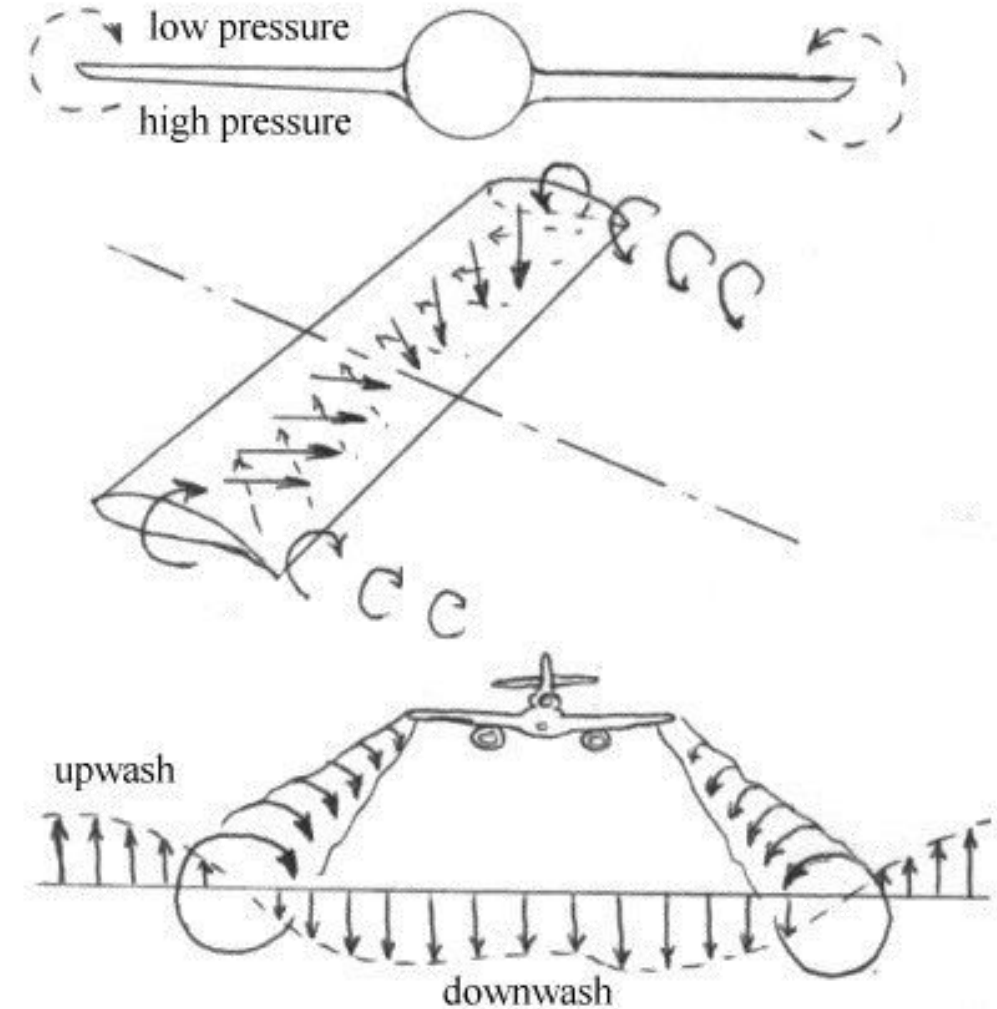
Celkový odpor a jeho složky

- ▶ Tvarový
 - tvar tělesa
- ▶ Třecí
 - Tření vzduchu v mezní vrstvě
- ▶ Interferenční
 - Vzájemné ovlivňování u částí letadla – trup – křídla
- ▶ Škodlivý
 - Součet tvarového, třecího a interferenčního odporu

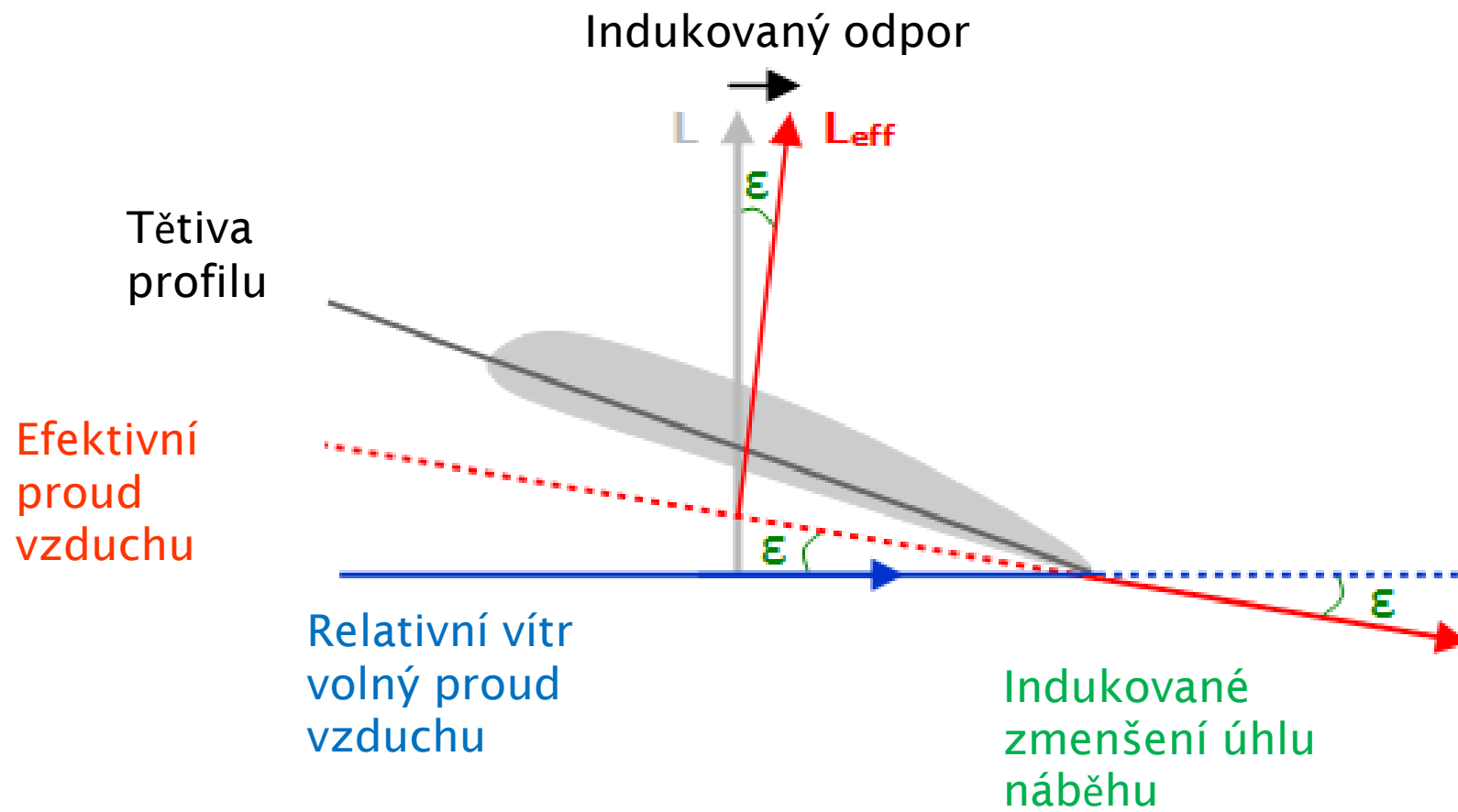


Indukovaný odpor

- ▶ Vzniká na křídle
- ▶ Důsledek vyrovnávání tlaků na konci křídla
- ▶ Vyšší úhel náběhu – vyšší indukovaný odpor

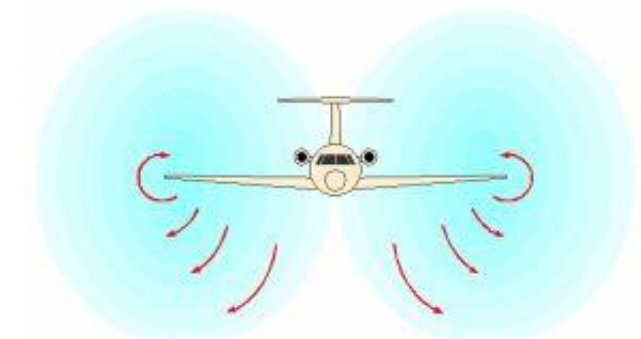


Indukovaný odpor



Indukovaný odpor a přízemní efekt

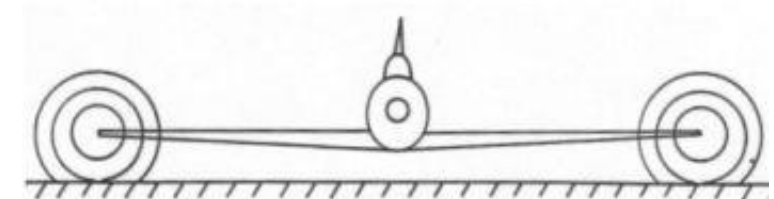
- ▶ Výška nad zemí do poloviny rozpětí
- ▶ Snižuje indukovaný odpor
- ▶ Narušení koncových vírů
- ▶ Letadlo „plave“



Vortices fully formed at altitude

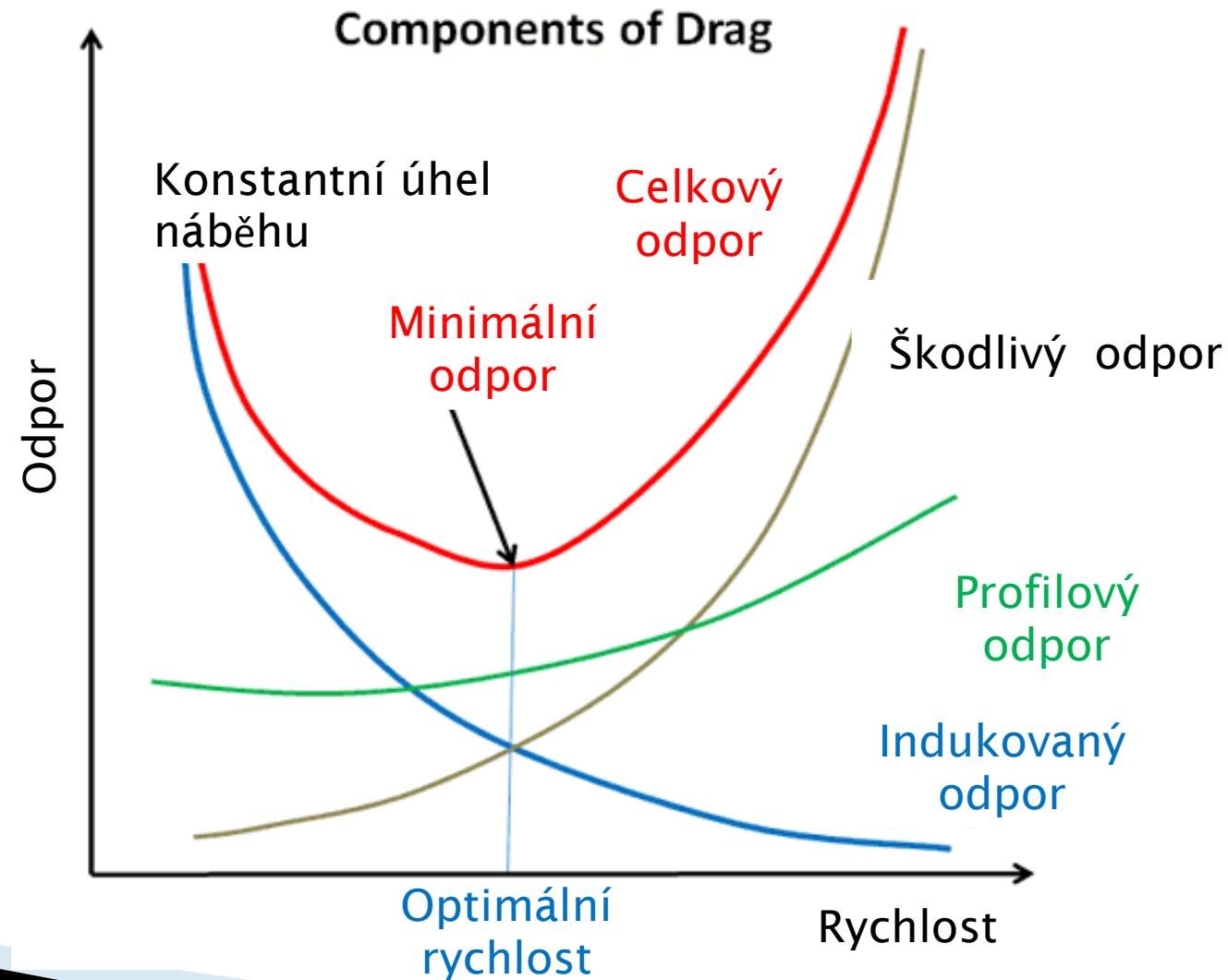


Vortices "compressed" near the ground

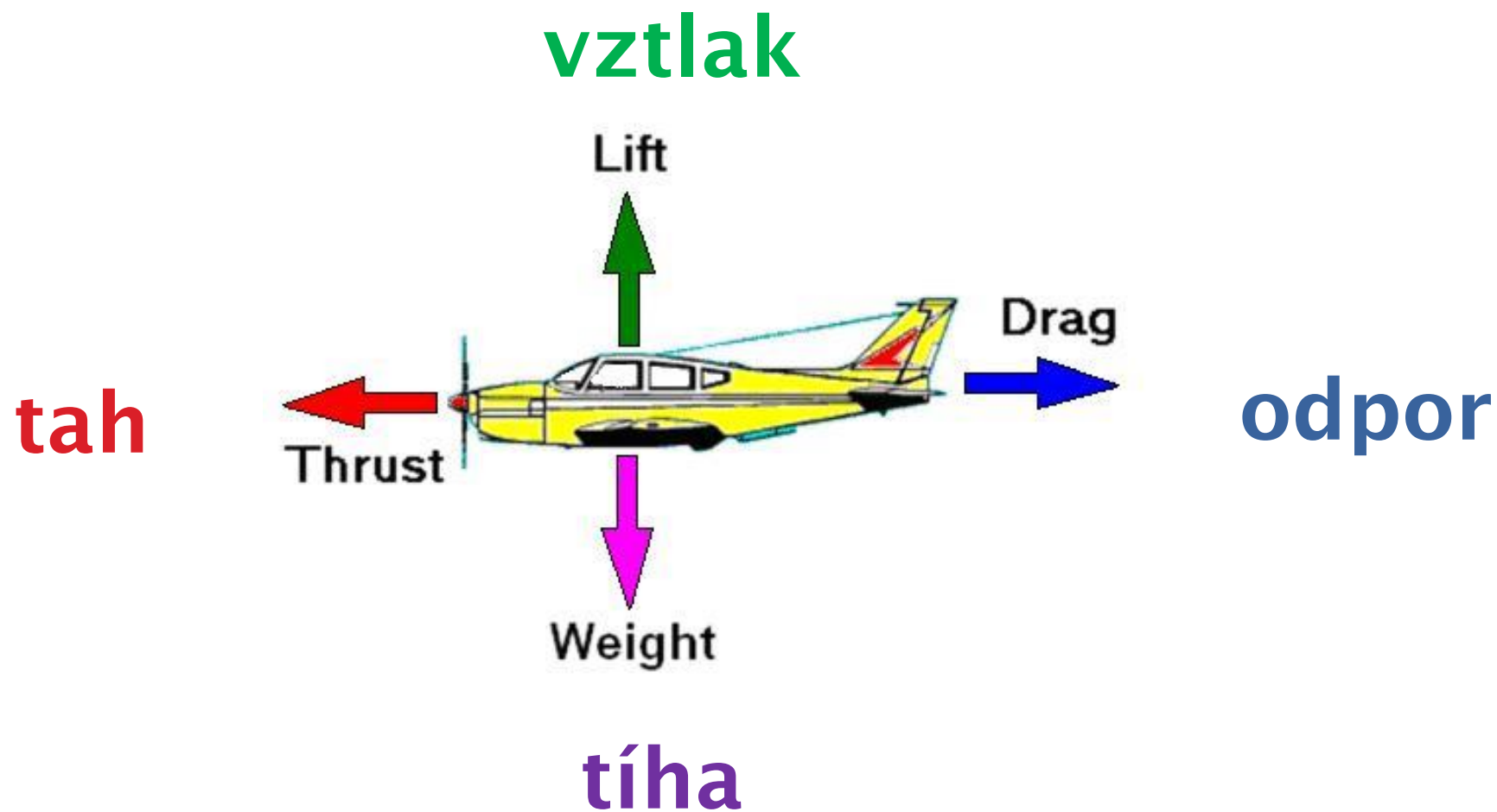


Vortices "blocked" by the ground

Celkový odpor a jeho složky



Překonávání odporu

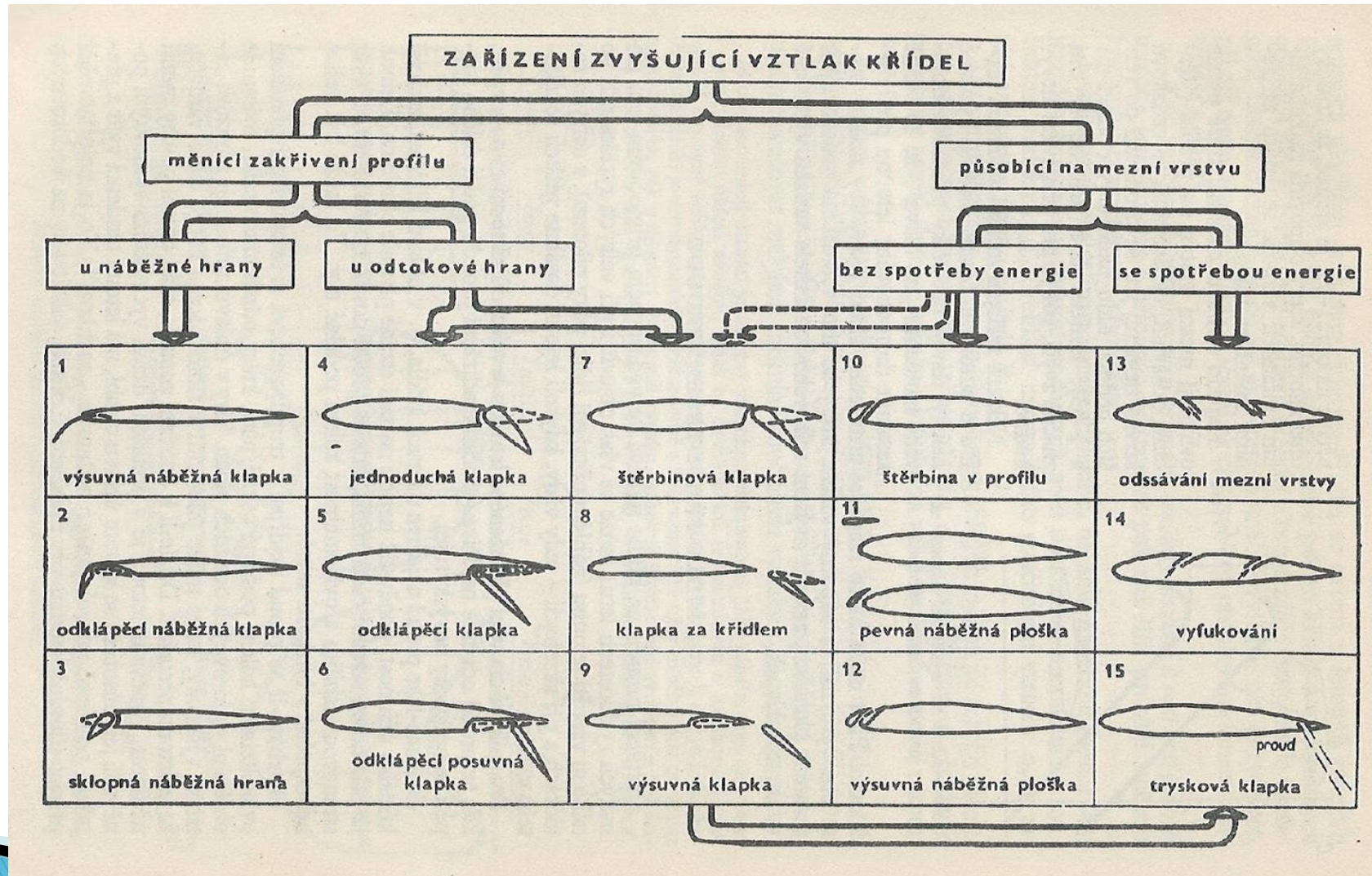


Druhy profilů, jejich vlastnosti a použití v konstrukci letadel

- ▶ Klasický nesymetrický
 - Nízké rychlosti
 - Tlustý profil
- ▶ Laminární
 - Posunuté maximum tloušťky
- ▶ Symetrický
 - Střední křivka profilu – přímka

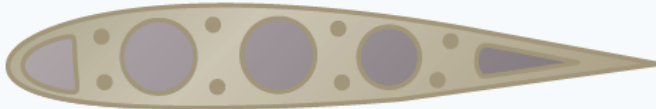


Prostředky zvýšení vztlaku

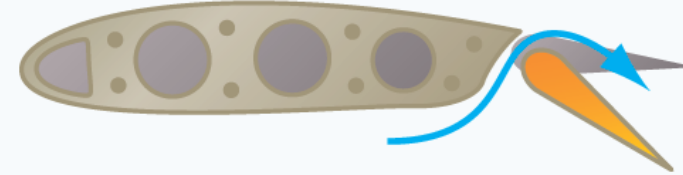


Prostředky zvýšení vztlaku

Základní profil



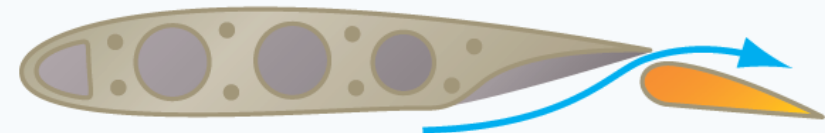
Štěrbínová klapka



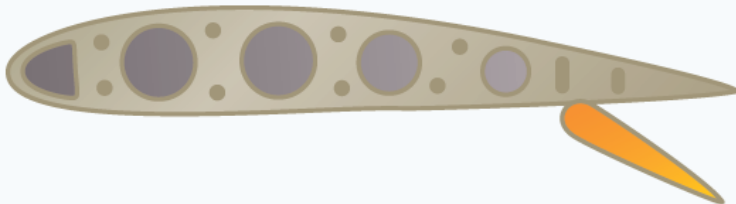
Jednoduchá klapka



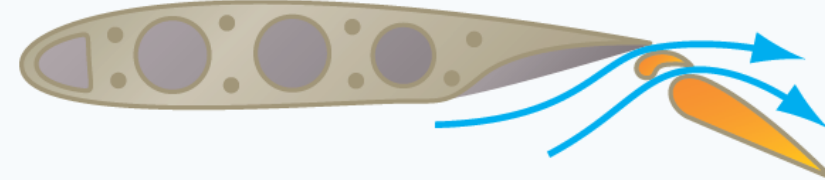
Fowlerova klapka



Odklápěcí klapka



Dvojitá Fowlerova klapka

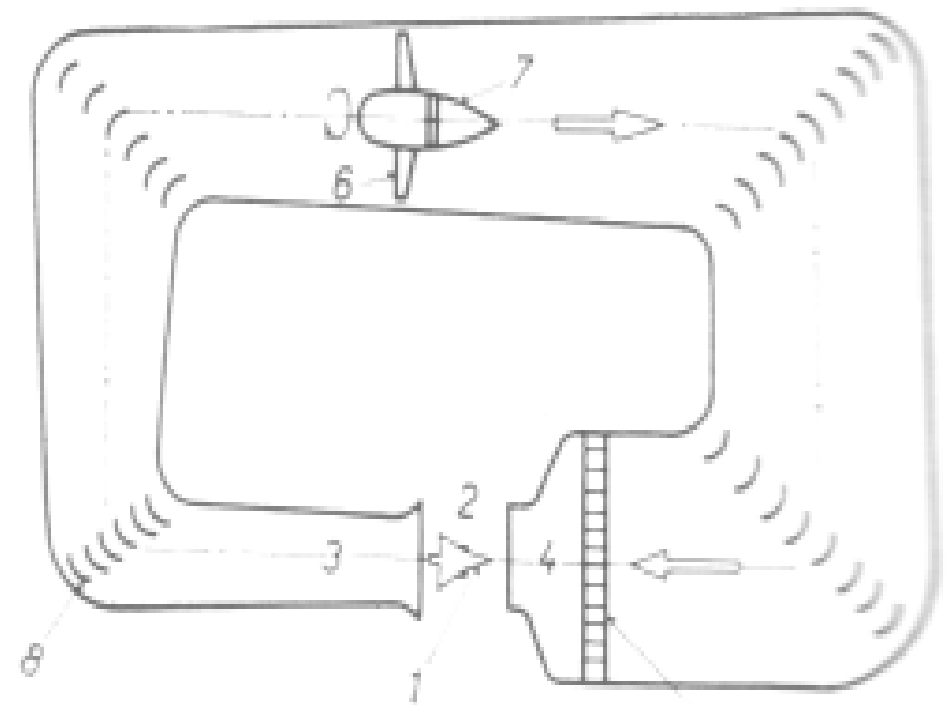


Aerodynamický tunel, schéma, význam, způsoby měření hodnot

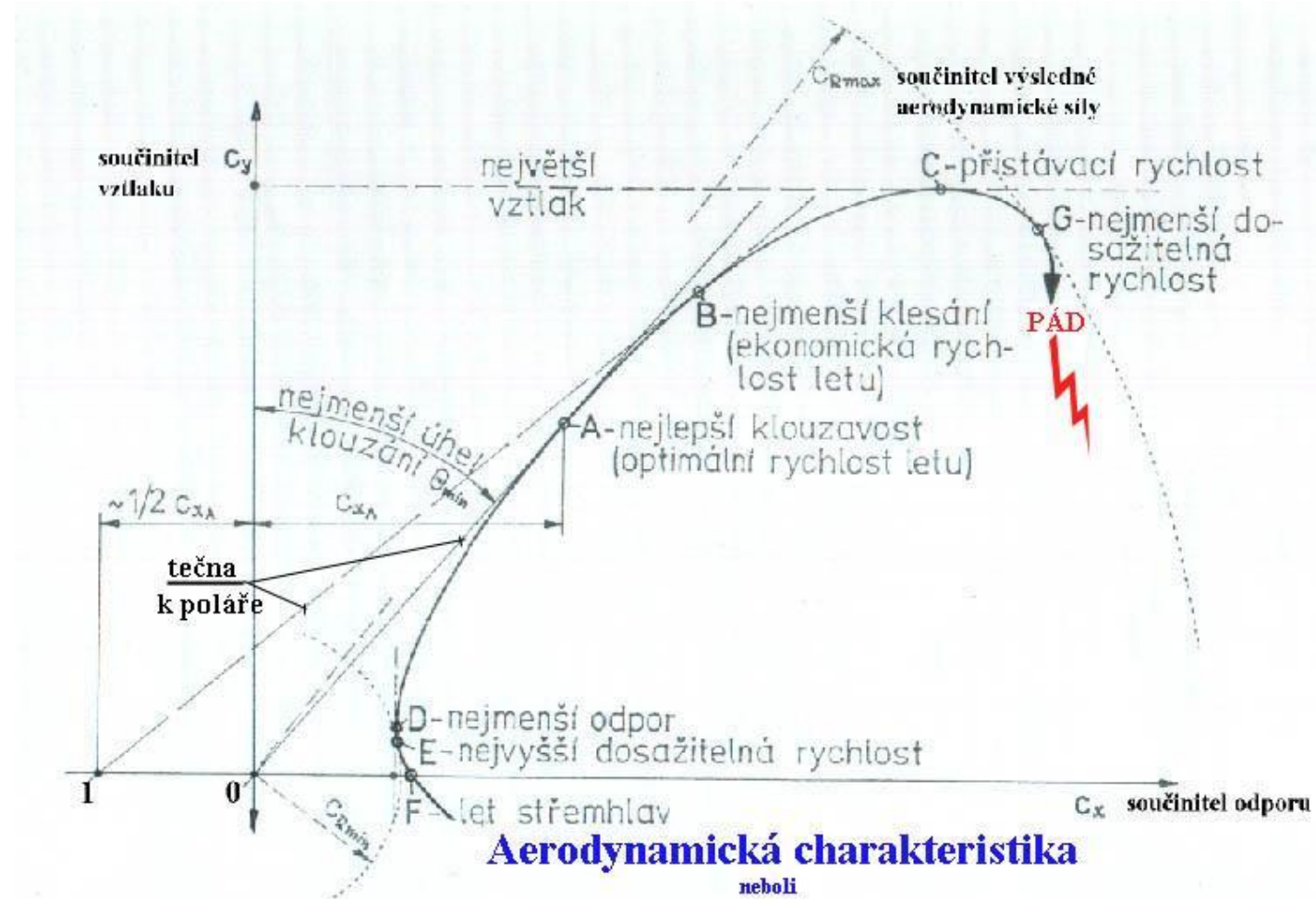
- ▶ Praktické zkoumání aerodynamických vlastností
- ▶ Modely letadel a jejich částí
- ▶ Zjišťování C_y a C_x

$$Y = C_y \frac{\rho V^2}{2} S$$

- $\rho V^2 / S$ je konstantní
- Při změně úhlu náběhu se mění C_y a C_x



Polára letounu



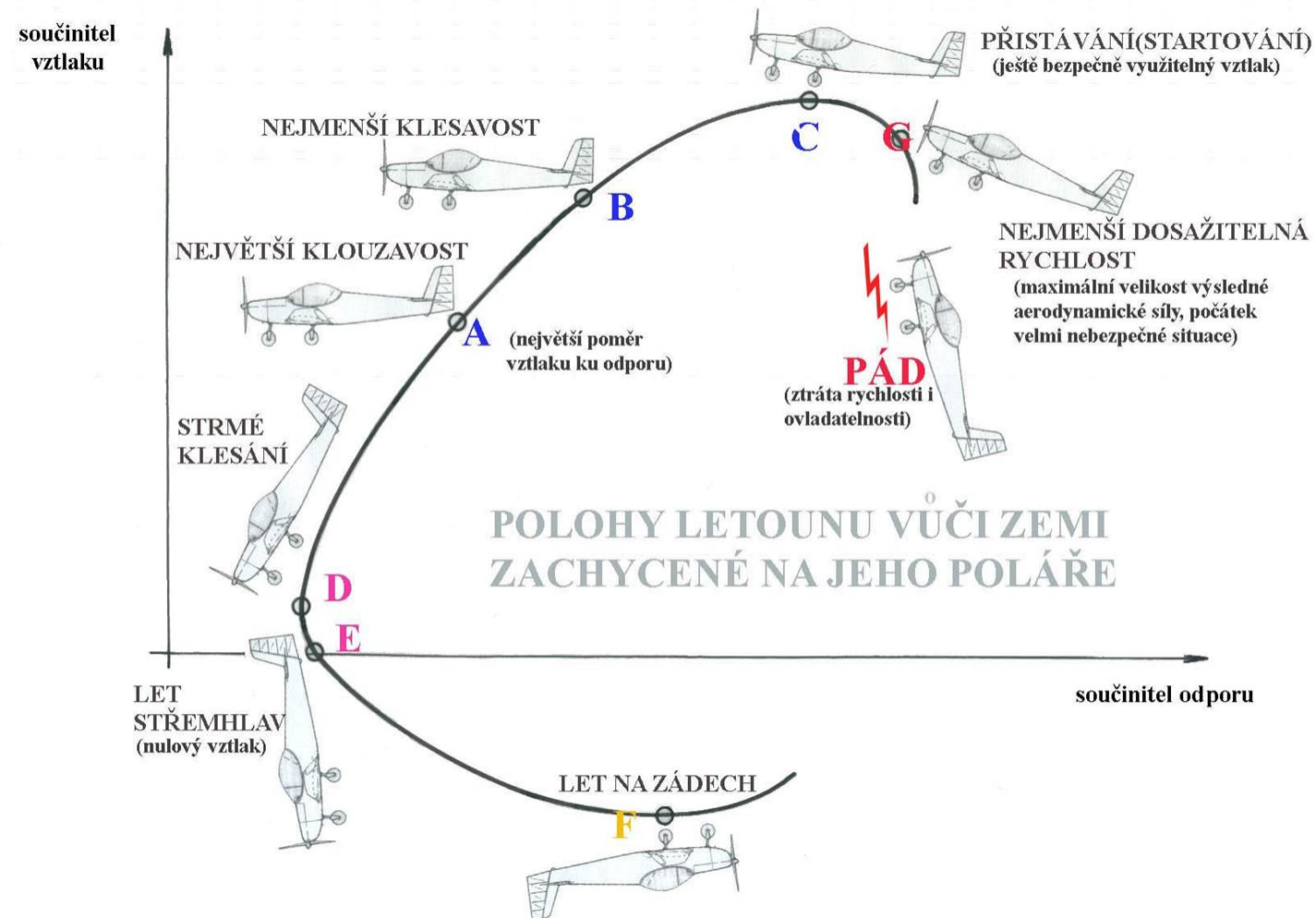
Aerodynamická charakteristika

neboli

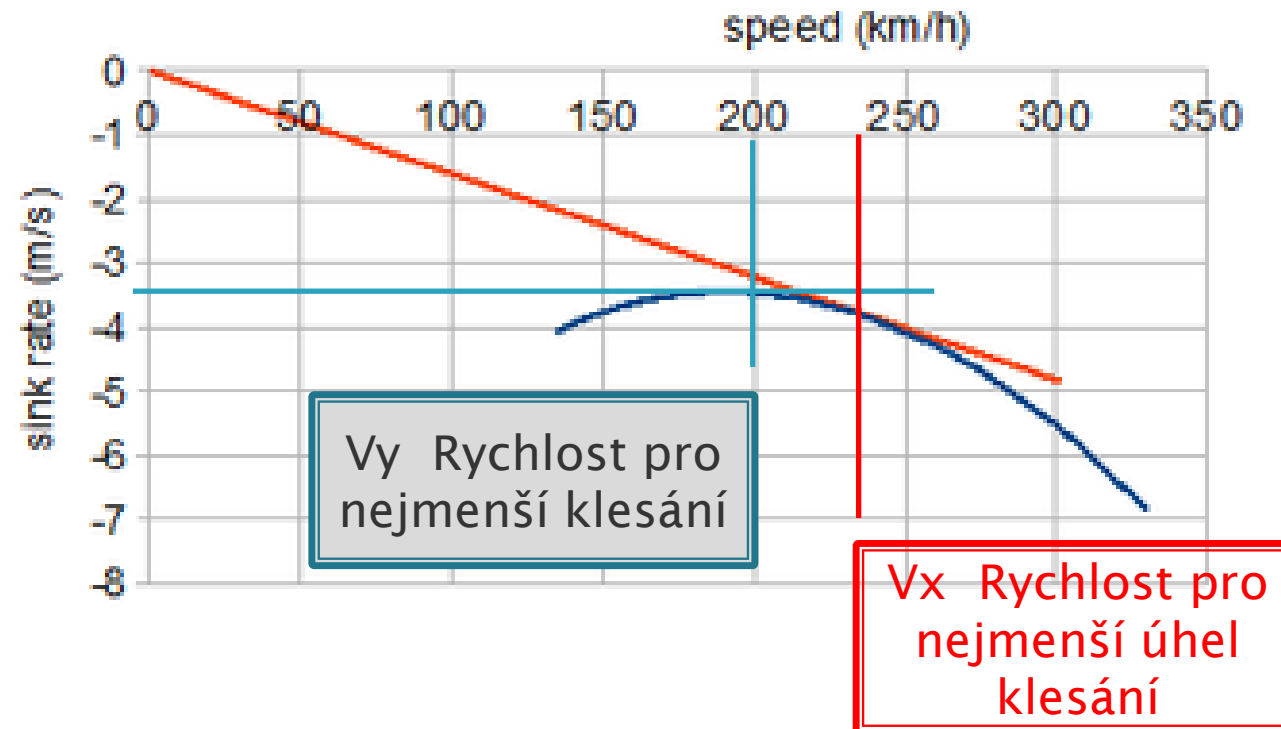
POLÁRA LÉTAJÍCÍHO STROJE

s uvedením důležitých situací, které se mohou vyskytnout během letu

Polára letounu



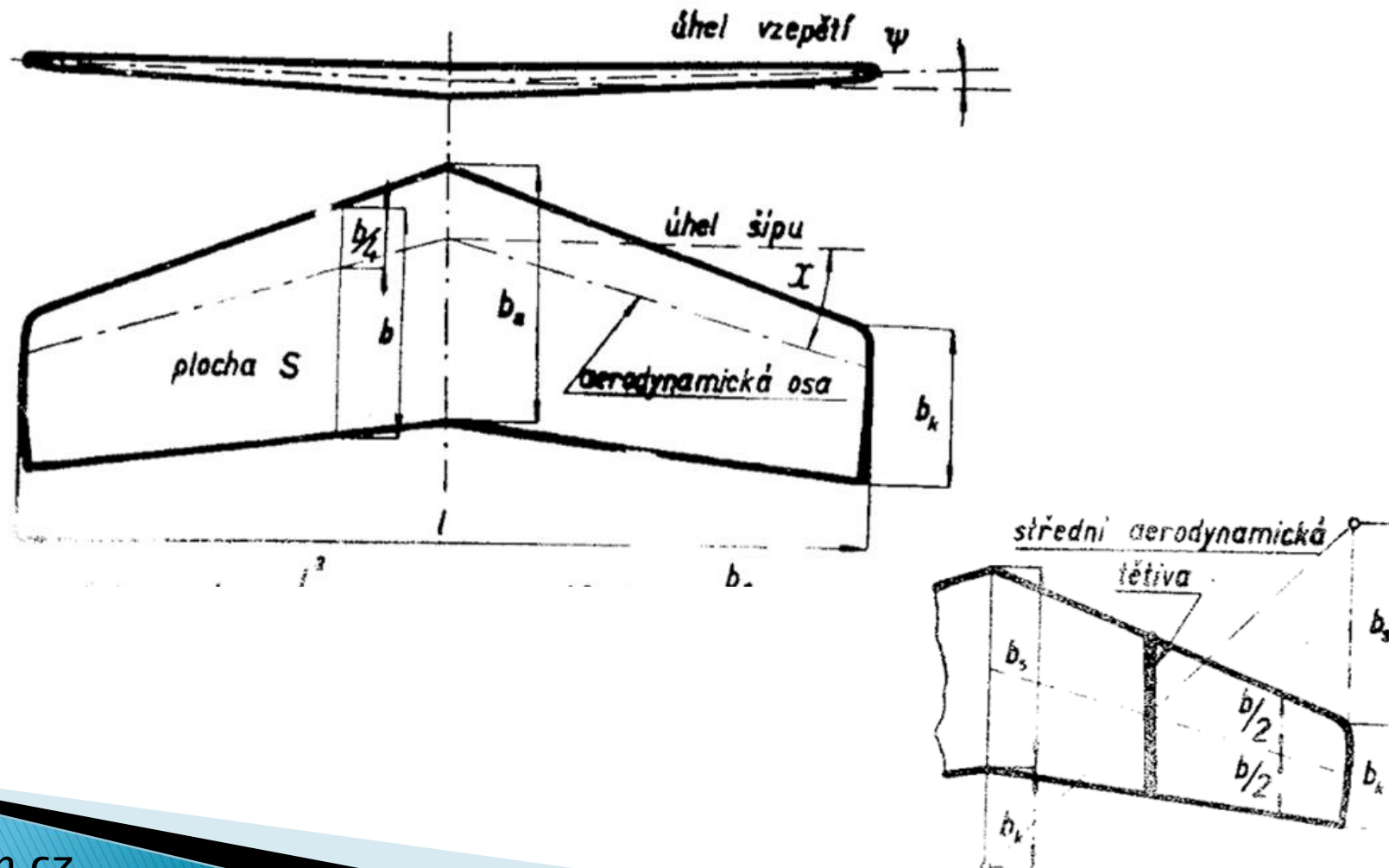
Rychlostní polára klouzání



Geometrické charakteristiky křídla, půdorysný tvar

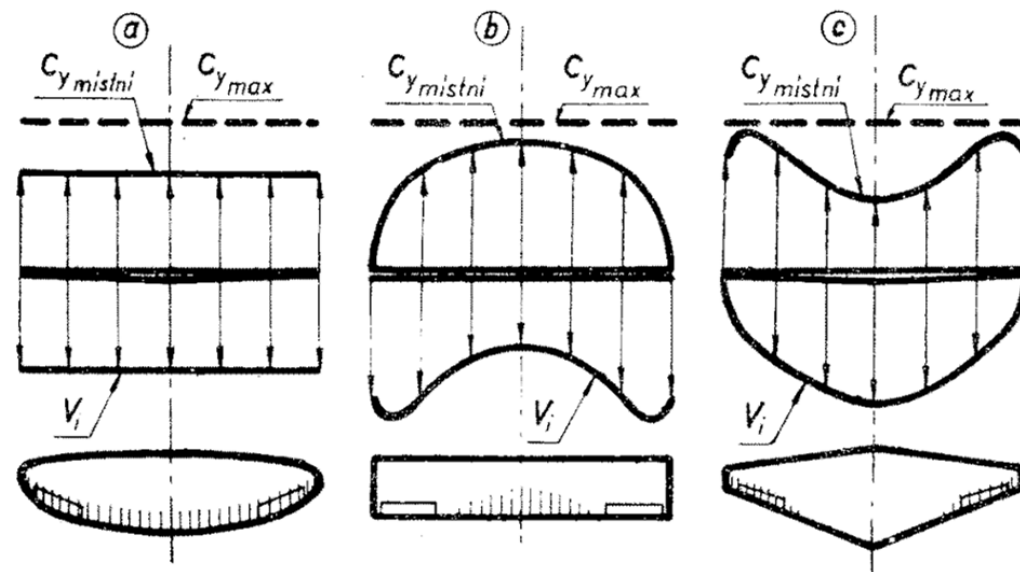
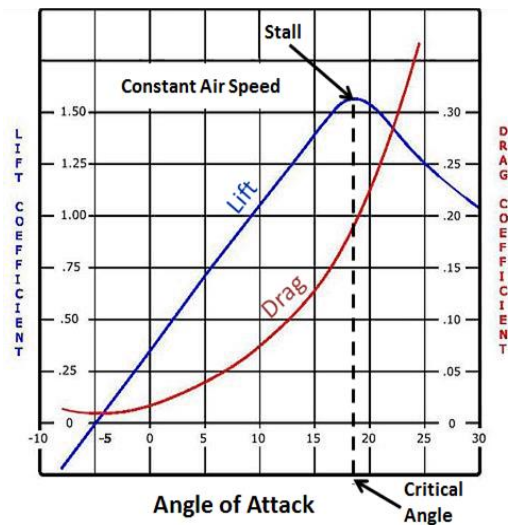
- ▶ Půdorys
 - Obdélník, lichoběžník, elipsa
- ▶ Šípovitost
 - Přímá, šípovitá
- ▶ Vzepětí
 - Kladné, nulové, záporné

Geometrické charakteristiky křídla, půdorysný tvar



Odrážení proudu na křídle

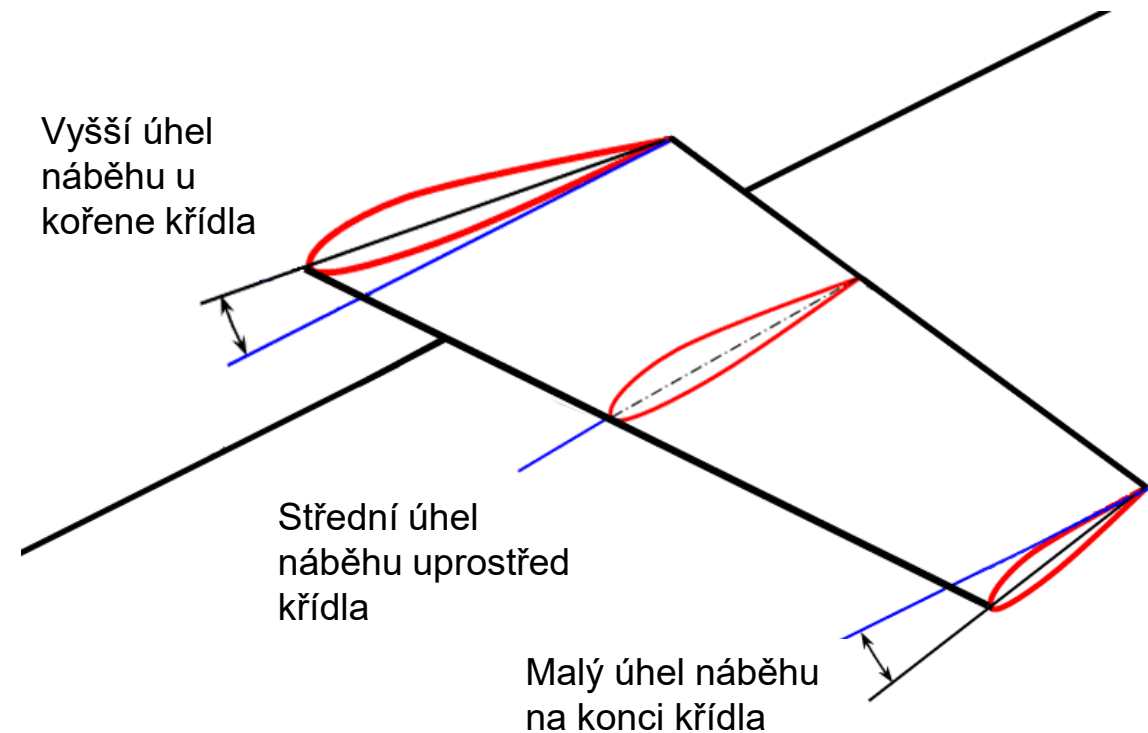
- ▶ Průběh odtržení závisí na tvaru křídla
- ▶ Nejlepší když se nejdříve odtrhne proud mezi trupem a křídélky a šíří se k trupu
- ▶ Jak ovlivní křídélka, zhoršuje řiditelnost



Obr. 1-54. Odrážení proudu na křídle se nejdříve objeví (naznačeno čárkovaně) v těch místech, kde při postupném zvyšování úhlu náběhu hodnota místního součinitele vztlaku nejdříve dosáhne hodnoty místního maximálního součinitele vztlaku.

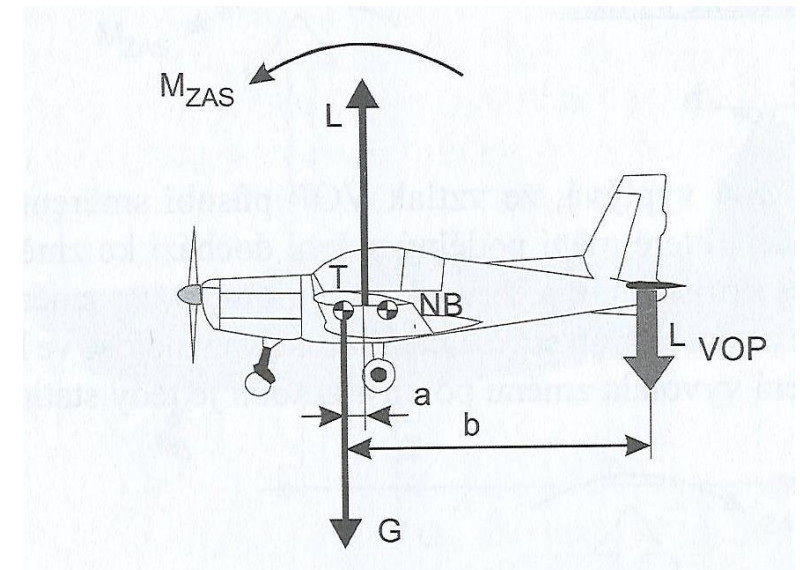
Aerodynamické a geometrické zkroucení křídla

- ▶ Zkroucení zlepšuje chování křídla při přetažení
- ▶ Aerodynamické
 - Jiné profily u kořene a na konci křídla
- ▶ Geometrické
 - Jiný úhel nastavení křídla u kořene a na konci

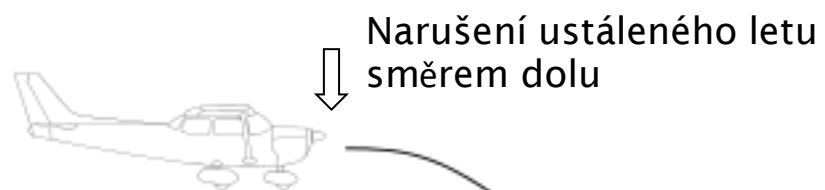


Statická stability letadla

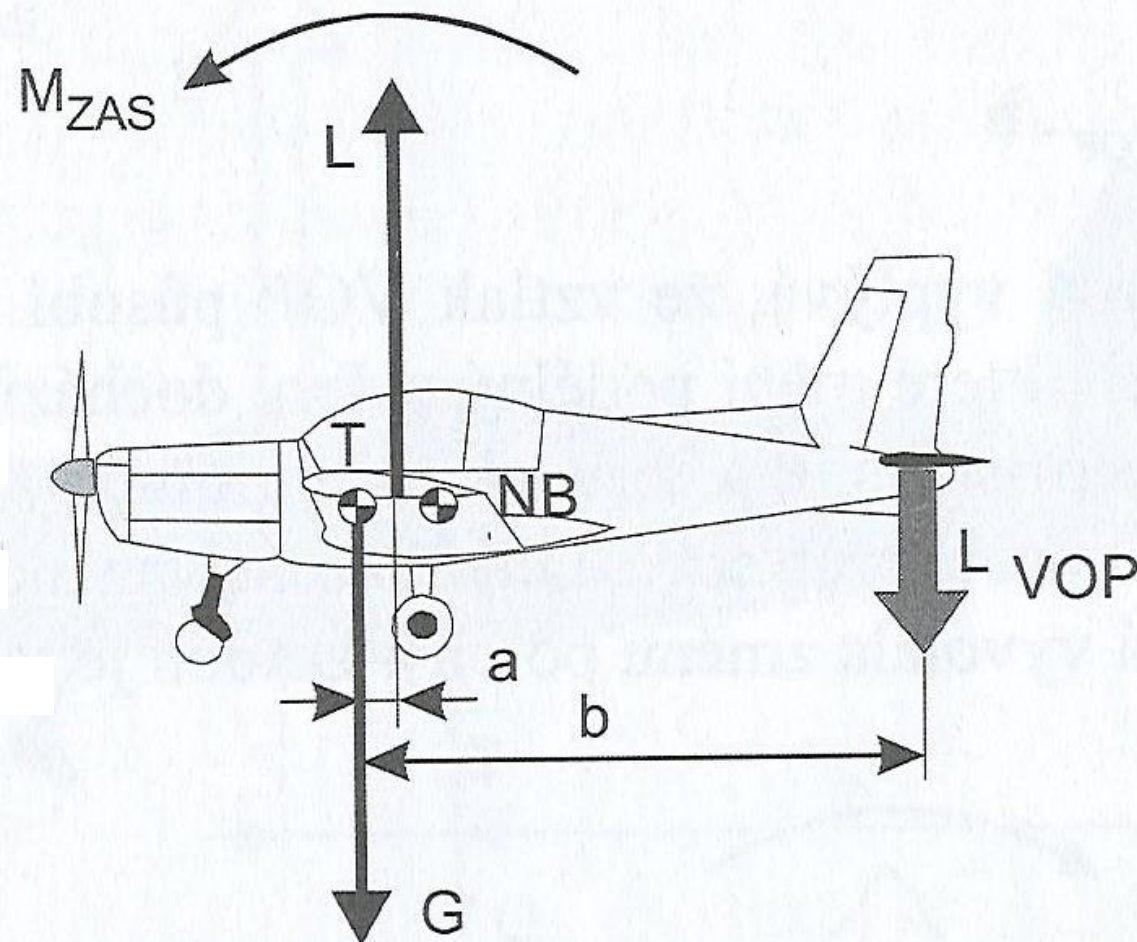
- ▶ Statická stabilita
 - Při změně úhlu náběhu nebo vybočení vzniká vratný moment.
 - Schopnost letadla bez zásahu pilota se vracet do původního režimu letu
- ▶ Staticky stabilní – když těžiště je před NB
- ▶ Neutrální bod (NB) – součinitel klopivého momentu je konstantní
- ▶ Těžiště – T
- ▶ Klopivý moment křídla M_{ZAS}
- ▶ Vztlak – L
- ▶ Vztlak VOP – L_{VOP}



Stabilita statická

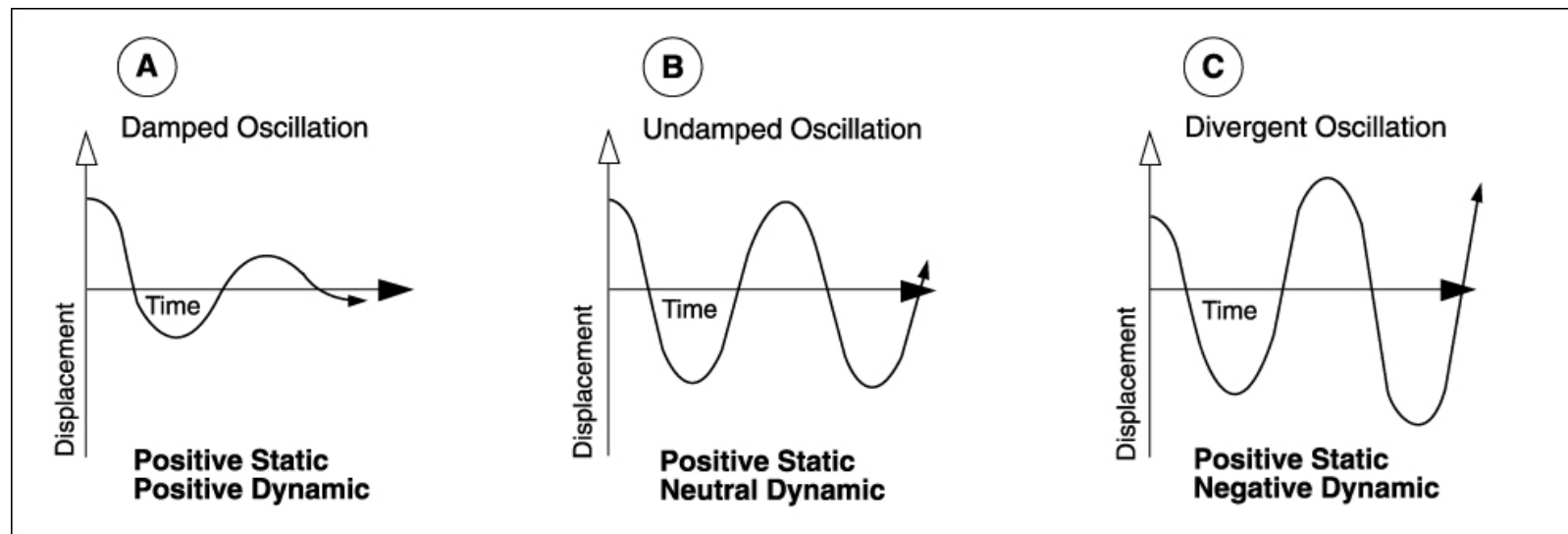


- Statically stabilní
- Statically neutral
- Statically unstable



Stabilita dynamická

- ▶ Staticky stabilní letadlo
 - při změně úhlu náběhu nebo vybočení vzniká vratný moment
- ▶ Dynamicky stabilní
 - velikost kmitů se zmenšuje s časem

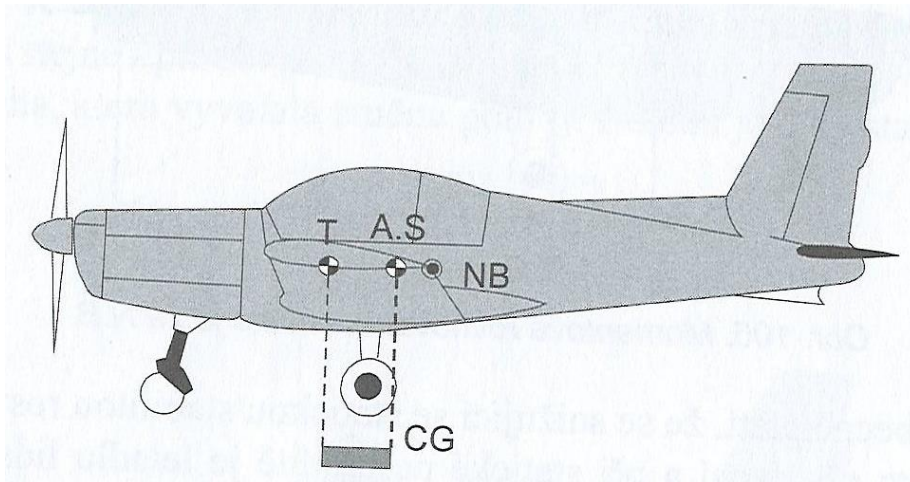


Stabilita stranová

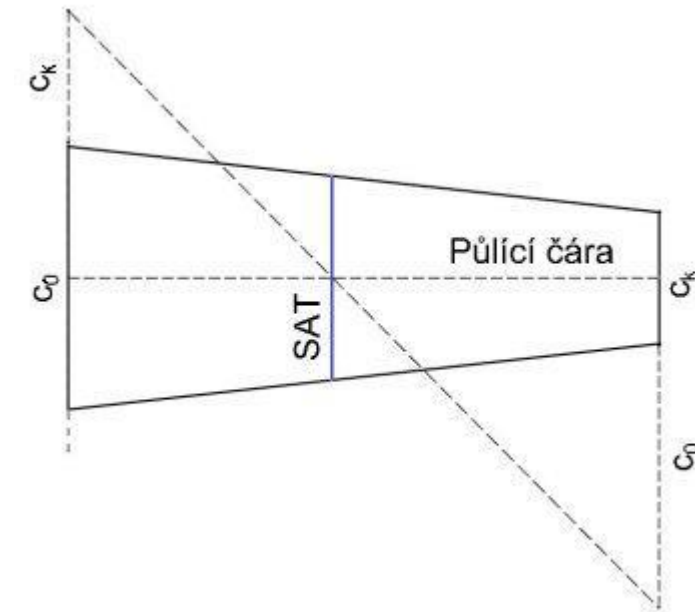
- ▶ Zajištěna:
 - svislou ocasní plochou (SOP)
 - trupem
- ▶ Při vybočení vzniká na SOP boční síla vracející letadlo do původního směru

Těžiště letounu, těžištní zásoba, vliv na letové vlastnosti

- ▶ Těžištní zásoba = centráž
 - rozsah povolené polohy těžiště na podélné ose
- ▶ Vyjadřuje se v % SAT



Učebnice pilota 2013



Poloha těžiště a vlastnosti letadla

▶ Přední centráž

- vyšší rychlost odpoutání a prodloužení rozjezdu
- zmenšení vertikální rychlosti a úhlu stoupání
- nižší maximální výšku letu
- snížená řiditelnost
- zhoršená výkonnost

▶ Zadní centráž

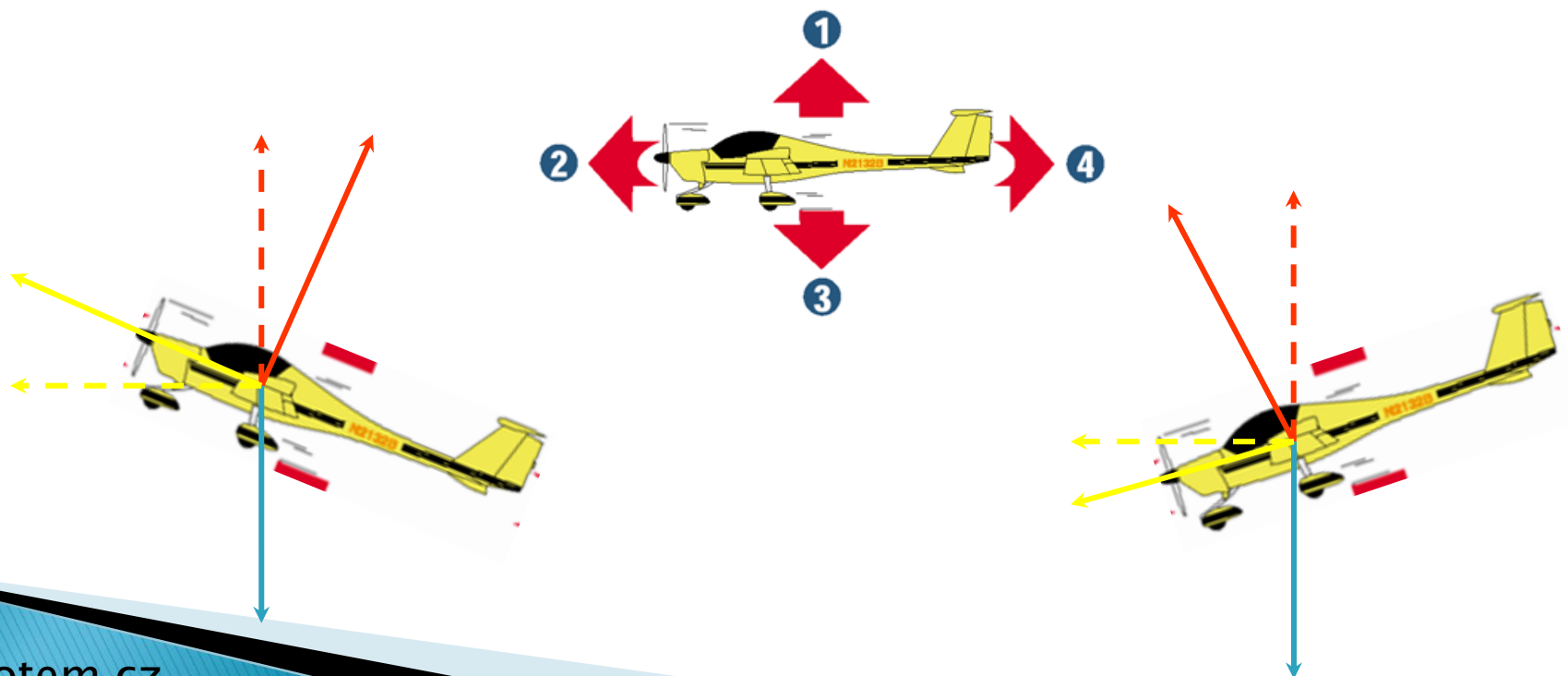
- menší stabilita
- zvýšená reakce na zásahy do řízení
- zvýšené riziko pádu a vývrtky
- obtížné vyvedení letounu z přetažení

Řízení letounu, druhy kormidel, funkce, výhody a nevýhody

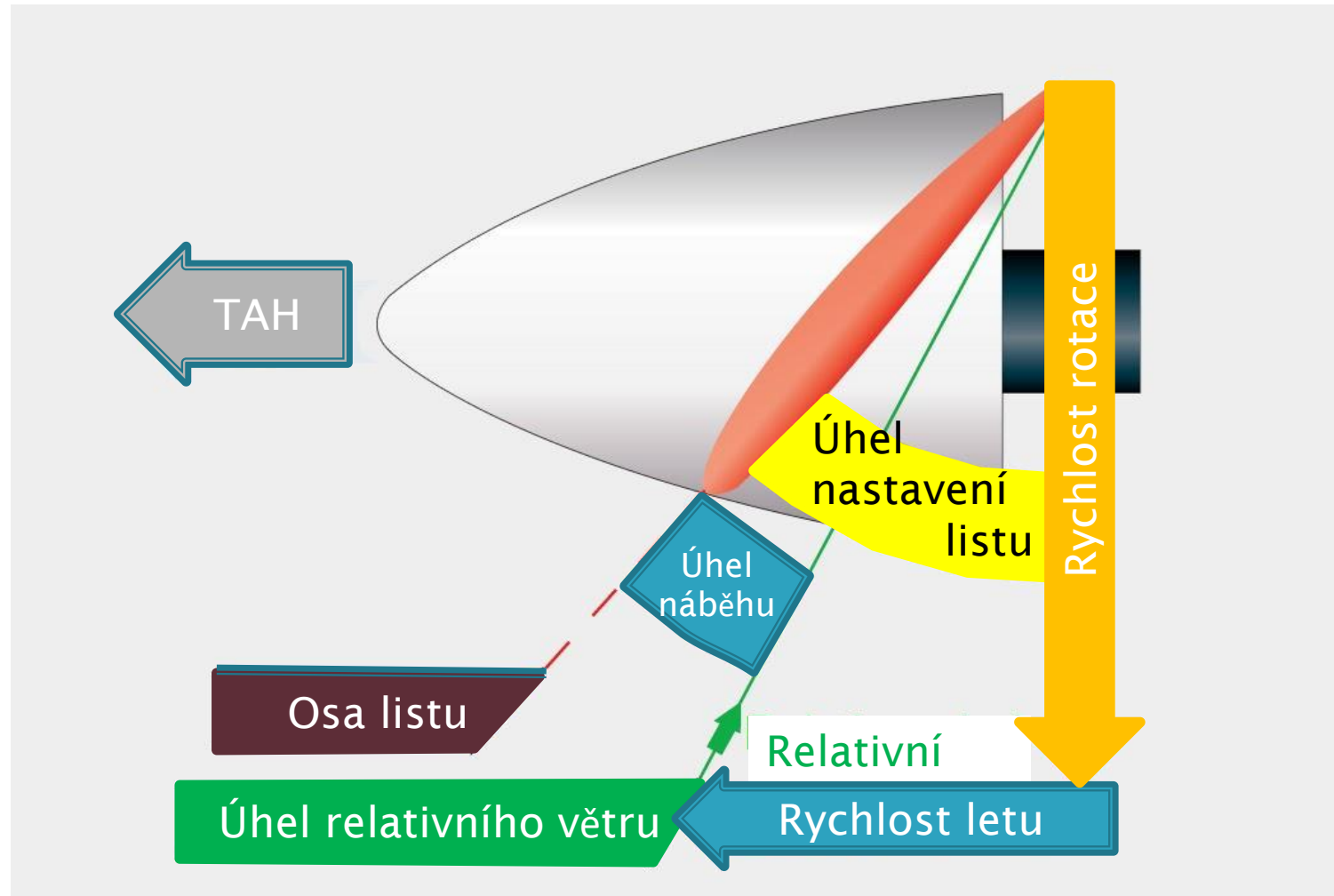
- ▶ Mechanický systém řízení
- ▶ Křidélka – klonění
 - Flapperony – spojení křidélek a přistávacích klapek
- ▶ Vodorovné ocasní plochy
 - Stabilizátor
 - Výškové kormidlo – klopení
 - Plovoucí stabilizátor
- ▶ Svislé ocasní plochy
- ▶ Statické a dynamické vyvážení kormidel

Rovnováha sil v ustáleném vodorovném motorovém letu, ve stoupání a v klouzavém letu

1. Vztlak, 2. Tah, 3. Hmotnost, 4. Odpor



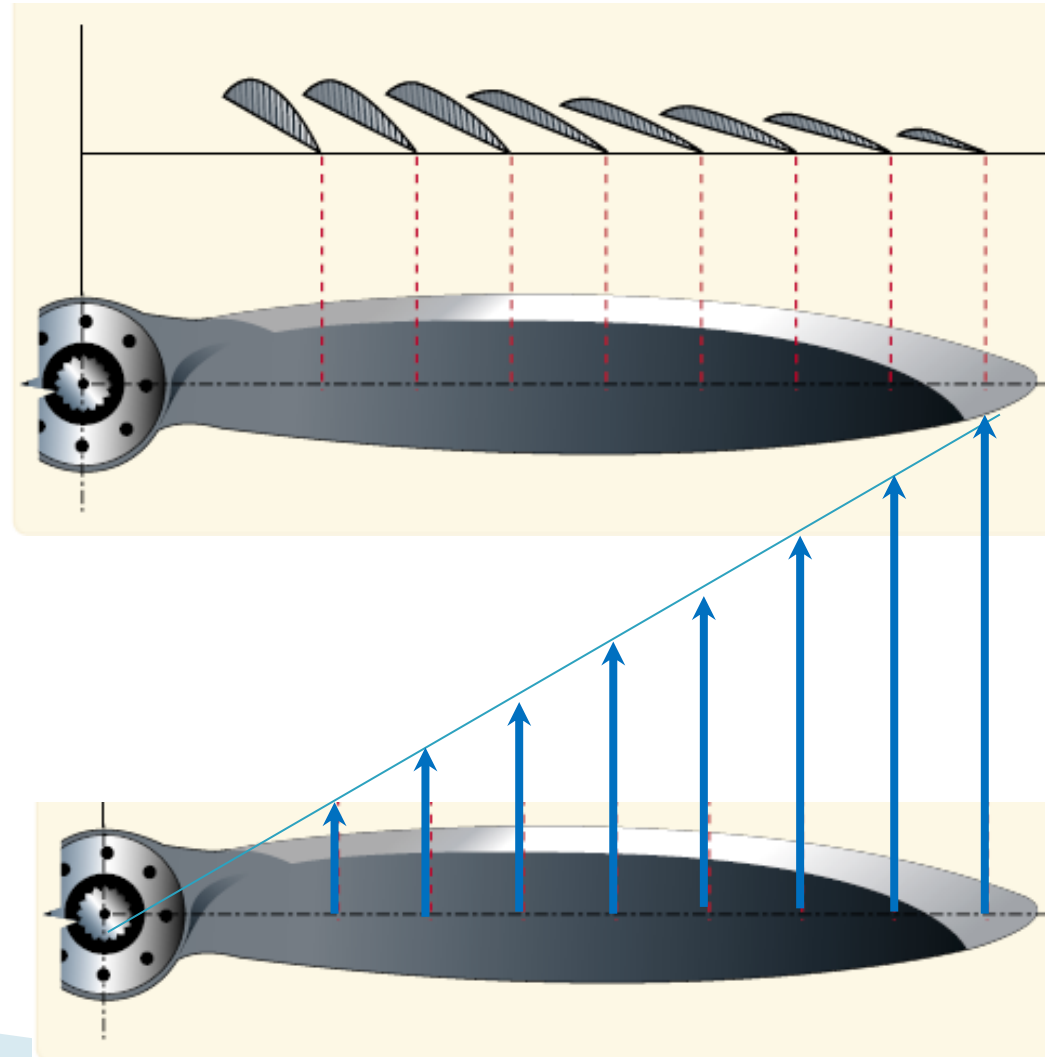
Aerodynamika vrtule



Aerodynamika vrtule

- ▶ <https://www.youtube.com/watch?v=0bP2MH3Lqvl>

Úhly nastavení po délce listu vrtule



Režimy práce vrtule

Vrtulníkový

- Nulová dopředná rychlost

Vrtulový

- Pohybuje se dopředu a táhne

Nulový tah

- Nulová účinnost

Brždění

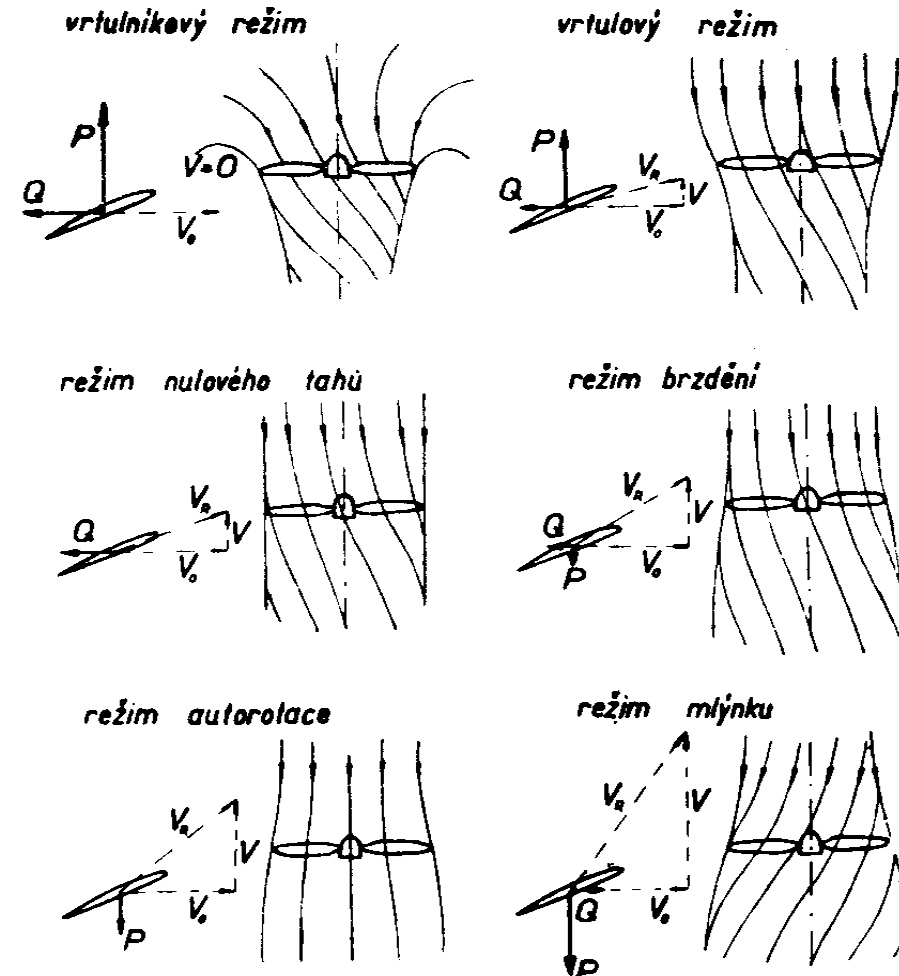
- Brzdí, je třeba výkon motoru

Autorotace

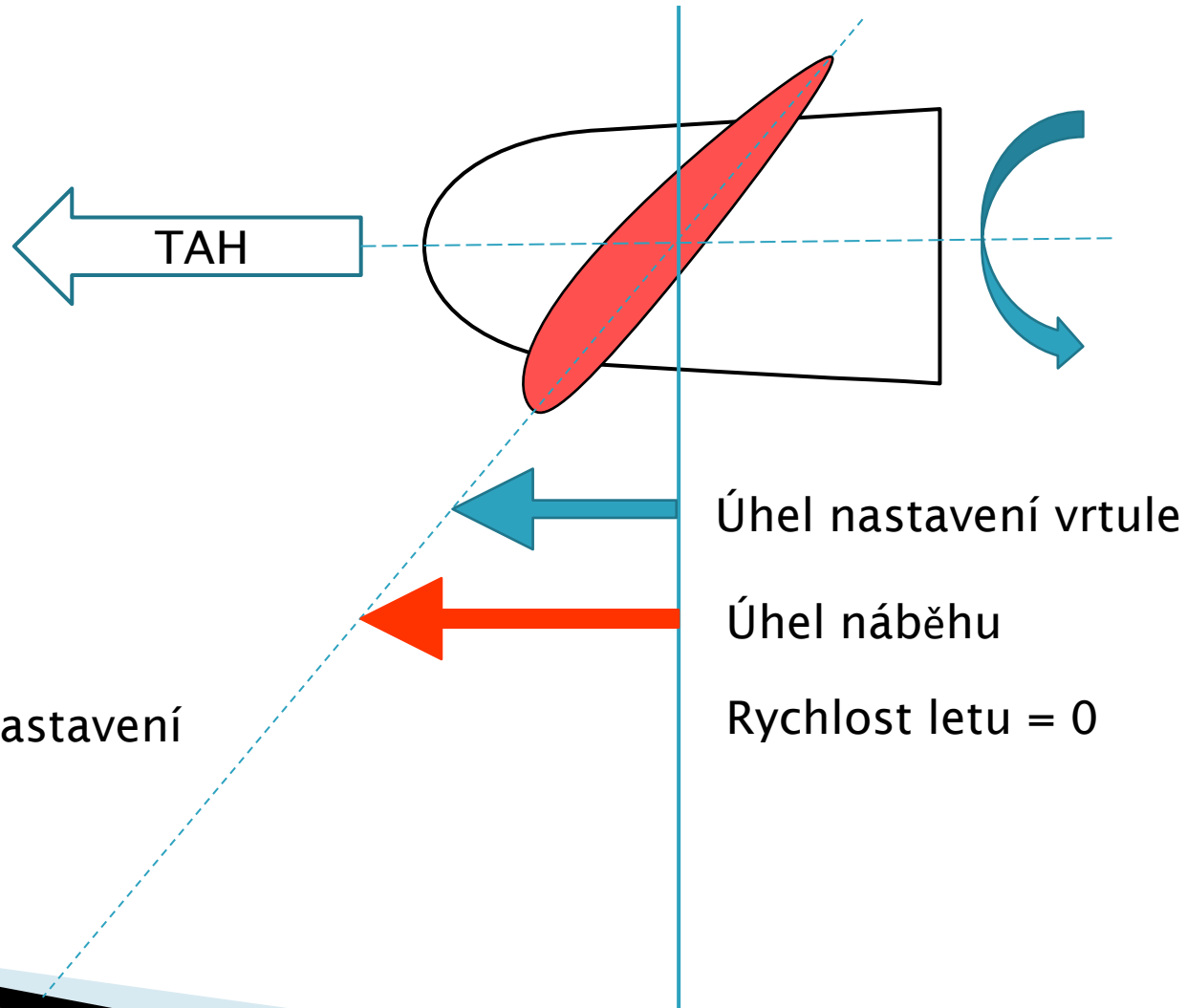
- Udržuje otáčky motoru

Mlýnku

- Brzdí a přidává otáčky motoru

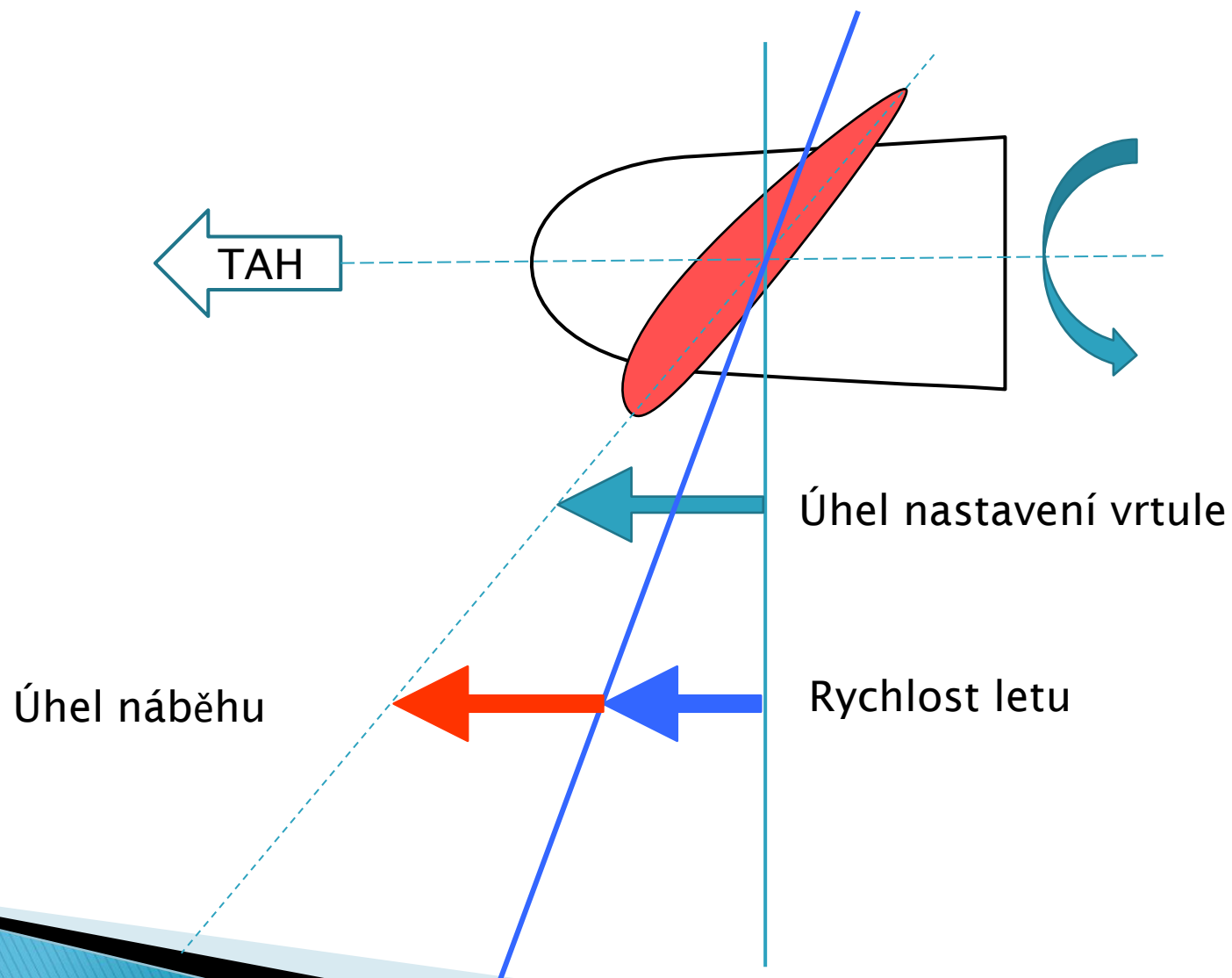


Vrtulníkový režim

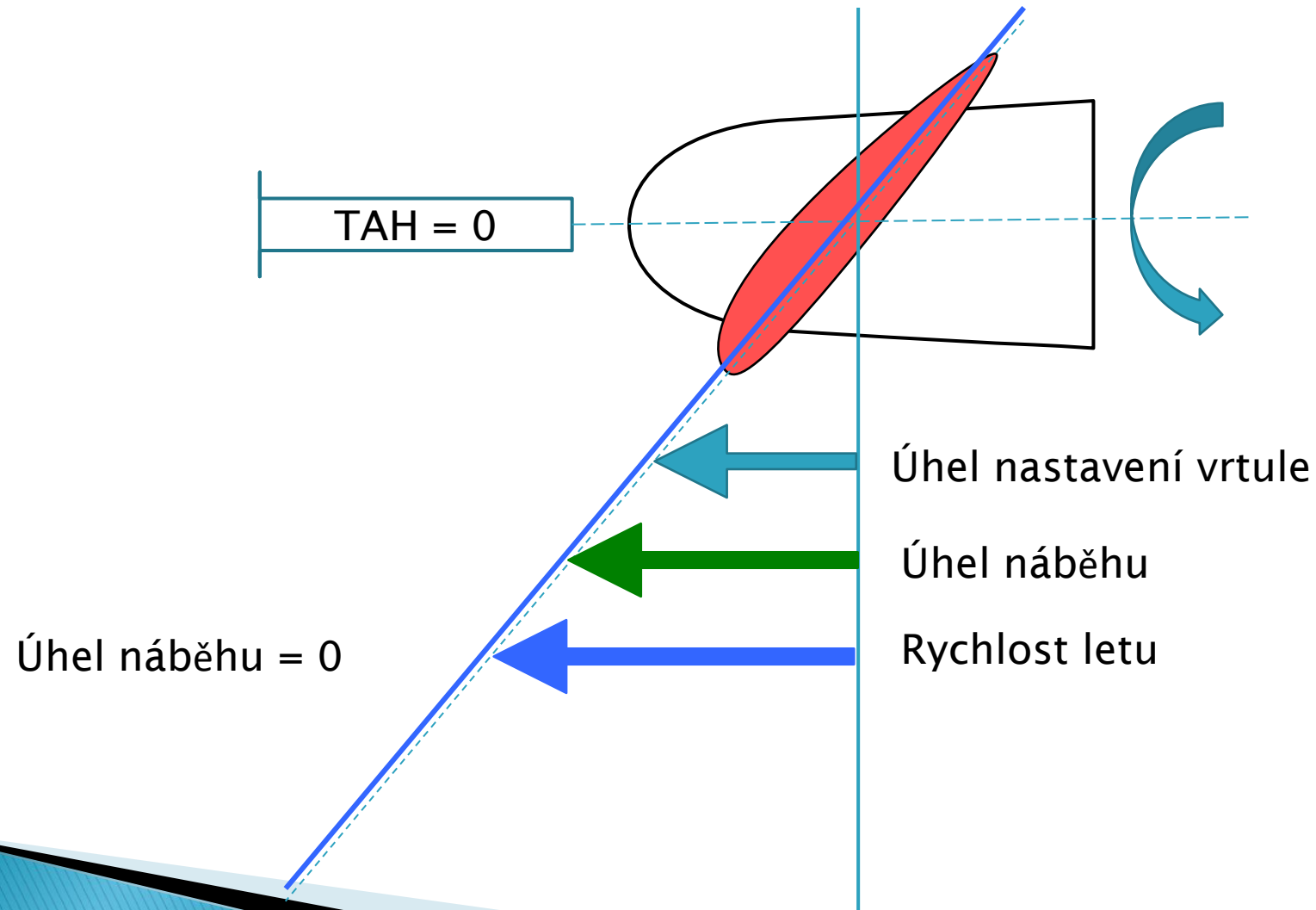


Úhel náběhu = úhel nastavení

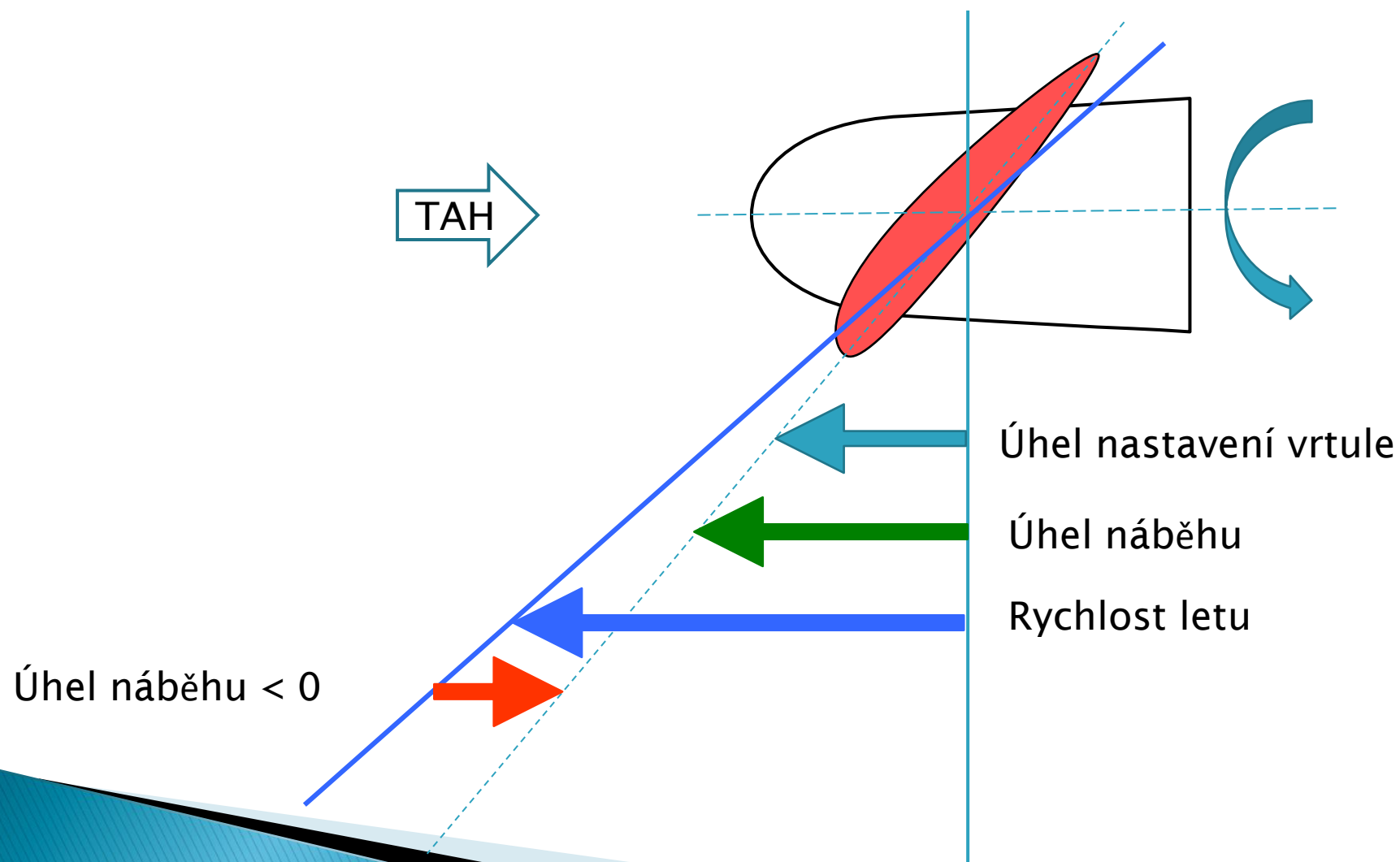
Vrtulový režim



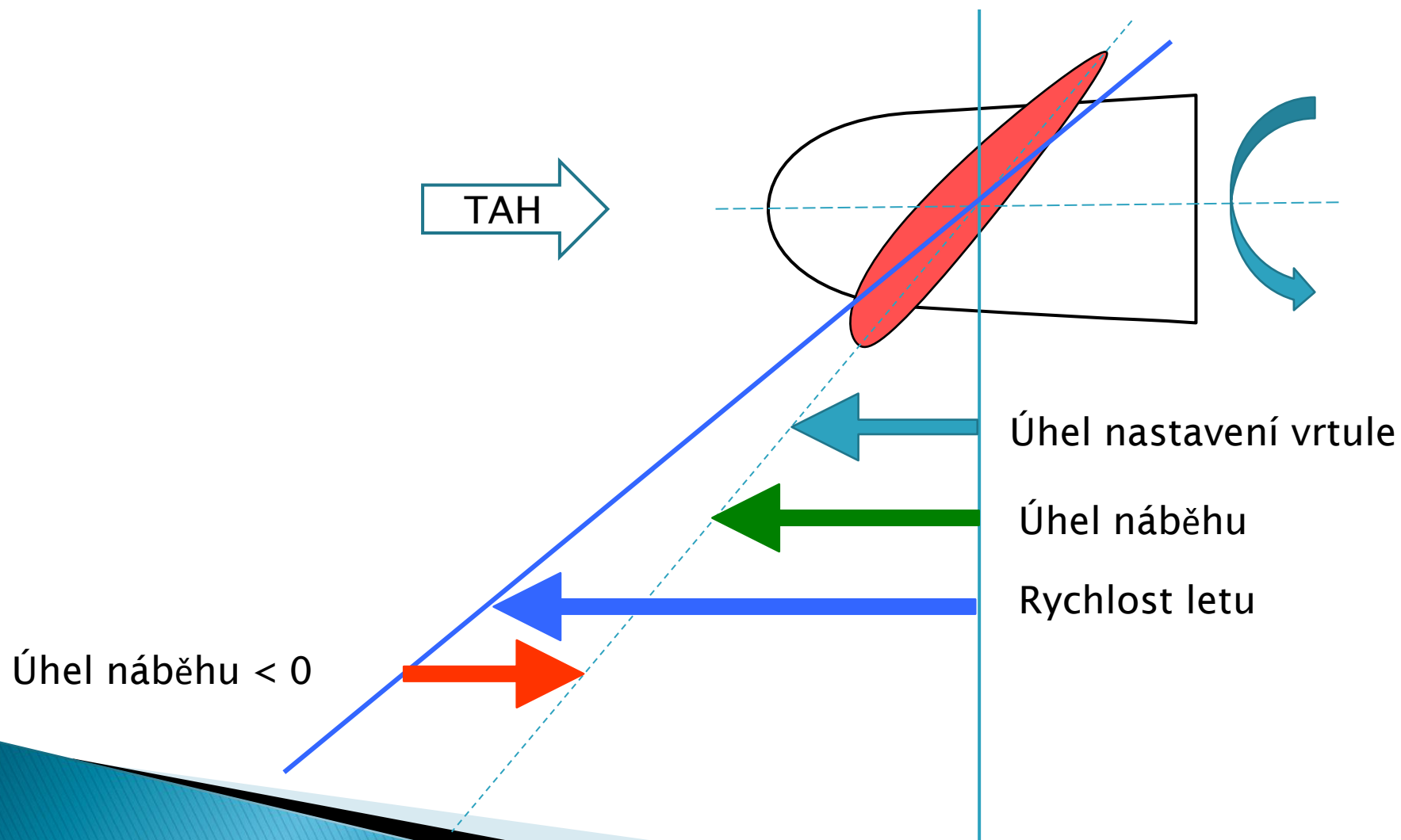
Režim nulového tahu



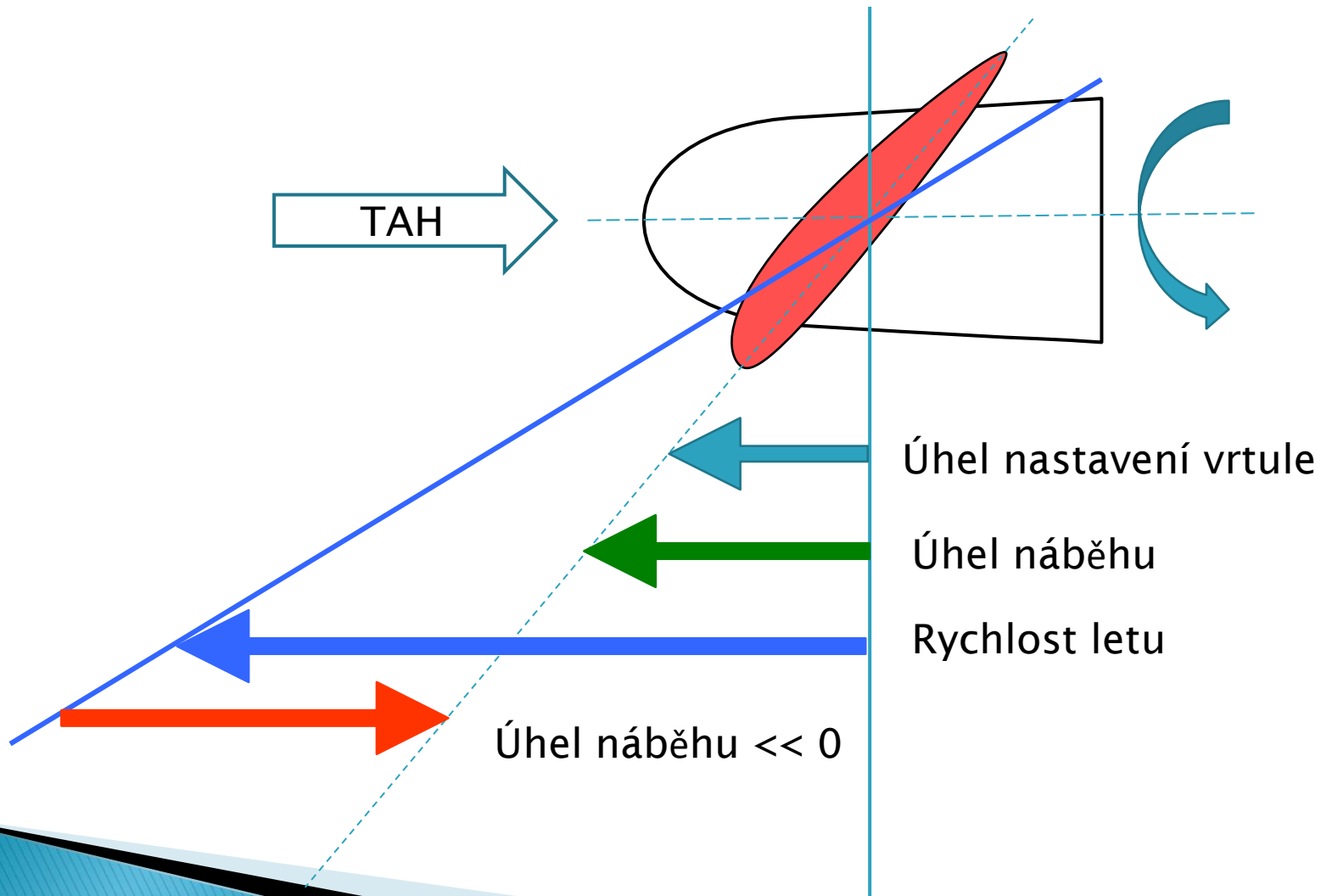
Režim brždění



Režim autorotace

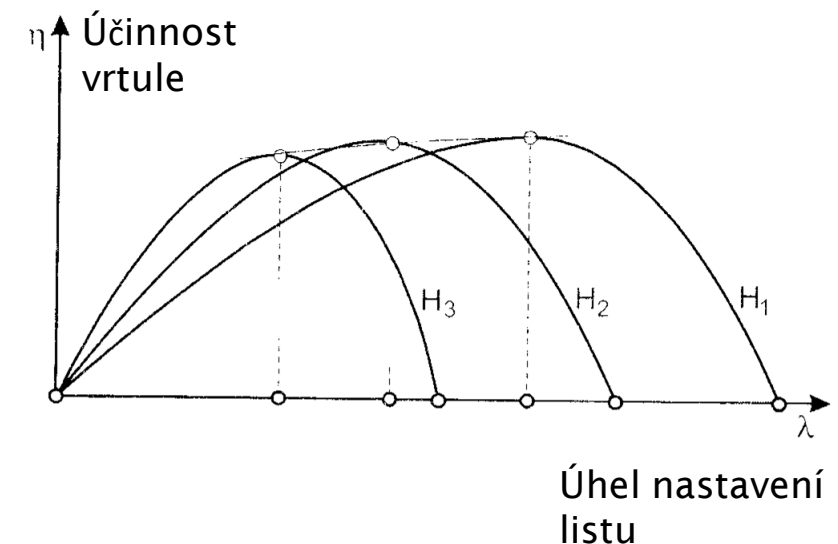


Režim mlýnku



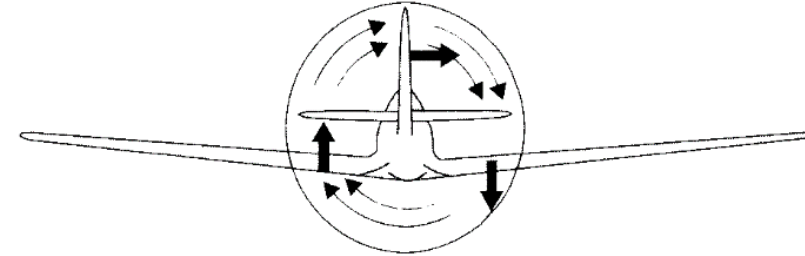
Pevná a stavitelná vrtule

- ▶ Pevná
 - Efektivně pracují při jedné rychlosti
- ▶ Stavitelná
 - Na zemi
 - Pouze při vypnutém motoru
 - Za letu
 - Vrtule stálých otáček
 - Automatické nastavování

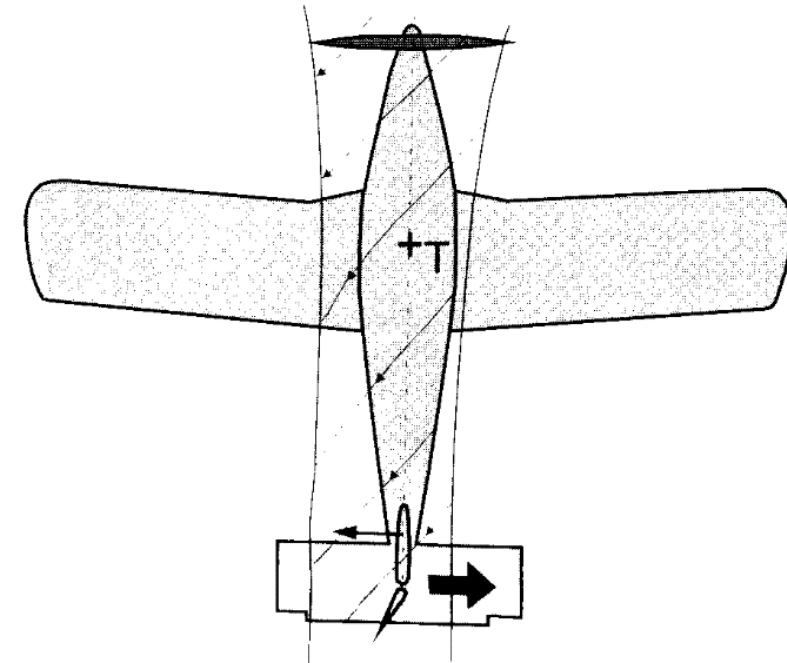


Vliv vrtule na letadlo

- ▶ Gyroskopický moment
- ▶ Reakční moment vrtule
 - Pravotočivá vrtule kloní letadlo doleva
- ▶ Zkroucení vrtulového proudu

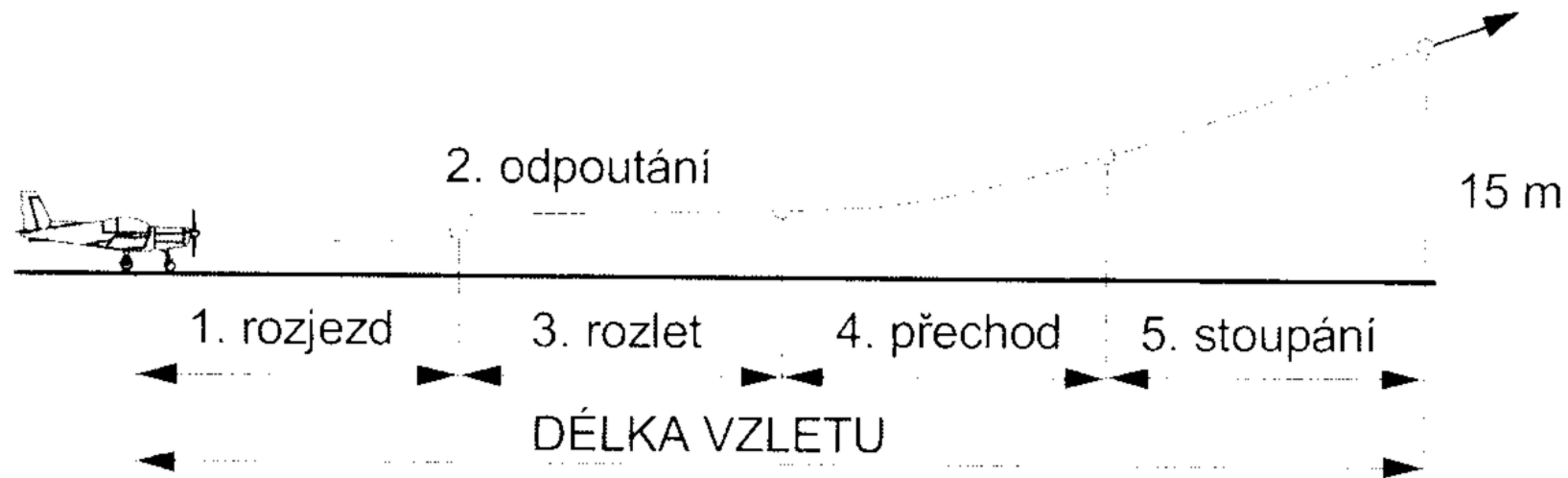


Obr. 72. Změna úhlu náběhu kořenových částí křídel.

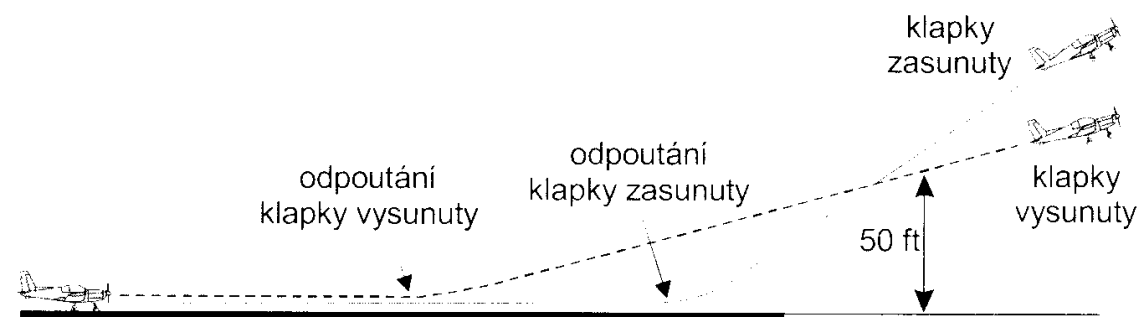
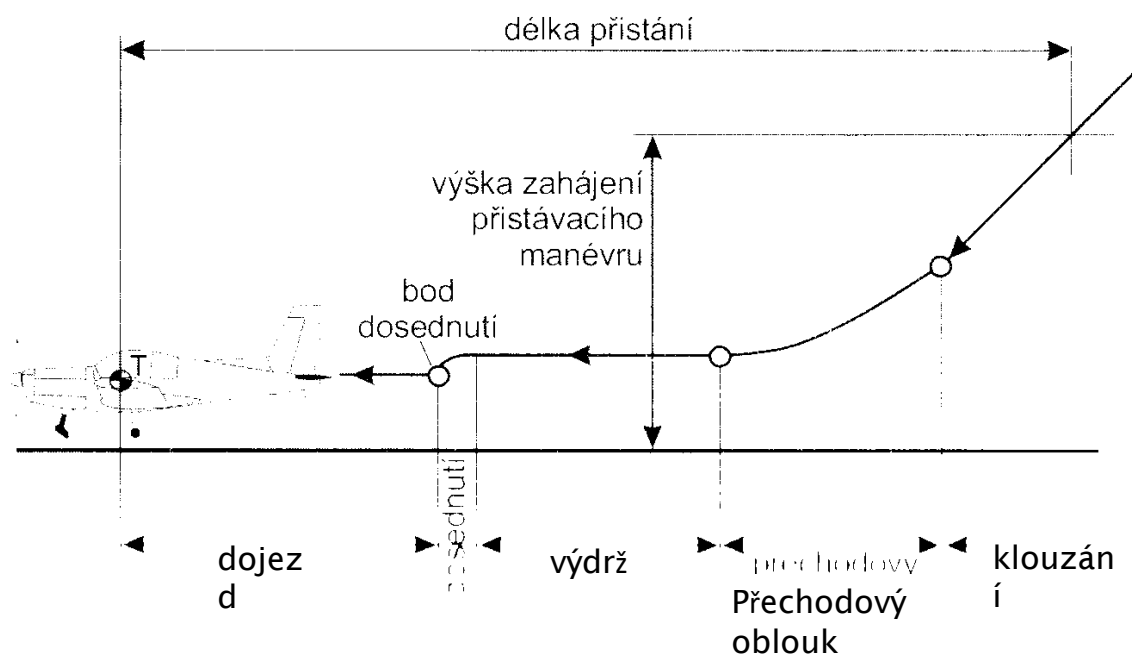


Jednotlivé fáze vzletu a přistání

- ▶ Rozjezd – směr, vylučování větru
- ▶ Zvednutí předního kola – ne moc brzy
- ▶ Odpoutání – zvyšování rychlosti
- ▶ Přejchod do stoupání – rychlost stoupání
- ▶ Stoupání



Jednotlivé fáze vzletu a přistání



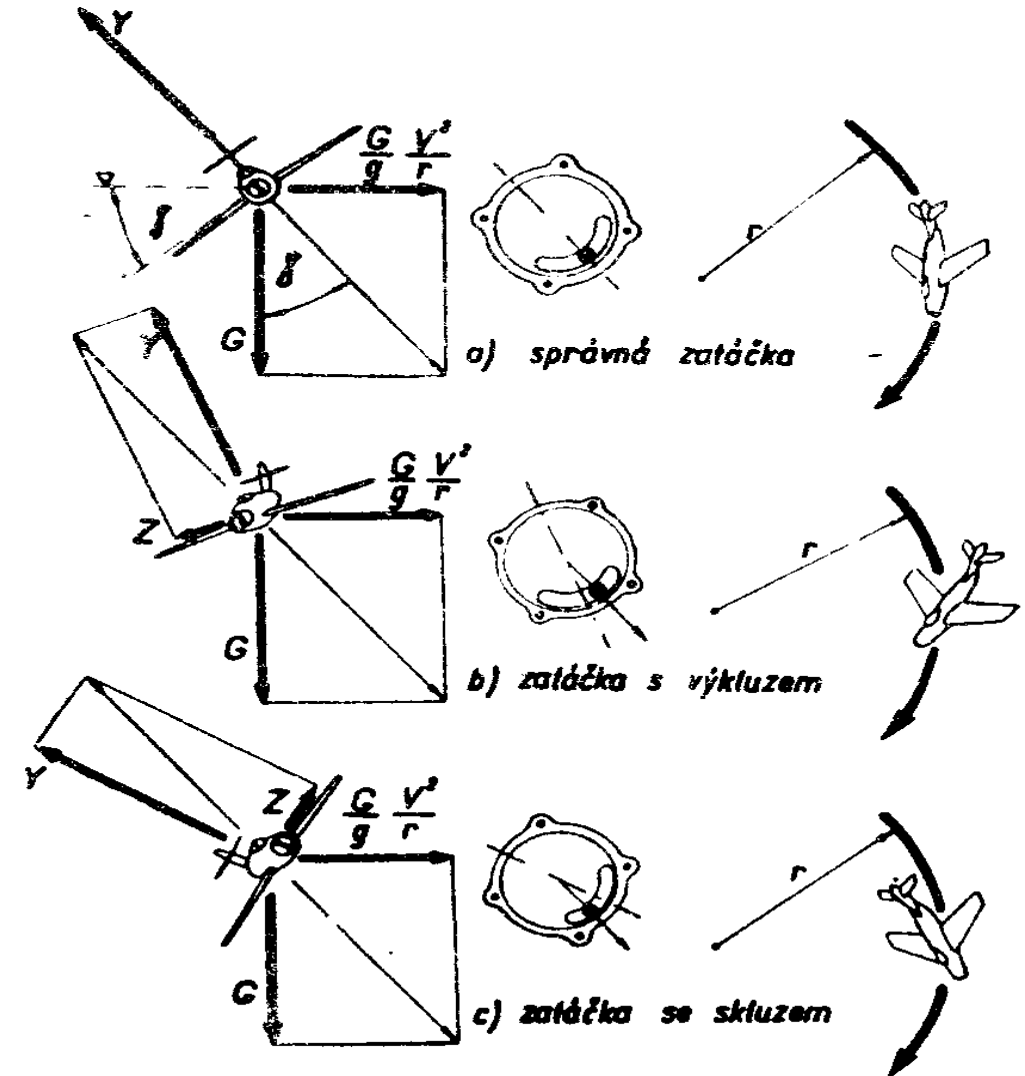
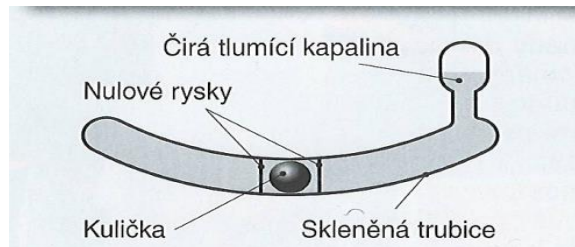
Vliv vzletové hmotnosti, nadmořské výšky, teploty, směru větru na výkony letounu a potřebnou délku VPD

► Delší délka vzletu a přistání

- Větší hmotnost
- Vyšší nadmořská výška
- Vyšší teplota
- Zadní vítr
- Vysoká tráva
- Sníh, kaluže na dráze

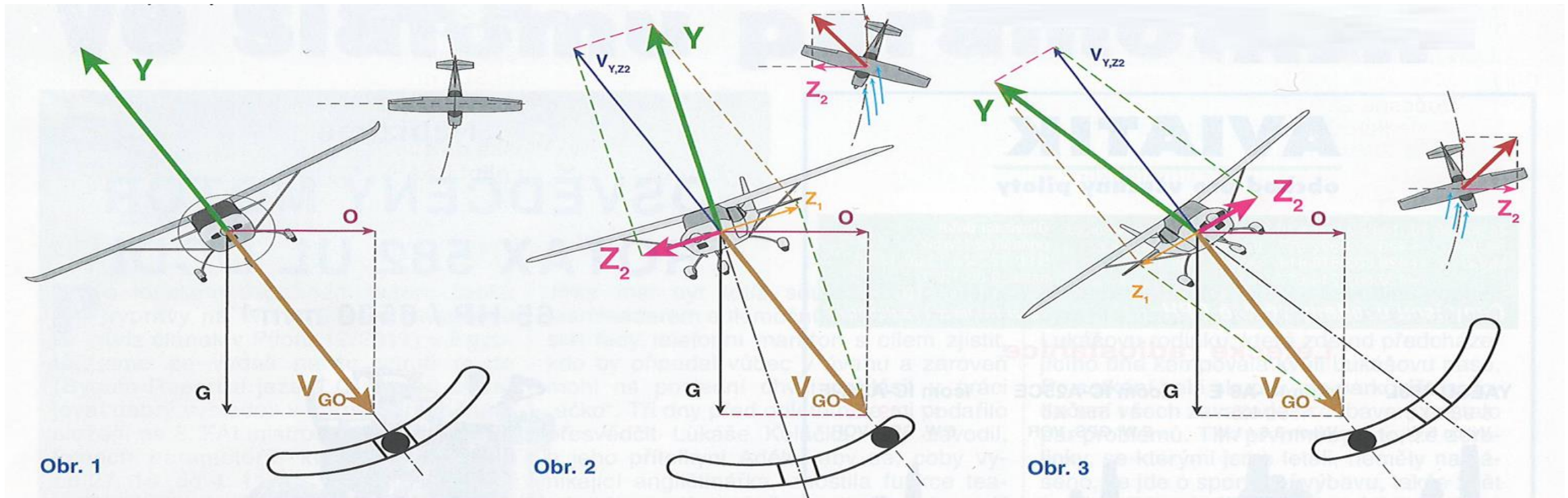
Rovnováha sil v ustálené horizontální zatačce

- Správná
- Výkluzová
- Skluzová
- Relativní sklonoměr – kulička

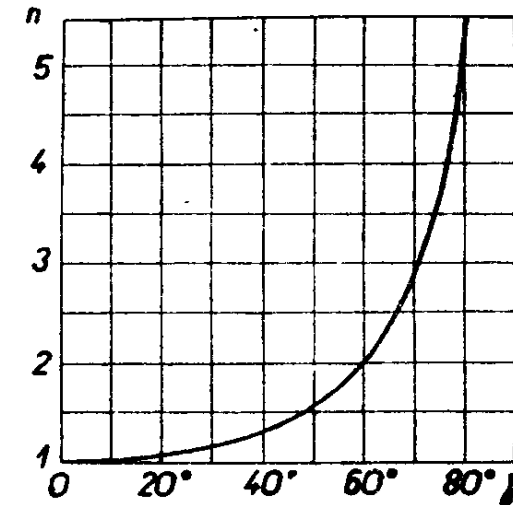
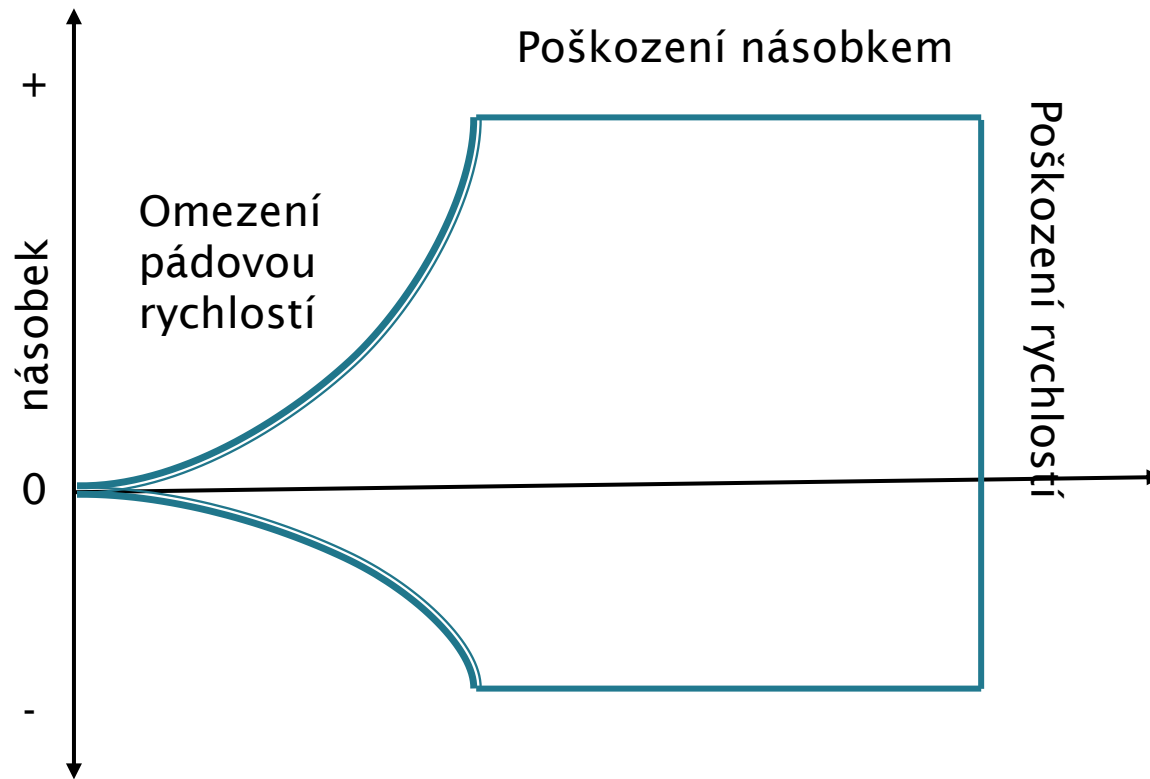


Rovnováha sil v ustálené horizontální zatačce

↗↘ Správná, výkluzová, skluzová zatačka



Násobek zatížení, letové obálky



Provozní a početní zatížení, součinitel bezpečnosti

- ▶ Provozní zatížení
 - Dané v letové příručce letadla
- ▶ Početní zatížení
 - Kdy dochází k poškození konstrukce za letu
- ▶ Součinitel bezpečnosti
 - Rozdíl mezi početním a provozním zatížením
 - Zpravidla 1,5

LAA Aerodynamika

- ▶ https://www.youtube.com/watch?v=rC_PpLaxhv4

Technika pilotáže v jednotlivých režimech letu, zábrana pádu, max. rychlost, skluz, vývrtka, spirála

- ▶ V další teoretické přípravě před jednotlivými cvičeními podle konkrétního typu letadla pro výcvik.

Testy LAA

- ▶ <https://zkouseni.laacr.cz/Zkouseni/index.html?page=volnytest>