

Aerodinamika

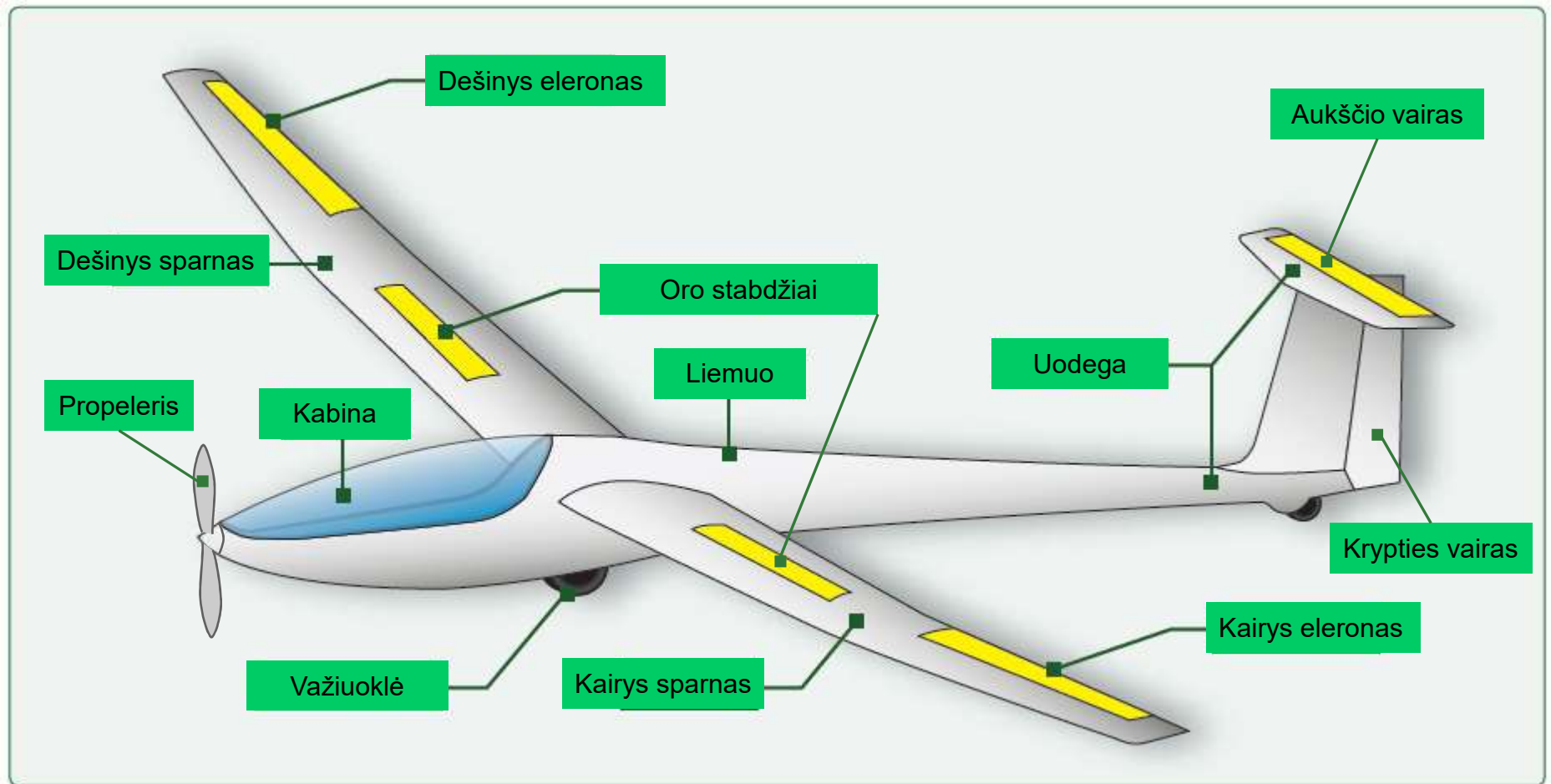
Skrydžio dinamika

E. Lasauskas

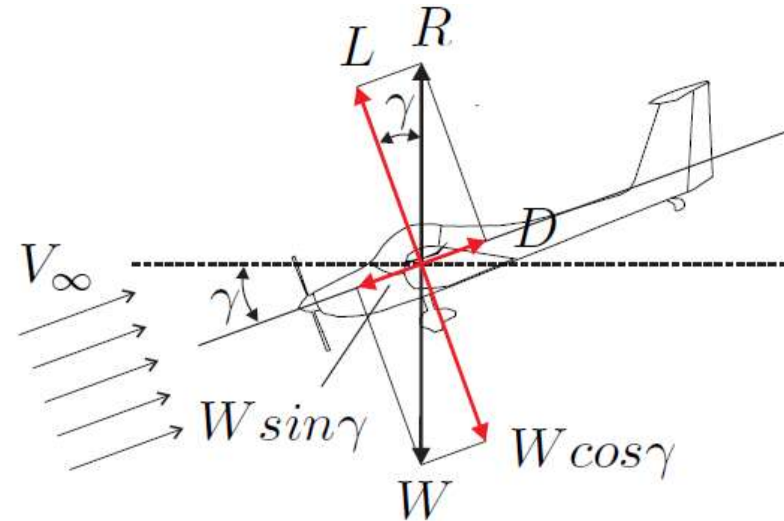
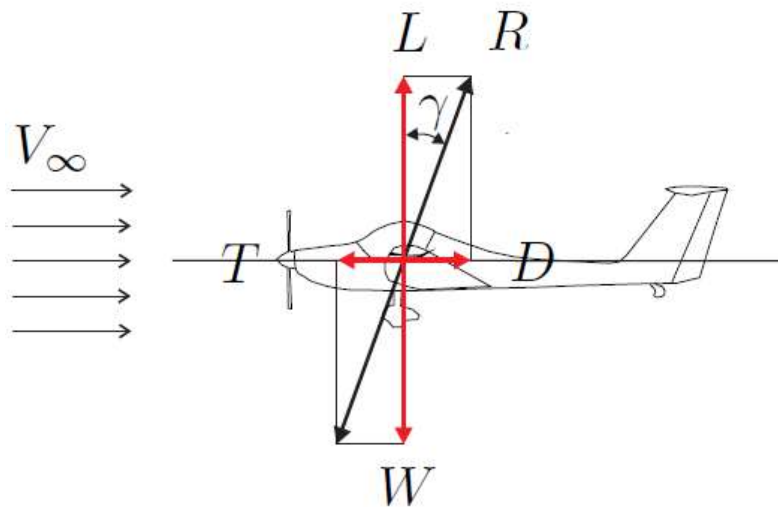
Įvadas

- Motosklandytuvo elementai
- Pagrindinės jėgos skrydyje
- Pagrindiniai parametrai
- Aerodinamikos apibrėžimas
- Dydžiai ir vienetai
- Niutono dėsniai

Motosklandytuvo elementai



Pagrindinės jėgos ir parametrai skrydyje



V_∞ – laisvo srauto greitis, reliatyvus greitis;

γ – trajektorijos polinkio kampas;

R – pilnoji aerodinaminė jėga;

L – keliamoji jėga;

D – pasipriešinimo jėga;

T – traukos jėga;

C_L – keliamosios jėgos koeficientas;

C_D – pasipriešinimo koeficientas;

ρ – oro tankis;

S – sparno plotas;

α – atakos kampas;

$$L = C_L \frac{\rho V_\infty^2}{2} S \quad D = C_D \frac{\rho V_\infty^2}{2} S$$

Seni
žymėjimai

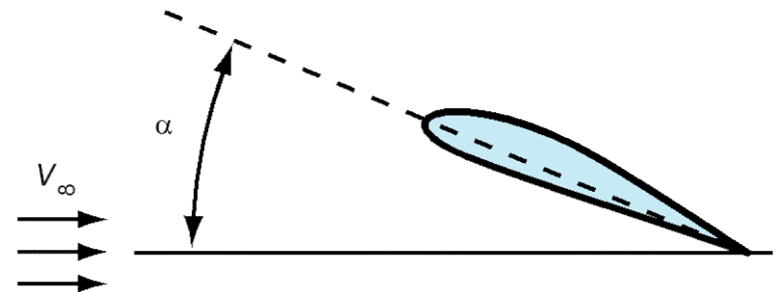
$Y=L$

$C_y=C_L$

$X=D$

$C_x=C_D$

$G=W$



Aerodinamika

Mokslas apie oro masės judėjimą ir aerodinamines jėgas, kurios veikia kūnus oro sraute.

Aerodinaminės jėgos priklauso nuo:

- Oro savybių;
- Orlaivio formos ir dydžio;
- Srauto greičio ir orlaivio padėties sraute.

$$L = C_L \frac{\rho V_{\infty}^2}{2} S$$

Dydžiai ir vienetai

SI vienetai

- Masė (kg)
- Ilgis (m)
- Laikas (s)
- Temperatūra (K)

Išvestiniai vienetai

- Greitis (m/s)
- Pagreitis (m/s²)
- Jėga, sunkis (N)
- Galia (W)
- Tankis (kg/m³)
- Slėgis (Pa)

Niutono dėsniai

- Pirmasis Niutono (inercijos) dėsnis

Jei kūno nepaveikia išorinės jėgos (arba jų poveikiai atsveria vienas kitą, tai kūnas išlaiko turėtą greitį (arba rimtį, jei greičio neturėjo)

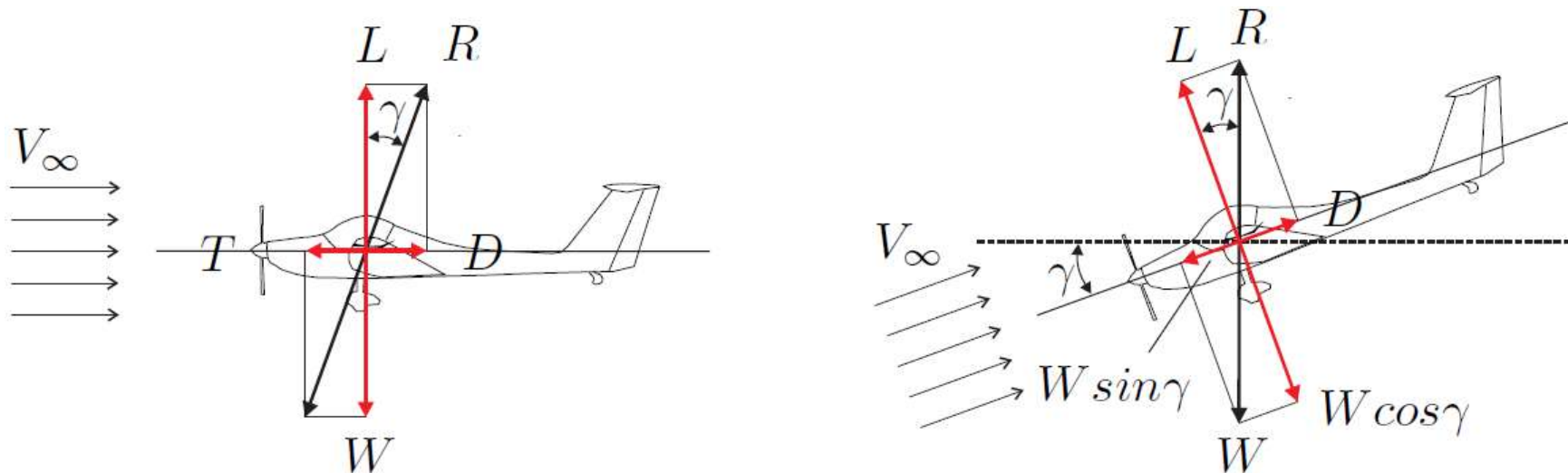
- Antrasis Niutono (poveikio) dėsnis

Inercinėje atskaitos sistemoje kūno judesio kiekio kitimo sparta yra proporcinga veikiančiai jėgai. $a = F/m$

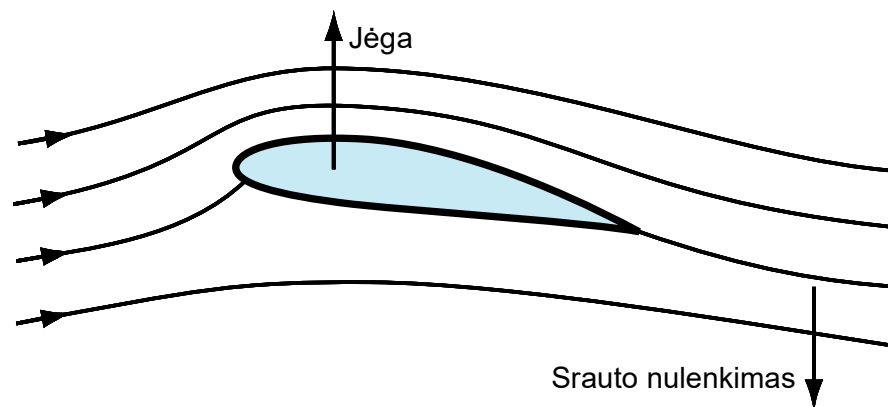
- Trečiasis Niutono (veiksmo ir atoveikio) dėsnis

jei vienas kūnas kokio nors dydžio jėga paveikia kitą kūną, tai tas kitas kūnas pirmąjį taip pat paveikia tokio pat dydžio priešingos krypties jėga

Pirmasis Niutono dėsnis

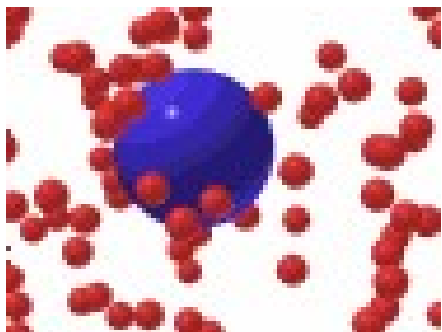


Trečiasis Niutono dėsnis



Fizinės oro savybės

- Slėgis
 - Temperatūra
 - Tankis
 - Klampumas
 - Spūdumas
-
- Standartinė atmosfera
 - Barometrinis aukščio matavimas



Oro slėgis

- Statinis slėgis

- Ramiamė ore
- Oro sraute

$$p = dF/dS$$

$$p = F/S$$

- Kas 5500 m mažėja dvigubai

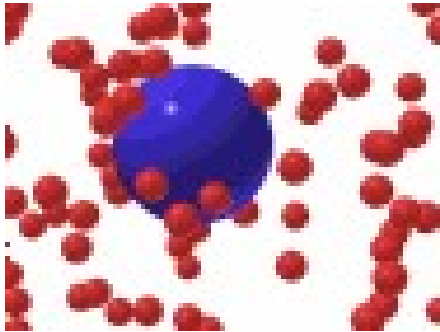
- Matuojamas manometrais

- Matavimo vienetai, Pa

$$Pa = N/m^2$$

- 1 mm Hg = 133,3224 Pa
- 1 atm = 101 325 Pa = 1013,25 hPa = 760 mm Hg
- 1 bar = 10⁵ Pa

Oro temperatūra



Standartinėse sąlygose

Vidutinis molekulių greitis: 460 m/s = 1656 km/val.

Vidutinis atstumas tarp susidūrimų: 0.000066332 mm

Molekulių skaičius viename cm³: 2,55*10¹⁹

Aerodinamikoje oras – vientisa terpė

- Molekulių kinetinės energijos išraiška
- Temperatūra t matuojama laipsniais, Celsijaus skalėje
- Absoliuti temperatūra T , Kelvino skalėje

$$T = t + 273,16$$

Oro tankis

- Oro tankis = tūrio vieneto masė (kg/m^3)
- Oro tankis – apibūdina oro inertiškumą
- Kai $t = 15^\circ\text{C}$, $p = 101\,325\text{ Pa} = 760\text{ mm Hg}$
 $\rho = 1,225\text{ kg/m}^3$
- Oro tankis priklauso nuo slėgio ir temperatūros
- Dujų būvio lygtis $\rho = p/(RT)$
- Oro konstanta $R = 287,05\text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

Drėgmės įtaka oro tankiui

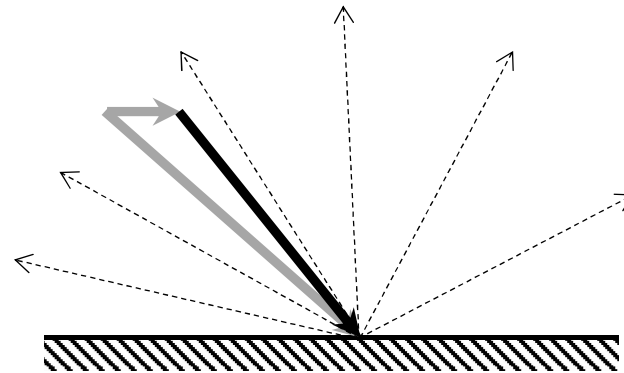
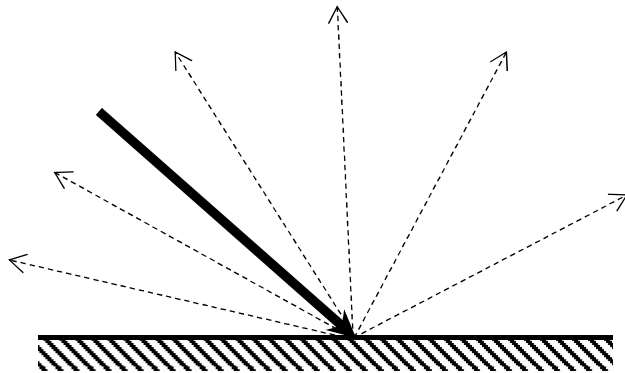
- Oro tankis “standartinėse sąlygose” $1,225 \text{ kg/m}^3$
- Vandens garų tankis “standartinėse sąlygose” $0,760 \text{ kg/m}^3$
- Kuo daugiau drėgmės ore, tuo jo tankis yra mažesnis

Oro tankio ir temperatūros įtaka vidaus degimo varikliams

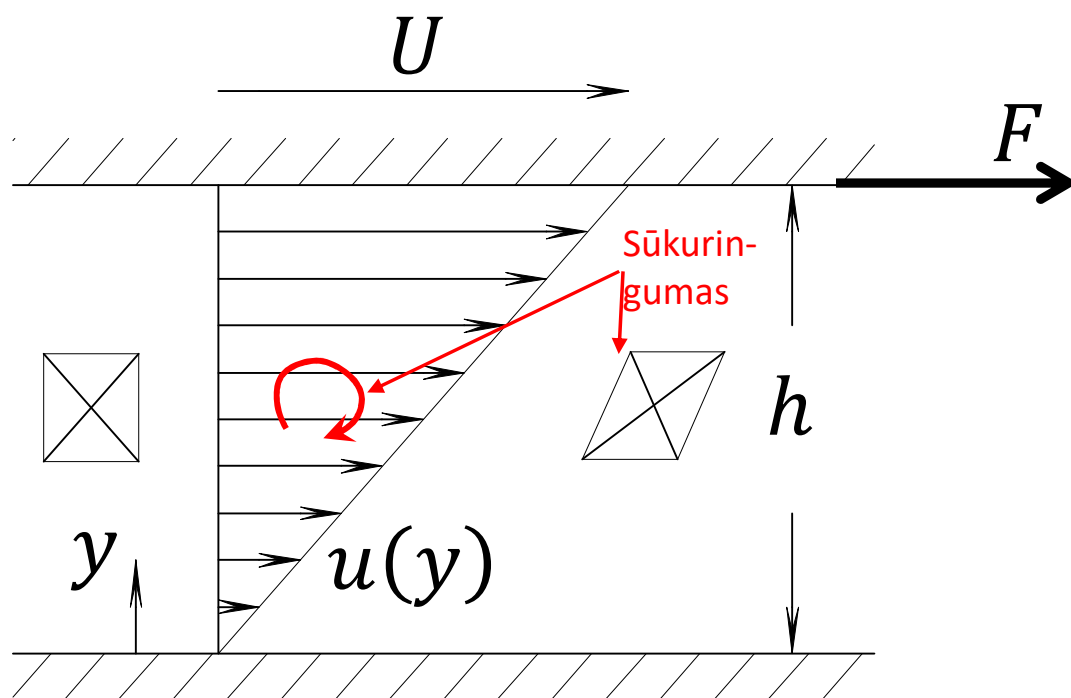
- Mažas oro tankis mažina variklio galią
- Aukšta oro temperatūra mažina variklio galią

Oro klampumas

- Apibūdina vidinę oro trintį
 - Pasipriešinimas gretimų oro sluoksnių poslinkiui
 - Prie paviršiaus greitis sumažėja iki nulio
- Sūkurių atsiradimo priežastis



Klumpumo koeficientas



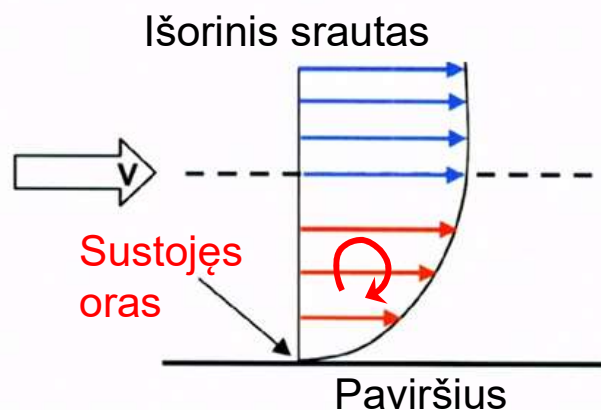
Šlyties
koeficientas $\tau = \frac{F}{S}$

Greičio
gradientas $\frac{du}{dy} = \frac{U}{h}$

$$\tau \sim \frac{du}{dy} \quad \tau = \mu \frac{du}{dy}$$

Dinaminis klumpumo koeficientas μ

Kinematinis kl. koeficientas $\nu = \frac{\mu}{\rho}$



KLAMPIŲ SRAUTŲ PANAŠUMAS

- Klampių srautų panašumo kriterijus

$$\text{Reinoldso skaičius } Re = \frac{\text{dinaminės jėgos}}{\text{klampumo jėgos}} = \frac{V \cdot c}{\nu} \approx 10^6$$

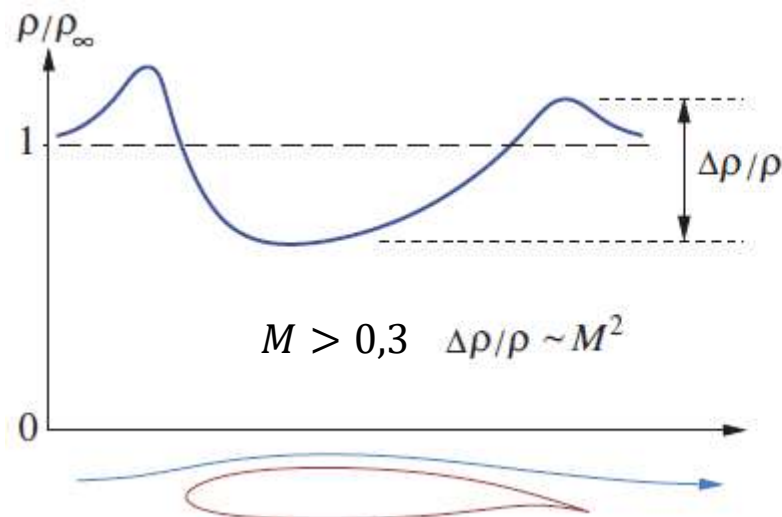
- Sklandytuvų ir lengvų lėktuvų sparnų Reinoldso skaičius svyruoja apytiksliai nuo $0,5 \cdot 10^6$ iki $3 \cdot 10^6$

Oro spūdumas

Spūdumas yra kūno savybė susispausti, veikiant išorinėms slėgio jėgoms.

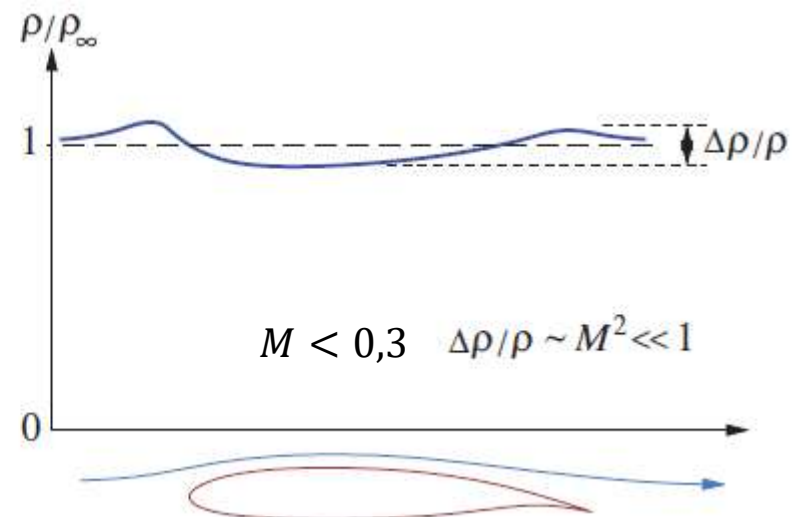
$$M = \frac{\text{srauto greitis}}{\text{garso greitis}} = \frac{V}{a}$$

Kai $M < 0.3$ orą galima nagrinėti, kaip nespūdų: $\rho = \text{const.}$



$M > 0,3 \quad \Delta\rho/\rho \sim M^2$

(M. Drela)



$M < 0,3 \quad \Delta\rho/\rho \sim M^2 \ll 1$

Standartinė atmosfera

1964 ICAO Standard Atmosphere

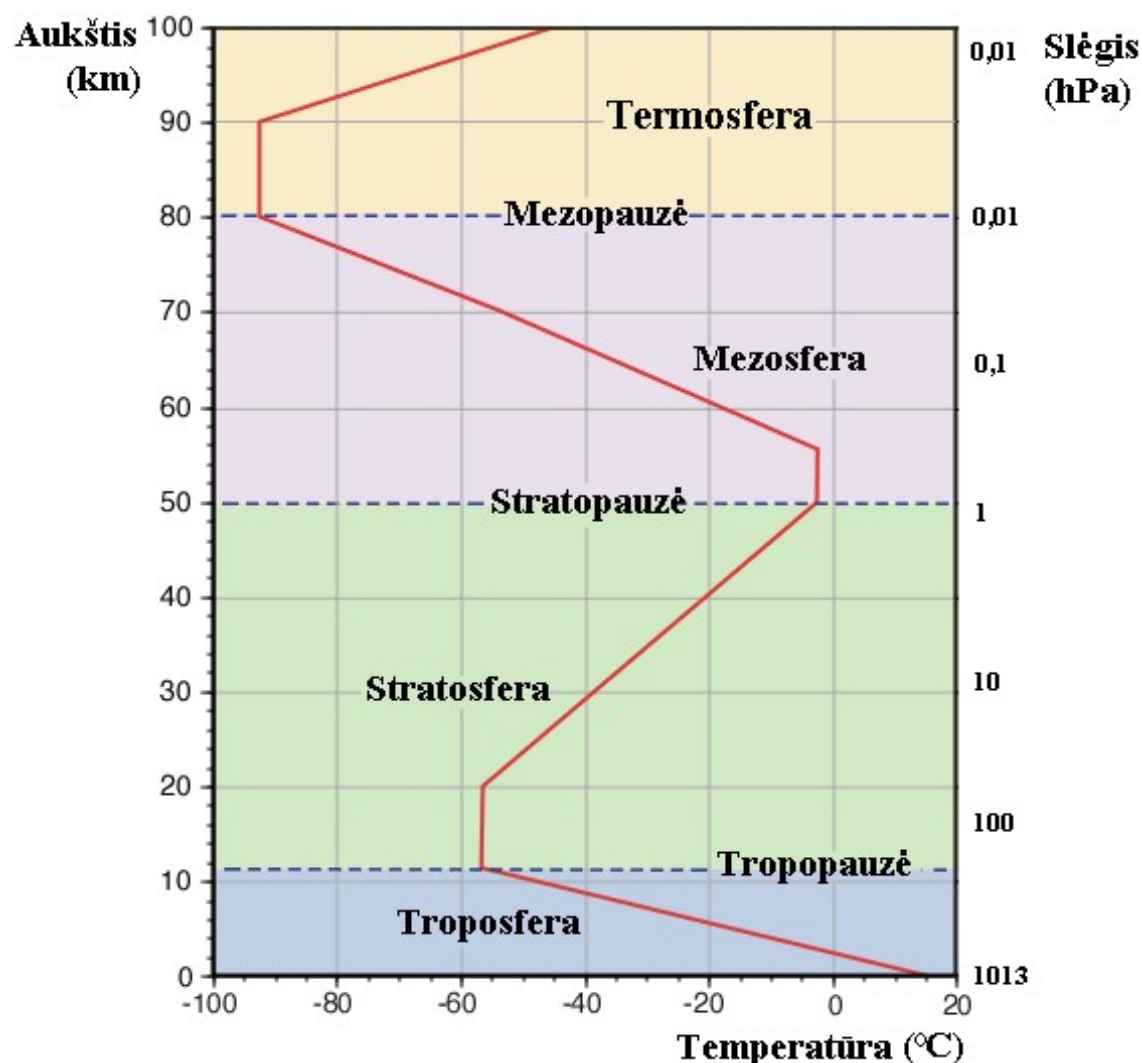
- Aviacijos prietaisų kalibravimui
- Skrydžio charakteristikų palyginimui vienodomis sąlygomis
- Pagal vidutinius parametrus
- Parametrų kitimas kintant aukščiui apskaičiuojamas pagal dujų dėsnius
- Internete yra daug Standartinės atmosferos kalkuliatorių, pvz.:

<http://www.aerospacweb.org/design/scripts/atmosphere/>

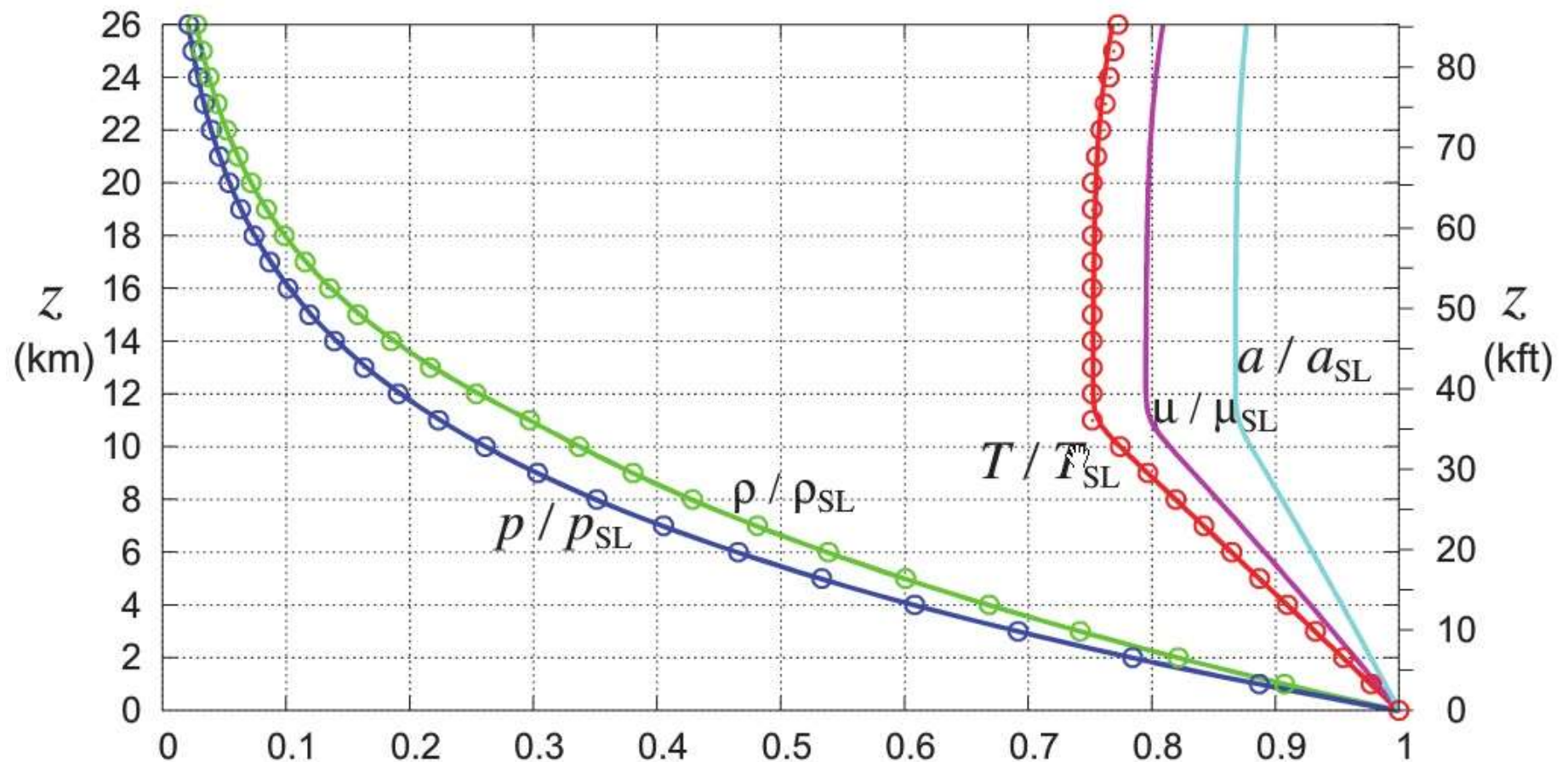
Žemės atmosfera

Sudėtis (pagal tūrį)

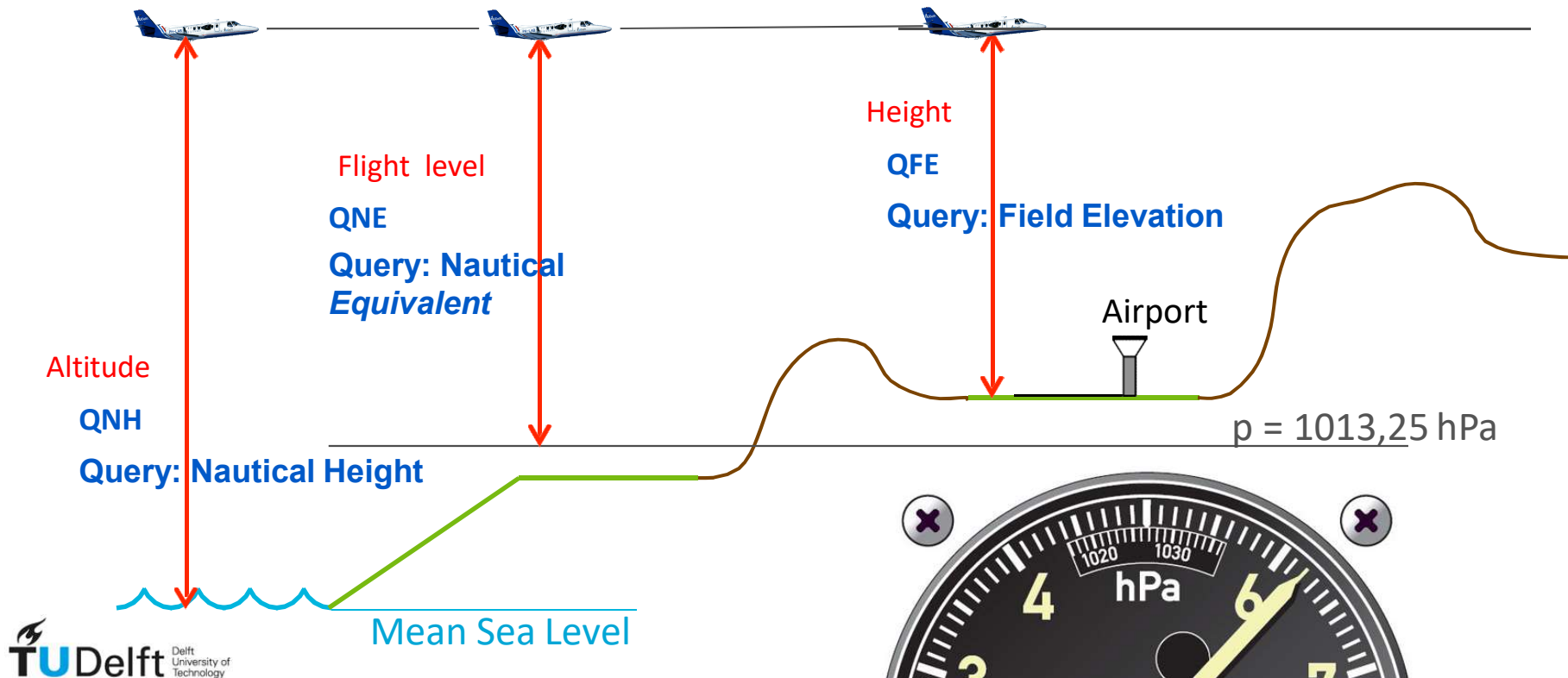
- 78,08 % azoto
- 20,95 % deguonies
- 0,93 % argono
- 0,247 % v. garų
- 0,038 % anglies dioksido, helio ir kitų inertinių dujų, vandenilio, lakių teršalų pėdsakai



Oro savybės įvairiuose aukščiuose



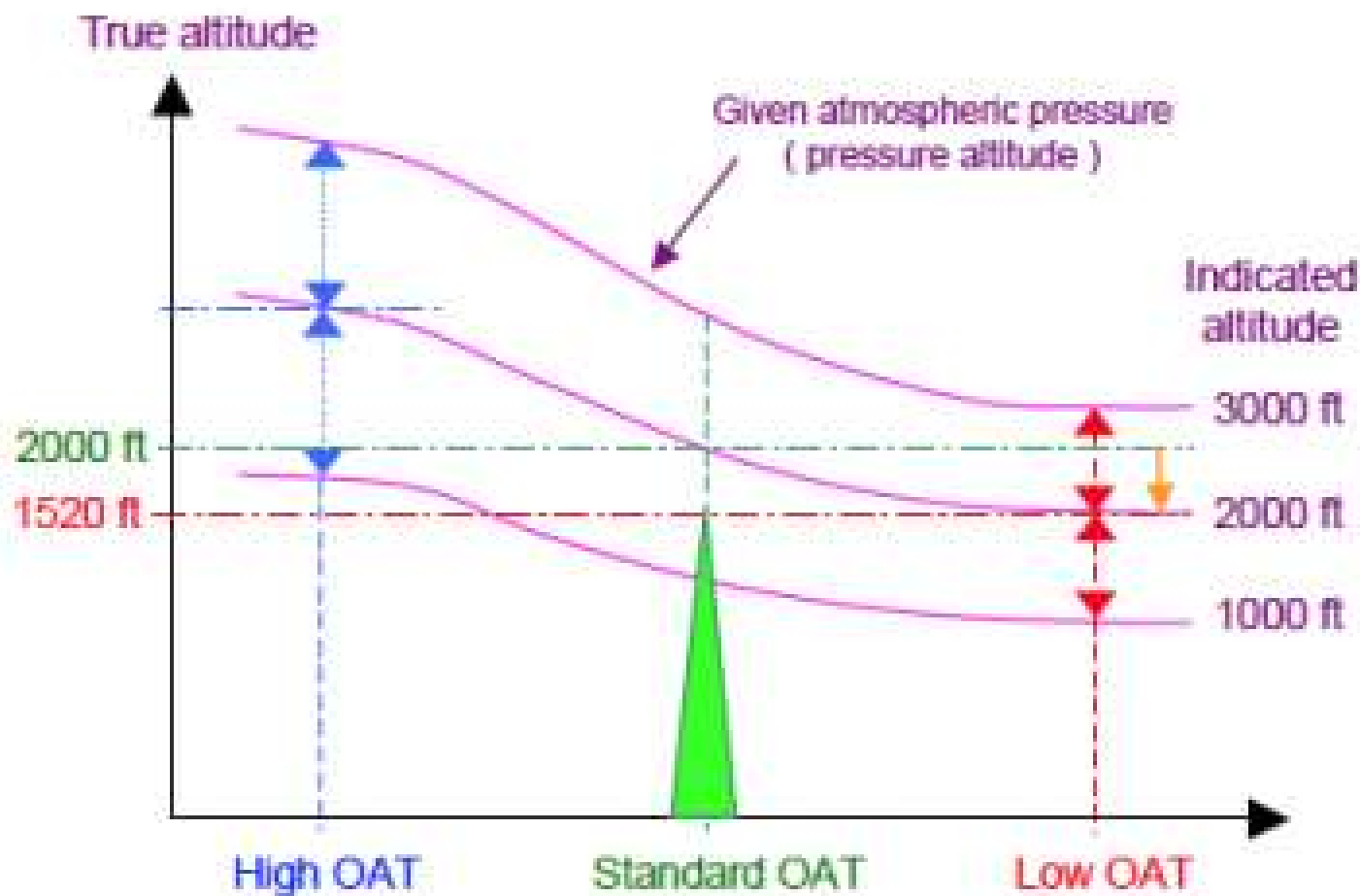
Aukščio matavimas



Statinis slėgis $\Rightarrow$



Oro temperatūros įtaka aukščiui matavimui



ICAO Flight Procedures

Vertės, kurias pilotas turi pridėti prie minimalaus aukščio virš kliūtis (m)

Temperatūra
aerodrome

Table III-1-4-1 a). Values to be added by the pilot to minimum promulgated heights/altitudes (m)

Aukščio atsarga virš kliūtis

Papildomas aukštis dėl temperatūros

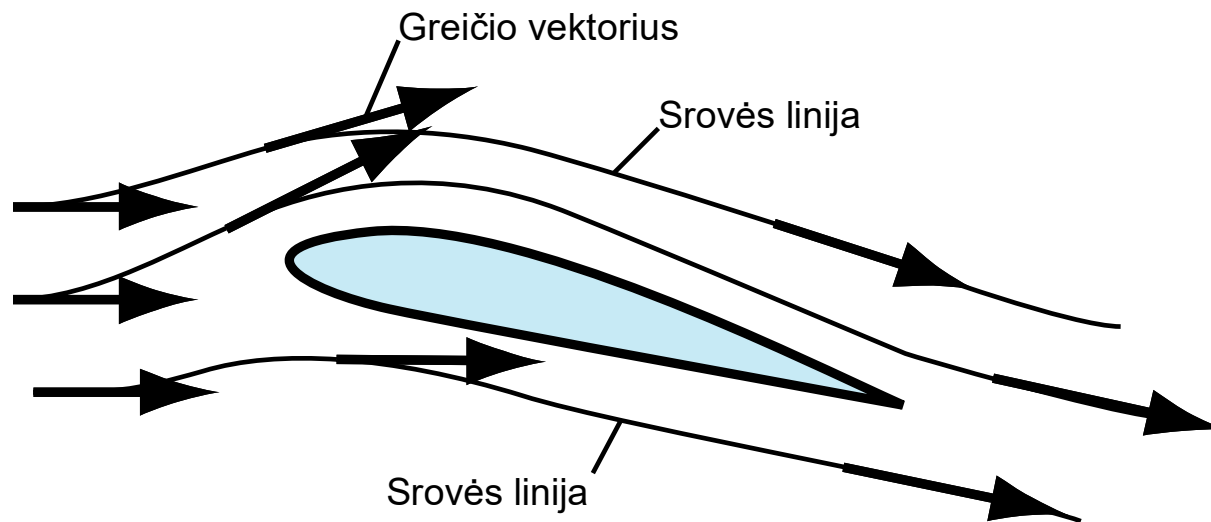
<i>Aerodrome temperature (°C)</i>	<i>Height above the elevation of the altimeter setting source (metres)</i>													
	60	90	120	150	180	210	240	270	300	450	600	900	1 200	1 500
0	5	5	10	10	10	15	15	15	20	25	35	50	70	85
-10	10	10	15	15	25	20	25	30	30	45	60	90	120	150
-20	10	15	20	25	25	30	35	40	45	65	85	130	170	215
-30	15	20	25	30	35	40	45	55	60	85	115	170	230	285
-40	15	25	30	40	45	50	60	65	75	110	145	220	290	365
-50	20	30	40	45	55	65	75	80	90	135	180	270	360	450

Srautų dėsniai

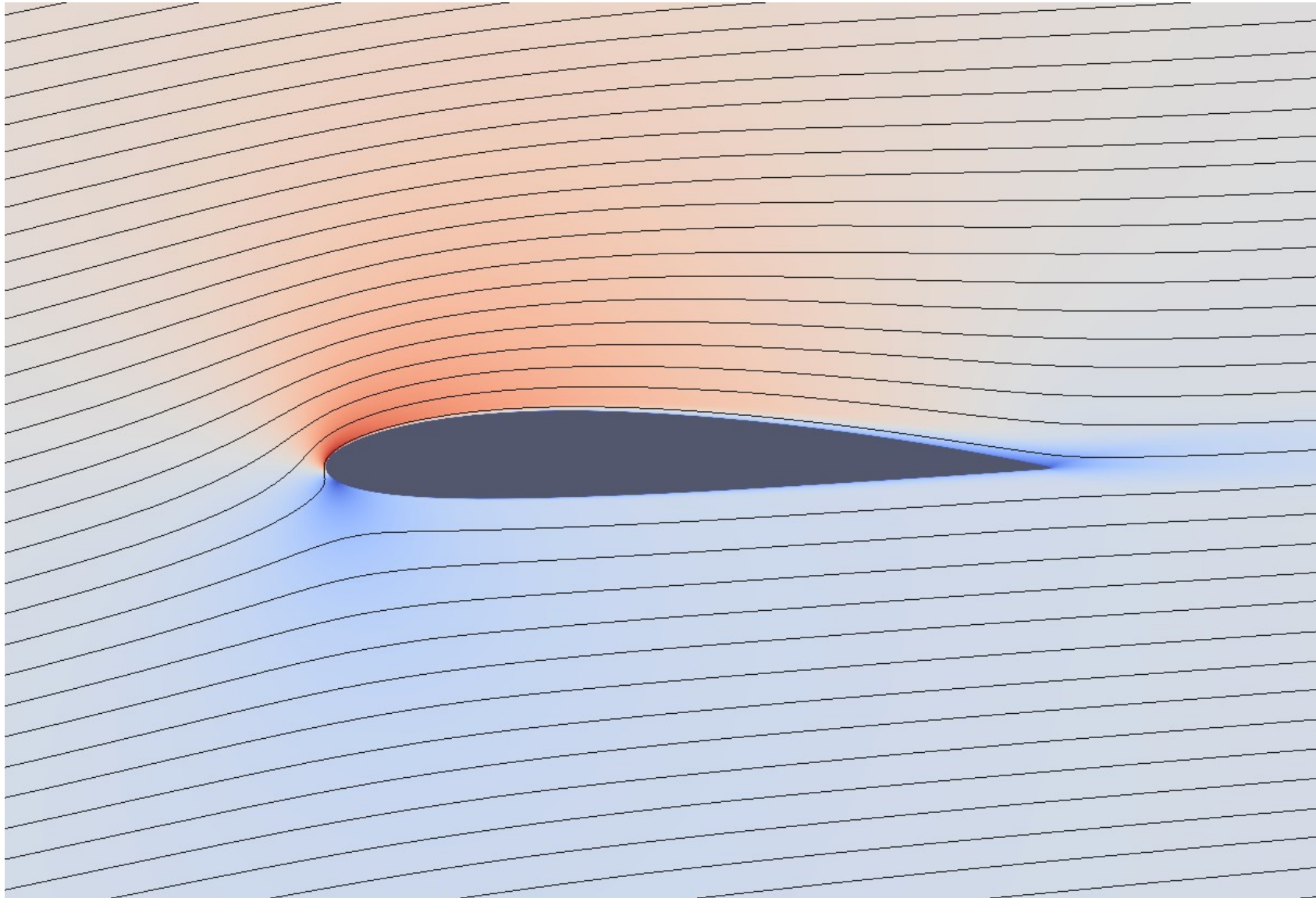
- Srovės linija;
- Statinis ir dinaminis slėgis;
- Vientisumo dėsnis;
- Bernulio lygtis;
- Skrydžio greičio matavimas.

ORO SRAUTAS

- Oro masės kryptinis judėjimas vadinamas oro srautu
- *Nusistojusiu (stacionariu) oro srautu* vadinsime srautą, kuriame oro dalelių greitis ir kryptis išlieka pastovi
- *Srovės linija* – linija, kurios kiekviename taške greičio vektorius yra šios linijos liestinė. Srovės linija sutampa su dalelių trajektorija nusistojusiame sraute



ORO SRAUTŲ VAIZDAVIMAS



Statinis ir dinaminis slėgis

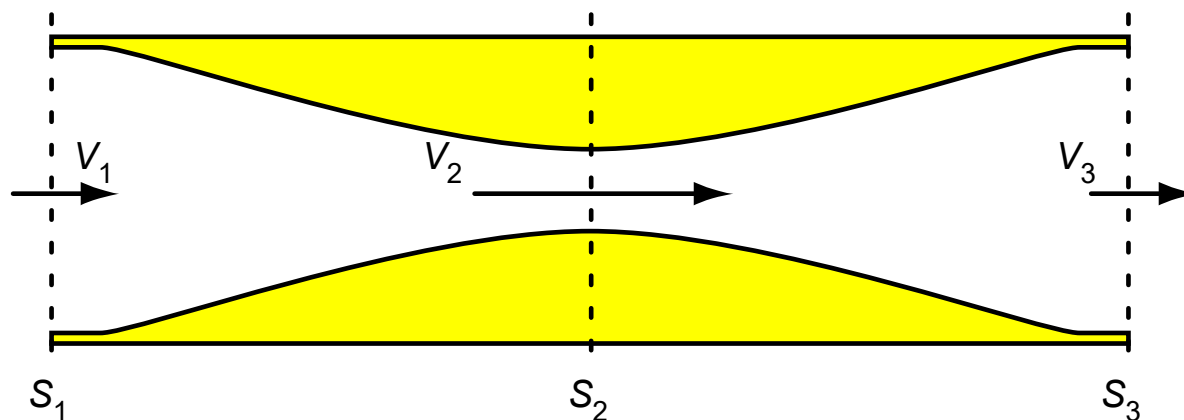
- Statinis slėgis (p)
 - Oro sraute statiniu slėgiu vadinamas slėgis, veikiantis statmenai į paviršių, lygiagretų su oro srautu.
 - Statinis slėgis apibūdina srauto potencinę energiją.
- Dinaminis slėgis (q)
 - Apibūdina oro srauto kinetinę energiją
 - Dinaminis slėgis yra vienas iš pagrindinių parametrų, nuo kurių priklauso aerodinaminės jėgos
 - Dinaminis slėgis proporcingas oro tankiui ir greičio kvadratui $q = \frac{\rho V^2}{2}$
- Pilnasis slėgis $p_0 = p + q$

SRAUTO JUDĖJIMO DĖSNIAI

- *Vientisumo dėsnis* išreiškia masės tvermės dėsnį.
- *Bernulio lygtis* nusako dujų mechaninės energijos tvermės dėsnį (neklampiuose srautuose).

Vientisumo dėsnis

Išsivaizduokim srauto vamzdelį, kurio sienelės sudaro srovės linijų paviršius.



$$m_1 = m_2 = m_3$$

$$S_1 V_1 \rho_1 = S_2 V_2 \rho_2 = S_3 V_3 \rho_3$$

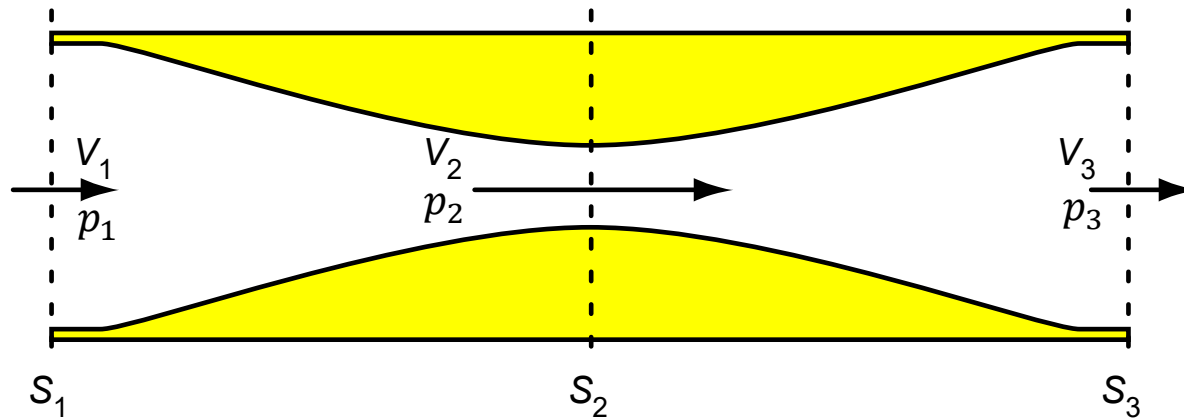
$$M < 0,3 \rightarrow \rho = \text{const.}$$

$$S_1 V_1 = S_2 V_2 = S_3 V_3$$

$$V_1 < V_2 > V_3$$

Išvada: srauto greičiai yra atvirkščiai proporcingi skerspjūvio plotams, t.y. mažėjant skerspjūvio plotui, srauto greitis didėja, ir atvirkščiai

Bernulio lygtis



$$V_1 < V_2 > V_3$$

$$p_{0_1} = p_{0_2} = p_{0_3}$$

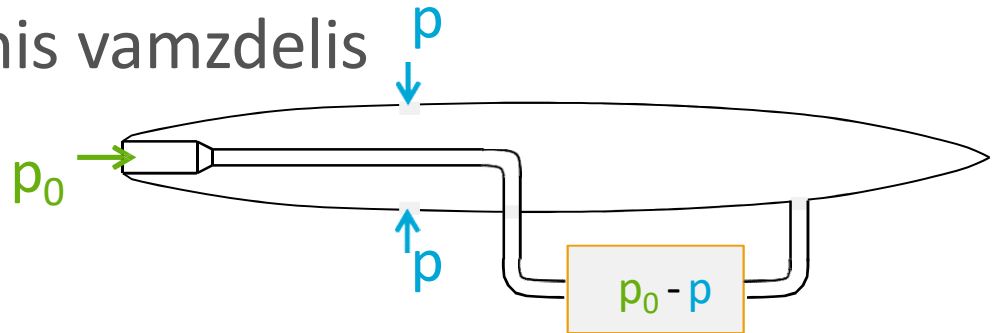
$$p_1 + \frac{\rho V_1^2}{2} = p_2 + \frac{\rho V_2^2}{2} = p_3 + \frac{\rho V_3^2}{2}$$

$$p_1 > p_2 < p_3$$

Išvada: kur oro srauto greitis didesnis – statinis slėgis yra mažesnis, ir atvirkščiai (neklampiname sraute).

Skrydžio greičio matavimas

Pito-statinis vamzdelis



Pilnasis slėgis

$$p_0 = p + q_\infty = p + \frac{\rho V_\infty^2}{2}$$

$$V = \sqrt{\frac{2(p_0 - p)}{\rho}}$$



V_{IAS}

Greičiai V_{IAS} , V_{CAS} , V_{EAS} , V_{TAS}

V_{IAS} ;

Prietaiso ir statinio bei pilnojo slėgio matavimo paklaidos

V_{CAS} ;

Spūdumo įtaka

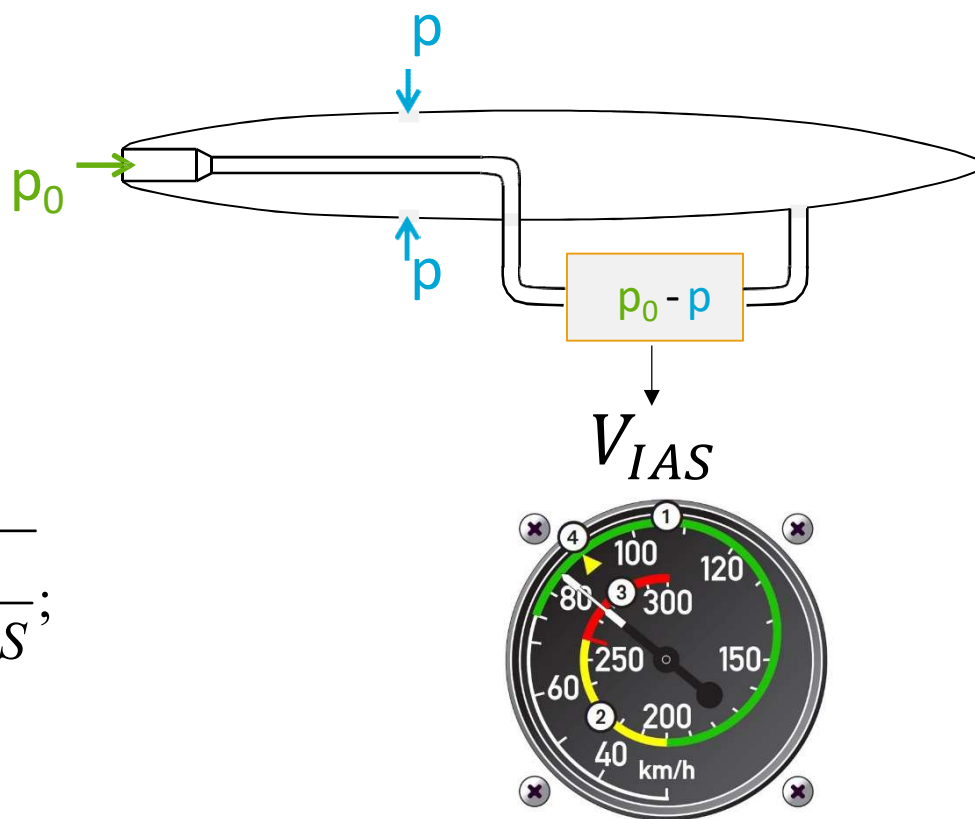
V_{EAS}

Tankio įtaka

V_{TAS}

$$V_{EAS} = \sqrt{\frac{2W}{\rho_0 C_L S}}; \quad V_{TAS} = \sqrt{\frac{2W}{\rho C_L S}};$$

$$V_{TAS} = \frac{V_{EAS}}{\sqrt{\sigma}}; \quad \sigma = \frac{\rho}{\rho_0}$$



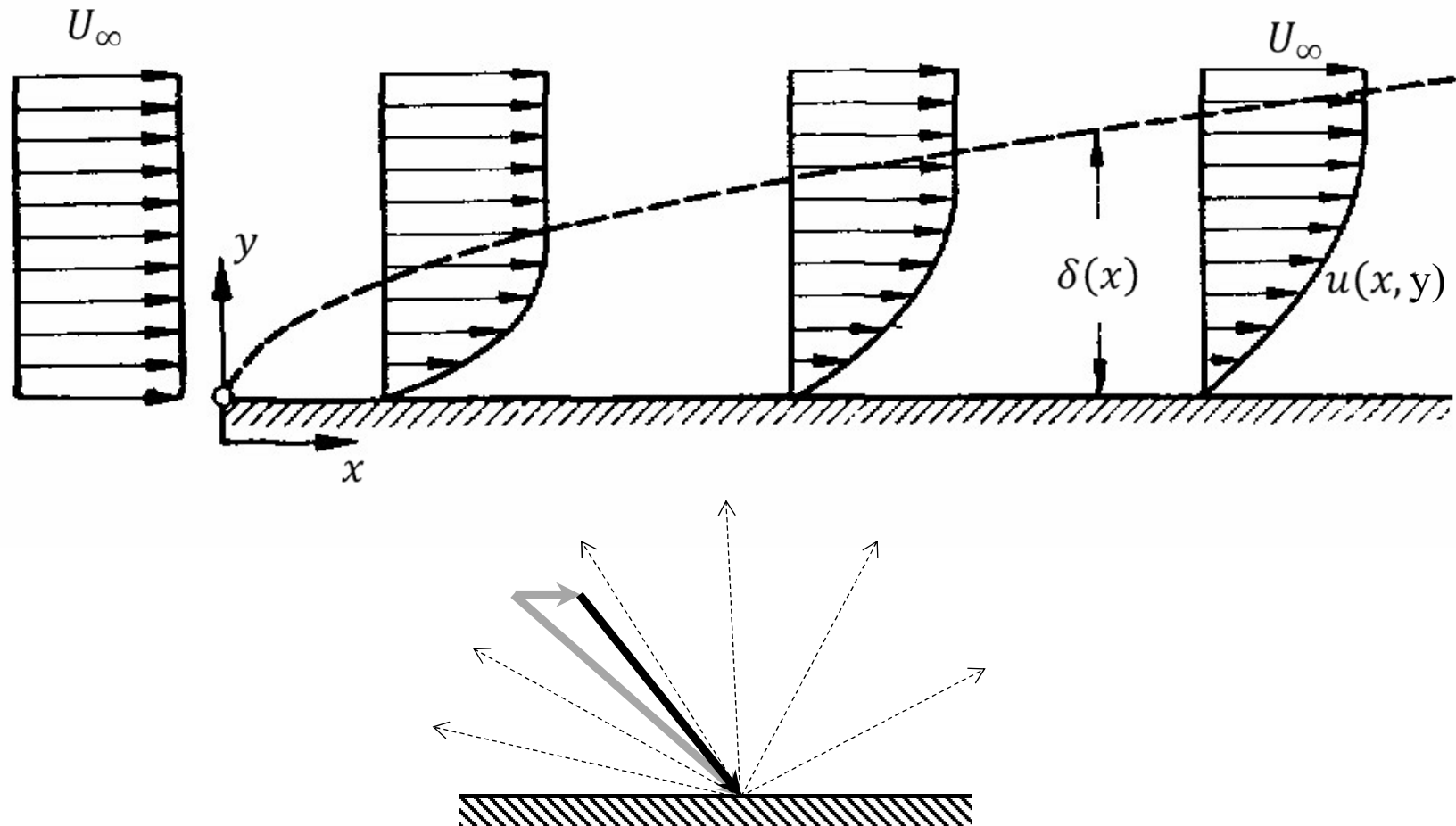
Pasienio sluoksnis

- Oro stabdymas prie paviršiaus;
- Laminarinis pasienio sluoksnis;
- Laminarinis – turbulencinis virsmas;
- Turbulencinis pasienio sluoksnis;
- Pasienio sluoksnis ant plokštelės;
- Pasienio sluoksnis profilio pradžioje;
- Pasienio sluoksnis profilio gale;
- Pasienio sluoksnio atitrūkimas.

Pasienio (paribio) sluoksnis

- Dėl klampumo oras, esantis prie pat paviršiaus, ne slysta, bet stabdomas. Oro greitis prie pat paviršiaus lygus nuliui.
- Toliau nuo paviršiaus oro greitis didėja ir tam tikrame atstume tampa lygus išorinio srauto greičiui.
- Paviršiaus sluoksnis, kuriame orą stabdo trinties jėgos vadinamas *pasienio sluoksniu*.
- Pasienio sluoksnio trinties eikvojama dalis srauto kinetinės energijos.

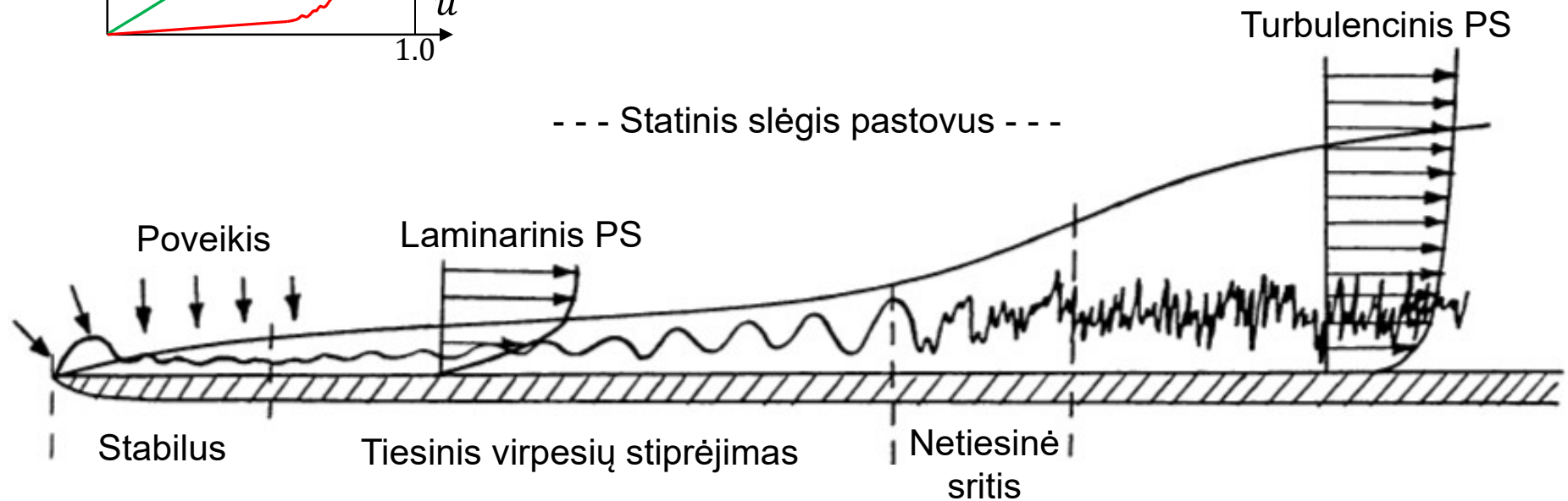
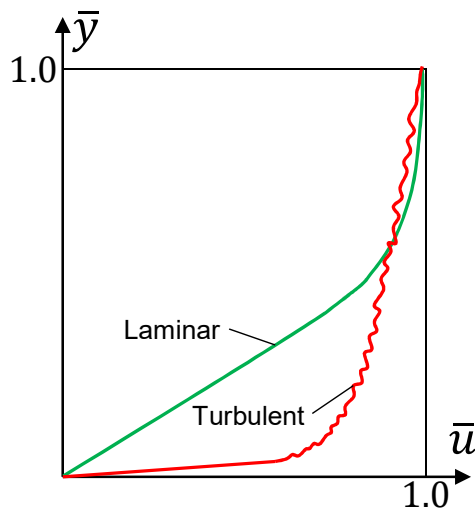
Pasienio sluoksnis



Pasienio sluoksnis

- Pasienio sluoksnis dviejų rūšių:
 - Laminarinis
 - Turbulentinis
- Dėl oro trinties atsiranda virpesiai ir laminarinis oro srautas virsta turbulentiniu
- Vieta, kur baigiasi laminarinis tekėjimas, vadinama *perėjimo tašku* arba *virsmo tašku*
- Virsmo vieta priklauso nuo srauto greičio, kūno formos ir padėties sraute, oro tankio, paviršiaus glotnumo ir kt.
- Susidarius tam tikrom sąlygom *pasienio sluoksnis gali atitrūkti*.

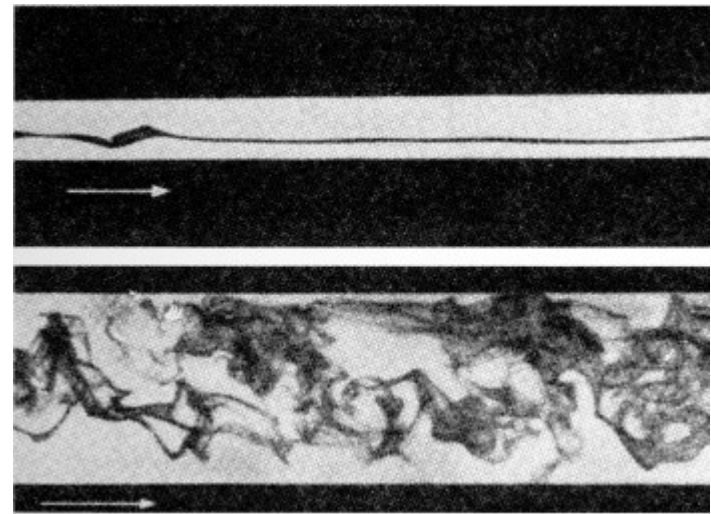
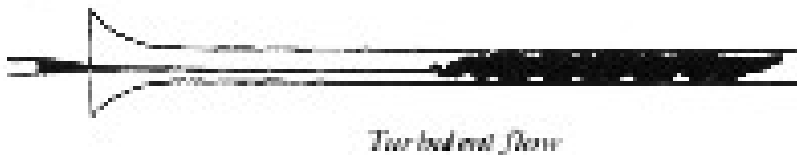
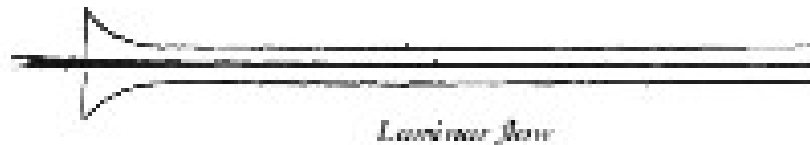
Pasienio sluoksnis (laminarinis, turbulencinis)



$$Re_x \frac{V \cdot x}{\nu} \approx 0.5 \cdot 10^6$$

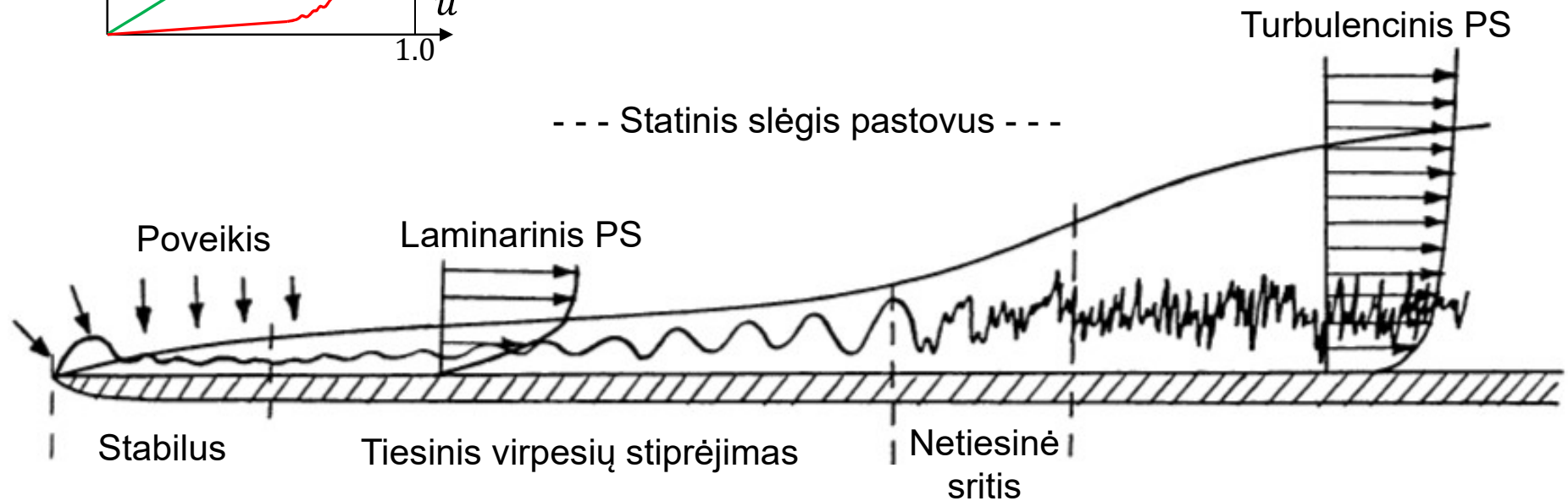
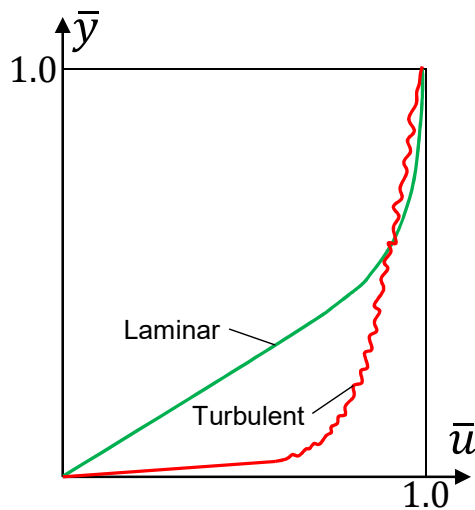
Reinoldso eksperimentas

1883



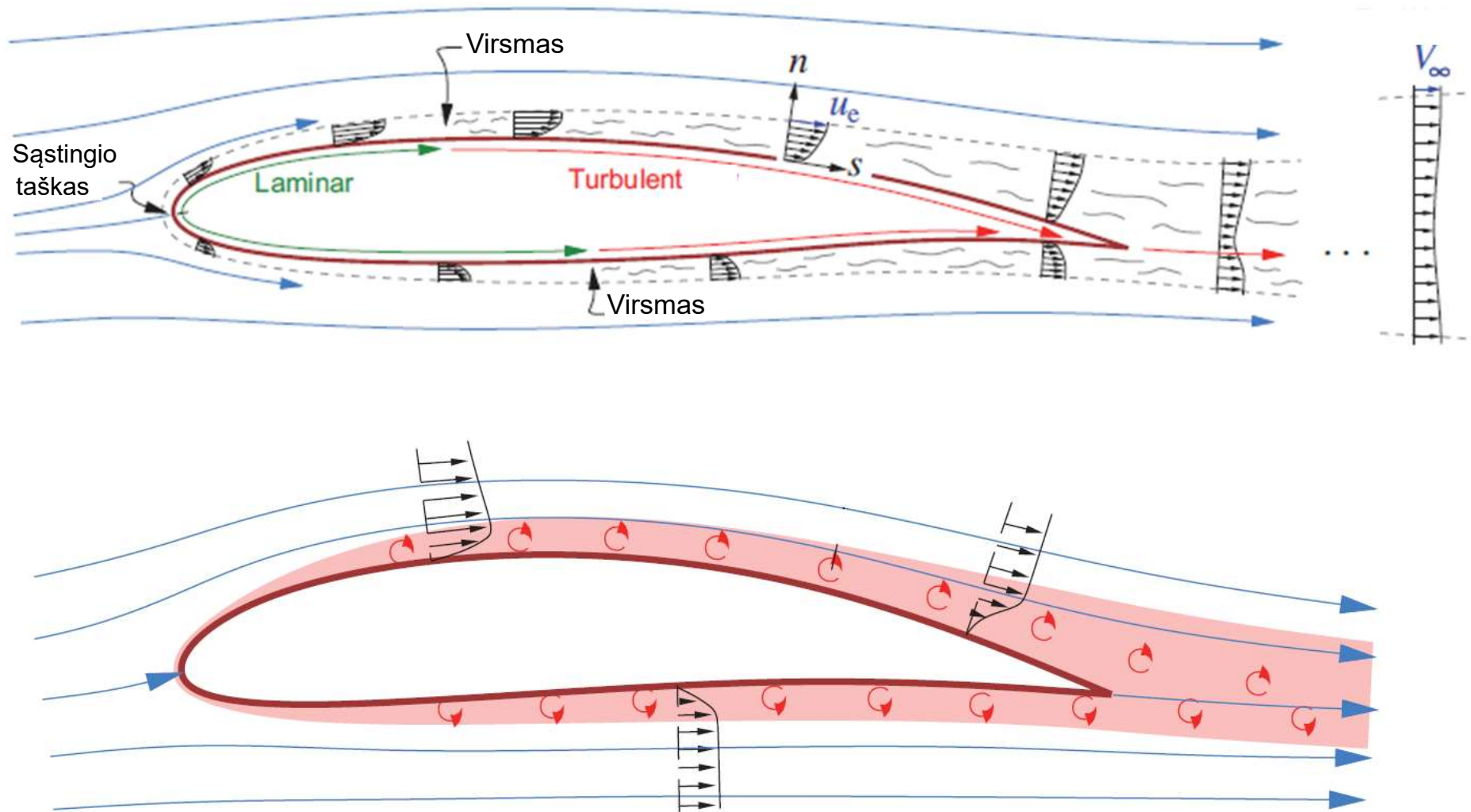
$$Re_D = \frac{V \cdot D}{\nu} \approx 2300 \dots 2900$$

Pasienio sluoksnis (laminarinis, turbulencinis)

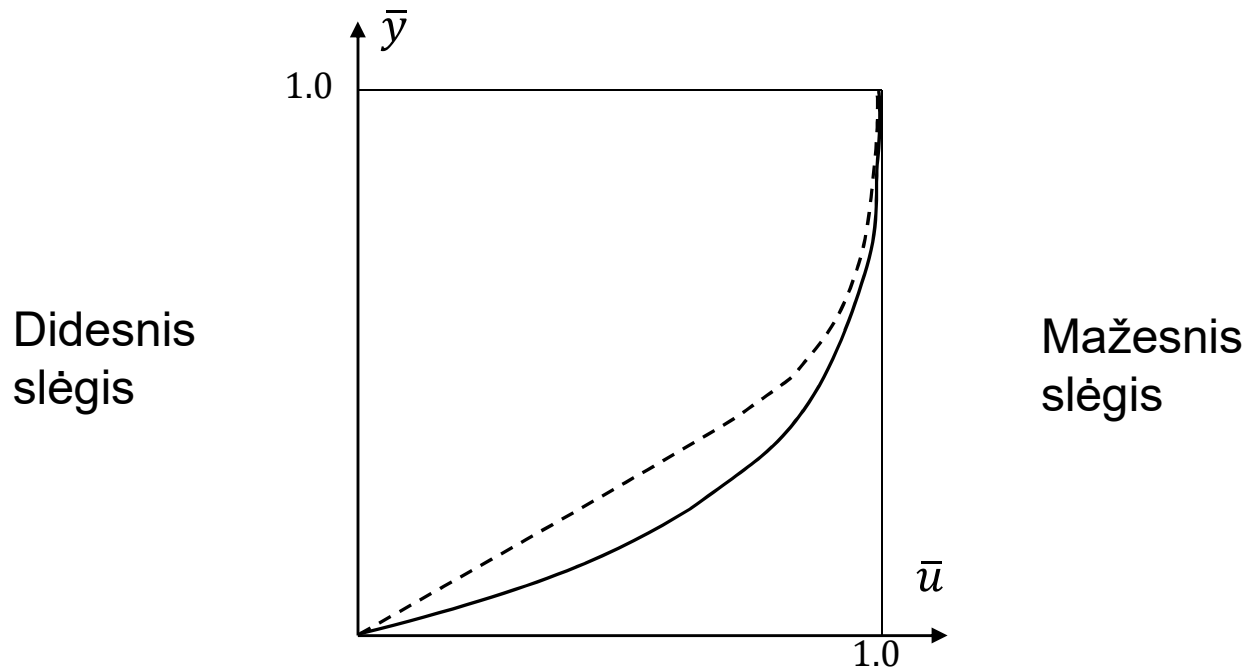


$$Re_x \frac{V \cdot x}{\nu} \approx 0.5 \cdot 10^6$$

Pasienio sluoksnis sparno paviršiuje

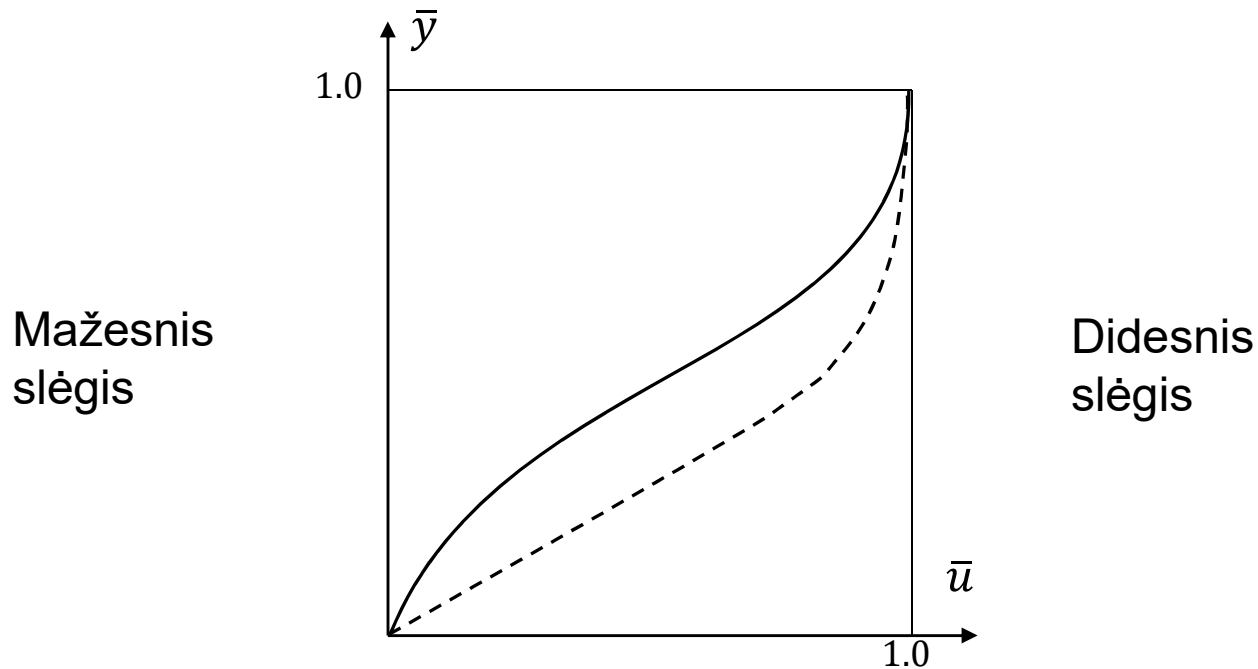


Statinis slėgis pasroviui mažėja (sparno profilio priekinė dalis)



- Srauto greitis didėja;
- Vidinių virpesių amplitudė mažėja;
- Laminarinis pasienio sluoksnis tampa stabilesnis
- Kinetinė energija pasienio sluoksnyje didėja;
- Pasienio sluoksnio atitrūkimo tendencija mažėja

Statinis slėgis pasroviui didėja (sparno profilio galinė dalis)



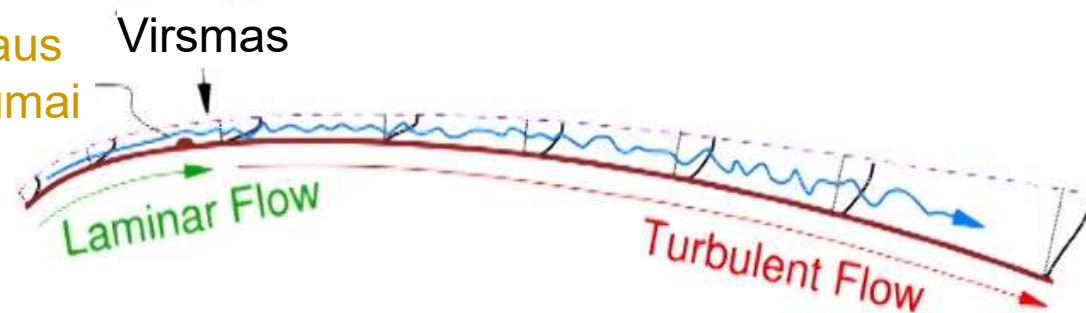
Srauto greitis mažėja;
Vidinių virpesių amplitudė didėja;
Laminarinis pasienio sluoksnis tampa mažiau stabilus
Kinetinė energija pasienio sluoksnyje mažėja;
Pasienio sluoksnio atitrūkimo tendencija didėja

Virsmo tipai (Mark Drela)

Priverstinis virsmas

Paviršiaus
netolygumai

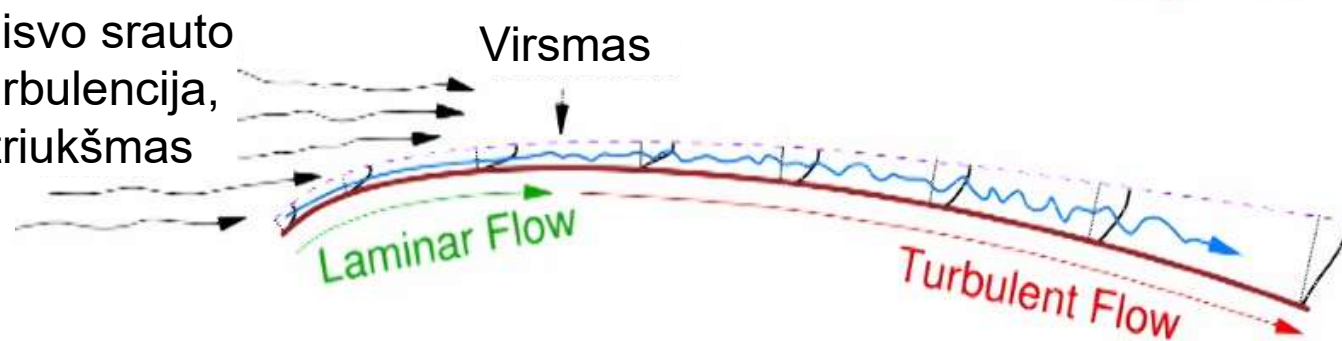
Virsmas



Šalutinis virsmas

Laisvo srauto
turbulencija,
triukšmas

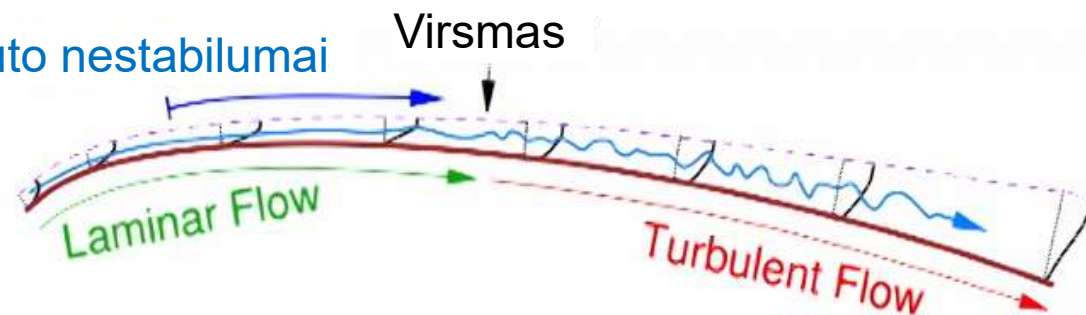
Virsmas



Laminarinio srauto nestabilumai

Virsmas

Natūralus virsmas



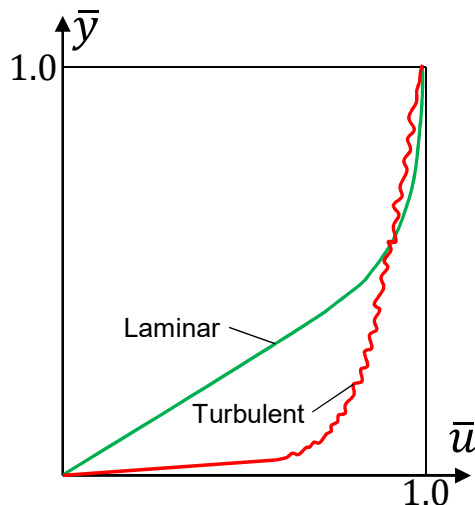
Laminarinio ir turbulencinio pasienio sluoksnių palyginimas

Laminarinis pasienio sluoksnis:

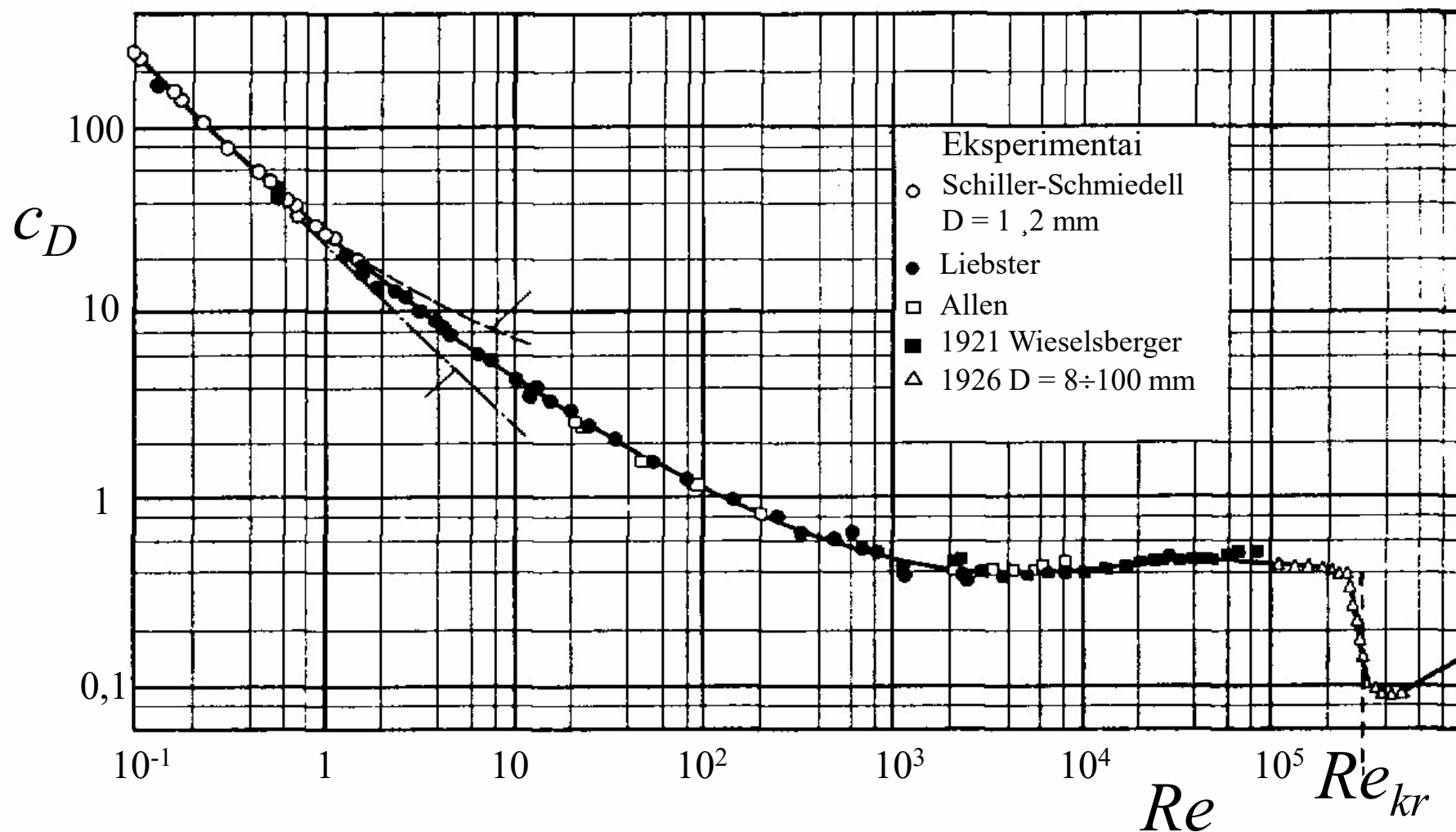
- 1) Srauto linijos yra *sklandžios ir taisyklingos*; srauto elementas sklandžiai išilgai srovės linijos;
- 2) Trinties pasipriešinimas *mažas*;
- 3) *Lengvai atitrūksta* nuo paviršiaus.

Turbulencinis pasienio sluoksnis :

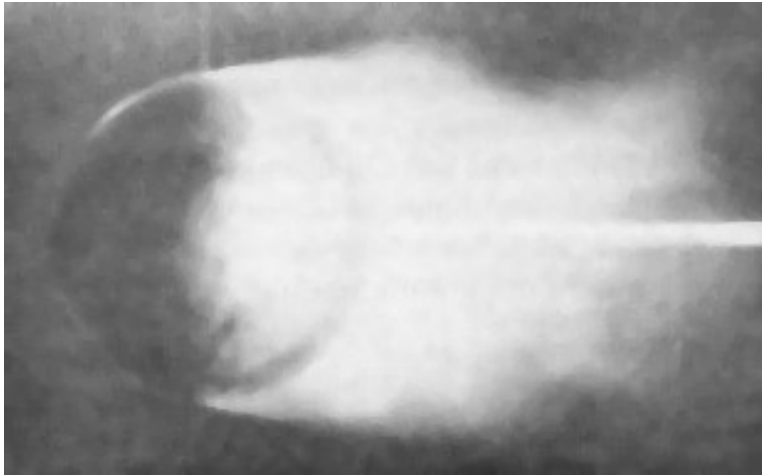
- 1) Srauto linijos trūkinėja; srauto elementas juda atsitiktinai, *netaisyklingai*;
- 2) Trinties pasipriešinimas *didelis*;
- 3) *Ilgiau išlieka neatitrūkęs* nuo paviršiaus.



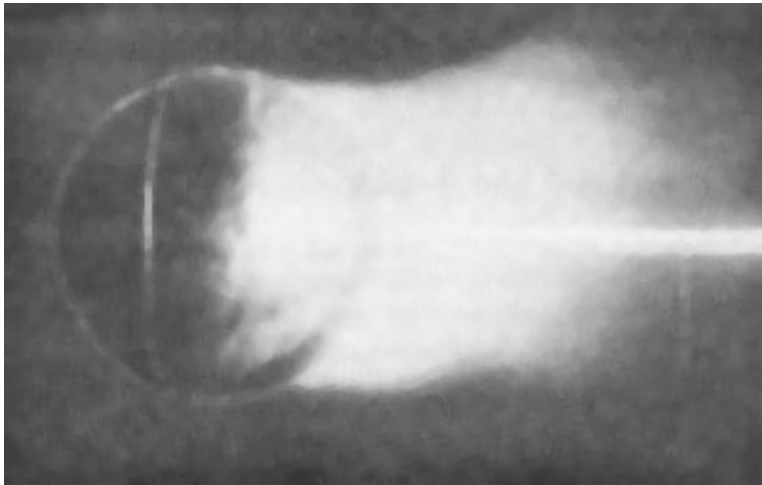
Rutulio C_d priklausomybė nuo Re



Rutulio aptekėjimas



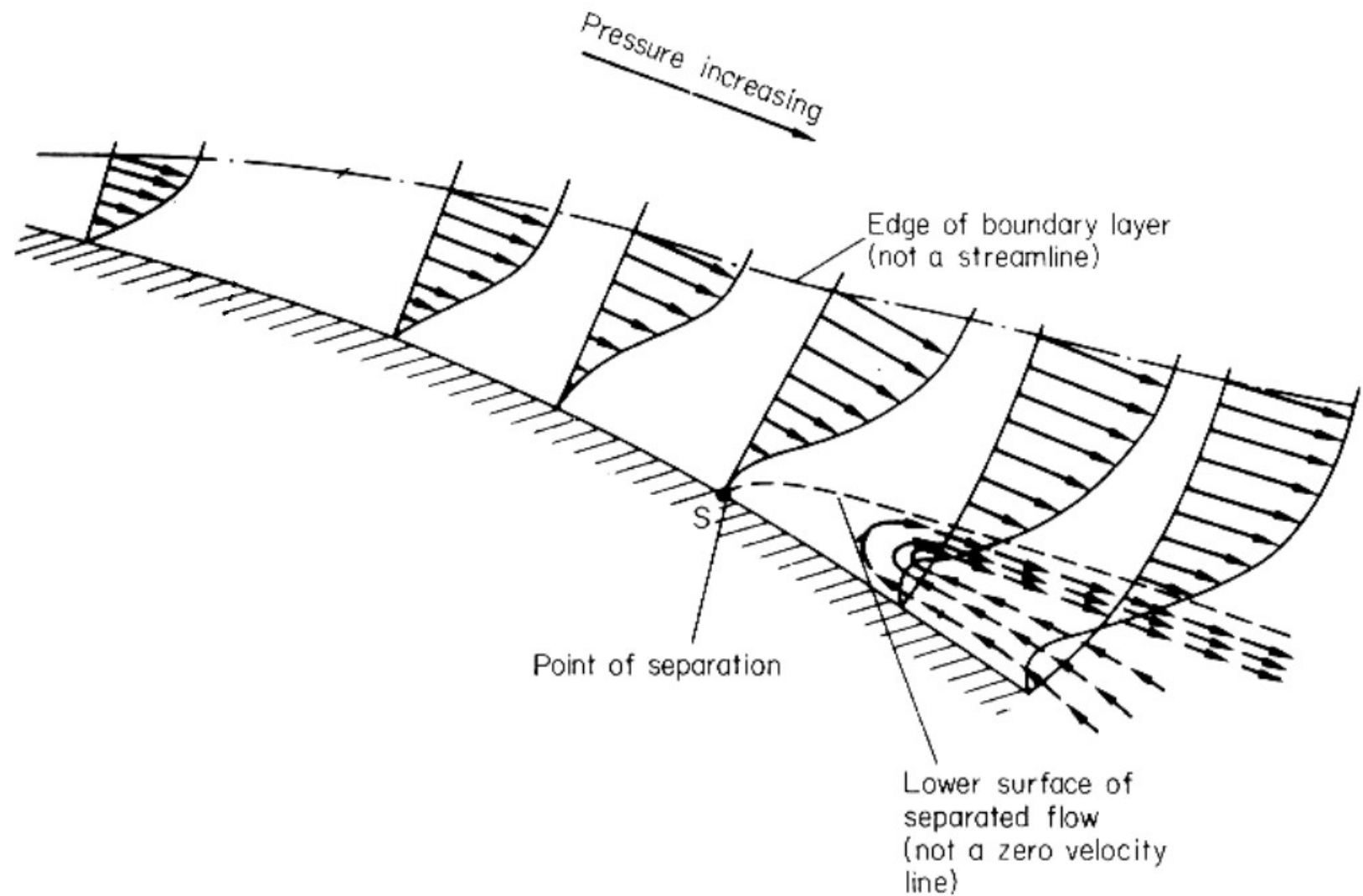
Ikikritinis Re



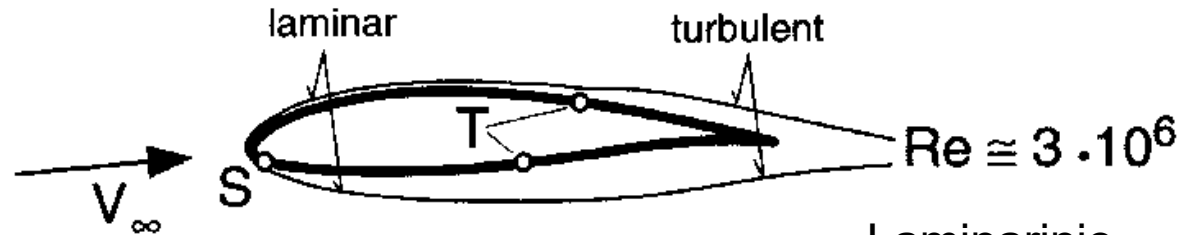
Virškritisinis Re



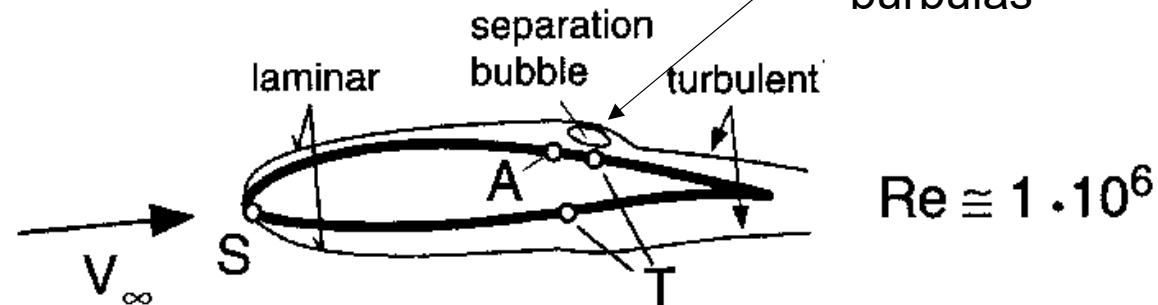
pasienio sluoksnio atitrūkimas



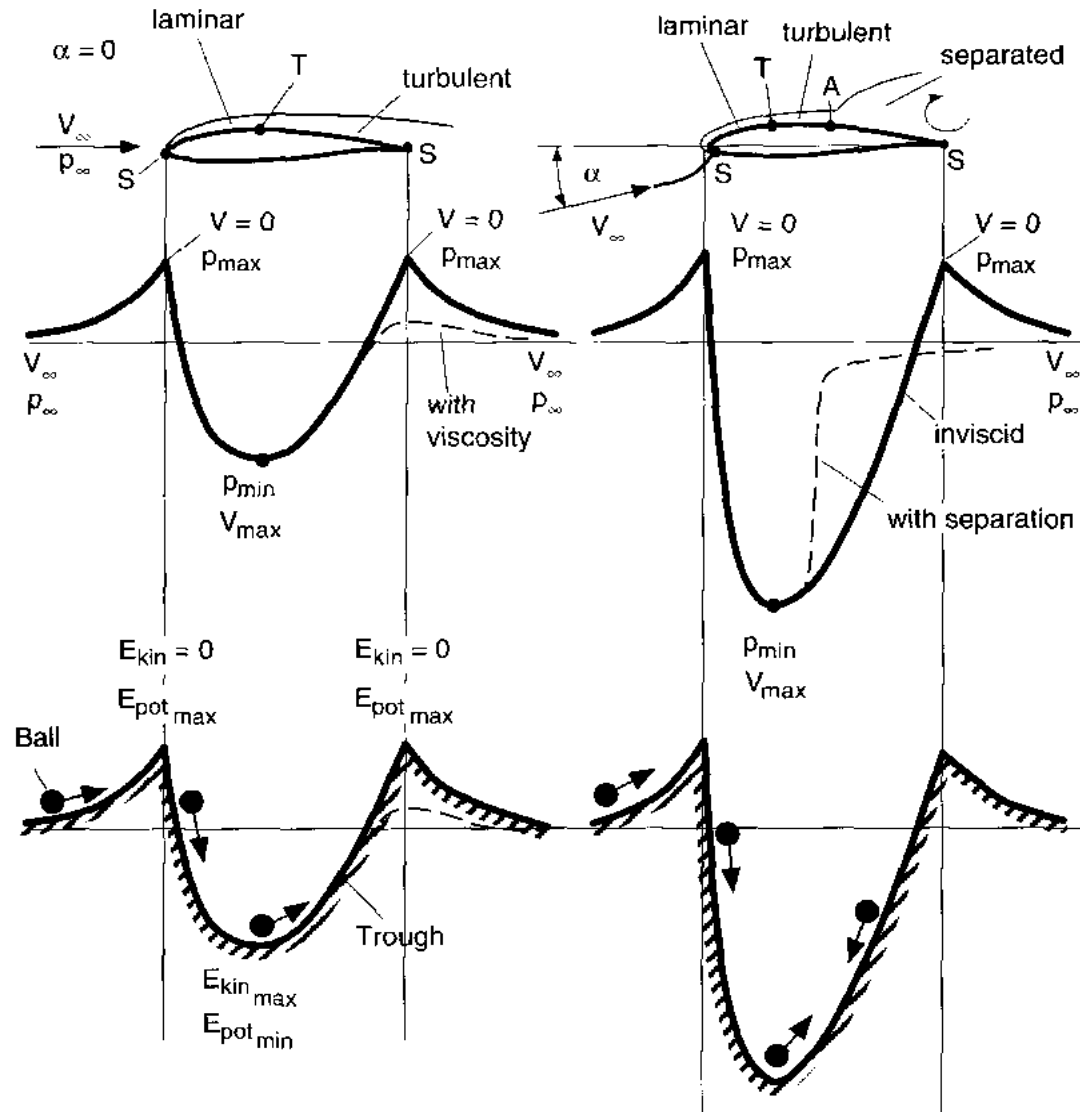
Profilio aptekējimas



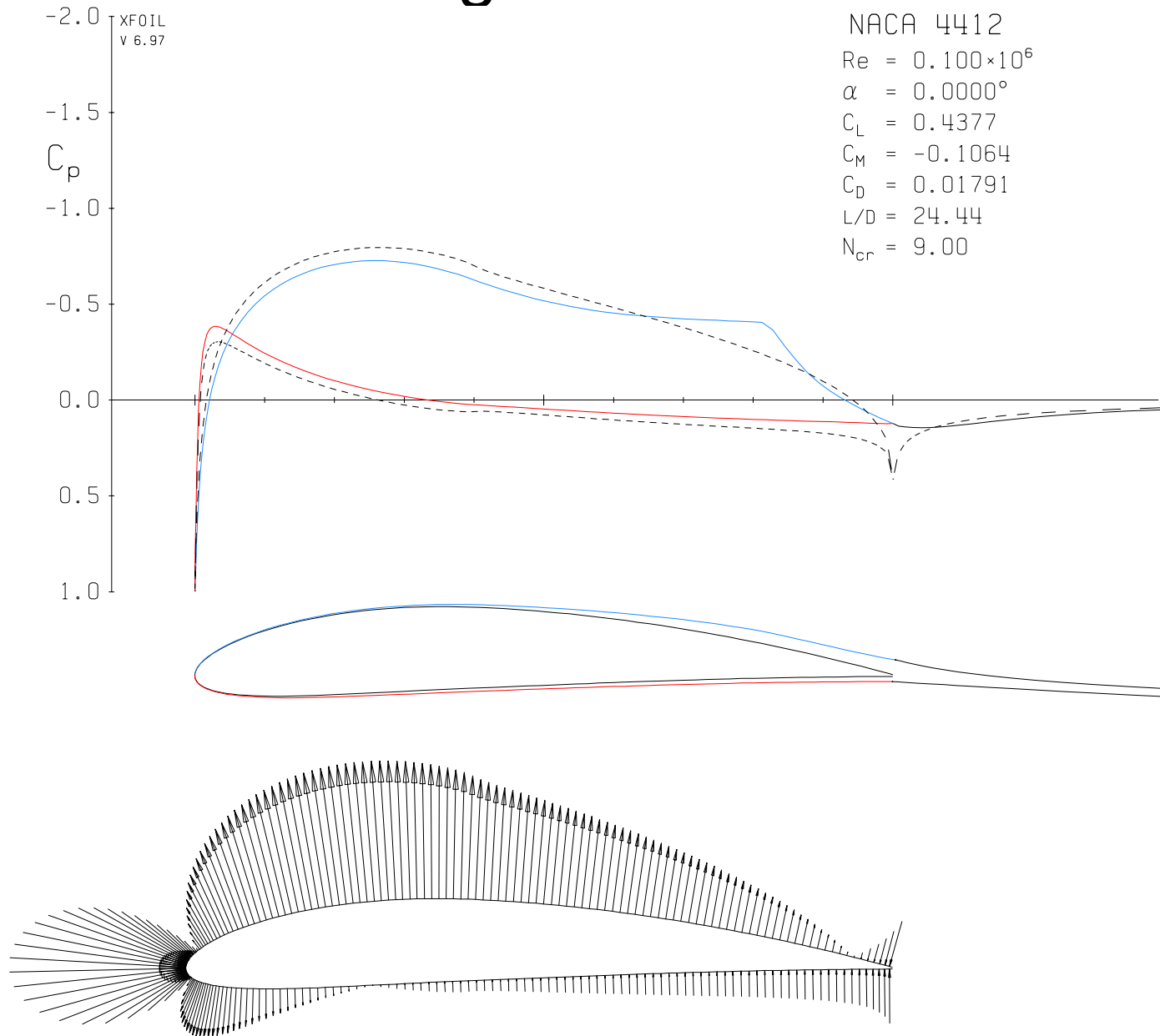
Laminarinio
atitrūkimo
burbulas



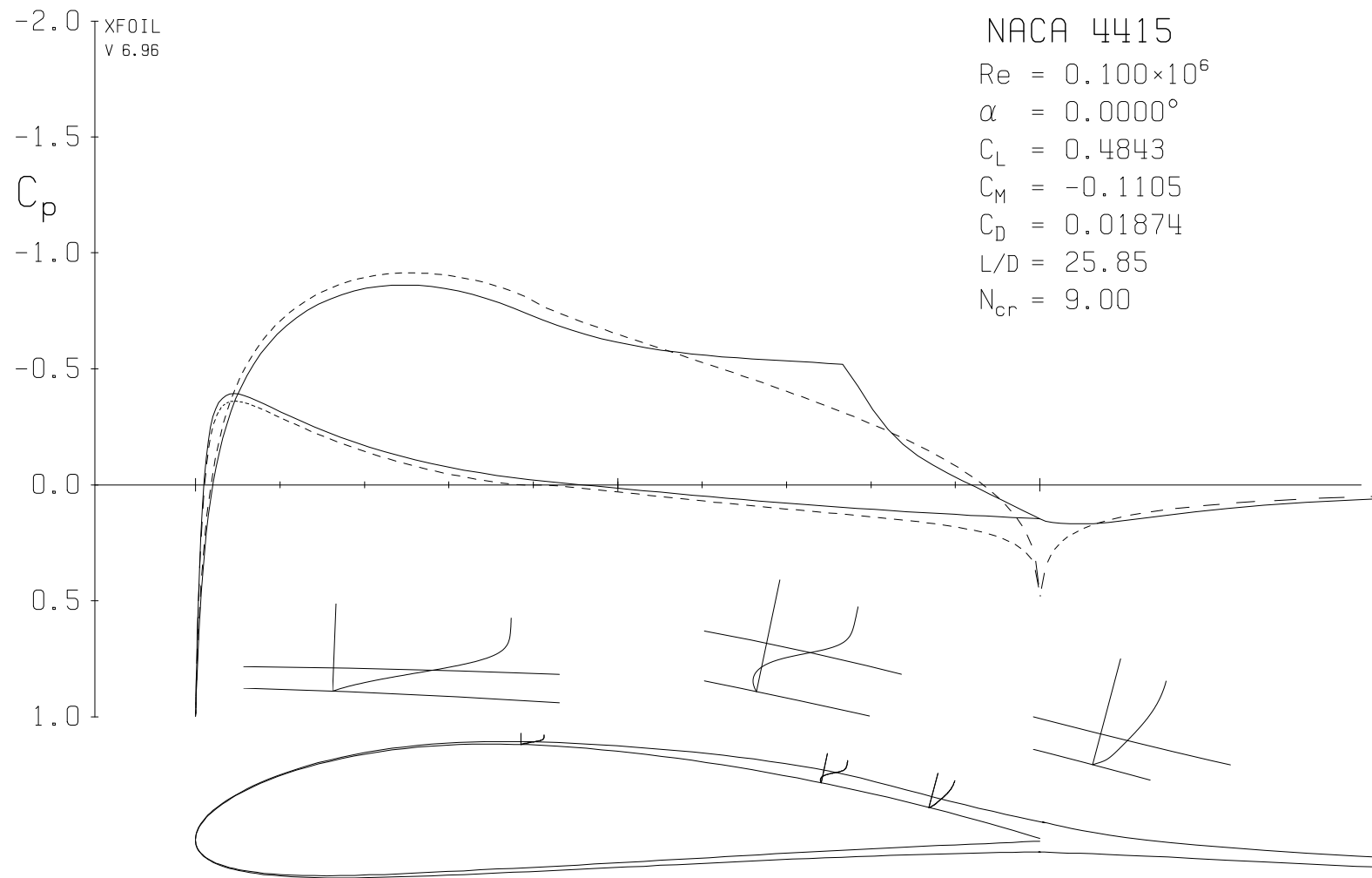
Pasienio sluoksnio atitrūkimas



Slégio kitimas



Pasienio sluoksnio profiliai

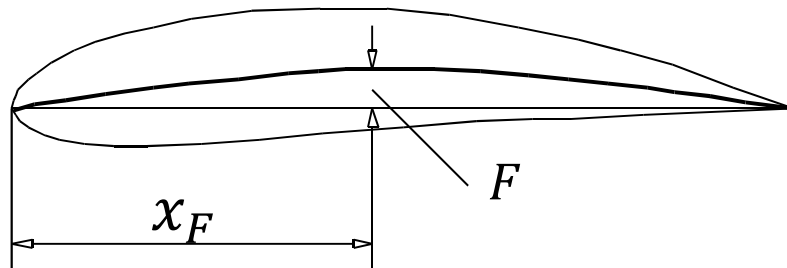
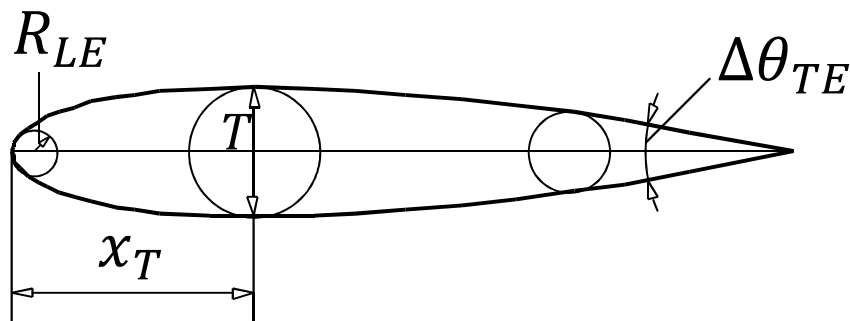
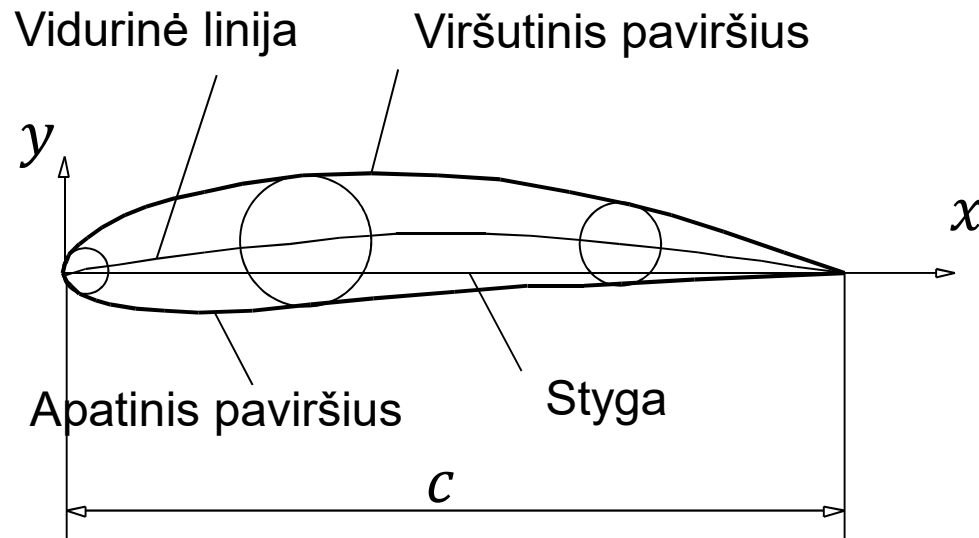


Done

Sparnų profiliai

- Profilio geometrija;
- Profiliai naudojami sklandytuvuose;
- Profiliai naudojami lengvuose lėktuvuose;
- Atakos kampas;
- Tvirtinimo kampas.

Sparno profilio forma



Santykiniai dydžiai

$$t = \frac{T}{c} \text{ storis}$$

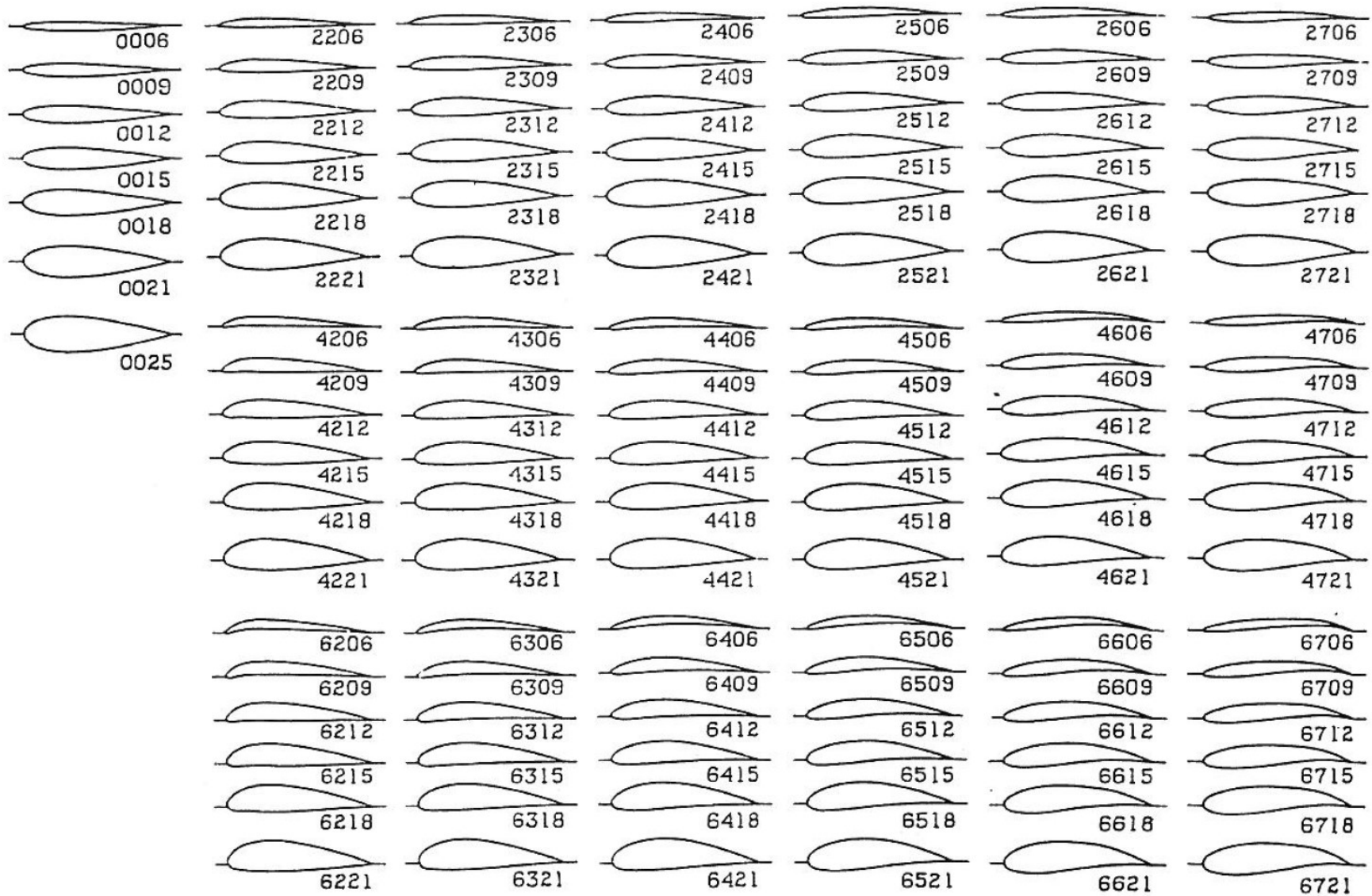
$$x_t = \frac{x_T}{c} \text{ didžiausio storio vieta}$$

$$f = \frac{F}{c} \text{ gaubtumas}$$

$$x_t = \frac{x_T}{c} \text{ didžiausio gaubtumo vieta}$$

$$R_{LE} = \frac{r_{LE}}{c} \text{ Priekinės briaunos spindulys}$$

NACA 4-ženkliai profiliai

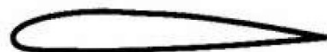


SKLANDYTUVŲ SPARNŲ PROFILIAI

- Profilio forma



Cambered Plate
(Lilienthal)



NACA 23012



FX 61-163



FX 62-K-131/17



Gö 482



FX 60-126



FX S 02-196



FX 67-K-150/17



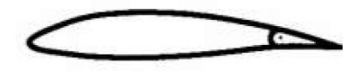
Gö 535



NACA 63₃-618



E 603



HQ 144-39 F3
Area changing flap retracted



Gö 549



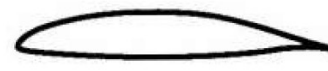
EC 86 (-3)-914



FX 66-17 AII-182



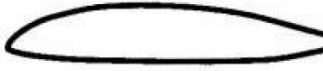
Flap extended



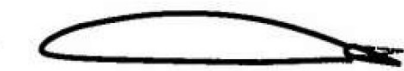
HQ 17/14.38



HQ 26N/14.82



DU84-158



DU89-134/14

F. Thomas

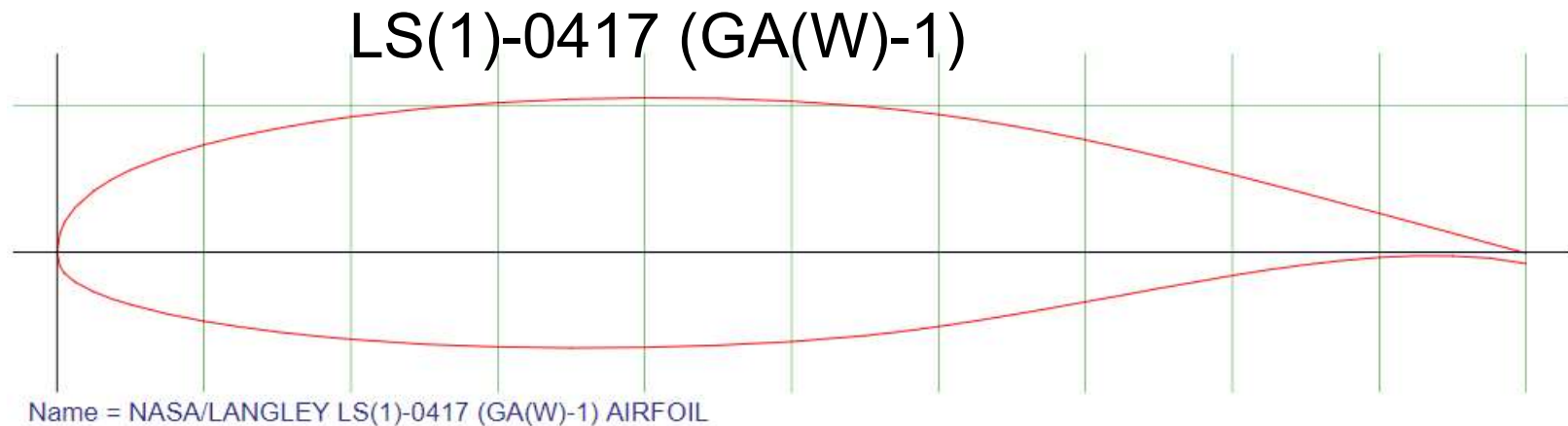
NASA profilis: bendroji avicija

NACA - National Advisory Committee for Aeronautics

1915

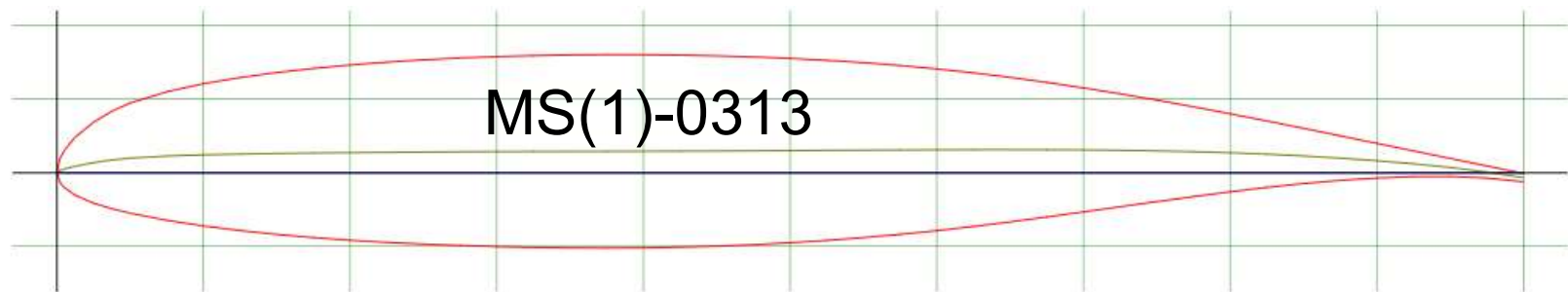
NASA - National Aeronautics and Space Administration

1958



- Mažas pasipriešinimas kreiseriniame skrydyje ($CL=0.4$, $M=0.15$)
- Didelė aerodinaminė kokybė aukštėjimo režime
- Didelė aerodinaminė kokybė
- Švelnus srauto nutrūkimas

NASA profilis: bendroji aviacija



- Mažas pasipriešinimas kreiseriniame skrydyje ($CL=0.3$, $M = 0.7$)

R. Epplerio profiliai

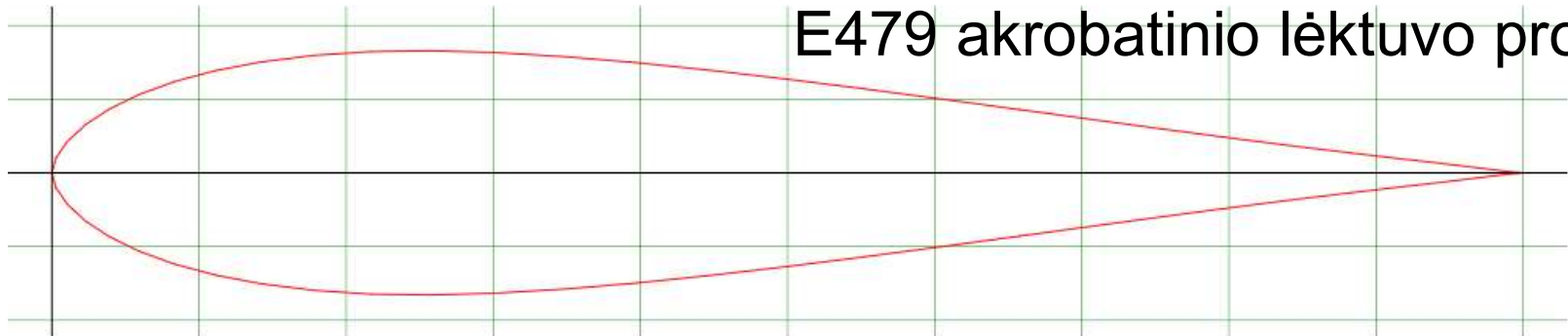
Eppler E387 mažiems Re skaičiams



Eppler E431 sklandytuvo profilis

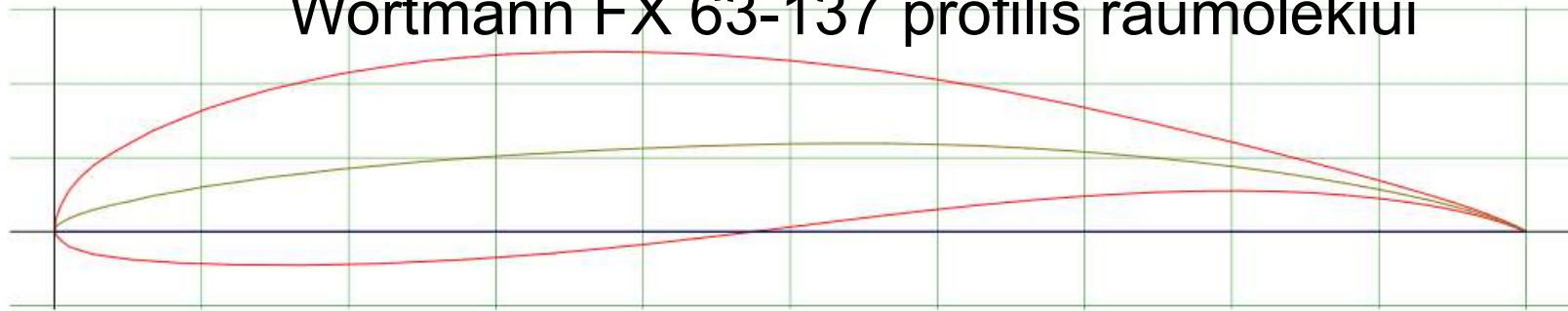


E479 akrobatinio lėktuvo profilis

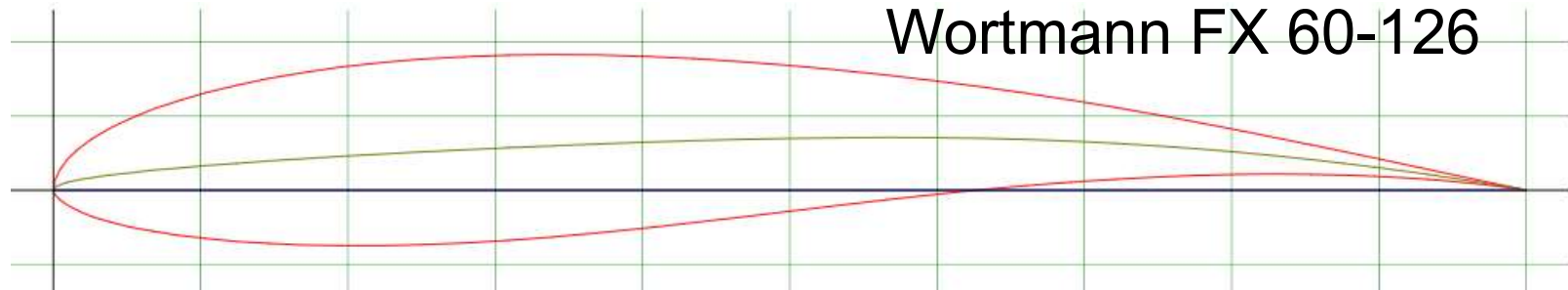


F.X. Wortmann - profiliai

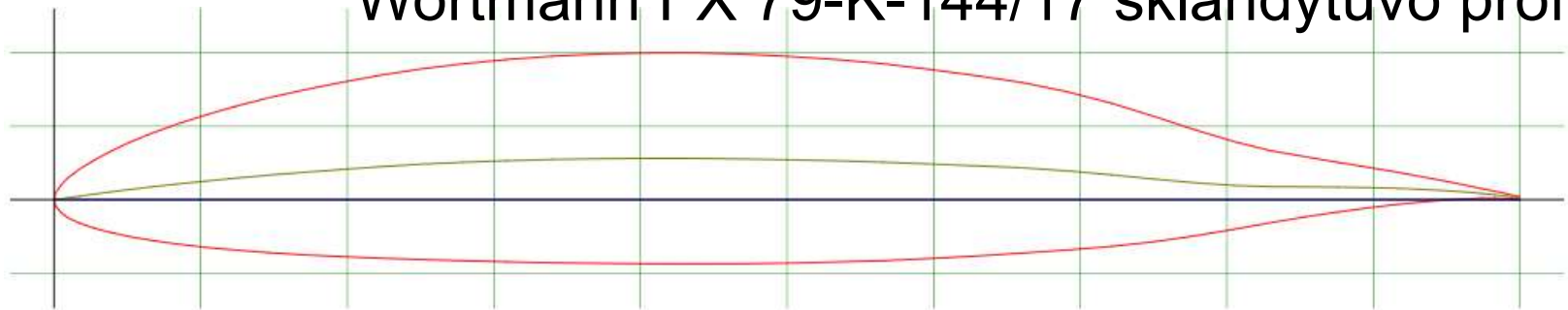
Wortmann FX 63-137 profilis raumolėkiui



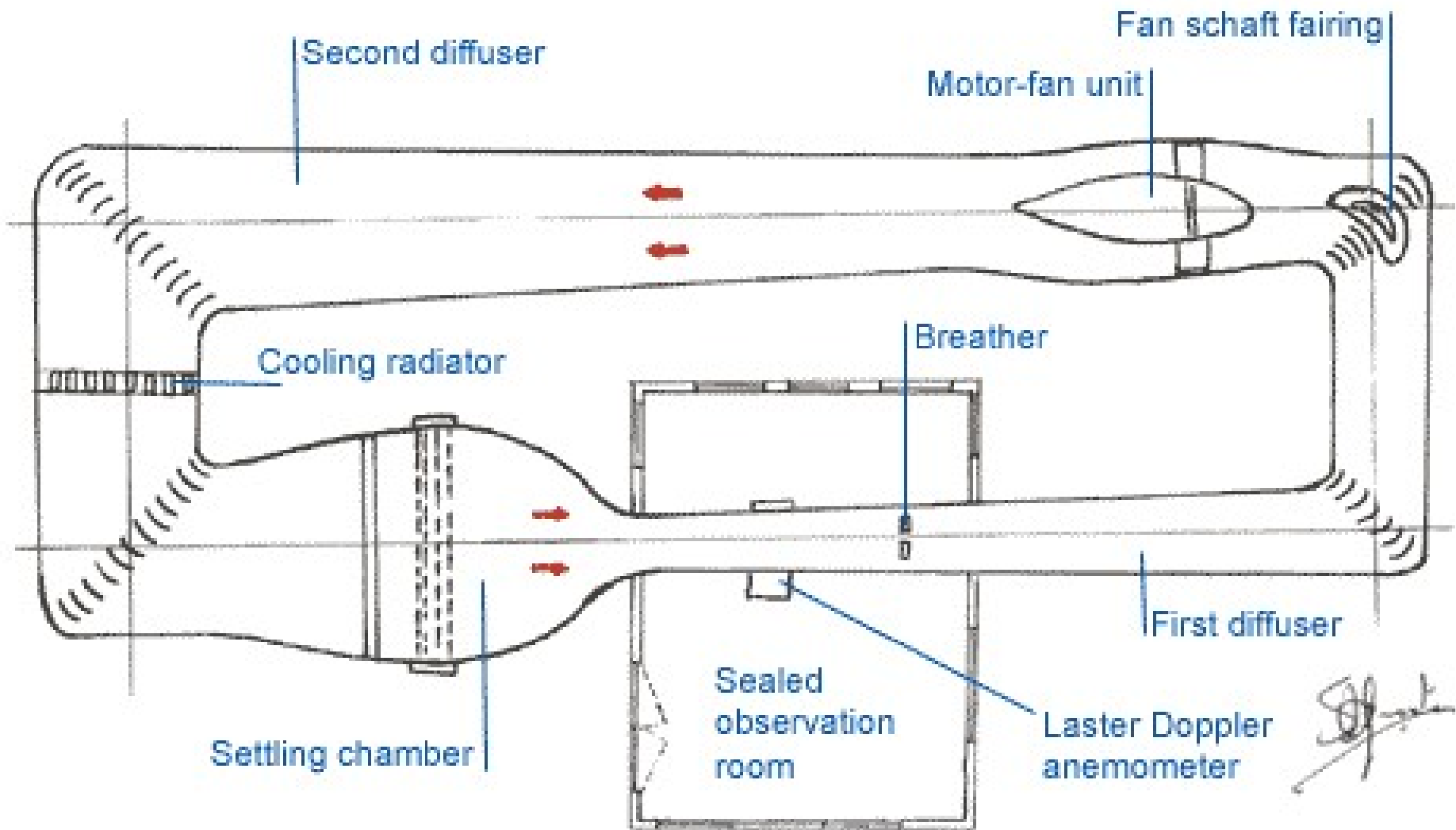
Wortmann FX 60-126



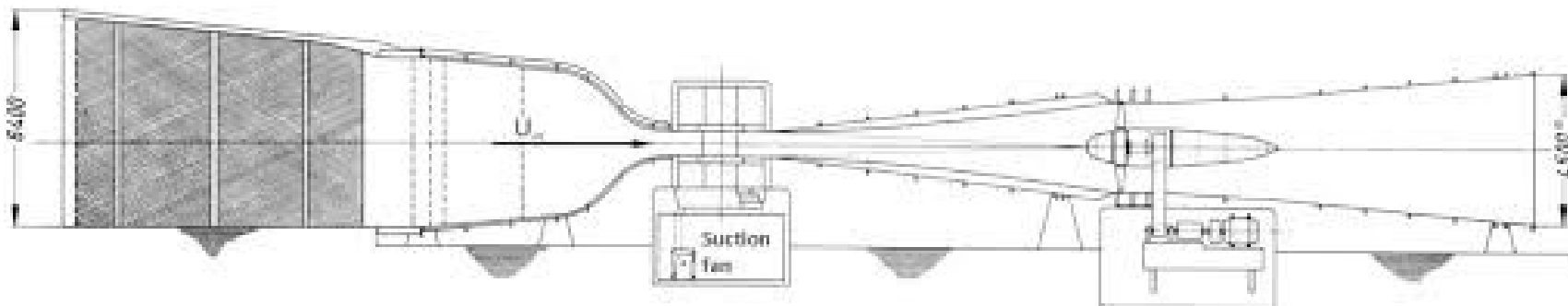
Wortmann FX 79-K-144/17 sklandytuvo profilis



Aerodinaminis vamzdis



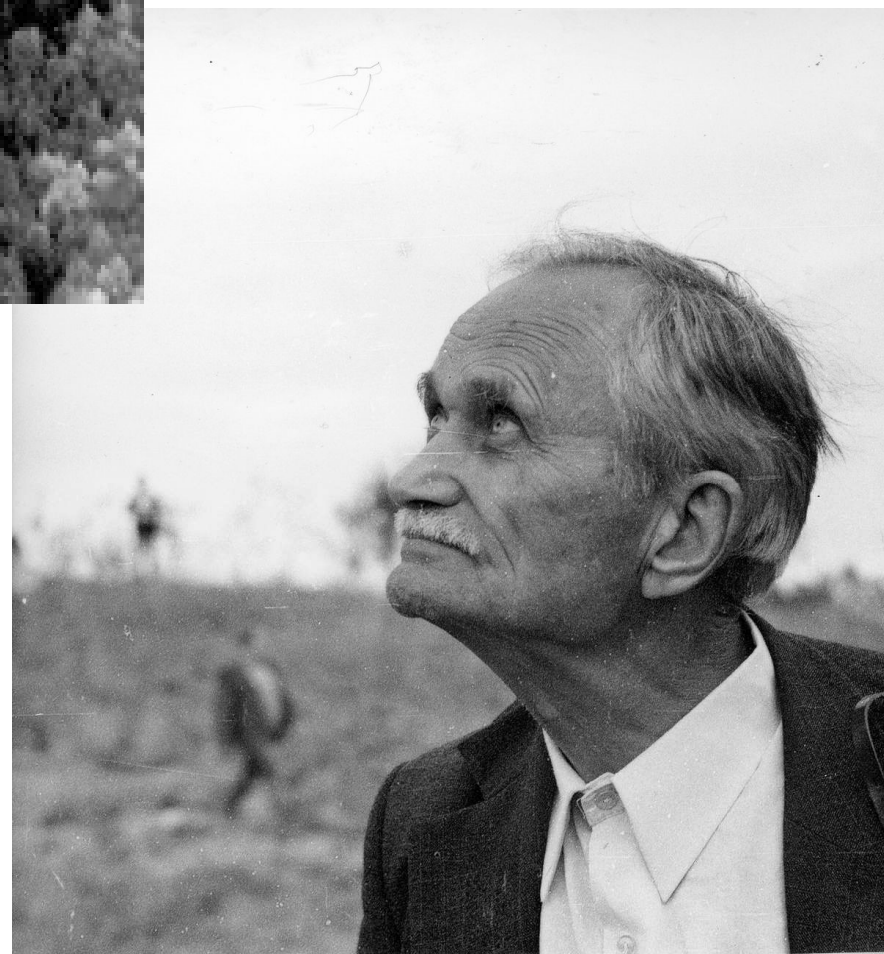
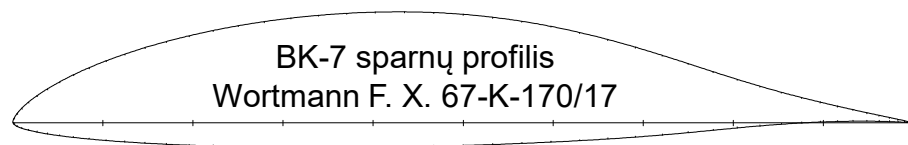
Štutgarto universiteto aerodinaminis vamzdis





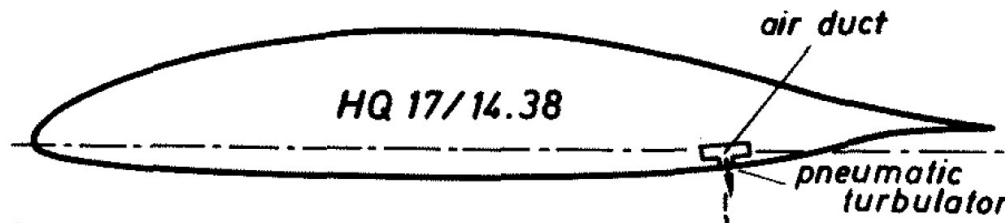
BK-7 (1972)
ESAG

Balys Karvelis

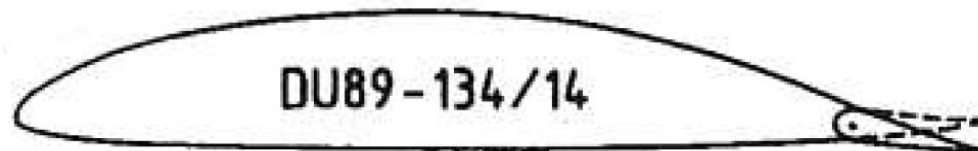


Sklandytuvų profilių kūrėjai

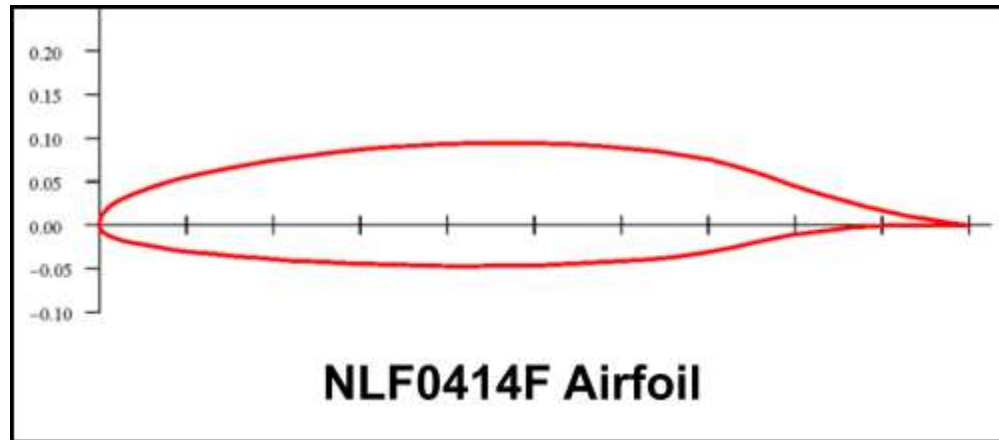
K.-H. Horstmann ir A. Quast airfoils, DLR Braunschweig
(Sklandytuvų ASW 22)



L. Boermans, TU Delft
(sklandytuvų ASW 17 ir daugelis kitų)



Laminarinis profilis



Profilis, kurio storiusia vieta yra tarp 45% ir 60% profilio stygos

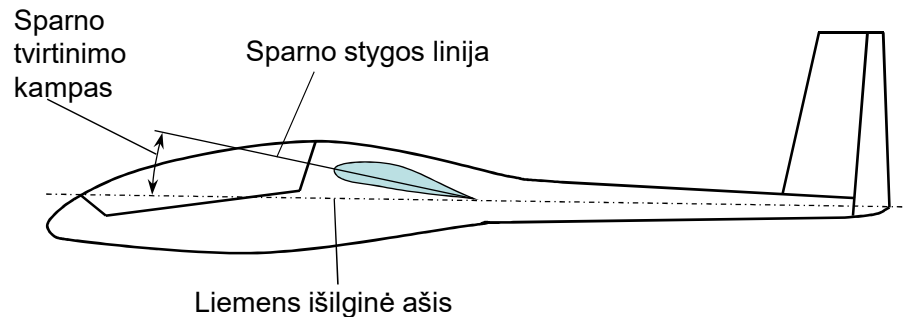
Kampai

– Tvirtinimo kampas

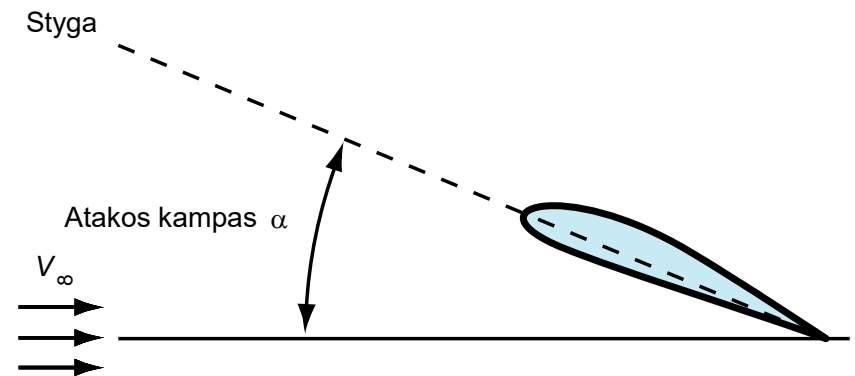
- kampas tarp išilginės motosklandytuvo ašies ir sparno stygos prie liemens

– Atakos kampas (α)

- kampas tarp laisvo srauto krypties ir sparno profilio stygos



Tvirtinimo kampas skrydžio metu nekinta

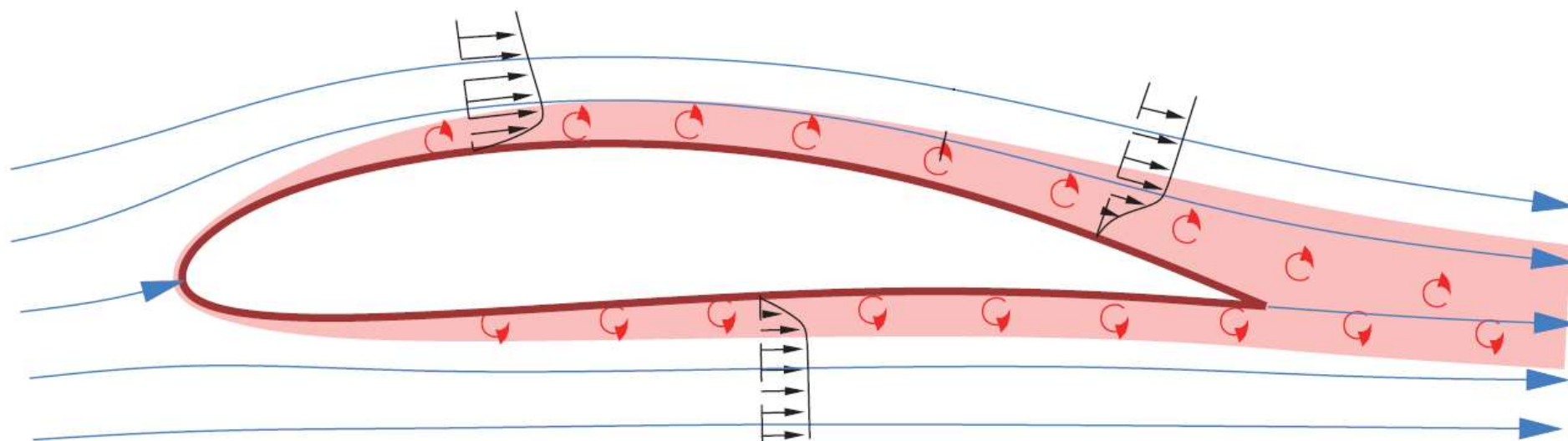


Atakos kampą skrydžio metu valdo pilotas

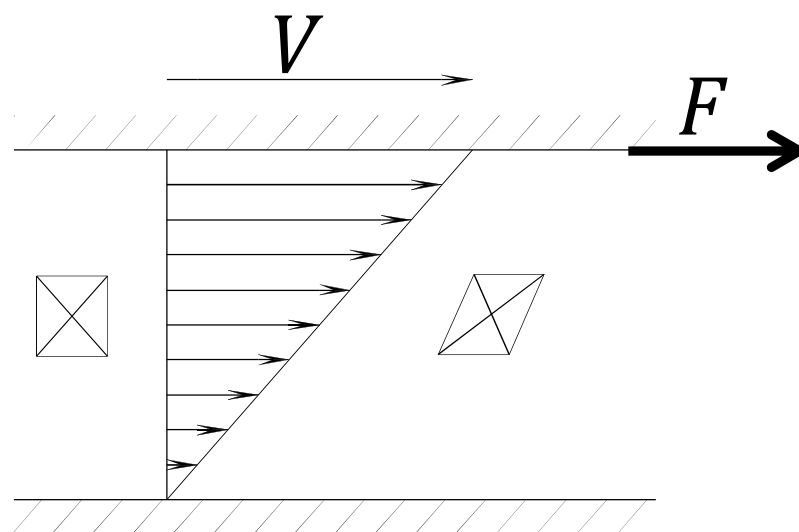
Keliamoji jėga

- Pasienio sluoksnio sūkuringumas;
- Magnus efektas
- Sparno sūkurio efektas;
- Trečiasis Niutono dėsnis.

Sūkuriai pasienio sluoksnyje

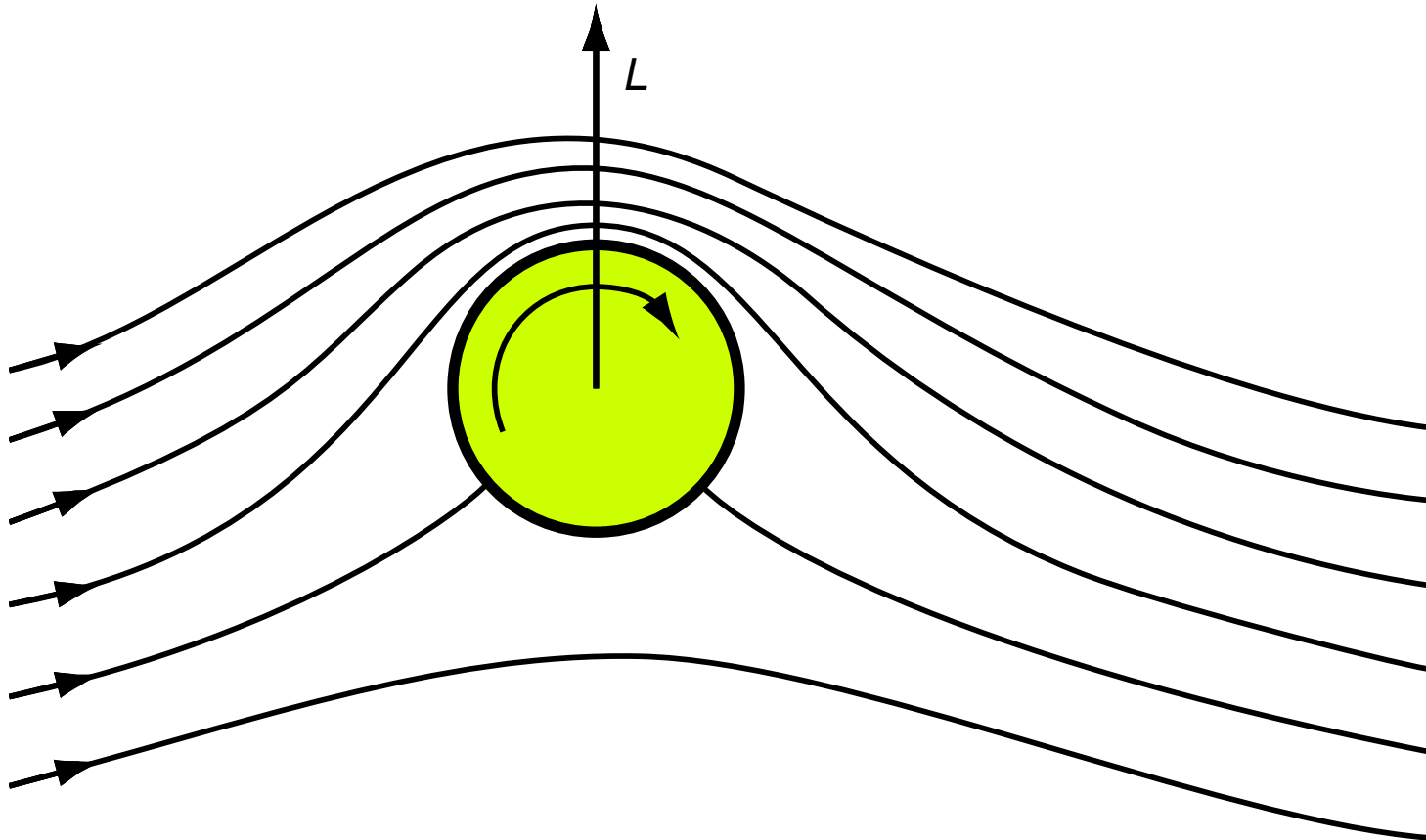


M. Drela

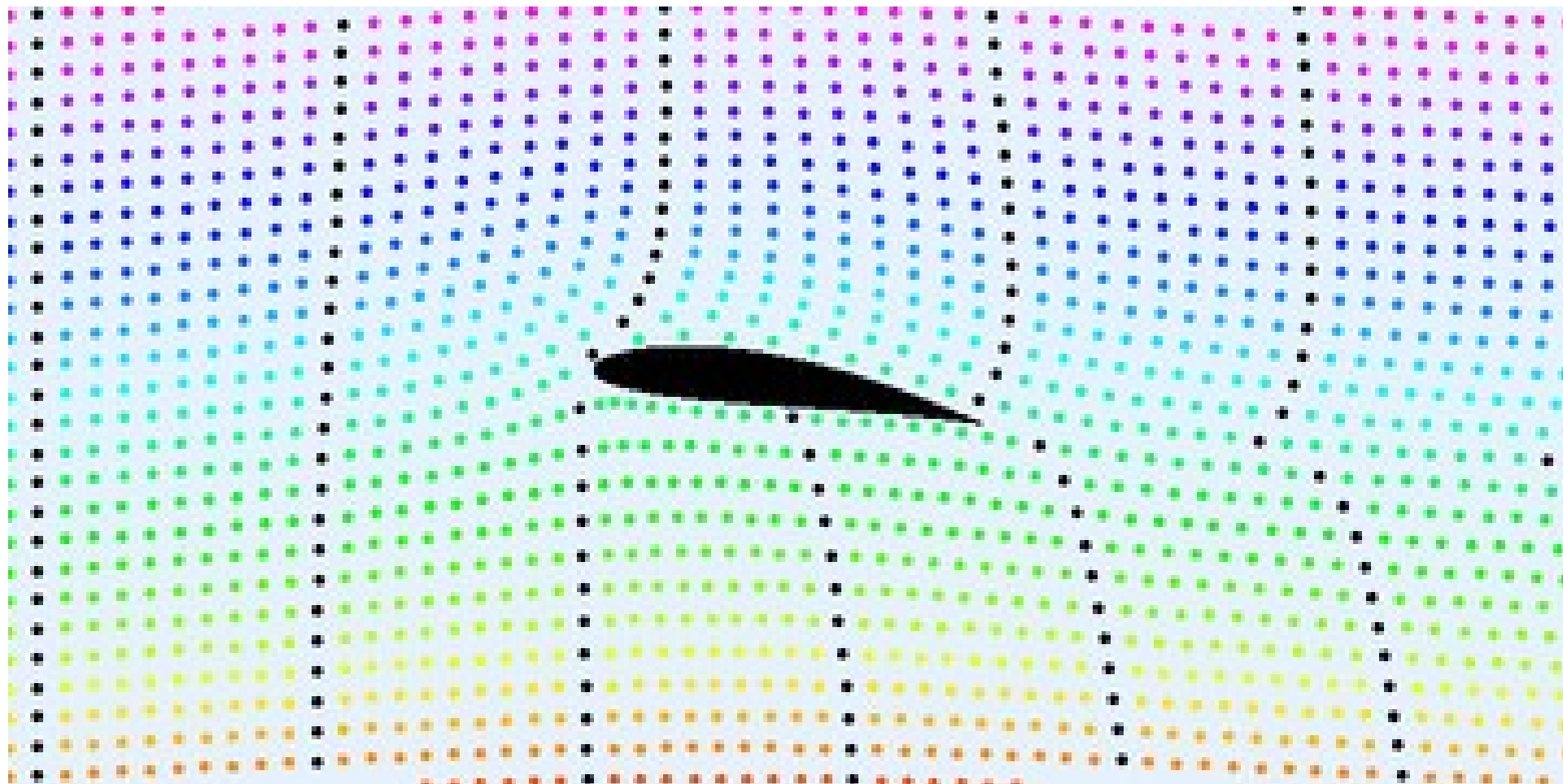


Magnus efektas

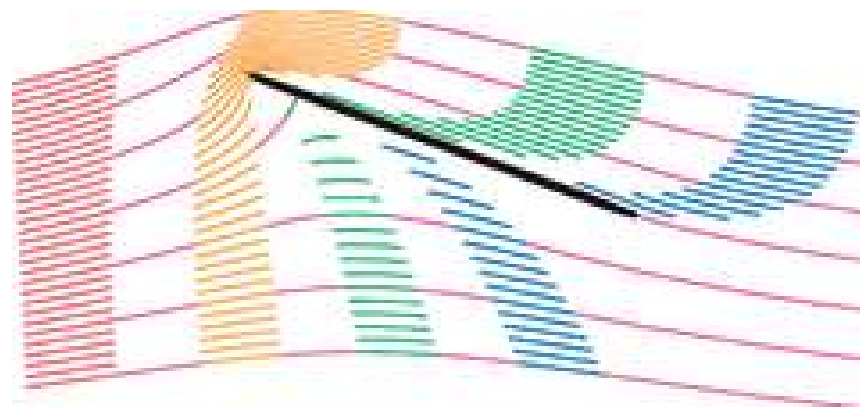
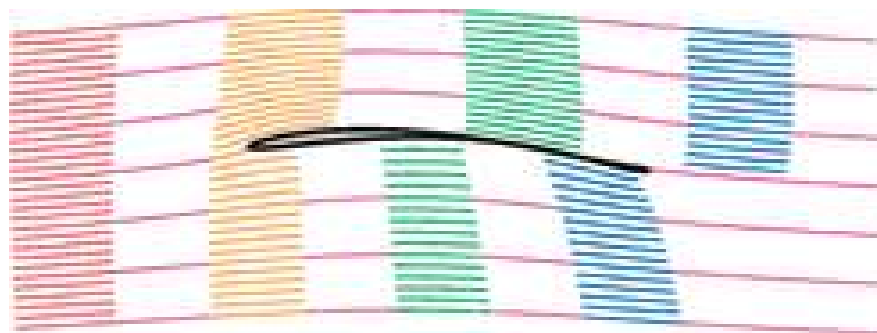
- Besisukančio cilindro keliamoji jėga



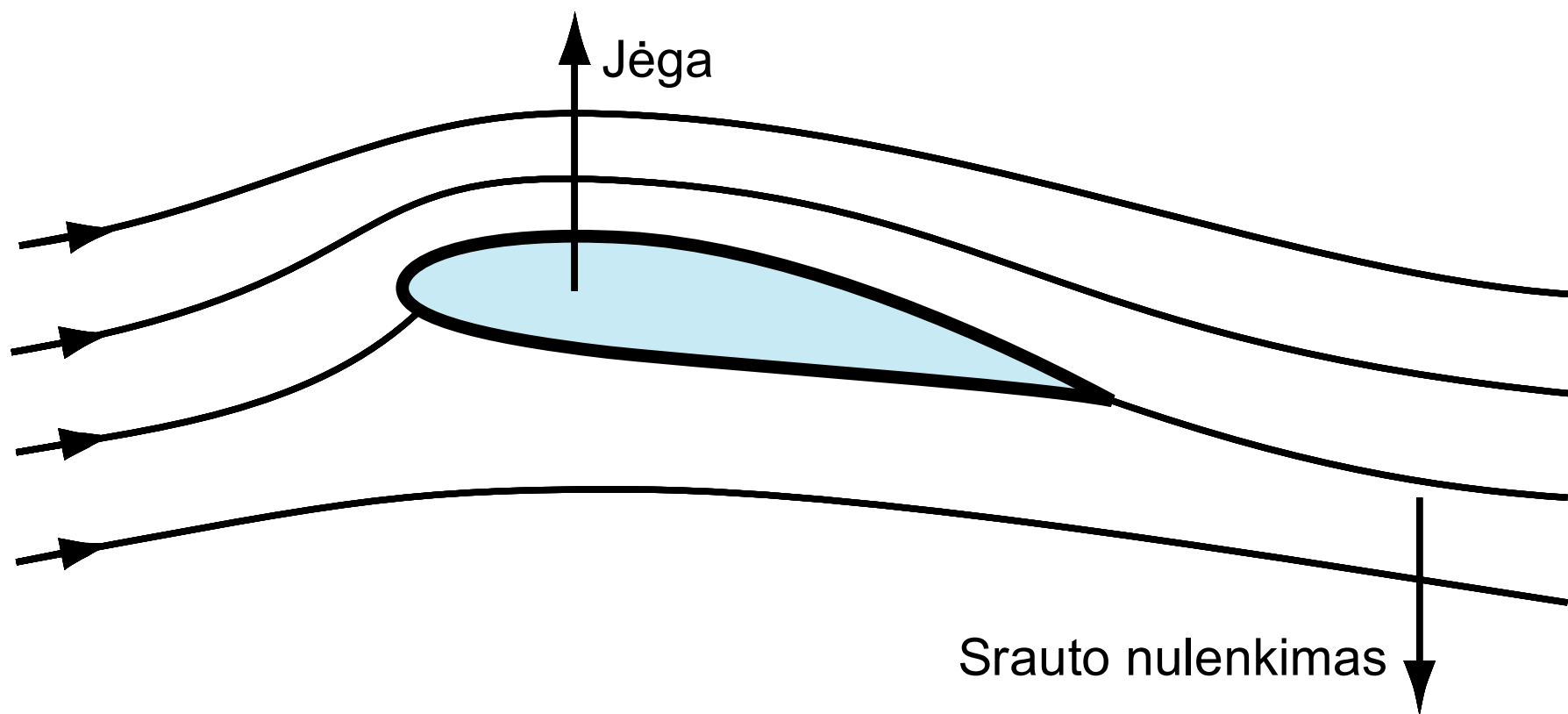
Sparno sūkurio efektas



Plono profilio aptekėjimas



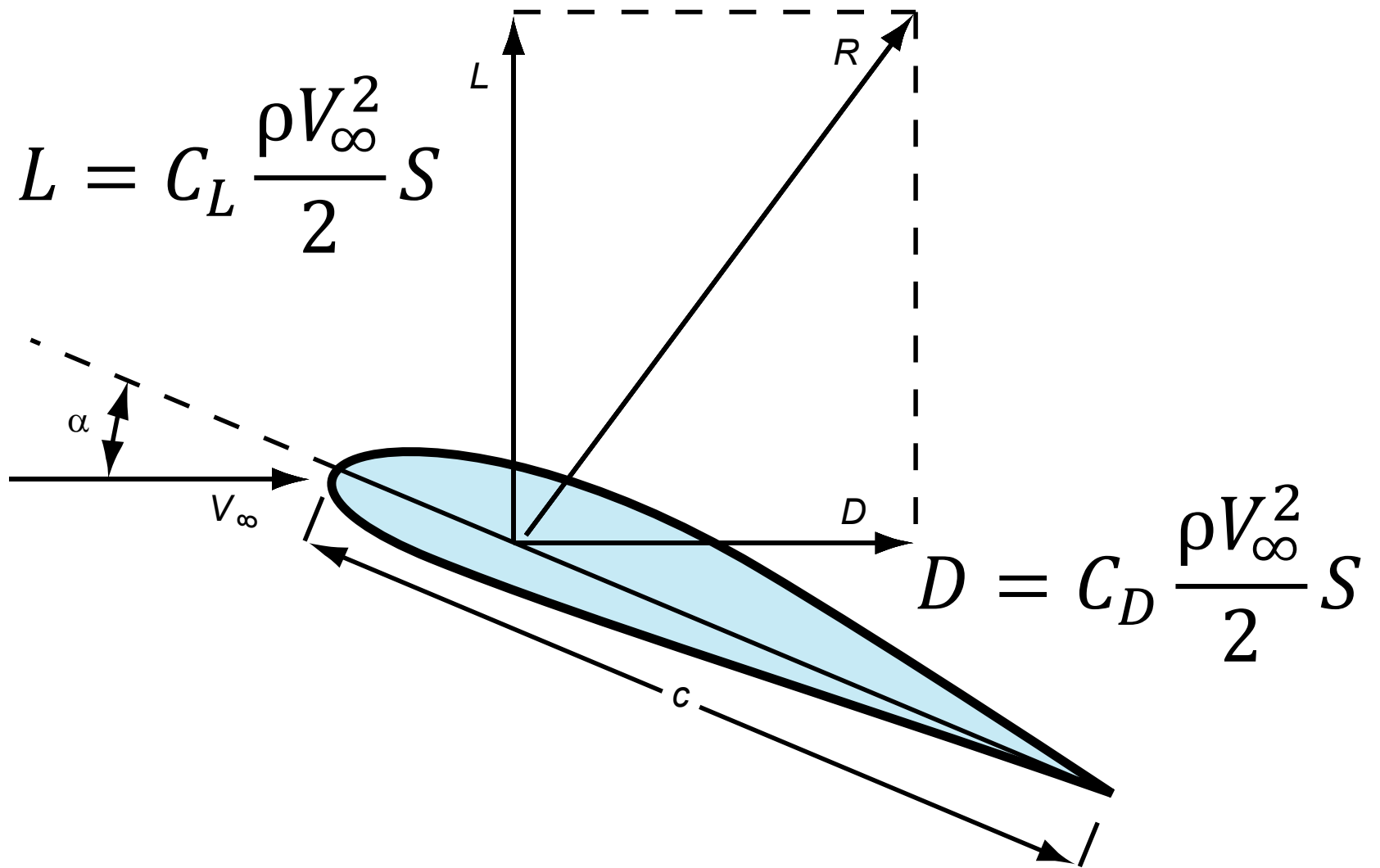
Trečiasis Niutono dėsnis



Keliamosios jėgos koeficientas ir pasipriešinimo koeficientas

- Keliamoji jėga ir pasipriešinimo jėga;
- Aerodinaminių jėgų koeficientai;
- Keliamosios jėgos koeficiento priklausomybė nuo atakos kampo;
- Pasipriešinimo koeficiento priklausomybė nuo atakos kampo;
- Aerodinaminių koeficientų poliarė;
- Aerodinaminė kokybė.

AERODINAMINĒS JĒGOS



Aerodinaminių jėgų koeficientai

- Koeficientai C_D ir C_L , jų priklausomybė nuo atakos kampo α (poliarė)
 - aerodinaminės jėgos priklauso nuo daugelio geometrinių ir oro srauto parametrų
 - patogumui naudojami bedimensiniai koeficientai C_D ir C_L
 - jėgų apskaičiavimui reikia: koeficientų reikšmių, dinaminio slėgio, ploto ir ilgio dydžių

Keliamoji jėga

- C_L priklausomybė nuo atakos kampo α
Keliamosios jėgos formulė

$$L = C_L \frac{\rho V_{\infty}^2}{2} S$$

Keliamoji jėga:

- Proporcinga oro tankiui;
- Proporcinga greičio kvadratui;
- Proporcinga sparno plotui.

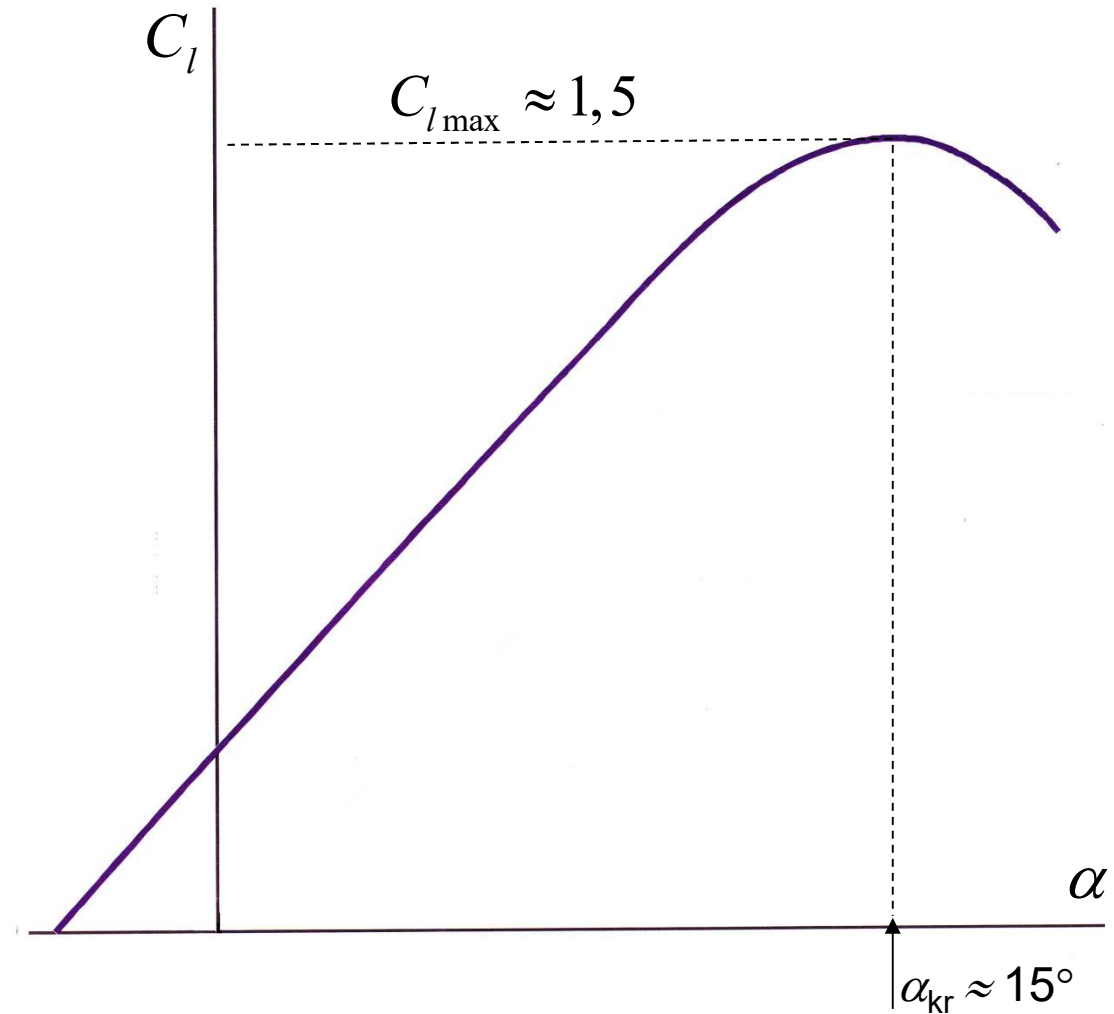
Keliamosios jėgos koeficientas

Keliamosios jėgos
koeficientas

$$C_l = \frac{L}{S \frac{\rho V^2}{2}}$$

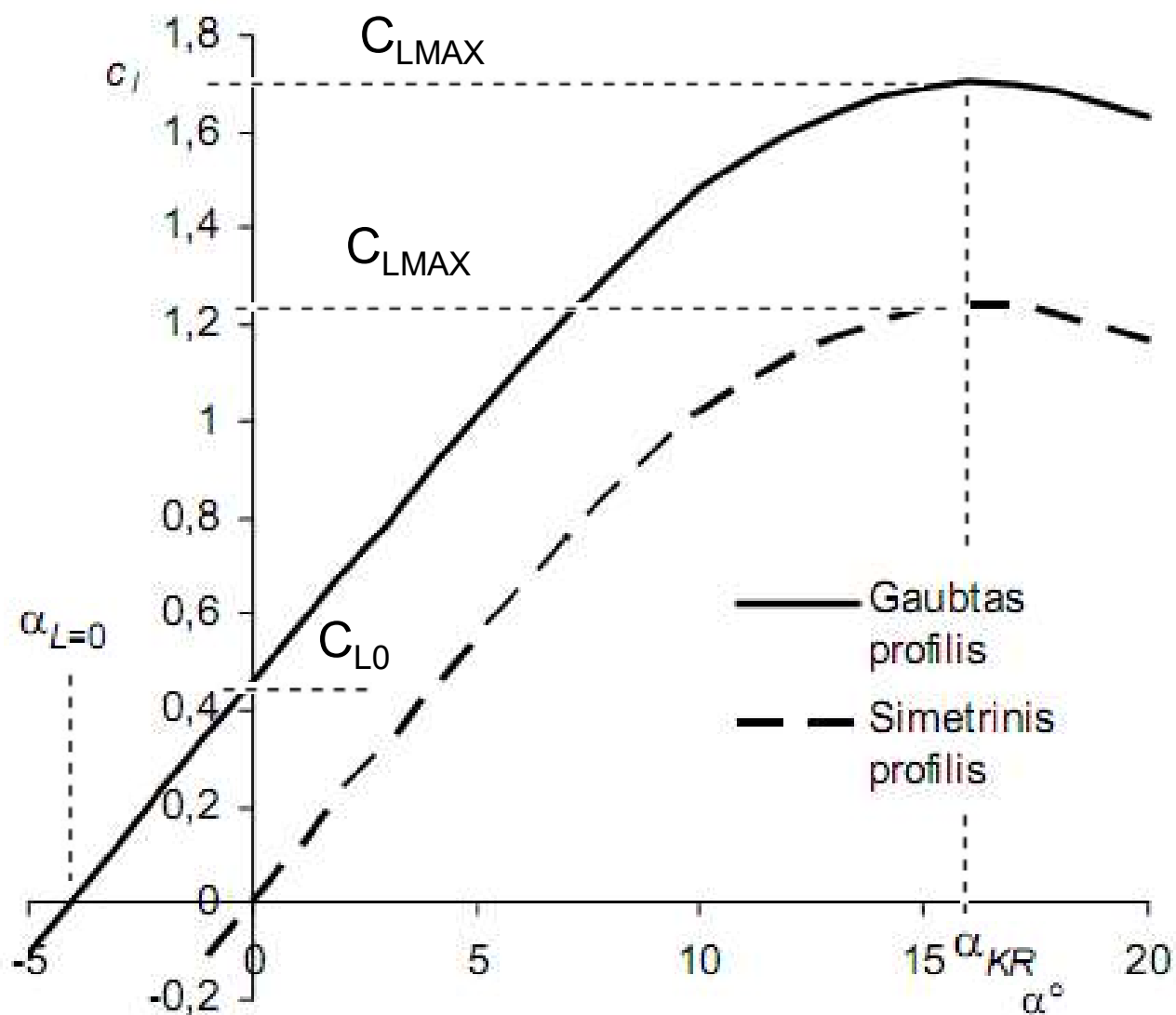
Keliamosios
jėgos lygtis

$$L = C_l S \frac{\rho V^2}{2}$$

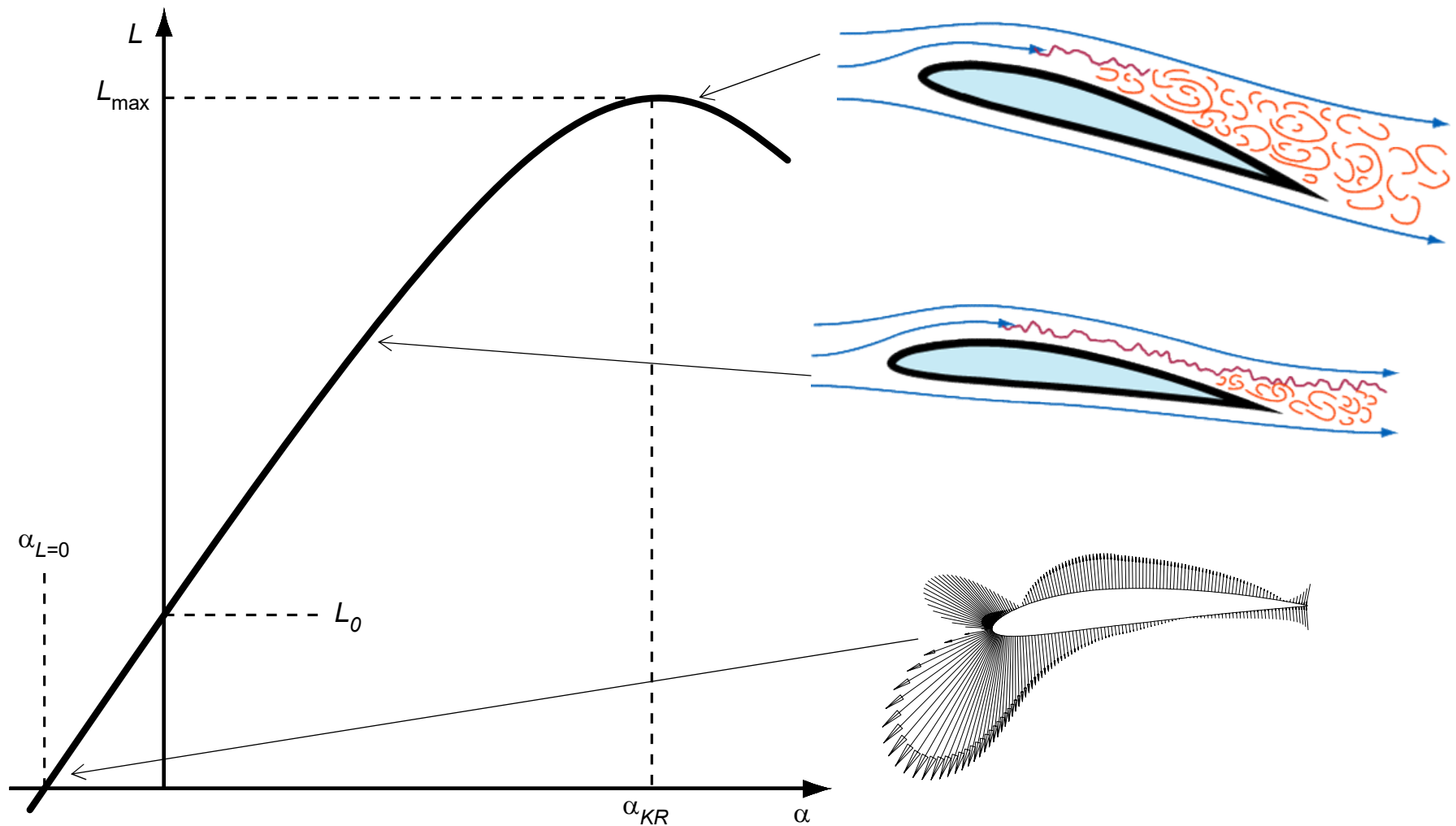


$$C_l(\alpha) \text{ išvestinė } \approx 6,28 \text{ [1/rad]} \approx 0,11 \text{ [1/lps]}$$

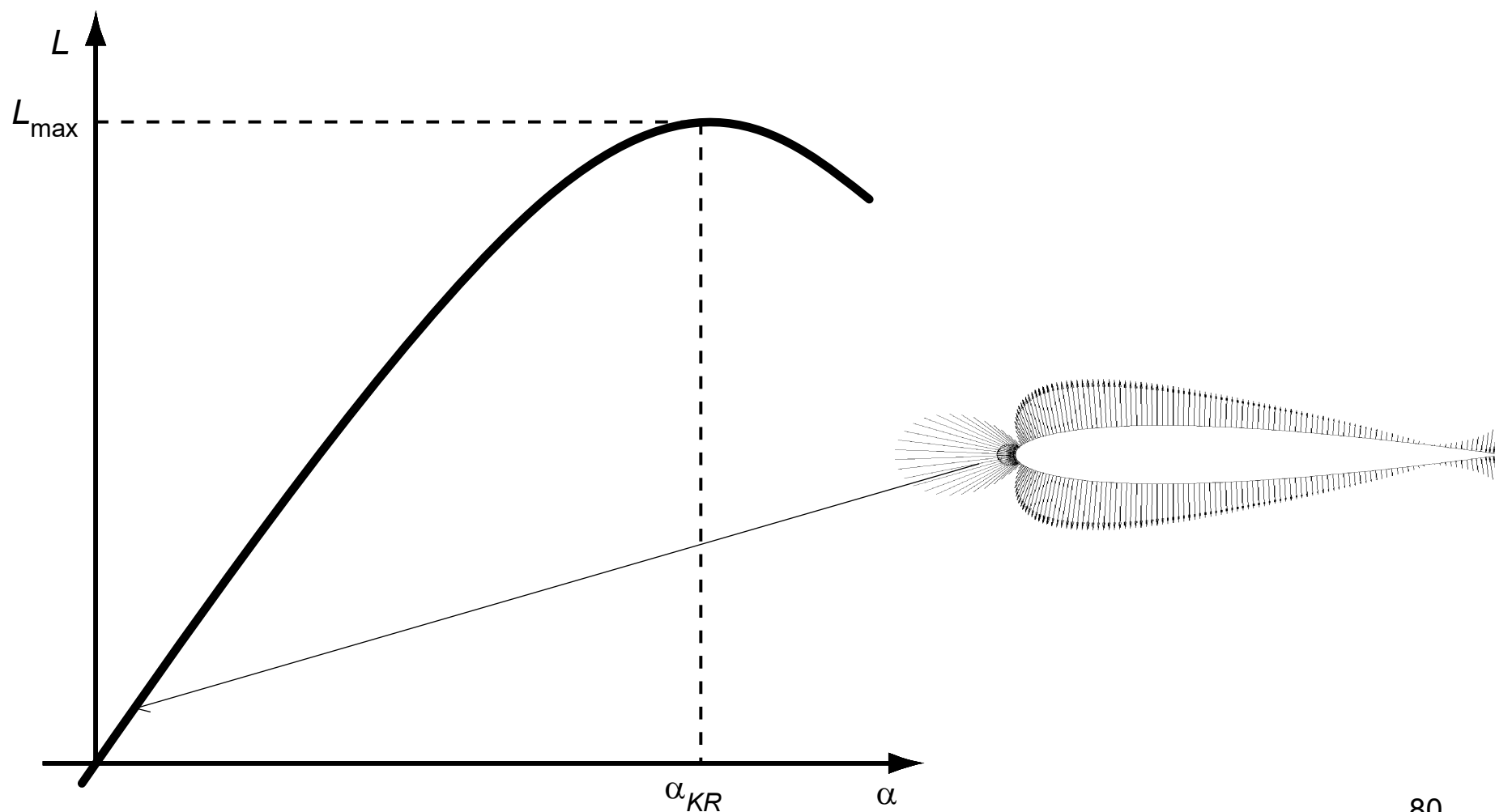
C_L priklausomybė nuo α



Keliamosios jėgos priklausomybė nuo atakos kampo (gaubtas profilis)



Keliamosios jėgos priklausomybė nuo atakos kampo (simetrinis profilis)



Pasipriešinimo jėga

C_D priklausomybė nuo atakos kampo α

Pasipriešinimo jėgos formulė

Pasipriešimo jėga:

$$D = C_D \frac{\rho V_{\infty}^2}{2} S$$

- Proporcinga oro tankiui;
- Proporcinga greičio kvadratumui;
- Proporcinga charakteringam plotui.

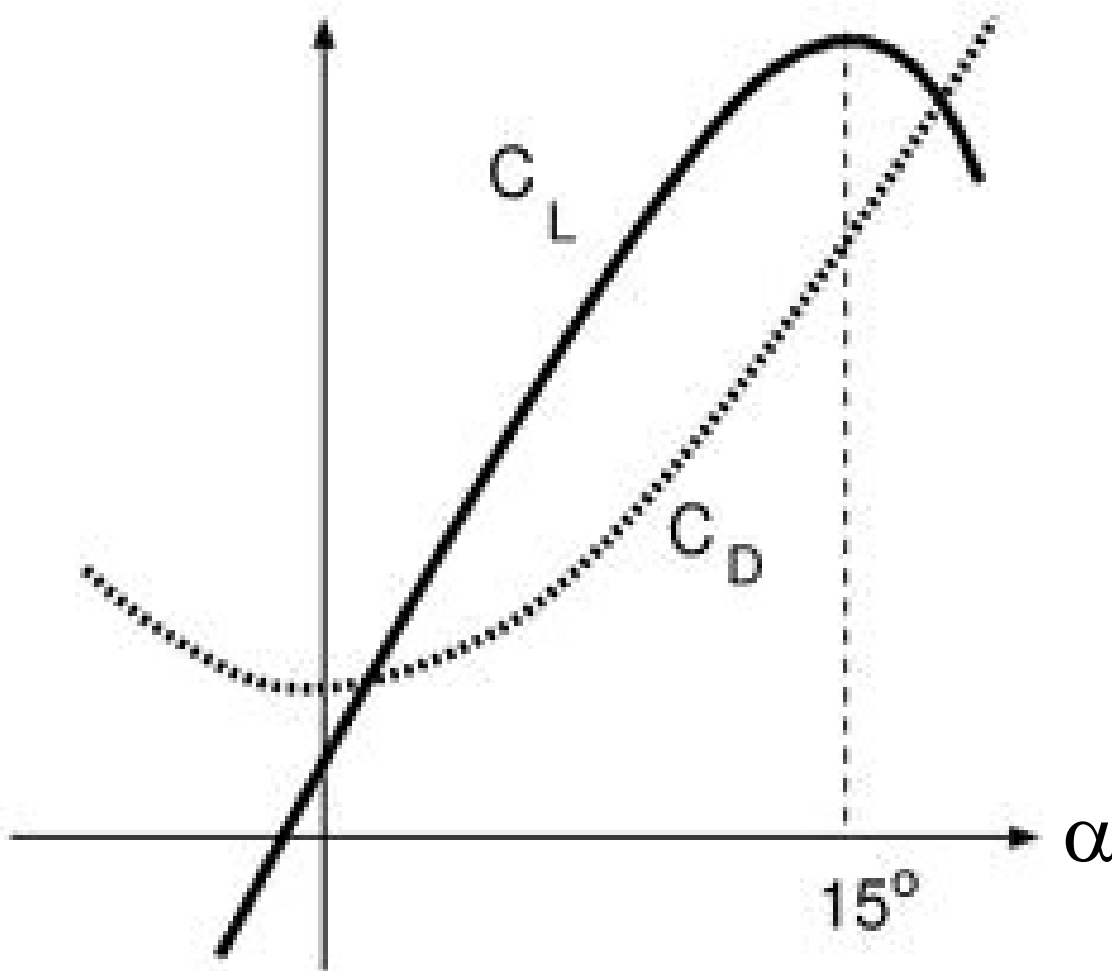
Pasipriešinimo koeficientas

Pasipriešinimo
koeficientas

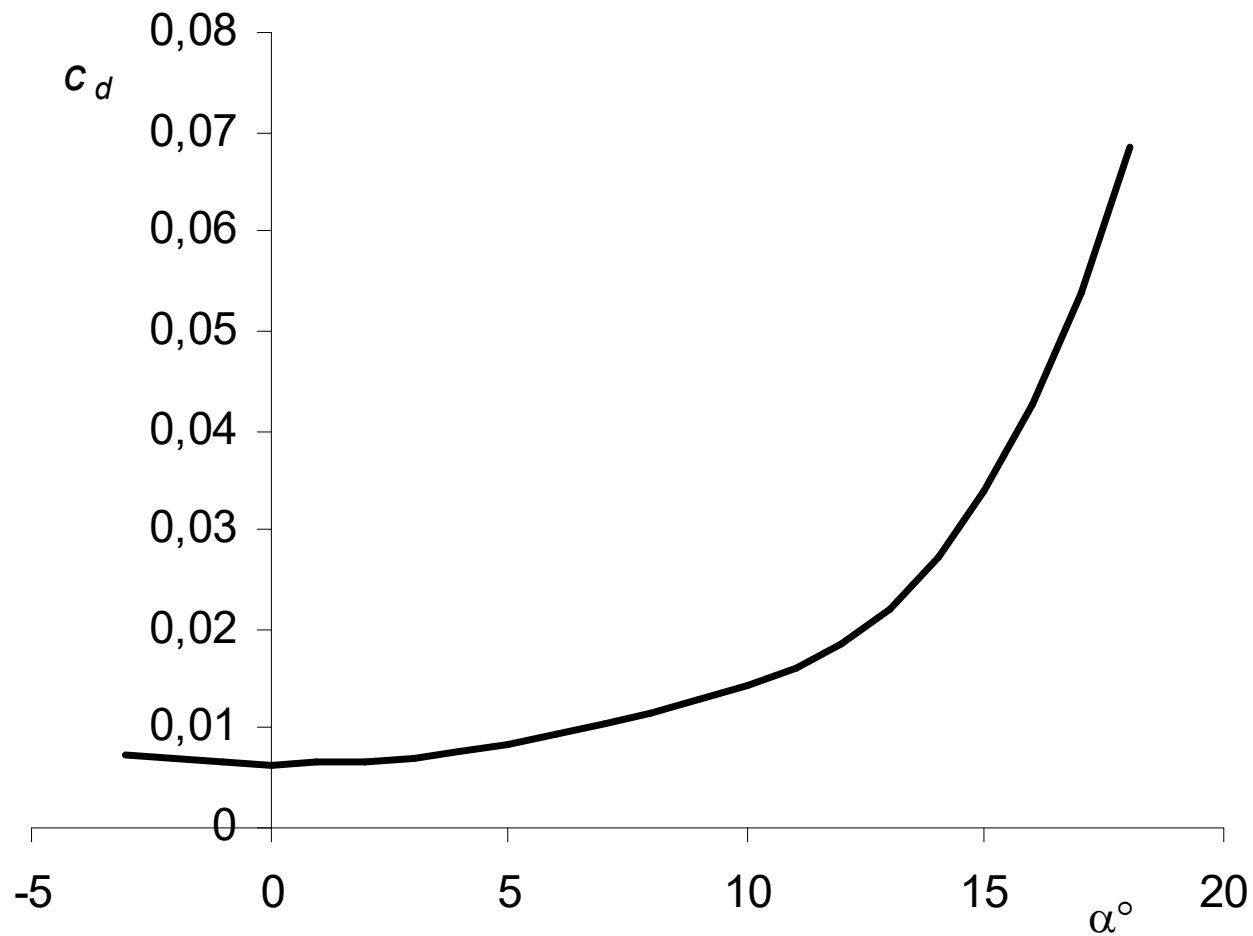
$$C_d = \frac{D}{S \frac{\rho V^2}{2}}$$

Pasipriešinimo
jėga

$$D = C_d S \frac{\rho V^2}{2}$$

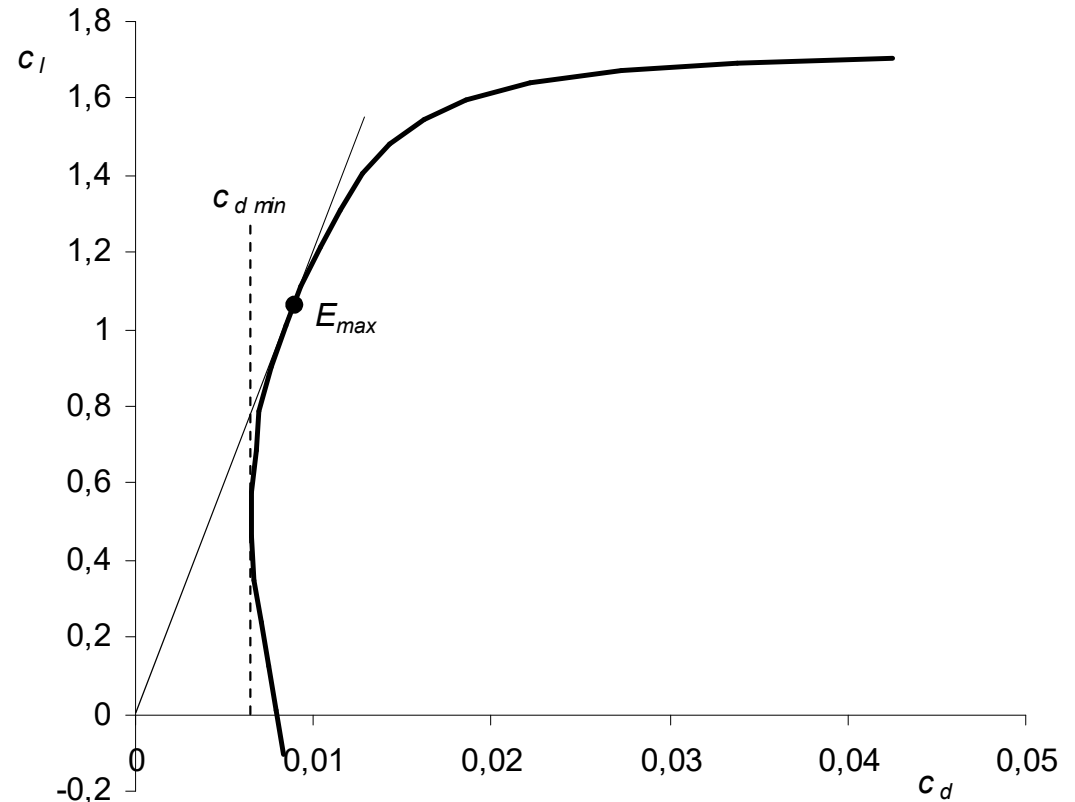
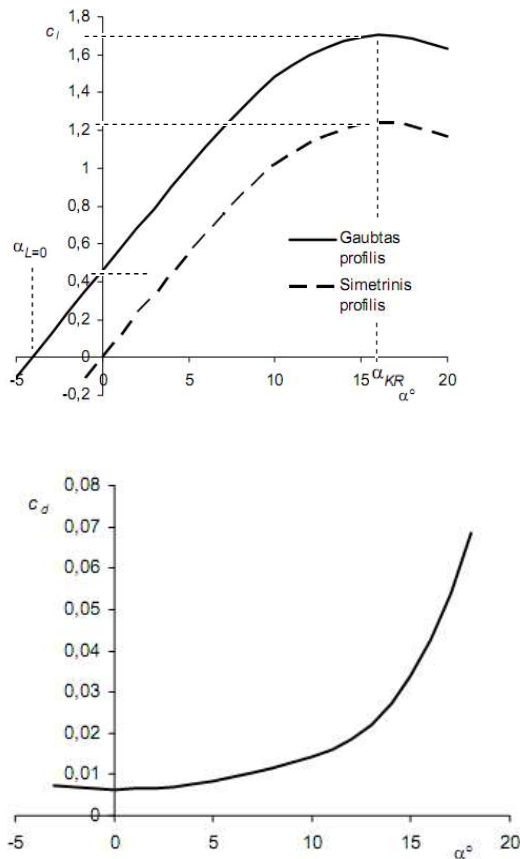


C_D priklausomybė nuo α

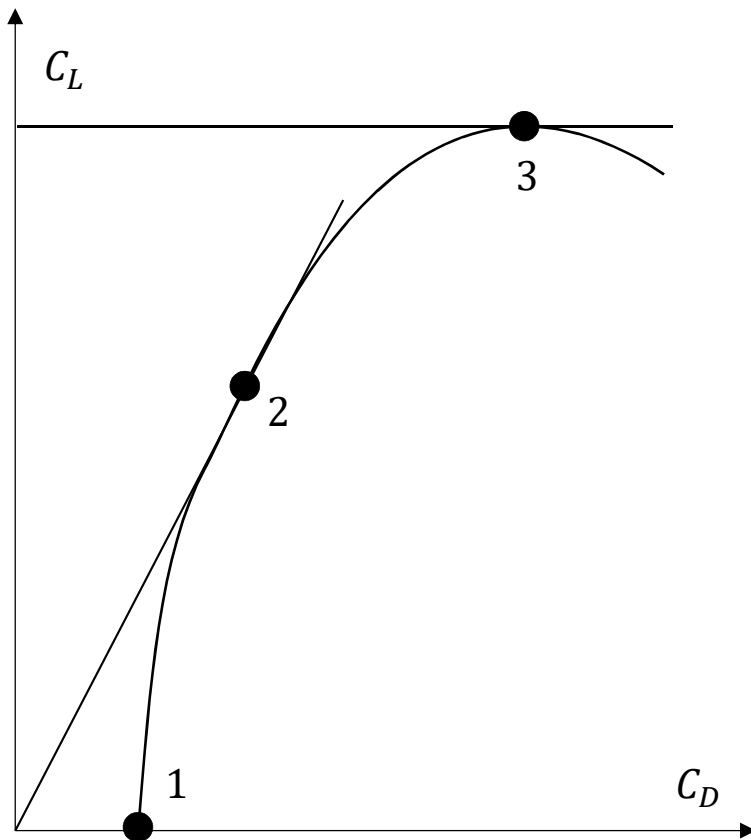


Profilio poliarė

- Profilio poliarė – tai $C_L(\alpha)$ ir $C_D(\alpha)$ viename grafike
- Profilio aerodinaminė kokybė: $E = L/D = C_L/C_D$
 - Profilių $E_{\max} \approx 100 \div 200$



Taškai poliarėje



- 1 – nulinės keliamosios jėgos taškas;
- 2 – maksimali aerodinaminė kokybė, naudingiausias režimas;
- 3 – kritinis (smukos) atakos kampas

Profilių aerodinaminės charakteristikos

- Sąstingio taškas;
- Slėgio kitimas profilio paviršiuje;
- Atakos kampo įtaka slėgiui profilio paviršiuje;
- Slėgio kitimo įtaka L-T virsmui;
- Profilio formos įtaka aerodinaminėms charakteristikoms.

Sąstingio taškas

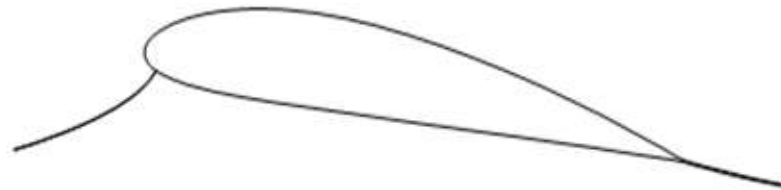
- Sąstingio (kritinis) taškas - taškas ant profilio kontūro priekinėje dalyje, kur srautas išsiskiria į viršutinį ir apatinį;
- Sąstingio taško vietos priklausomybė nuo atakos kampo;
- Sąstingio taške statinis slėgis yra lygus pilnam slėgiui.



Sąstingio taško padėtis, kai atakos kampas mažas

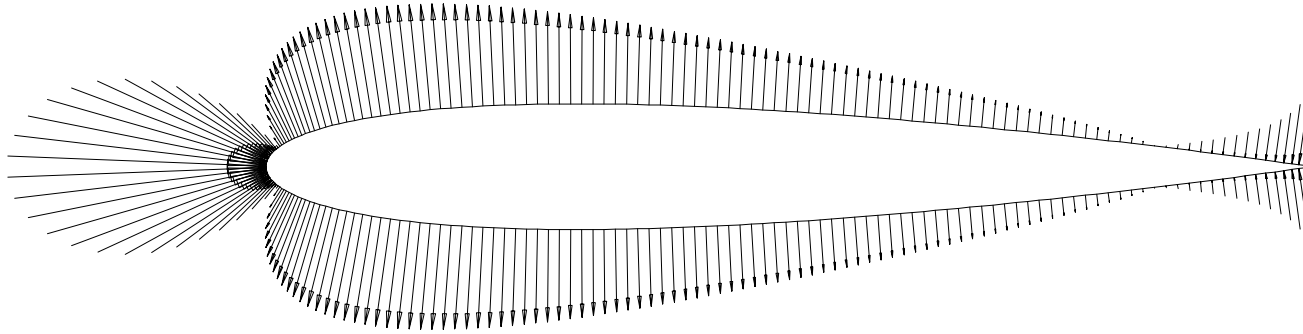


Sąstingio taško padėtis, kai atakos kampas vidutinis

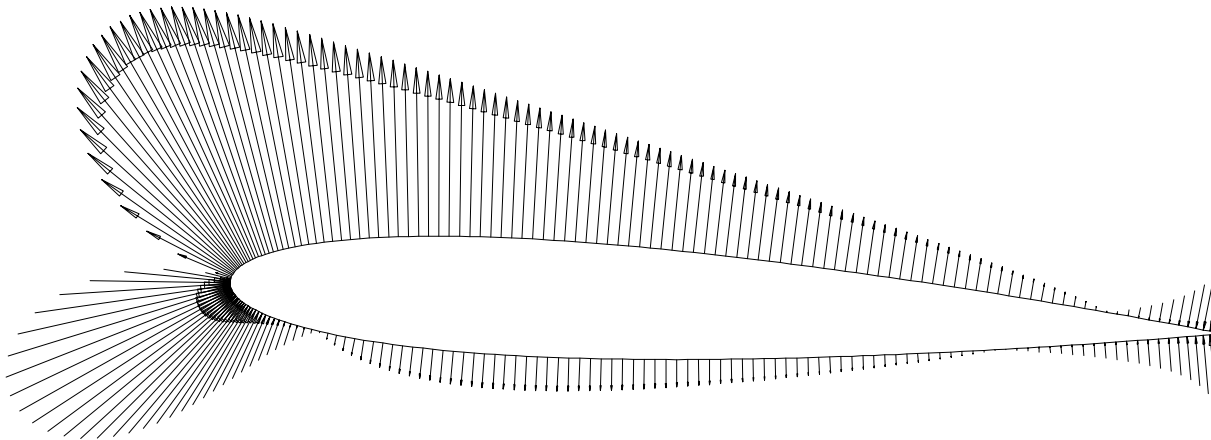


Sąstingio taško padėtis, kai atakos kampas didelis

Slėgis simetrinio profilio paviršiuje

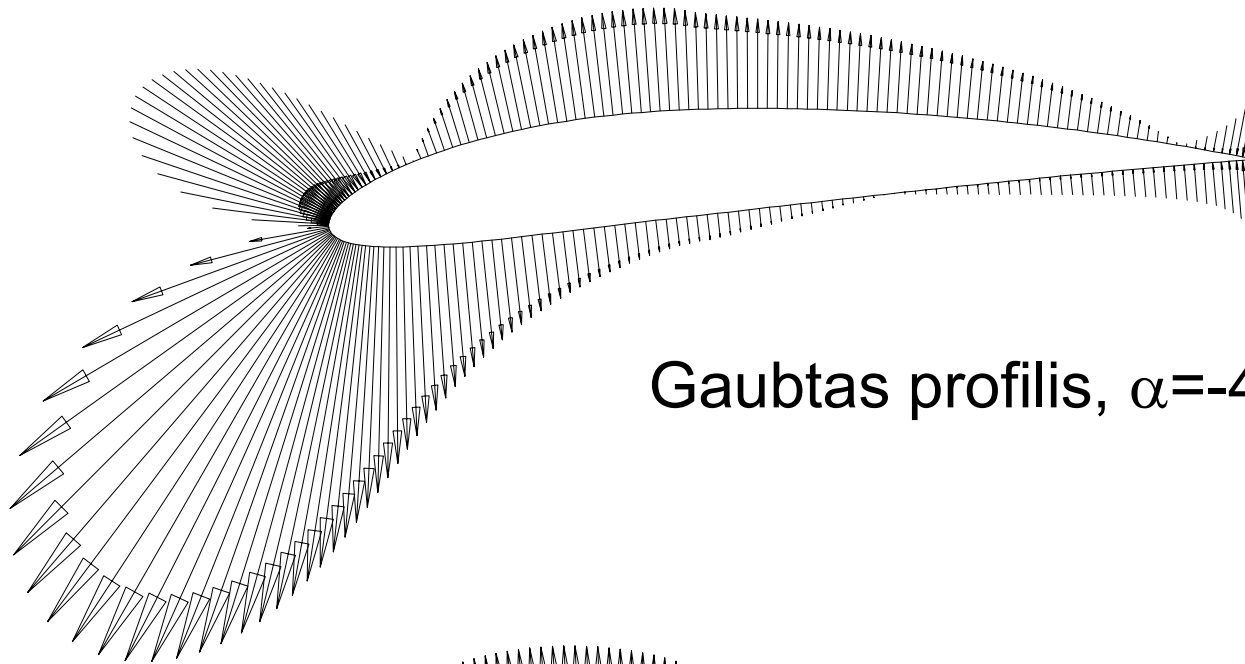


Simetrinis profilis, $\alpha=0$

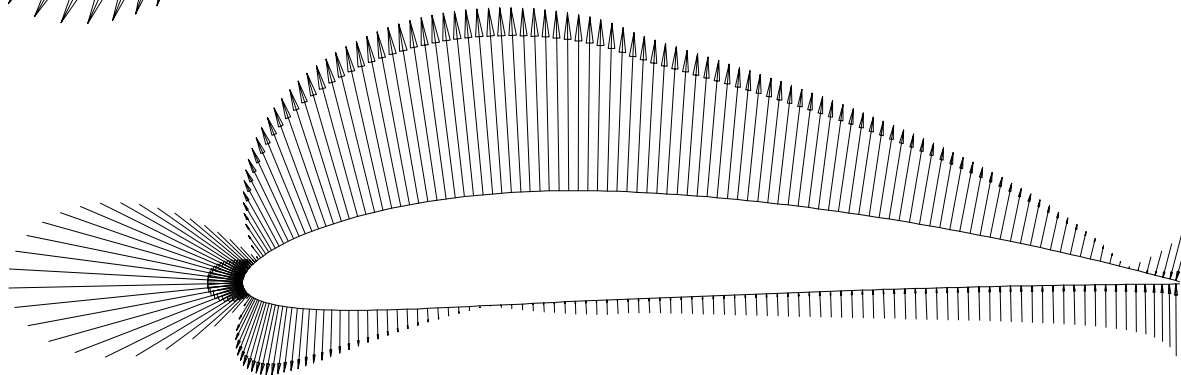


Simetrinis profilis, $\alpha=3^\circ$

Slėgis gaubto profilio paviršiuje

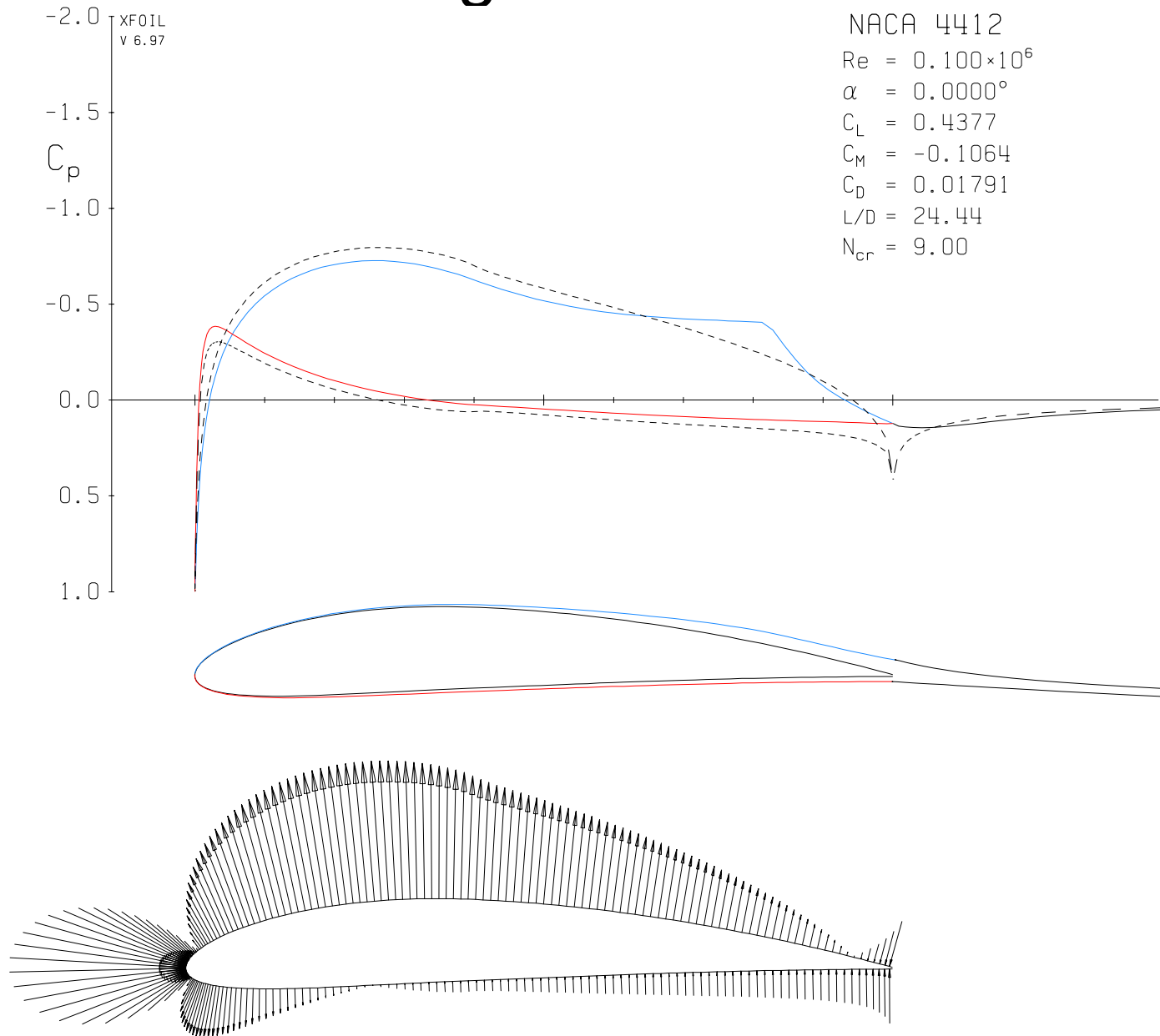


Gaubtas profilis, $\alpha = -4,2^\circ$; $C_L = 0$

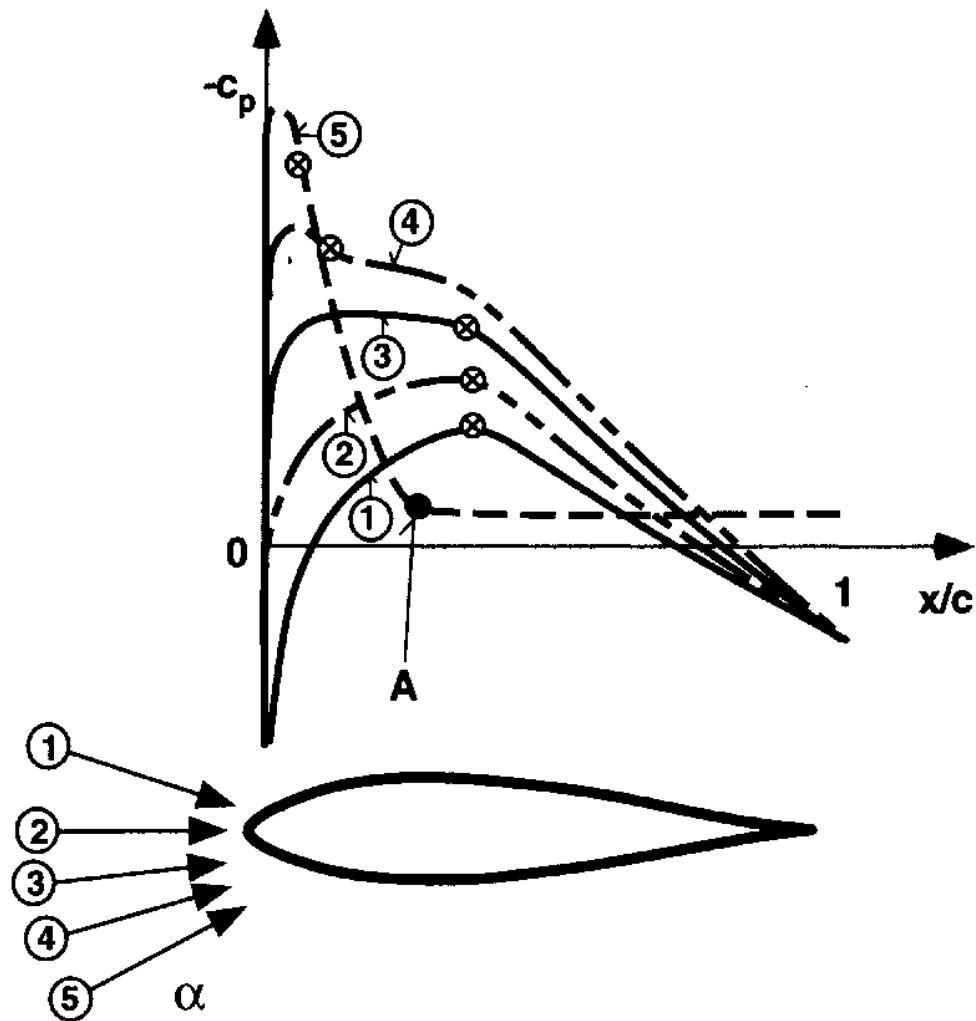


Gaubtas profilis, $\alpha = 0^\circ$

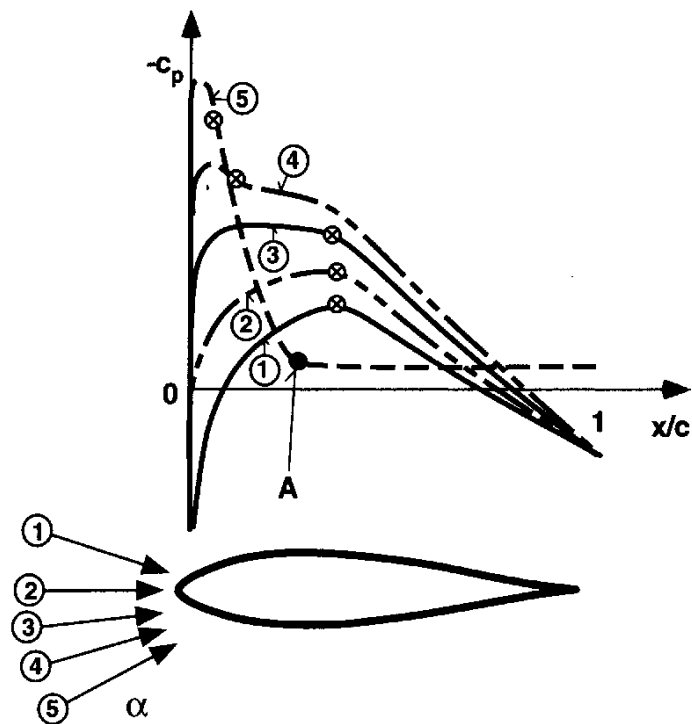
Slégio kitimas



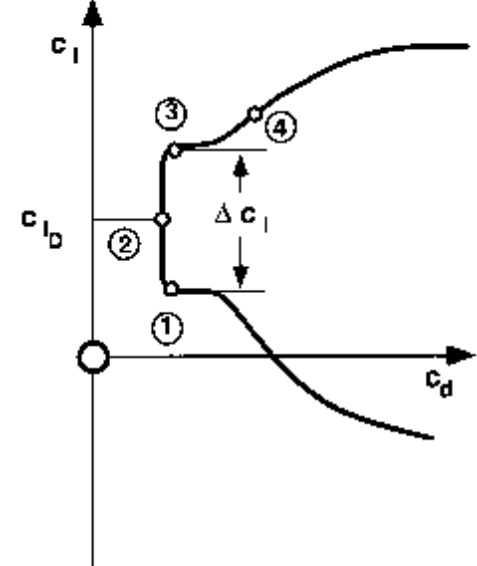
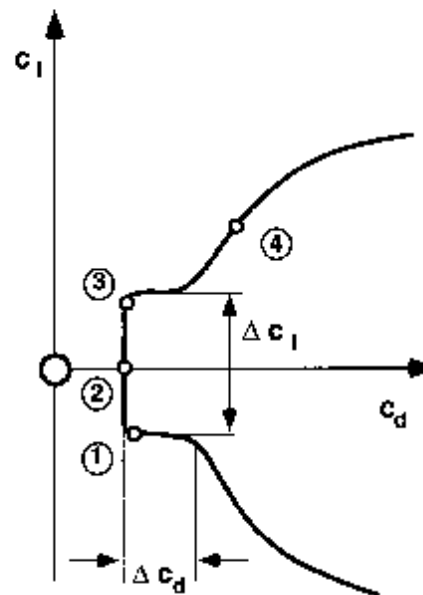
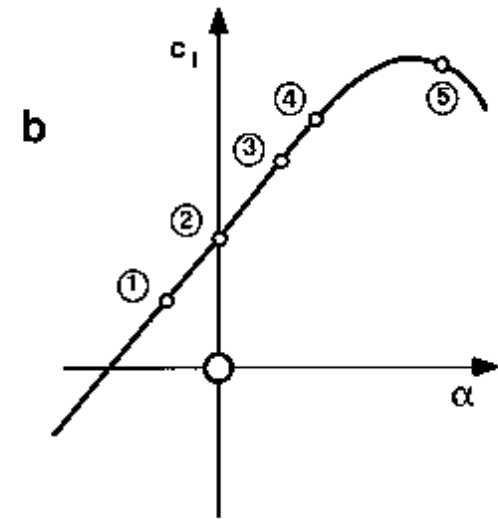
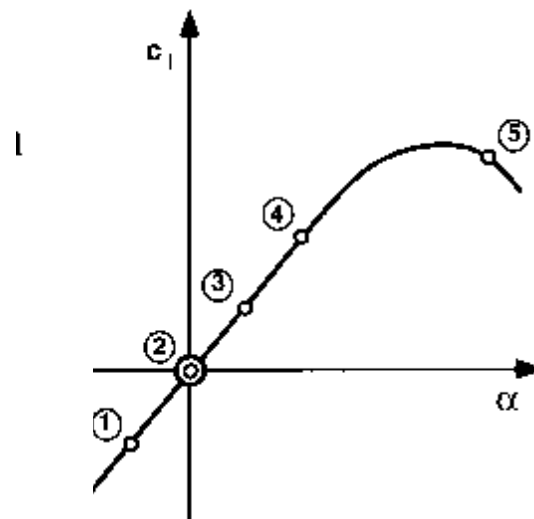
Slėgio kitimas



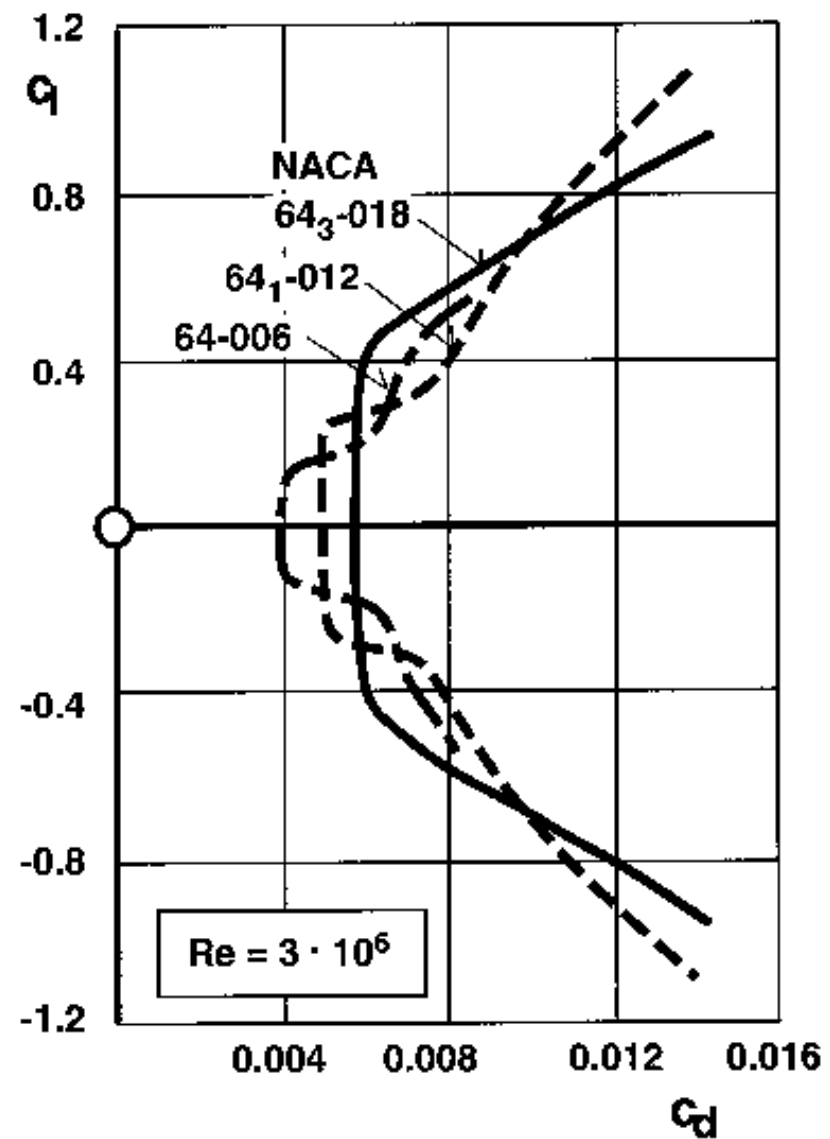
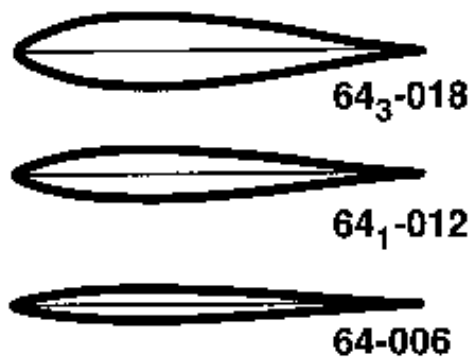
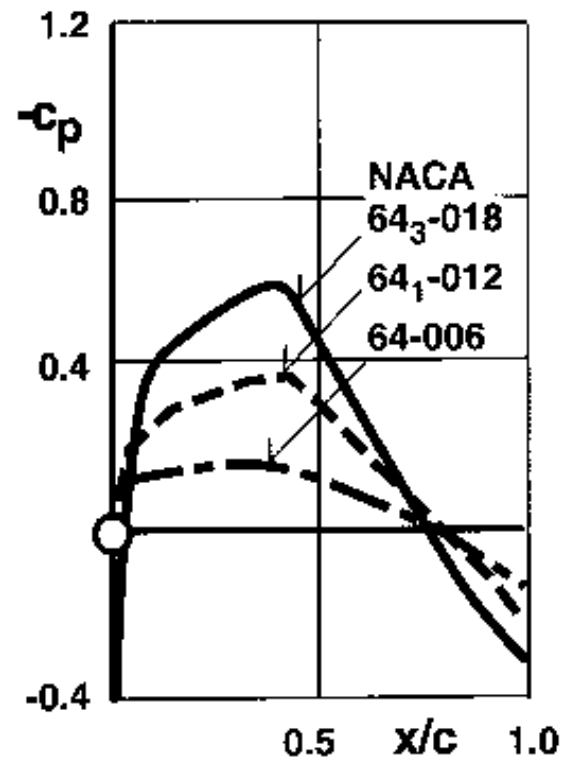
Mažo pasipriešinimo sritis



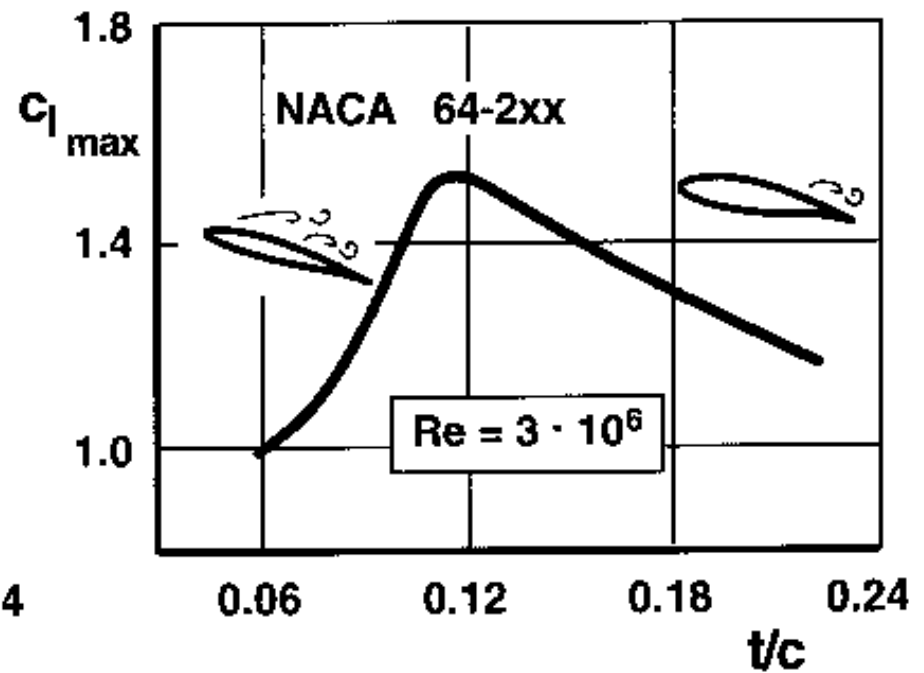
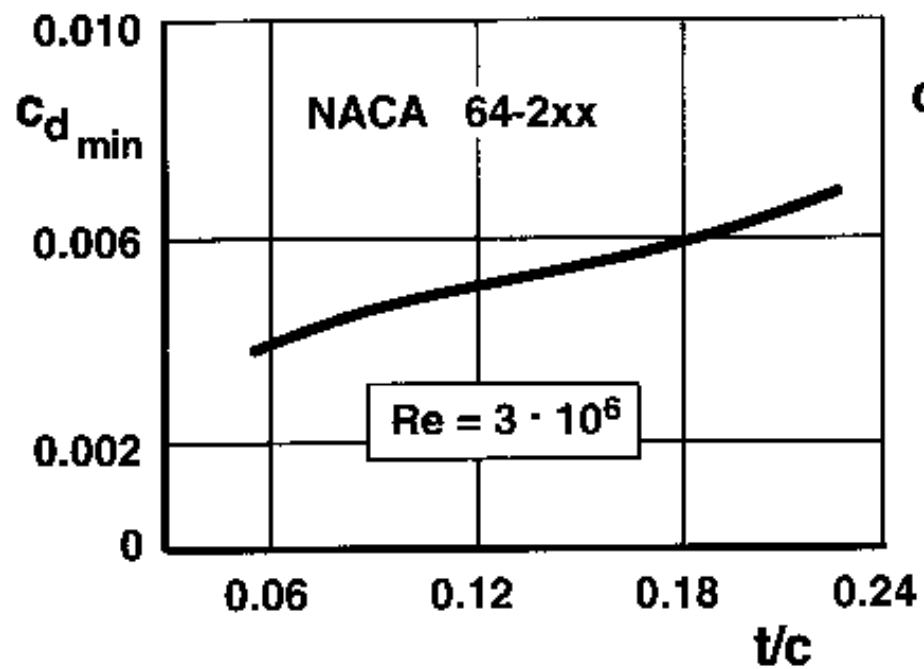
F. Thomas



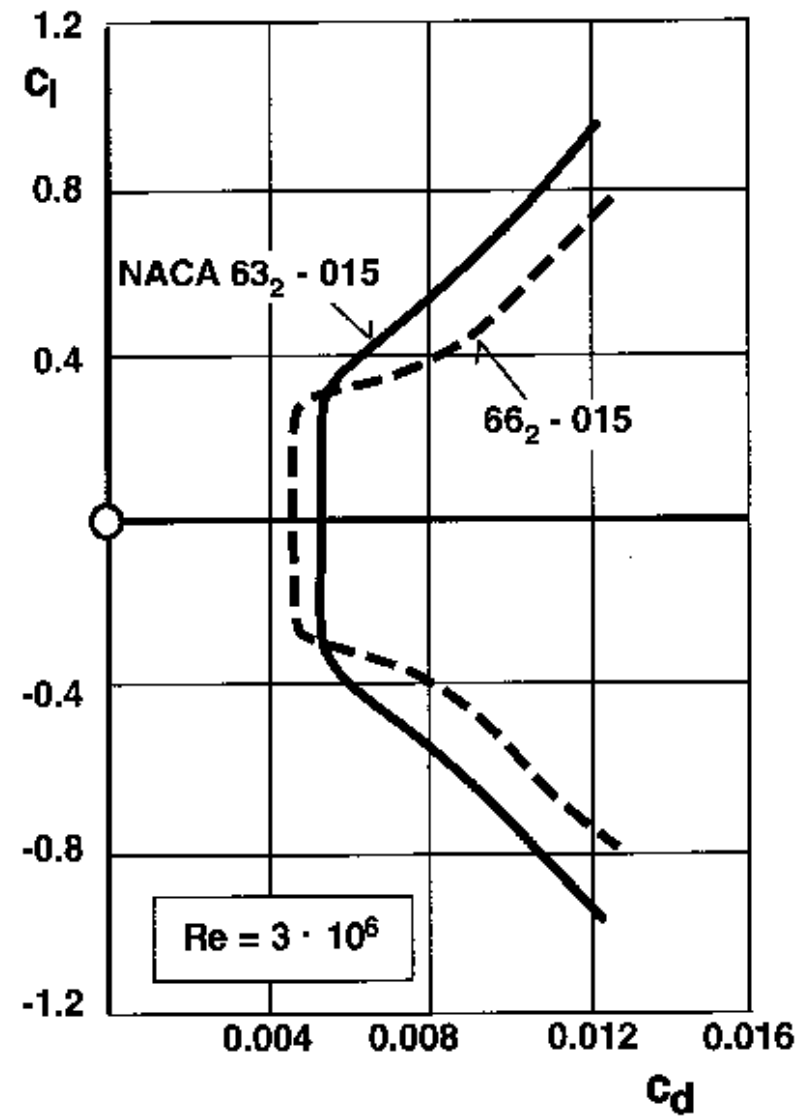
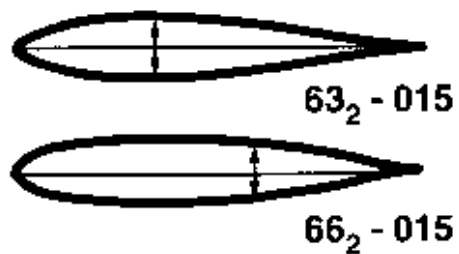
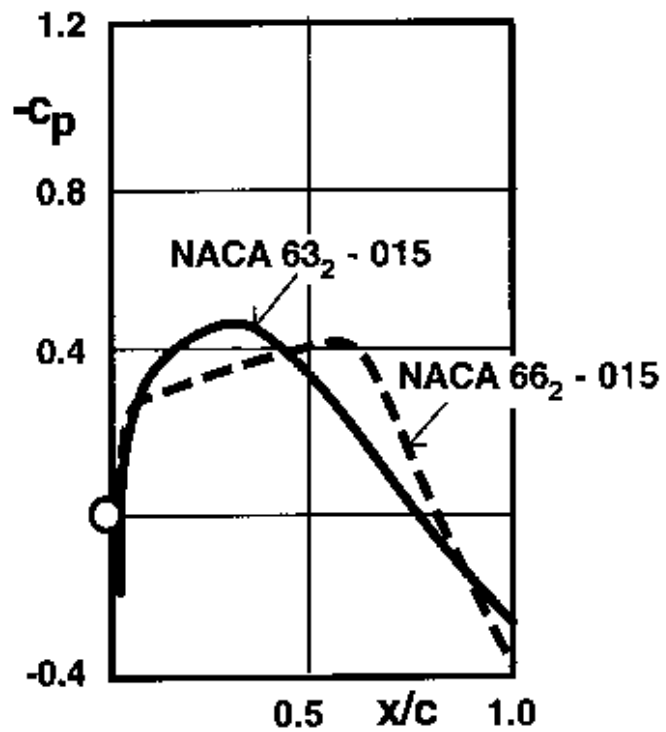
Storio ųtaka



Storio žitaka

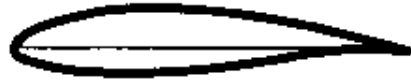


Formos įtaka

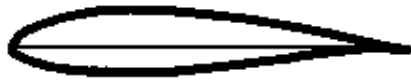


Gaubtumo įtaka

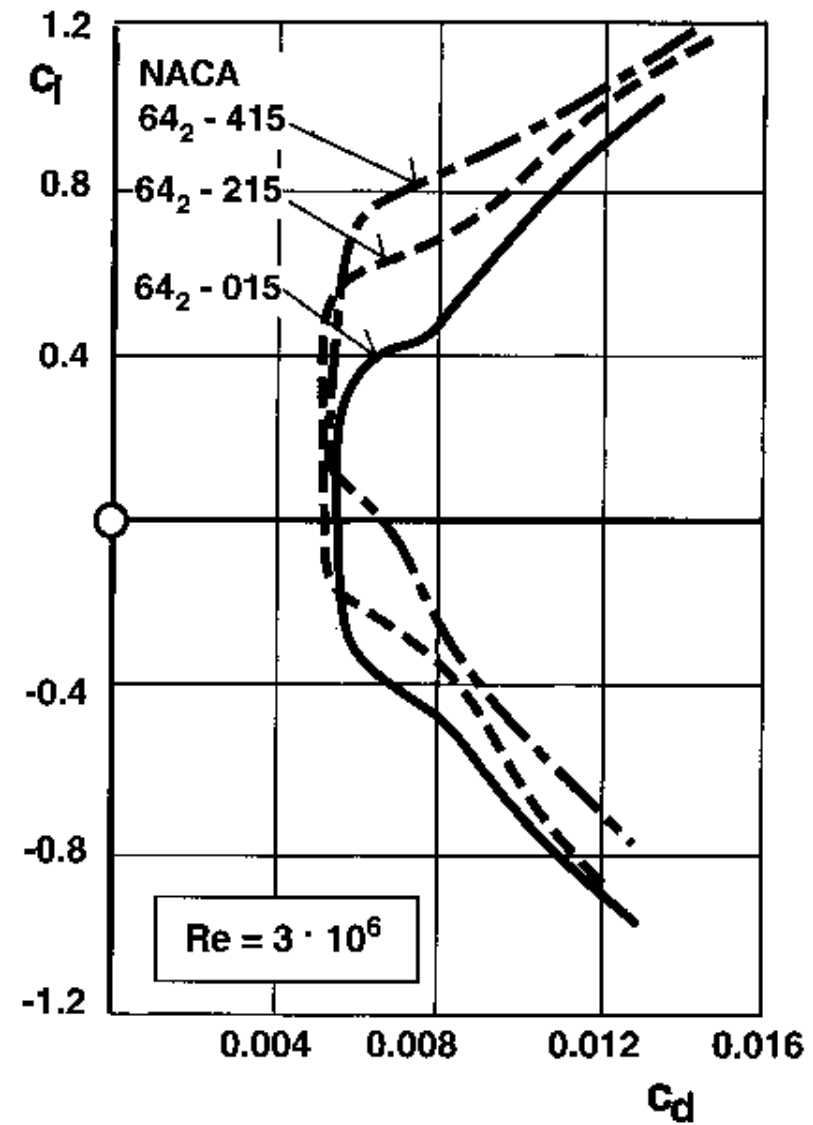
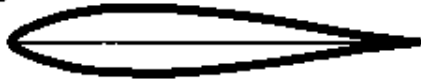
NACA
64₂ - 415



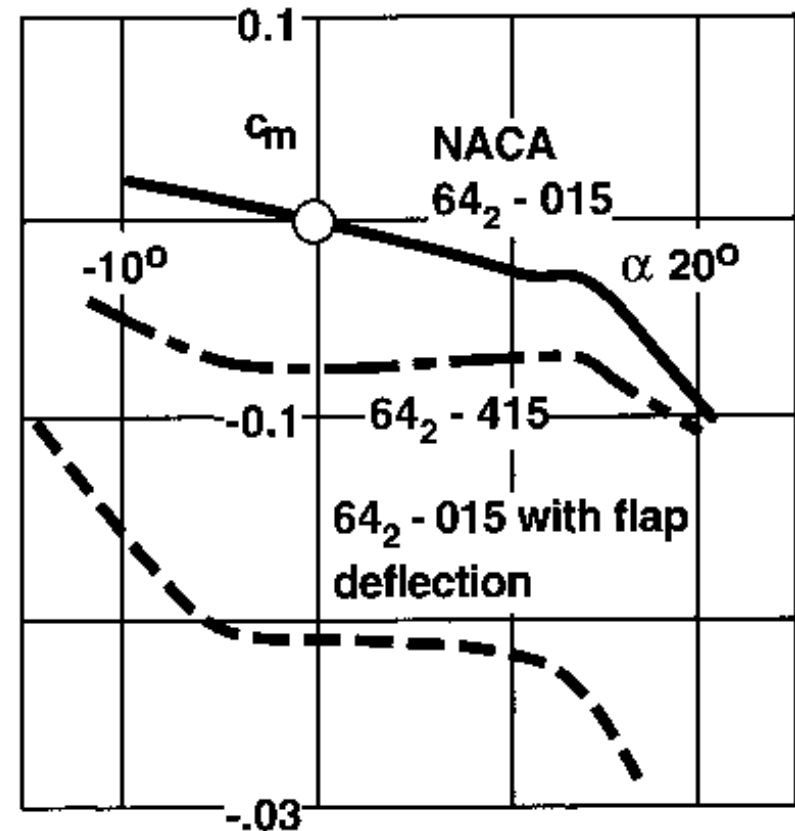
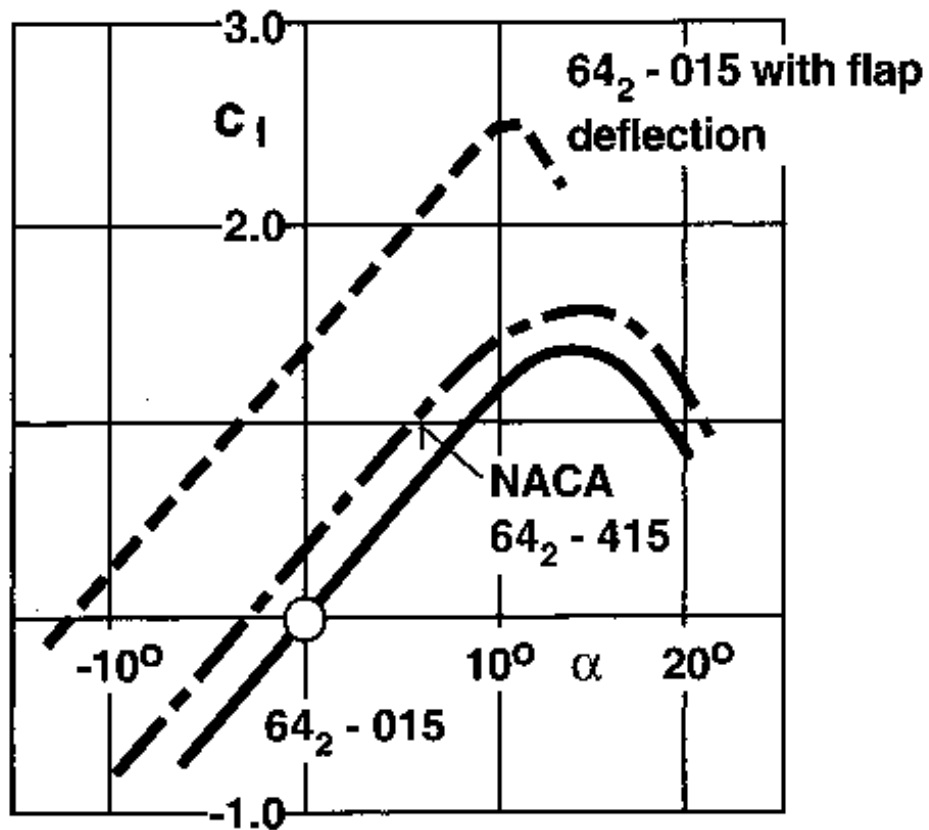
64₂ - 215



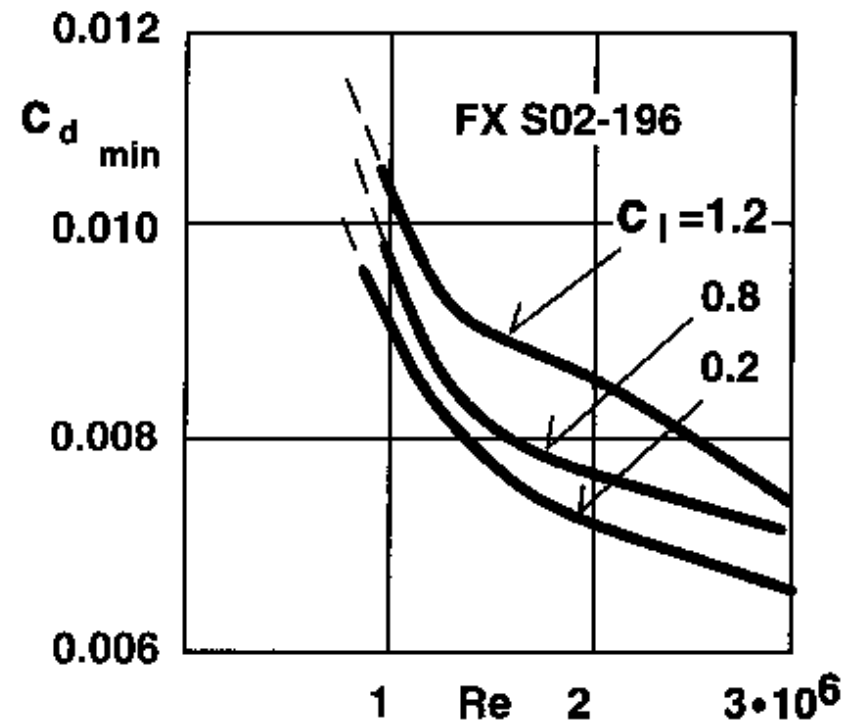
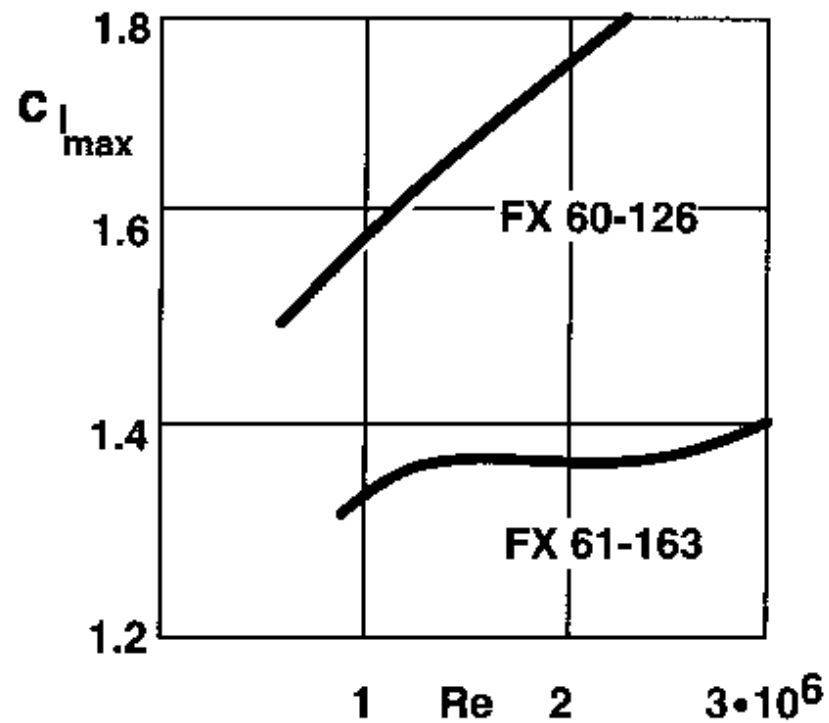
64₂ - 015



Gaubtumo ir užsparnio įtaka



Reinoldso skaičiaus įtaka



$$D_{Pr} = C_{D_{Pr}} \frac{\rho V^2}{2} S$$

PILNASIS
PASIPRIEŠINAMAS

ŽALINGAS
(PARAZITINIS)
PASIPRIEŠINAMAS

INDUKCINIS
PASIPRIEŠINAMAS

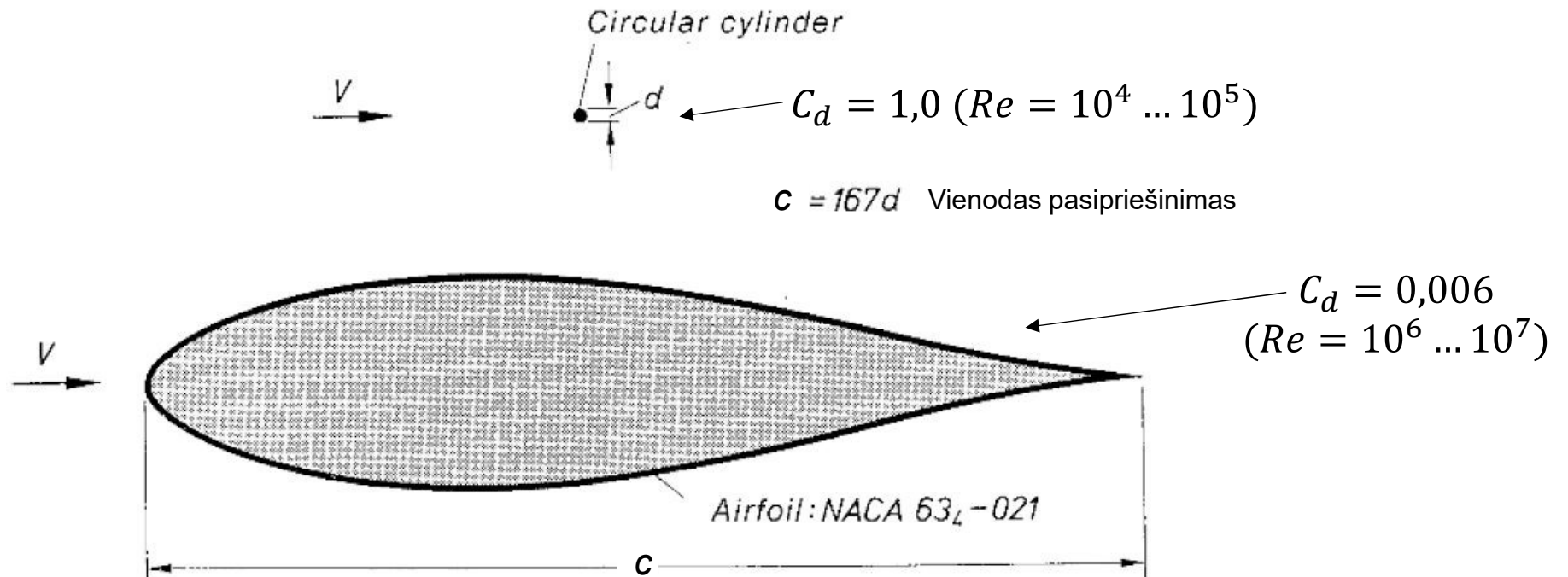
TRINTIES
PASIPRIEŠINAMAS

FORMOS
PASIPRIEŠINAMAS

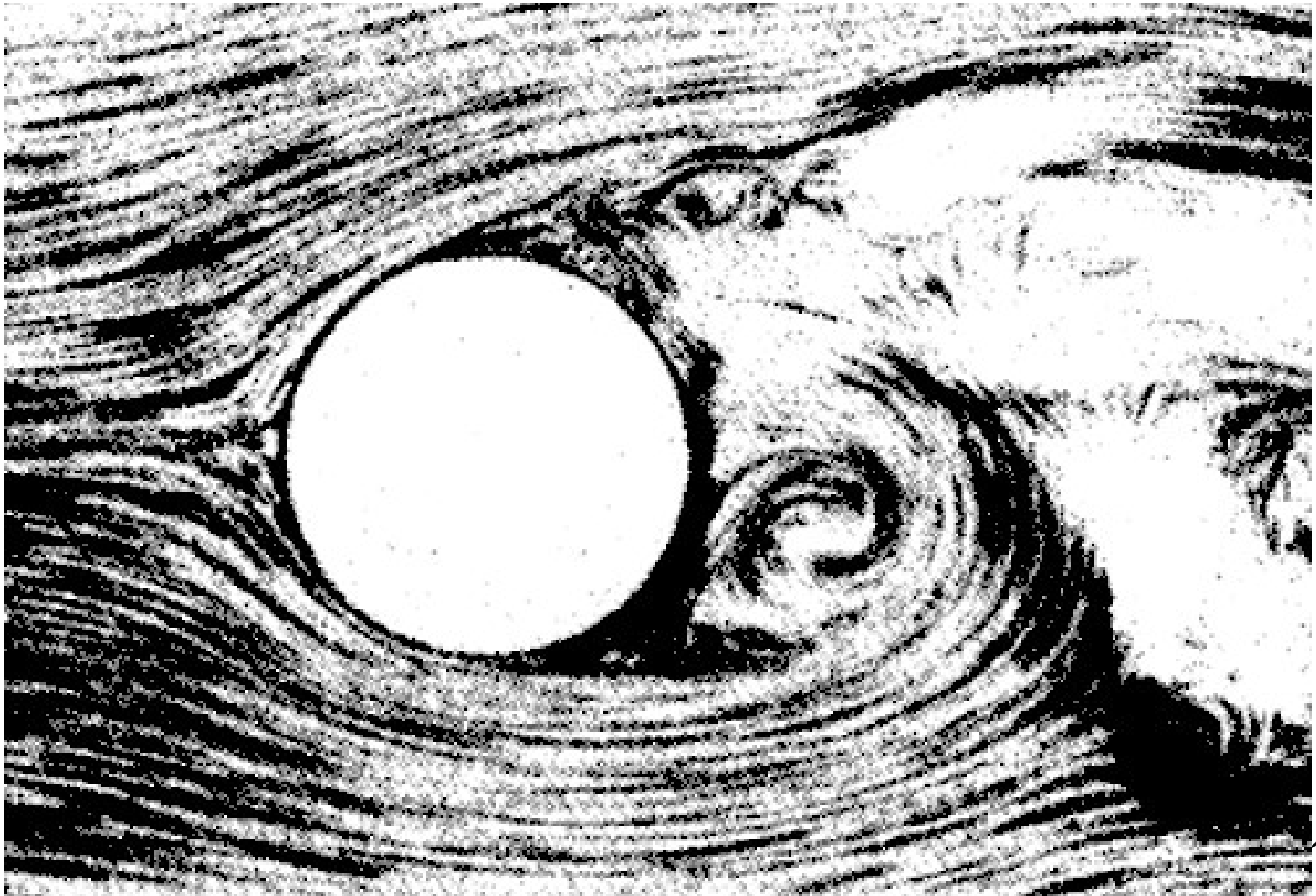
INTERFERENCINIS
PASIPRIEŠINAMAS

PROFILINIS
PASIPRIEŠINAMAS

Vienodo pasipriešinimo kūnai



Atitrūkusio srauto savybės (erdvinis, nestacionarus)



Parazitinis pasipriešinimas

- *Trinties pasipriešinimas* – tai trinties jėgų, atsiradusių dėl oro klampumo suma
- Trinties pasipriešinimą įtakoja:
 - Srovės greitis (kuo greitesnis – tuo didesnė)
 - Tėkmės rūšis (turbulentinio srauto yra 3-5 kartus didesnė nei laminarinio)
 - Paviršiaus glotnumas
- *Slėgio pasipriešinimas* - tai jėga, veikianti išilgai srauto ir atsiradusi dėl padidėjusio slėgio prieš kūną ir sumažėjusio už jo.
 - Priklauso nuo kūno formos ir atakos kampo
 - Lemiamą įtaką turi atitrūkusio srauto srities dydis
- *Profilinis pasipriešinimas* – tai trinties ir slėgio pasipriešinimų suma

Slėgio pasipriešinimas



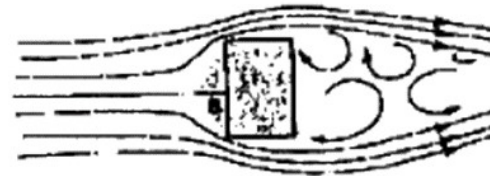
$C_d = .083$



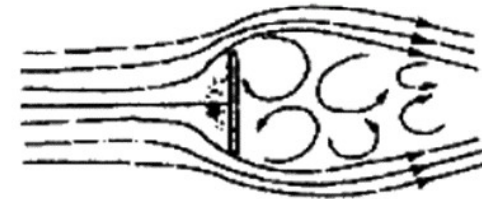
$C_d = .58$



$C_d = .17$



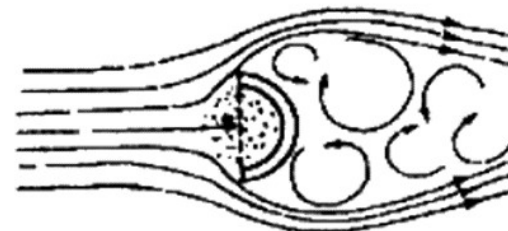
$C_d = .91$



$C_d = 1.11$

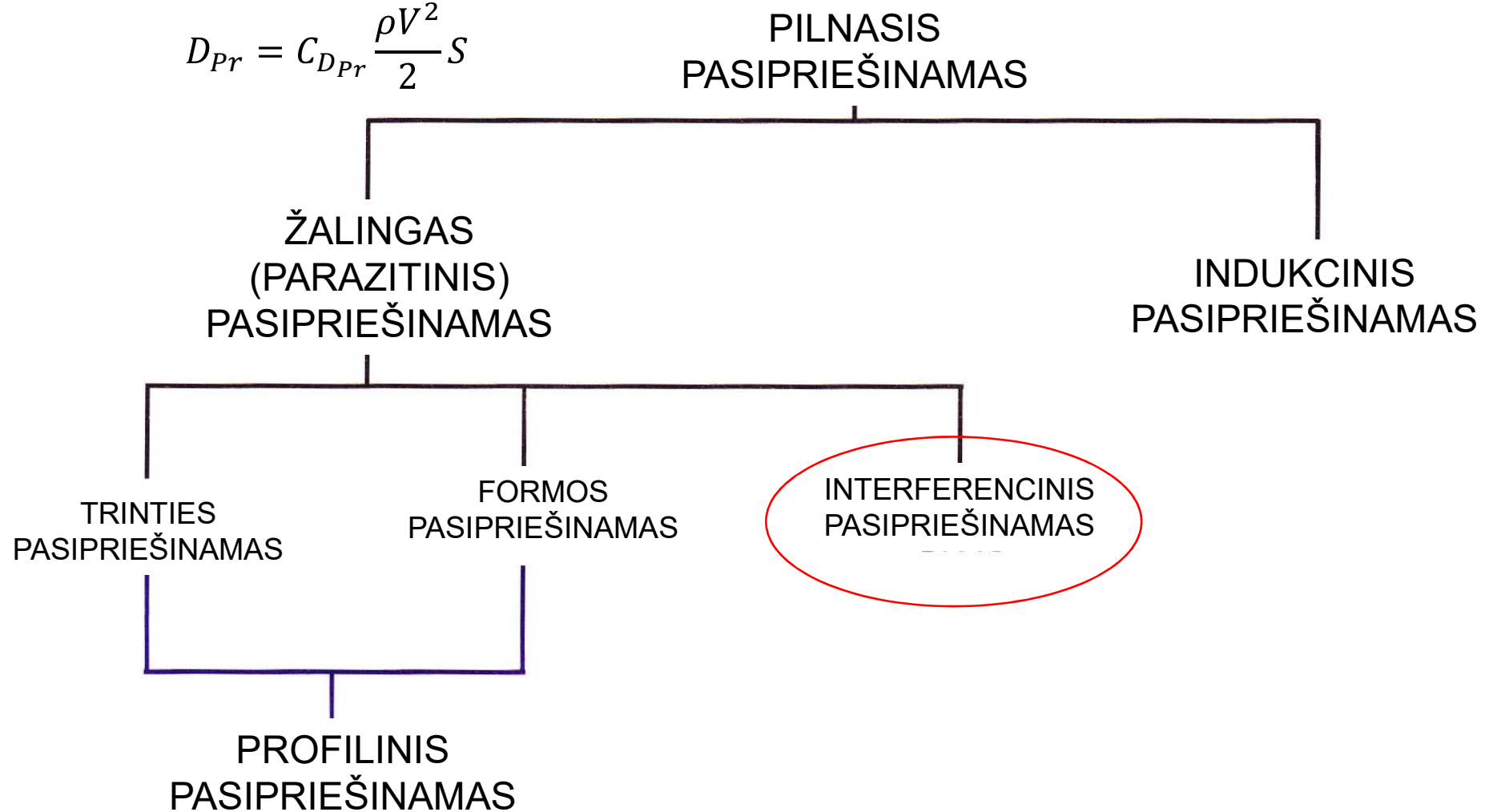


$C_d = .31$



$C_d = 1.33$

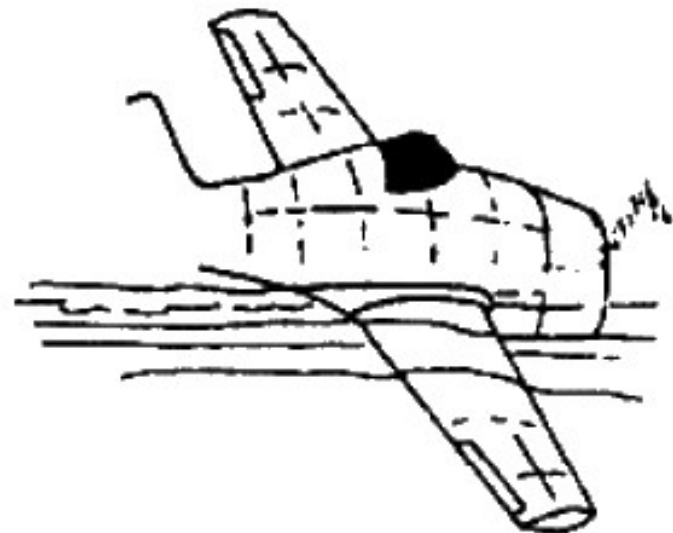
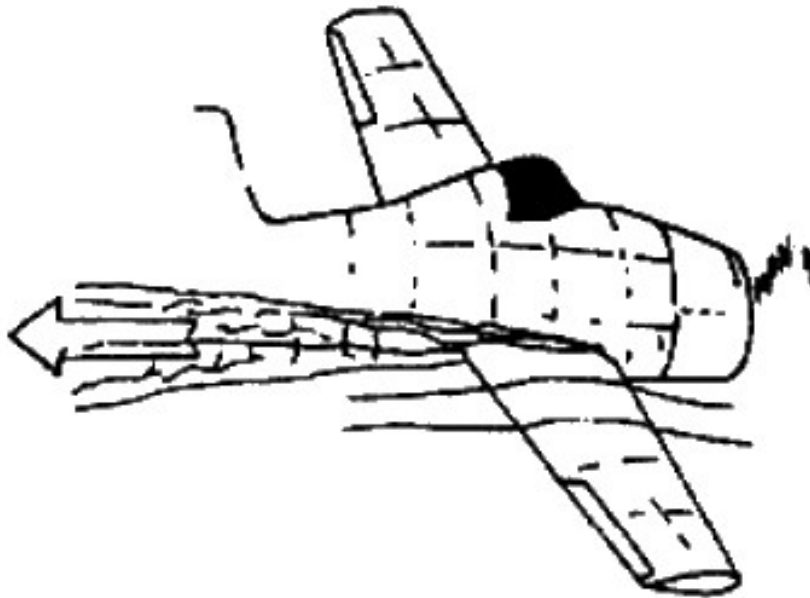
$$D_{Pr} = C_{D_{Pr}} \frac{\rho V^2}{2} S$$



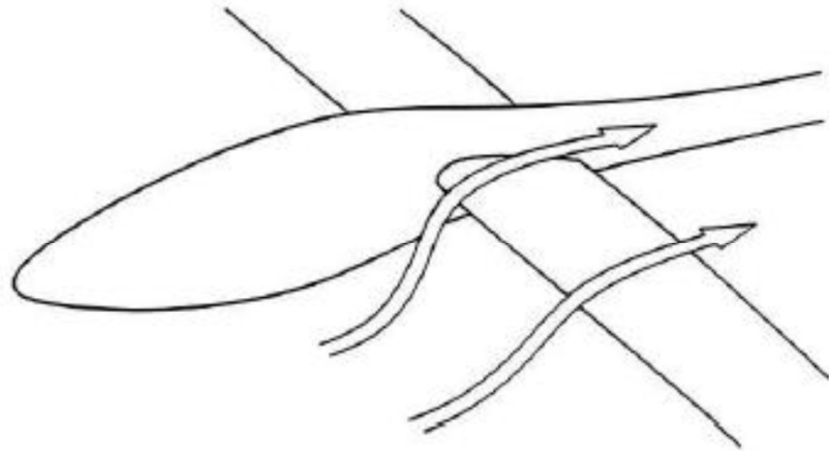
Interferencinis pasipriešinimas

Pasipriešinimo padidėjimas, atsirandantis sujungus dvi ar daugiau orlaivio dalių

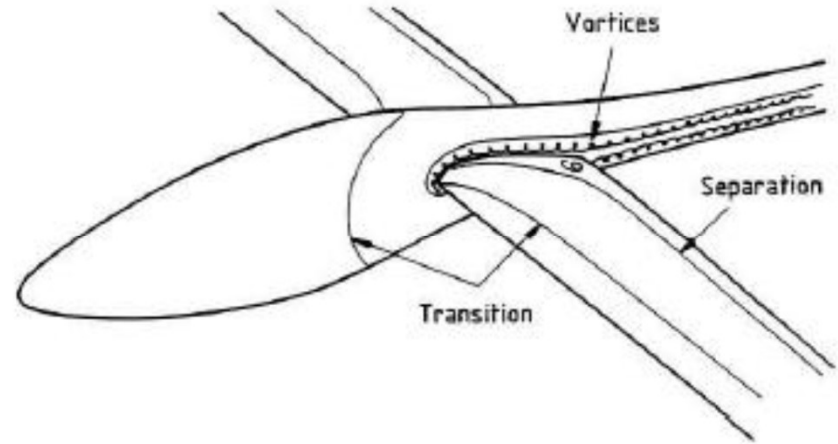
- Susijęs su atskirų lėktuvo dalių tarpusavio įtaka
- Pvz. sparno ir liemens sistemos pasipriešinimas yra didesnis už sparno ir liemens pasipriešinimų sumą
- Mažinimo būdas - sujungimo kampų užapvalinimas



Interferencija



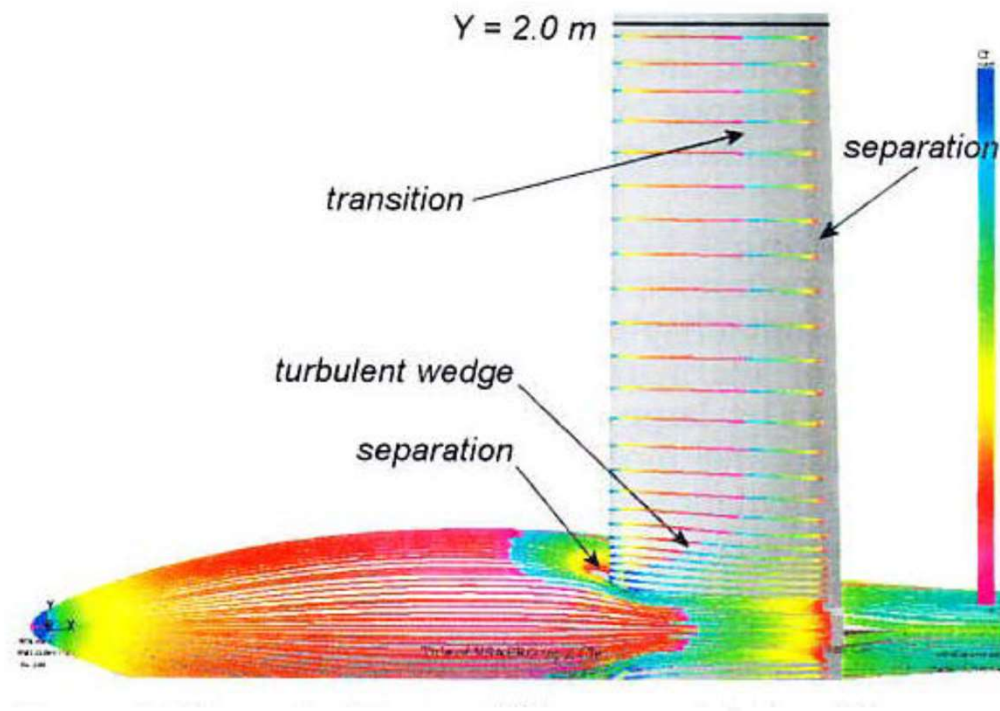
α -flow



Viscous flow



Concordia



Fuselage Streamlines for $CL = 0.30$



Fuselage Streamlines for $CL = 1.20$

Mü 31

Akaflieg München



Mü 31

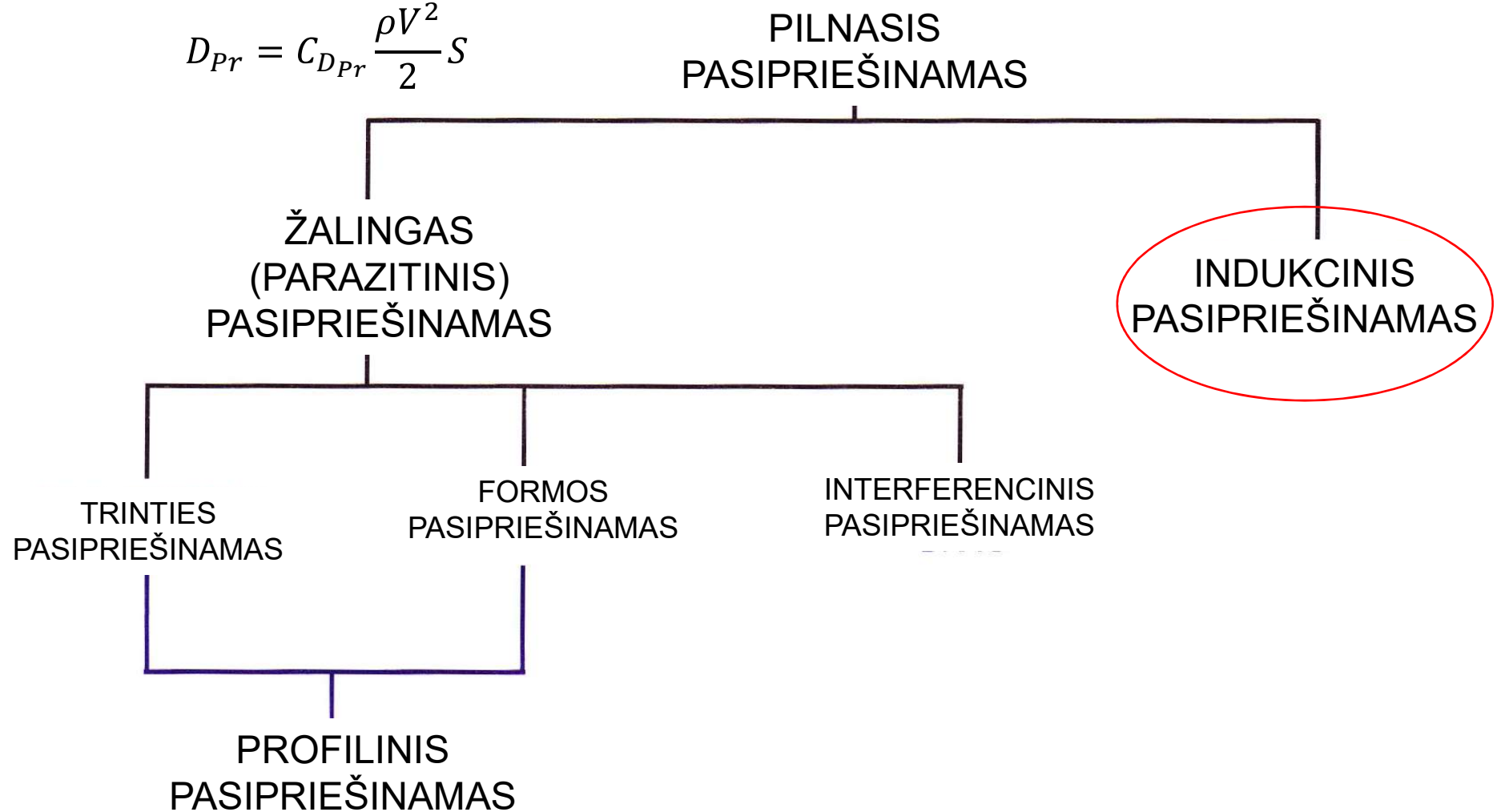
Akaflieg München



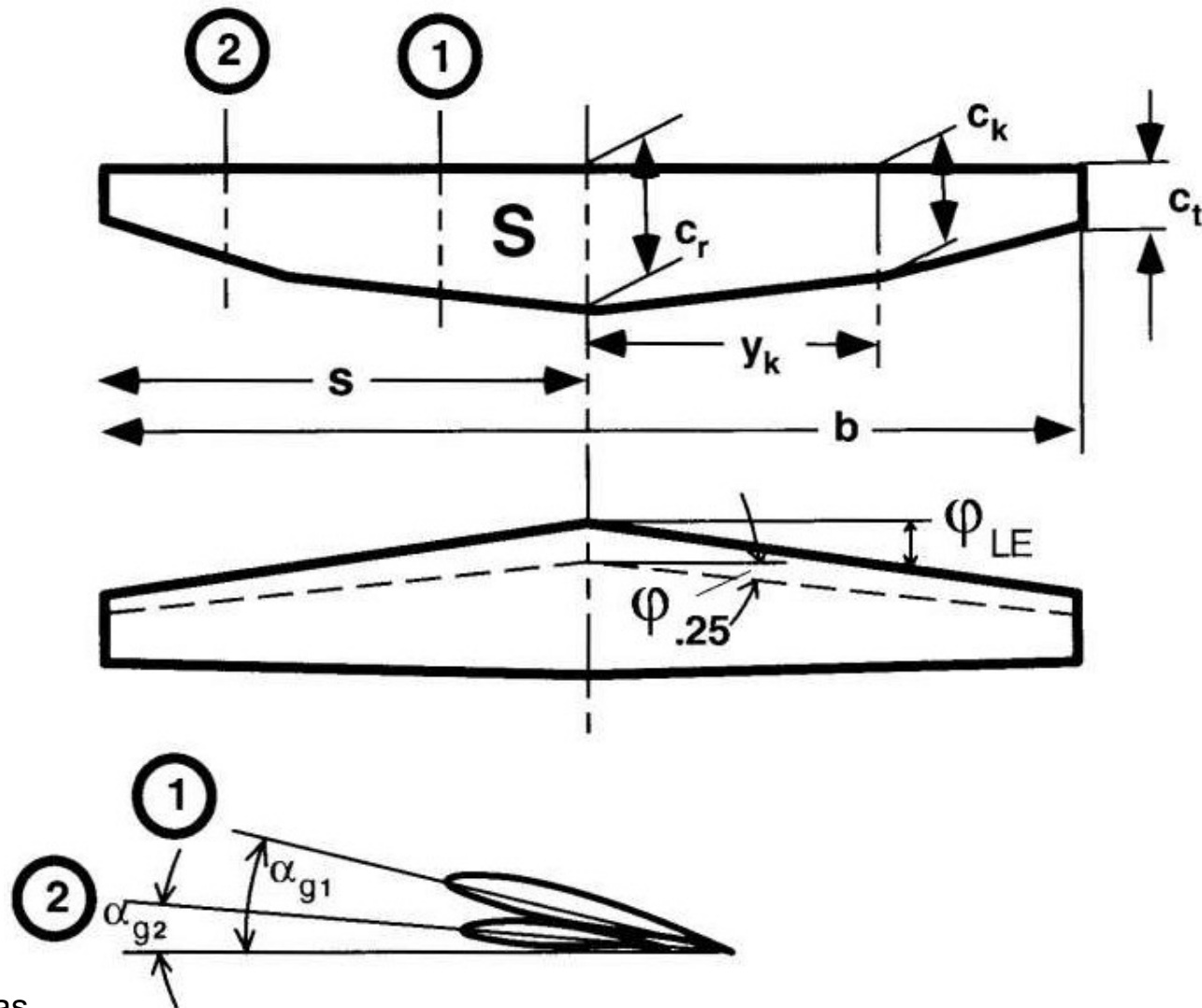
JS 3



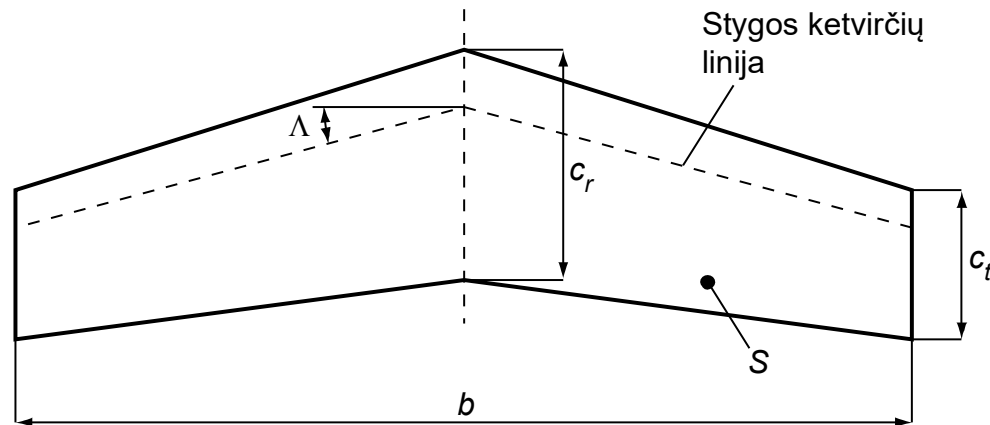
$$D_{Pr} = C_{D_{Pr}} \frac{\rho V^2}{2} S$$



Geometrinės sparno charakteristikos

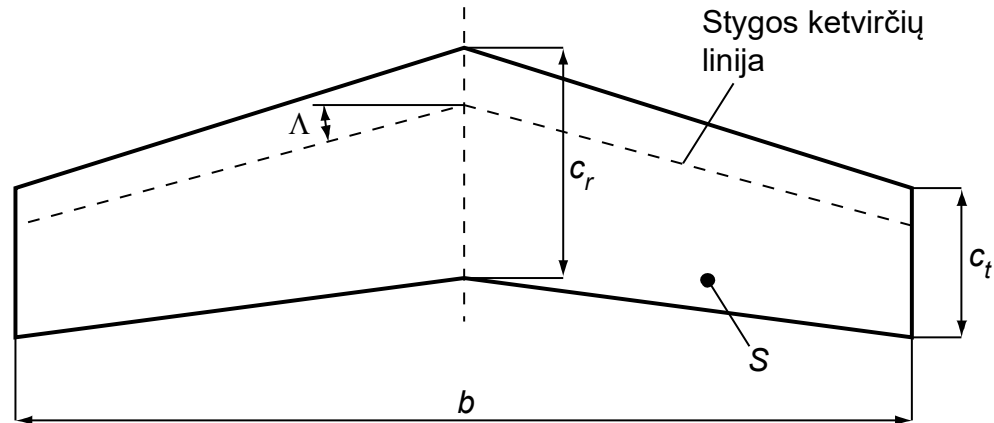


SPARNAS



- Geometrinės sparno charakteristikos:
 - mojis (mostas)
 - Atstumas nuo vieno sparno galo iki kito sparno galo statmenai lėktuvo simetrijos plokštumai yra sparno mostas, žymima **b**
 - plotas
 - Sparno horizontalios projekcijos plotas vadinamas sparno plotu ir žymima raide **S**
 - vidutinė geometrinė sparno styga
 - Sparno plotą padalinus iš sparno mosto gaunama vidutinė geometrinė sparno styga: $c_g = S/b$

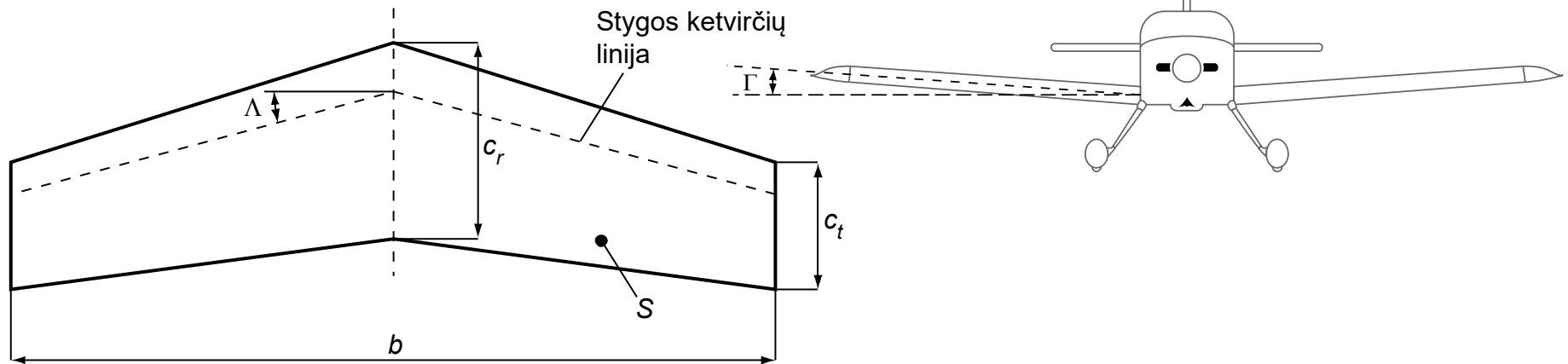
SPARNAS



- Geometrinės sparno charakteristikos:
 - proilgis
 - Sparno mosto ir vidutinės geometrinės stygos santykis yra sparno proilgis, jis žymimas raide A

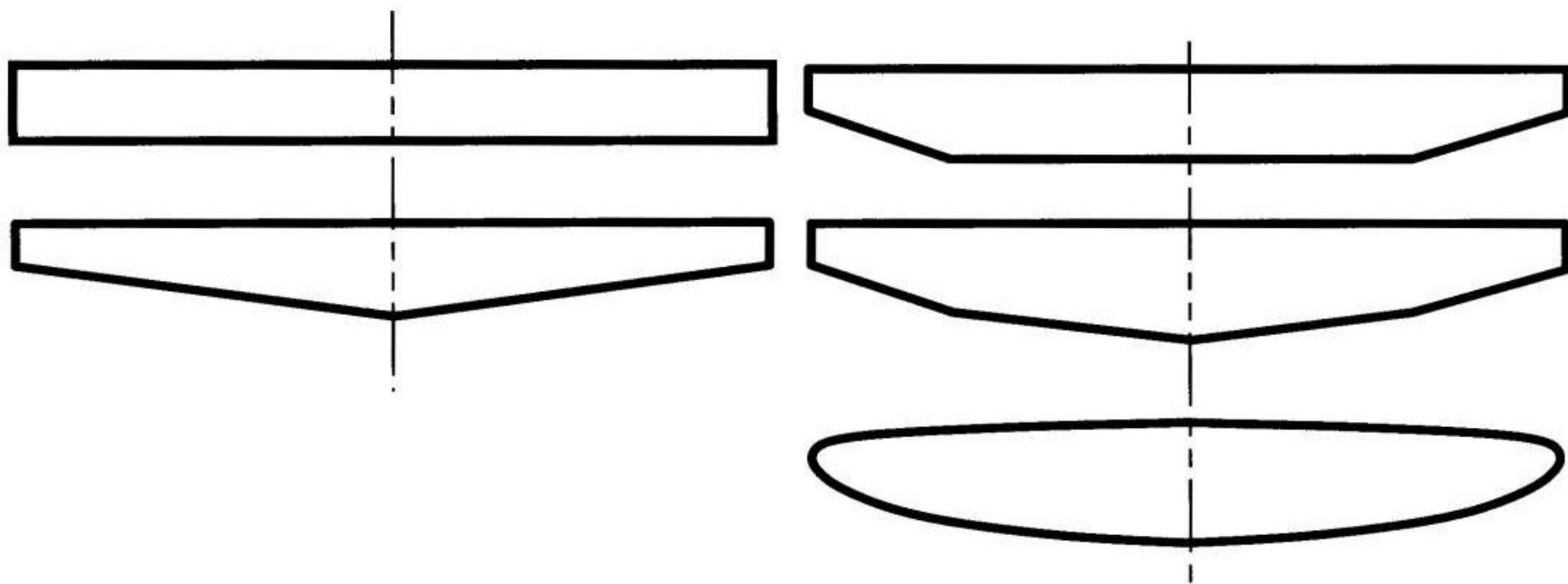
$$A = \frac{b}{c_g} = \frac{b^2}{S}$$

SPARNAS



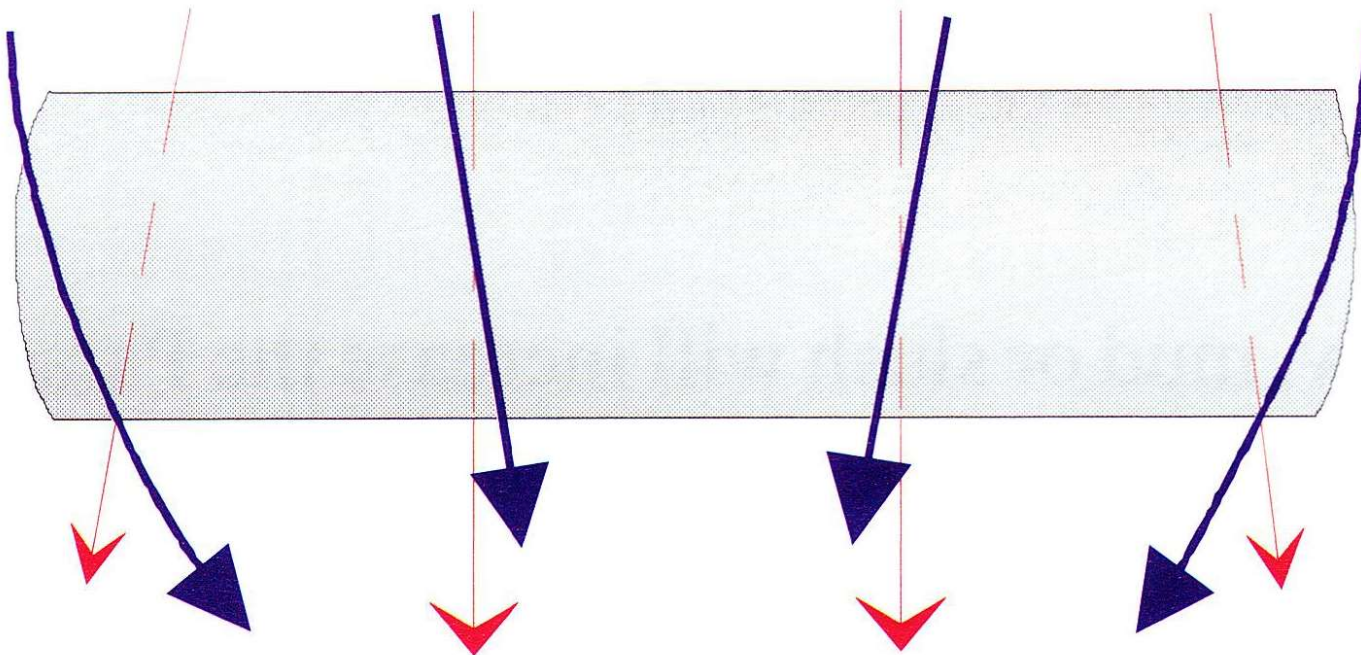
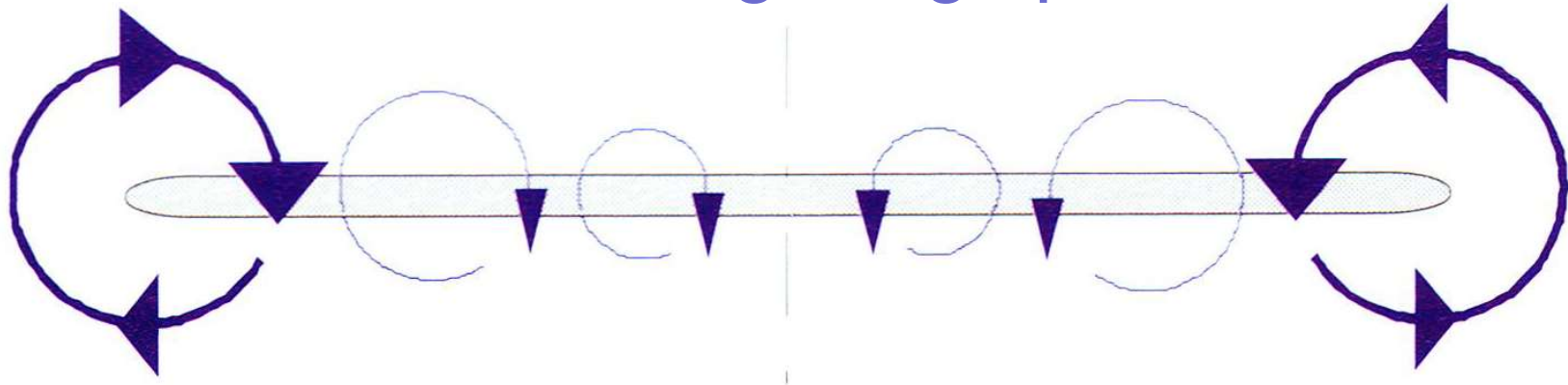
- Geometrinės sparno charakteristikos:
 - strėliškumas
 - kampas tarp statmens simetrijos plokštumai ir stygos ketvirčių linijos vadinamas sparno strėliškumo kampu ir žymimas raide Λ
 - skersinis „V“
 - kampas tarp sparno plokštumos ir horizontalios plokštumos vadinamas skersinio „V“ kampu ir žymimas Γ

Sklandytuvų ir lengvų lėktuvų sparnų formos

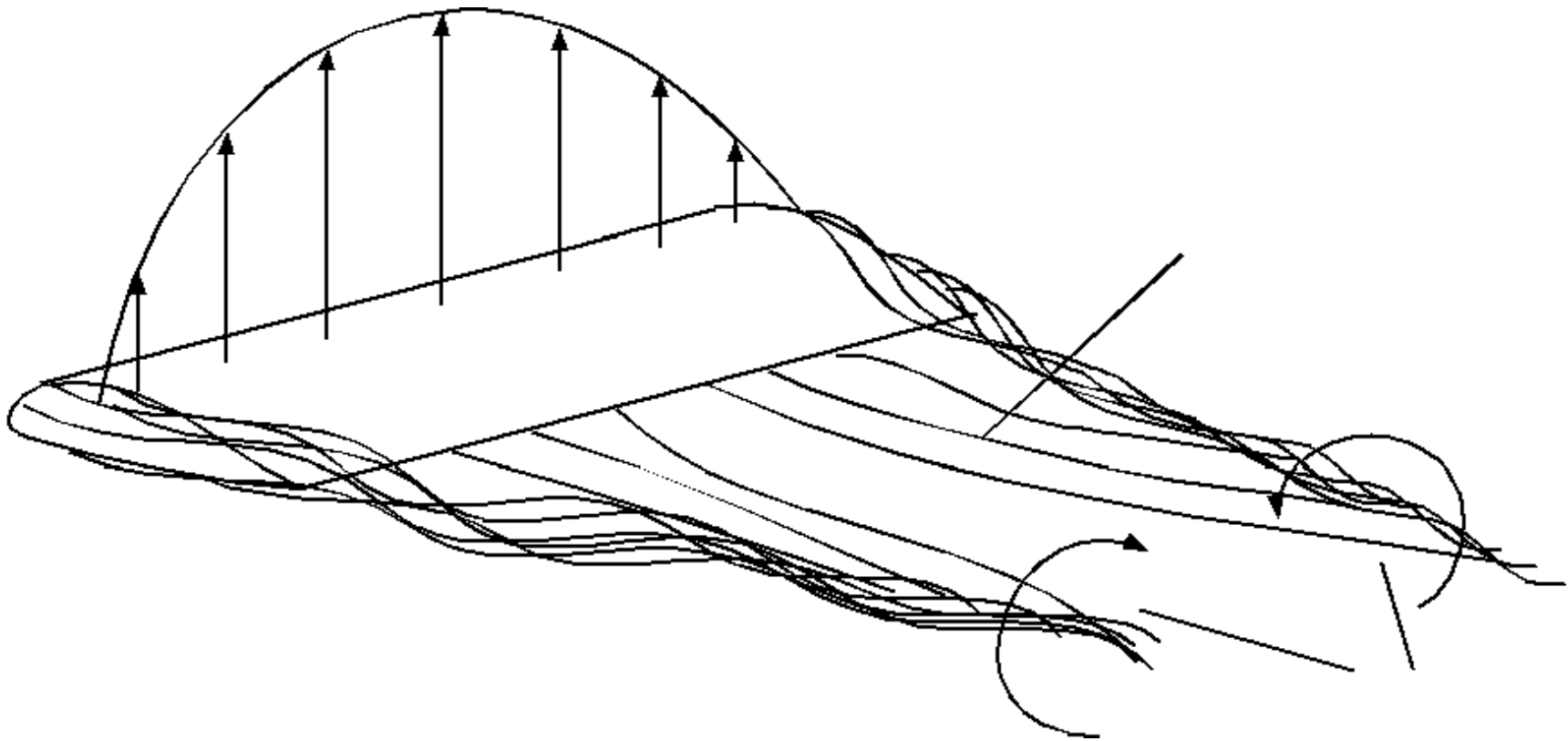


Srautas išilgai sparno

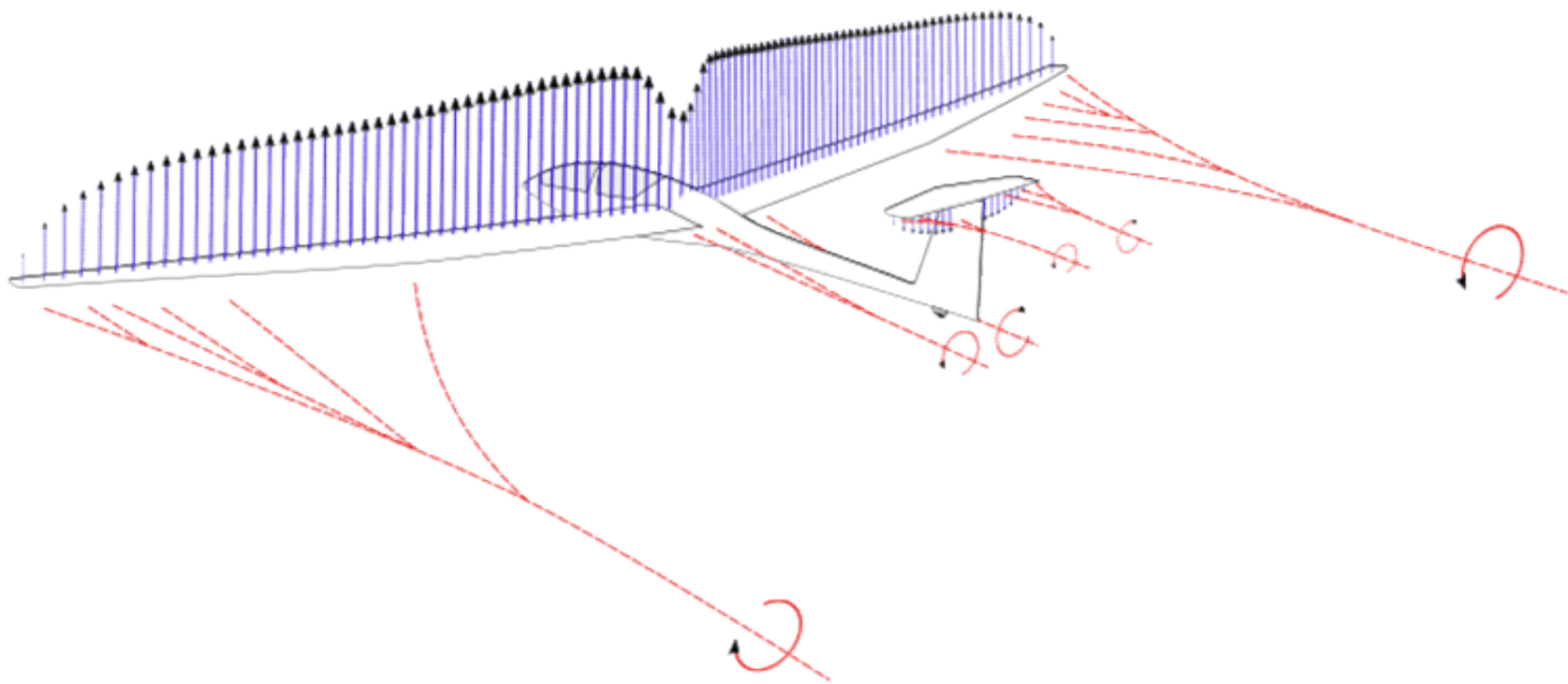
Flow along wing span



Sparno sūkuriai

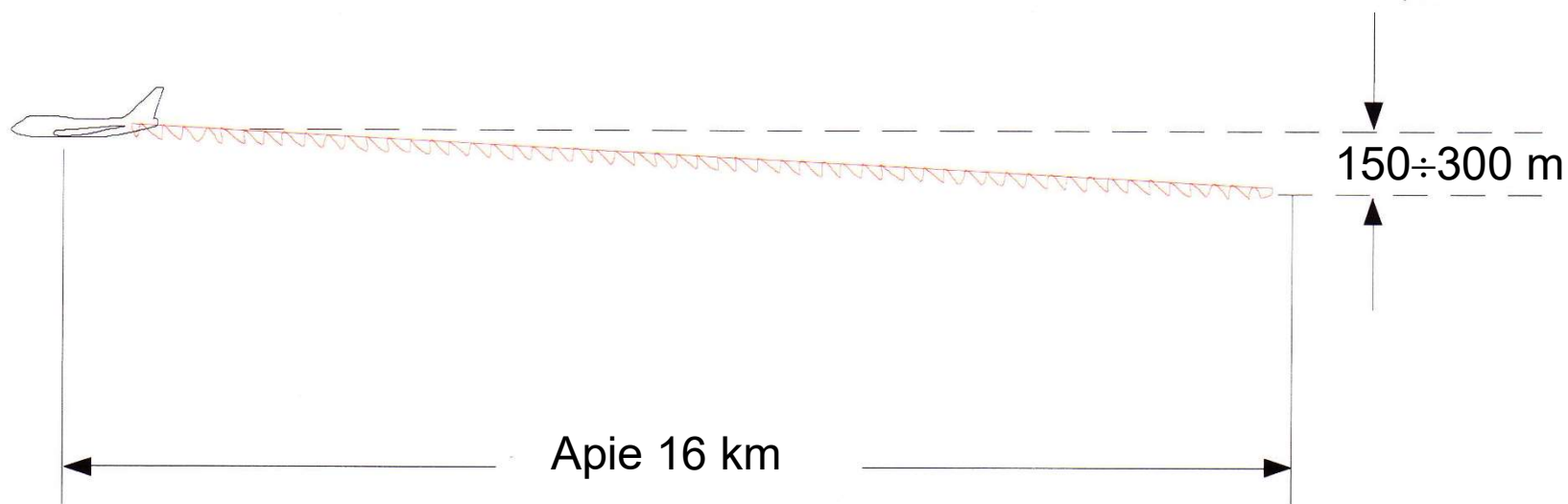
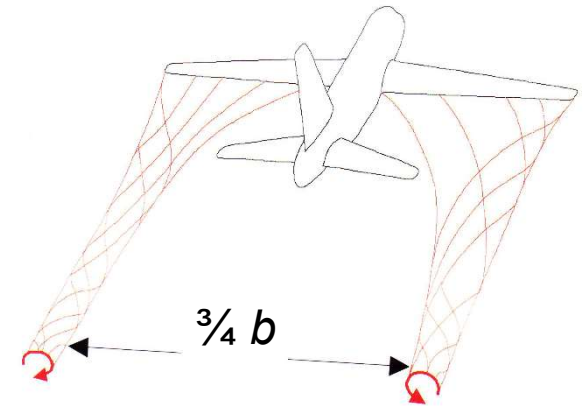


Sklandytuvo sparno sūkuriai



Sparno sūkuriai

- Sūkurių intensyvumą nulemia tokie parametrai:
- 1) Lėktuvo svoris. Kuo didesnis lėktuvo svoris, tuo stipresni sūkuriai.
- 2) Sparnų mostas nulemia atstumą tarp dviejų sūkurių paskui lėktuvą.
- 3) Skrydžio greitis. Kuo mažesnis skrydžio greitis, tuo stipresni sūkuriai.
- 4) Lėktuvo konfigūracija. Kai lėktuvo konfigūracija yra „švari“, t.y., kai važiuoklė ir užsparniai įtraukti, sūkuriai yra stipriausi.
- 5) Atakos kampas. Kuo didesnis atakos kampas, tuo stipresni sūkuriai.



Sparno sūkuriai



Indukcinis pasipriešinimas

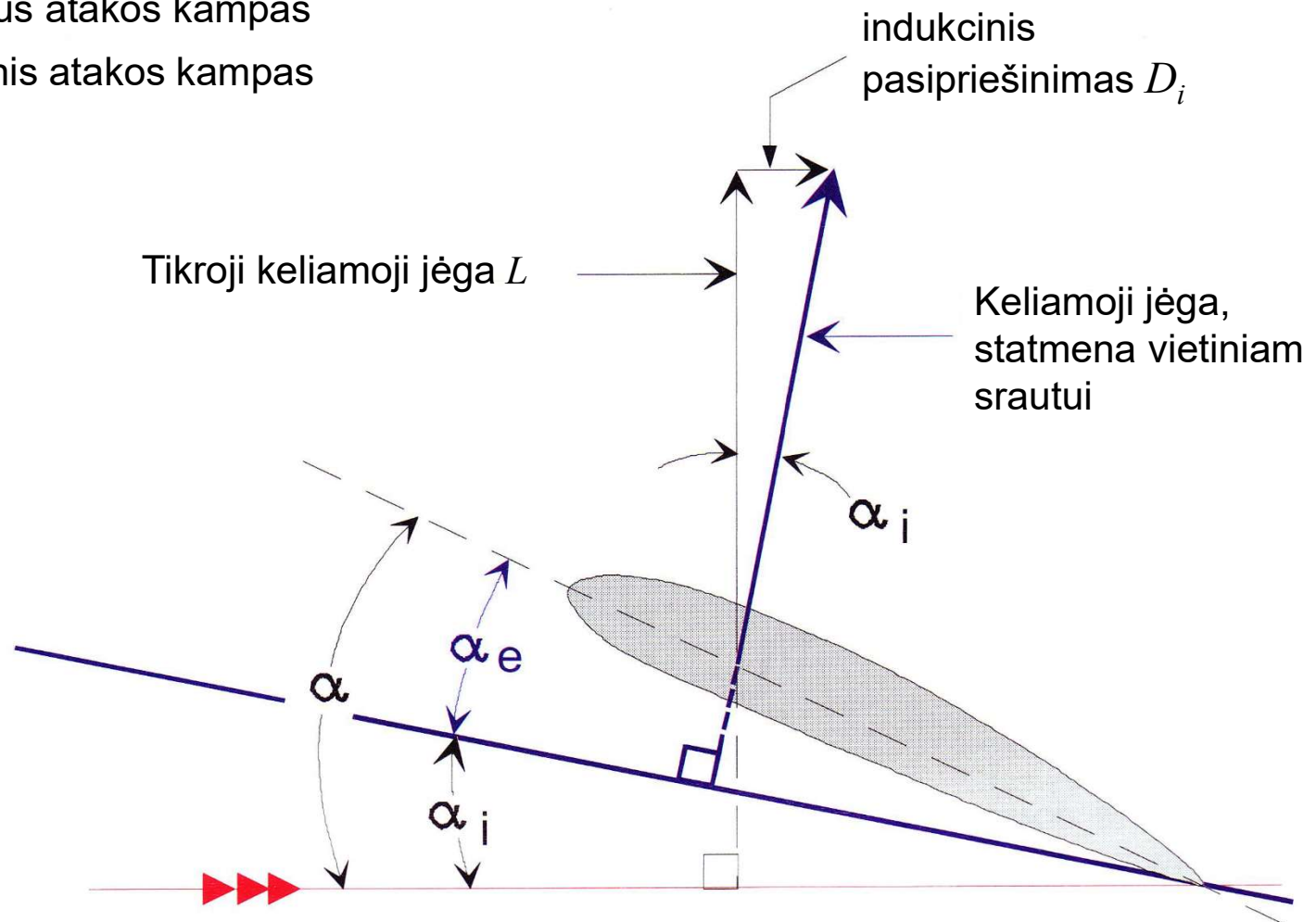
Jis atsiranda dėl oro greičių viršutinėje ir apatinėje sparno dalyje skirtumo, srauto nulenavimo ir oro srovės užsukimo sparnų galuose

- Srauto nulenavimas
- Sūkurių
- Pasipriešinimo padidėjimas
- Proilgio (ilgmenis) įtaka

Indukcinis pasipriešinimas D_i

α_e = efektyvus atakos kampas

α_i = indukcinis atakos kampas



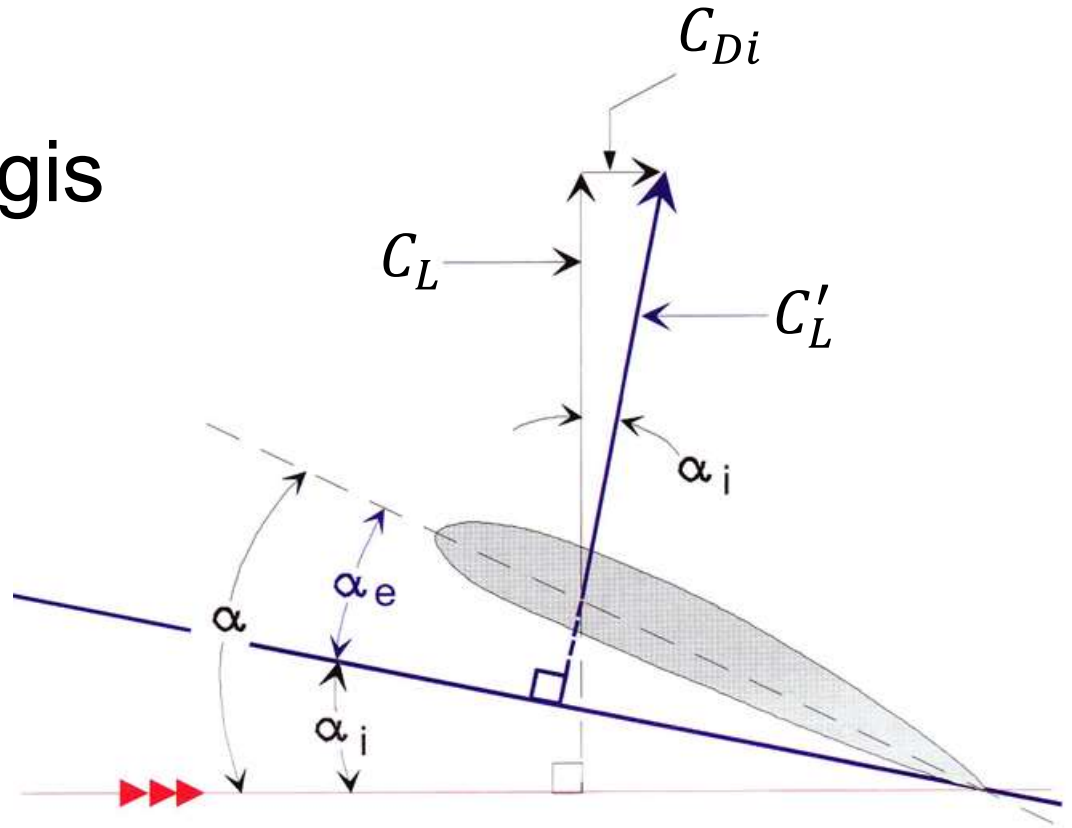
Indukcinio pasipriešinimo koeficientas

$$C_L \approx C'_L$$

$$\alpha_i = \frac{C_L}{\pi A}$$

$$A = \frac{b^2}{S} - \text{sparno proilgis}$$

$$C_{Di} = \frac{C_L^2}{\pi A}$$



Indukcinis pasipriešinimas

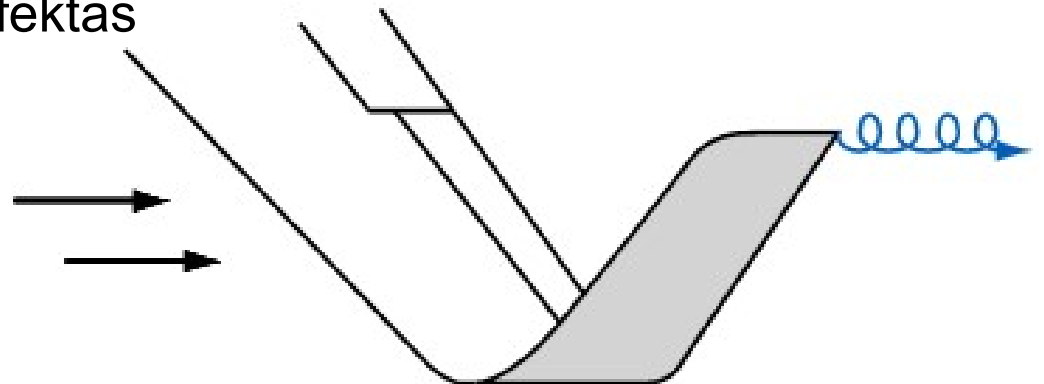
$$D_i = \frac{1}{\pi} \left(\frac{W}{b} \right)^2 \frac{2}{\rho V^2} \quad \text{Elipsinio sparno indukcinis pasipriešinimas}$$

- Indukcinis pasipriešinimas priklauso nuo:
 - Lėktuvo svorio W – *didėjant svoriui DIDĖJA*
 - Sparnų mosto b – *kuo didesnis mostas prie duotojo W , to mažesnis D_i*
 - Skrydžio greičio V – *didėjant greičiui MAŽĖJA*
 - Skrydžio aukščio (ρ)
 - Sparno projekcijos formos – elipsinis turi mažiausią D_i
- Indukcinis pasipriešinimas sudaro iki 35-40% viso sparno pasipriešinimo

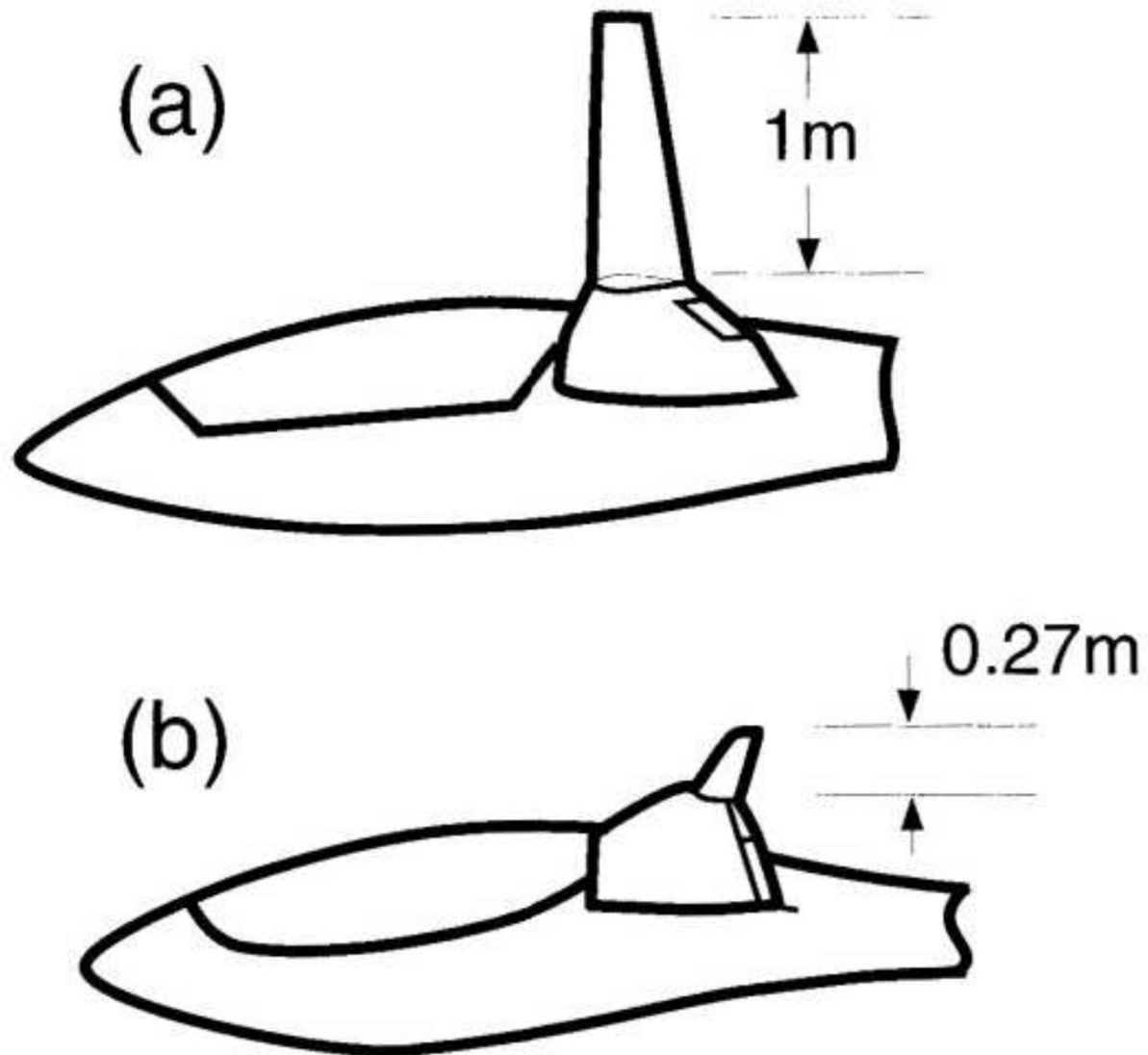
Indukcinis pasipriešinimas

$$D_i = \frac{1}{\pi} \left(\frac{W}{b} \right)^2 \frac{2}{\rho V^2} \quad \text{Elipsinio sparno indukcinis pasipriešinimas}$$

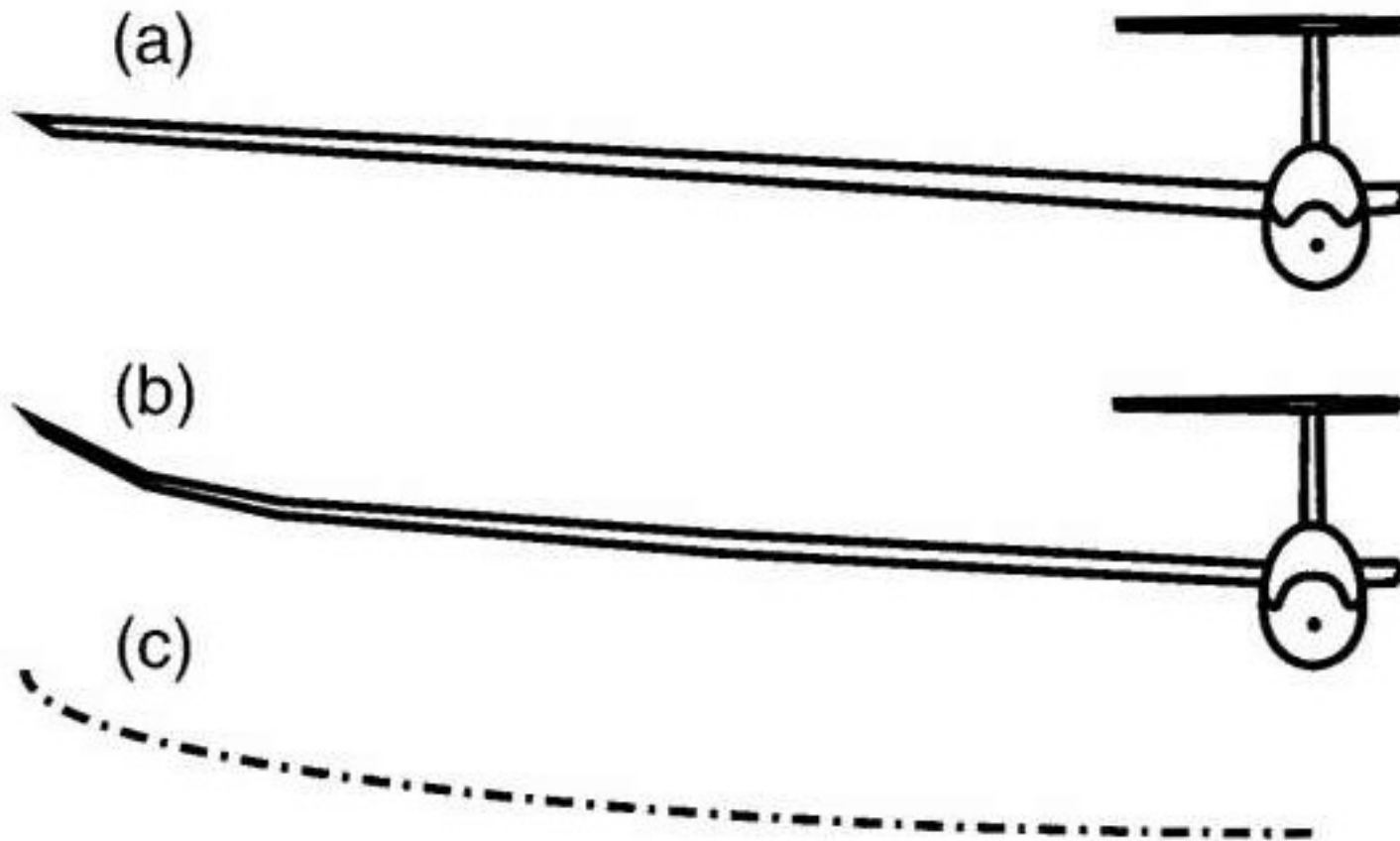
- Indukcinis pasipriešinimo mažinimo būdai:
 - Sparno proilgis ($A=b^2/S$)
 - tiesiogiai įtakos neturi (žr. W/b), bet kuo didesnis A , tuo mažesnis D_i
 - Santykinė sparno mosto apkrova (W/b)
 - kuo mažesnė, tuo mažesnis D_i
 - Vertikalūs sparnų galiukai (winglets)
 - atstumas tarp laisvųjų sūkurių truputį padidėja, susidaro ilgesnio sparno mosto efektas



Vertikalūs sparnu galai



Skersinis „V“ kampas



LAK17bfes (15, 18, 21 m)

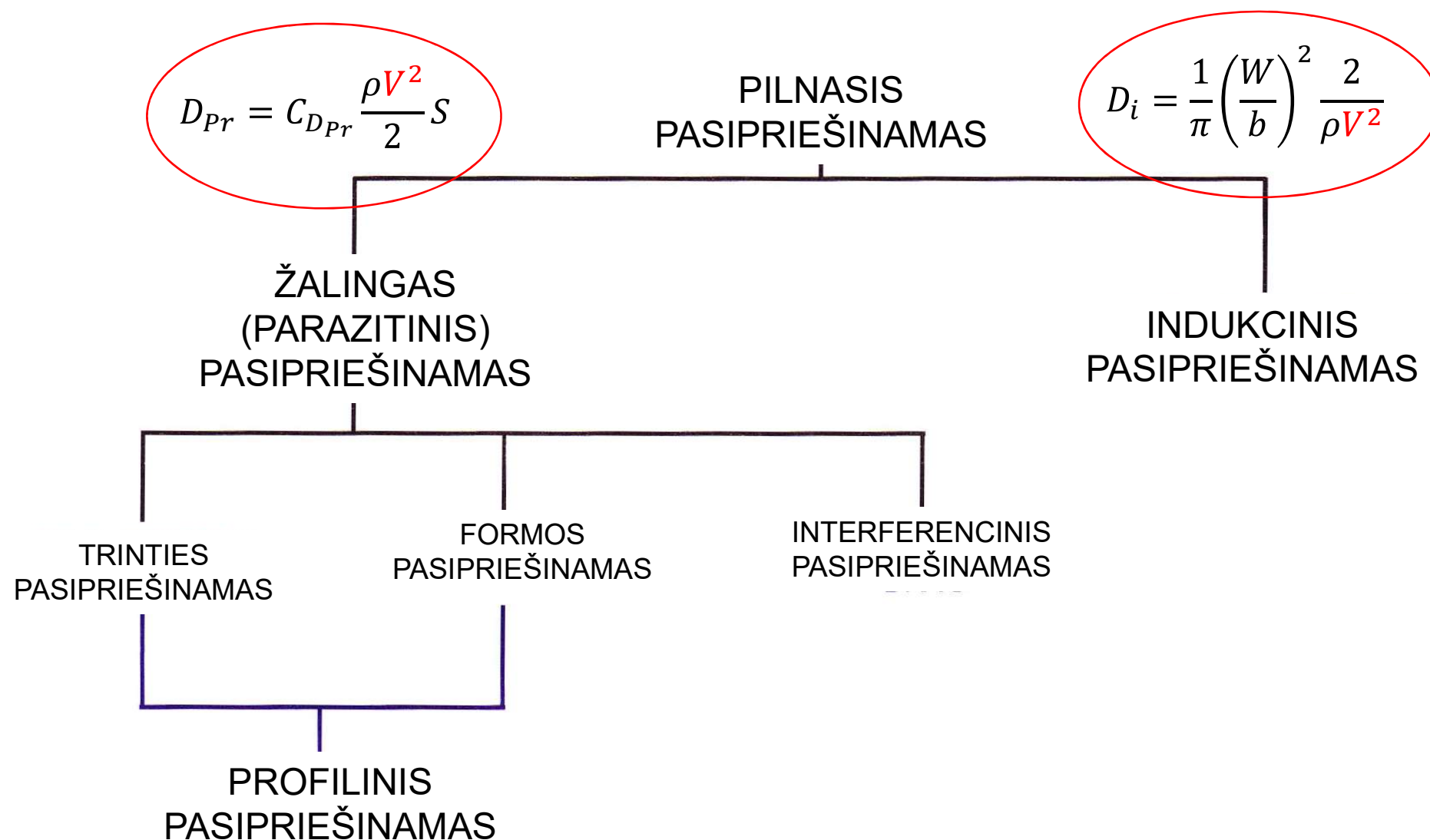


Mini LAK

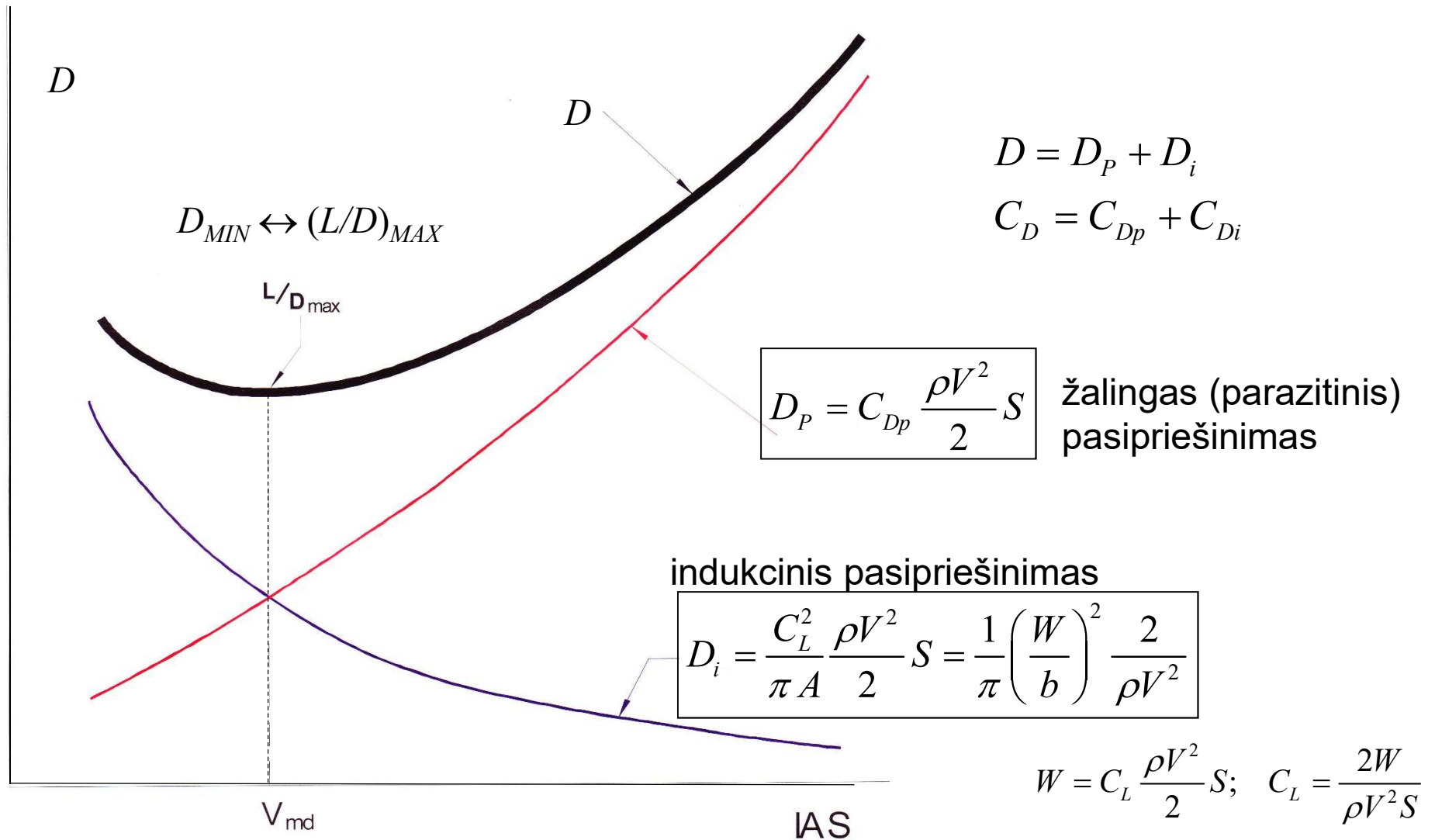


Pilnasis pasipriešinimas

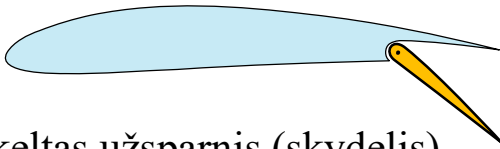
- **Pasipriešinimas:**
 - Žalingas (parazitinis) D_p
 - profilinis (trinties + slėgio)
 - trinties
 - slėgio
 - interferencinis
 - Indukcinis D_i
 - dėl srauto nulenavimo ir sūkurių



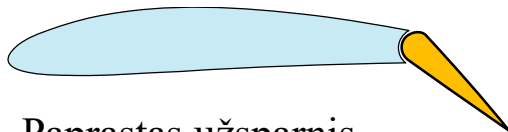
Pilnasis pasipriešinimas



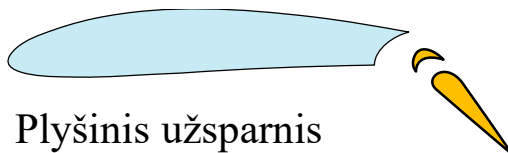
Užsparniai, jų tipai ir naudojimas



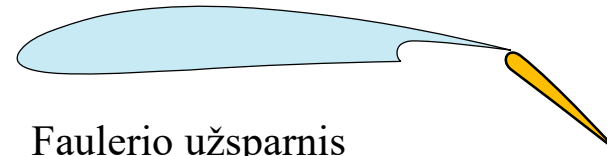
Skeltas užsparnis (skydelis)



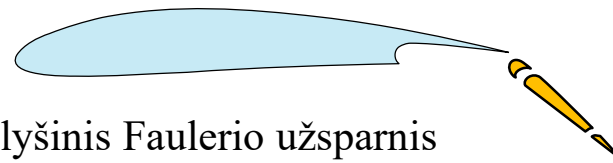
Paprastas užsparnis



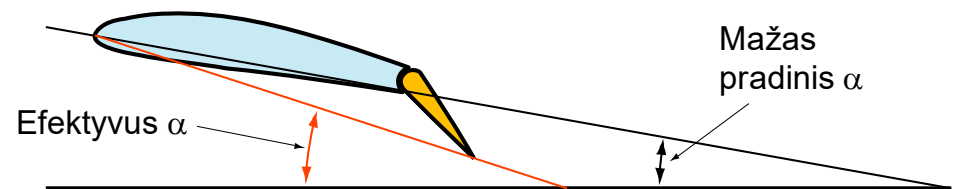
Plyšinis užsparnis



Faulerio užsparnis

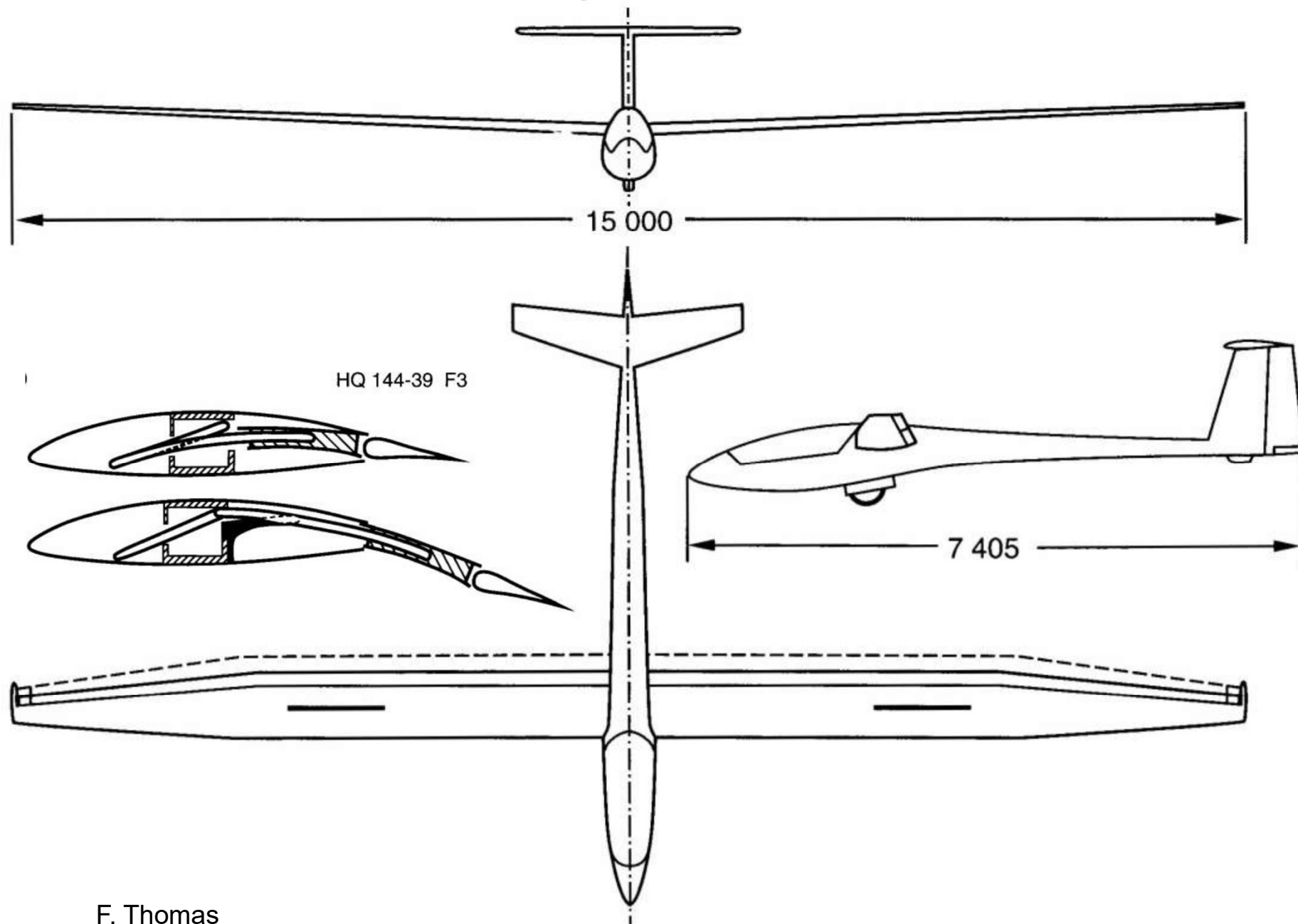


Plyšinis Faulerio užsparnis



Užsparnio įtaka profilio gaubtumui
ir efektyviam atakos kampui

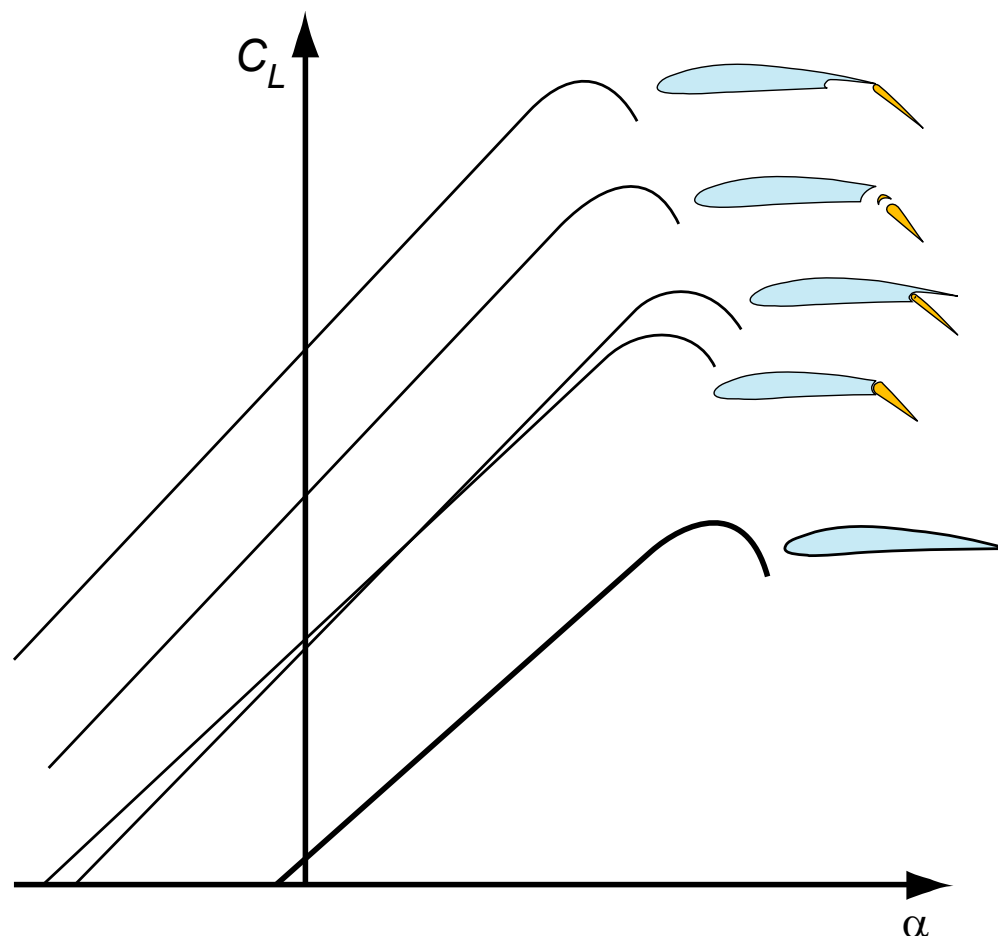
Sklandytuvas SB 11



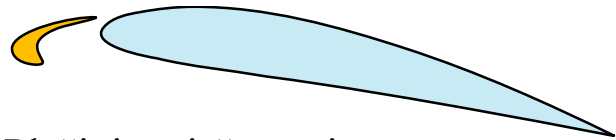
F. Thomas

Užsparniai, jų tipai ir naudojimas

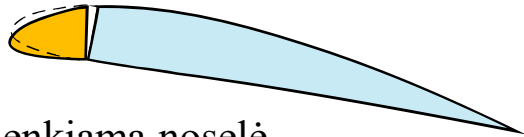
- Maksimalus keliamosios jėgos koeficientas padidėja
- Kritinis atakos kampas sumažėja
- Pagrindinė užsparnių paskirtis – sumažinti kilimo ir tūpimo greitį



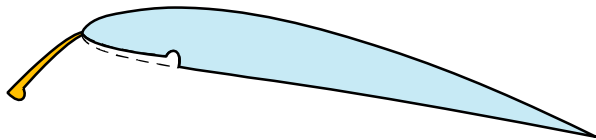
Priešsparniai, jų tipai ir naudojimas



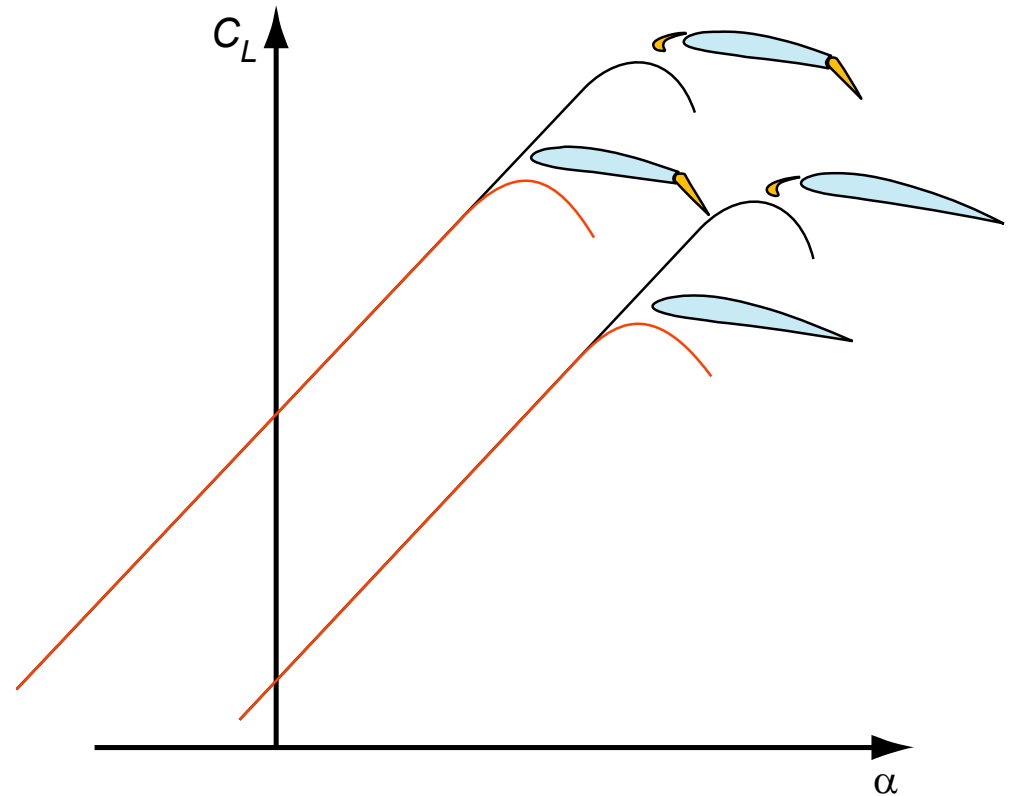
Plyšinis priešsparnis



Atlenkiama noselė



Kriugerio priešsparnis

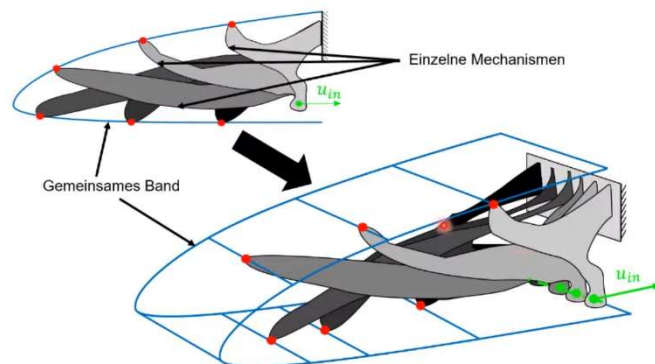


Užsparnių ir priešsparnių įtaka

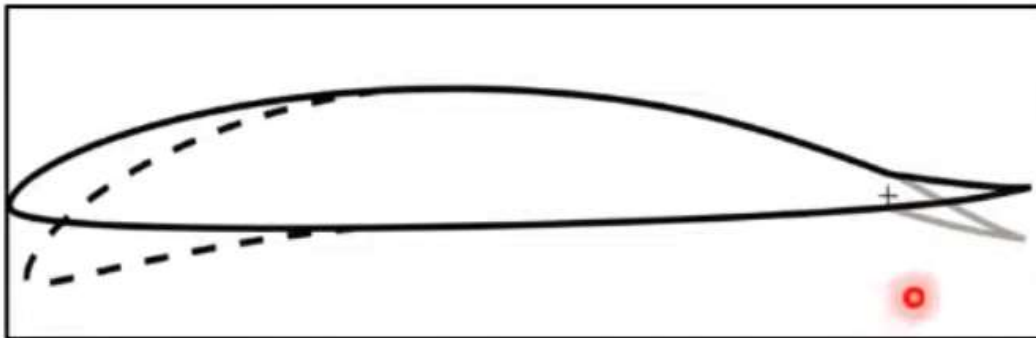
Pagrindinė priešsparnių paskirtis – padidinti maksimalų keliamosios jėgos koeficientą ir sumažinti kilimo bei tūpimo greitį

Dauguma keliamąją jėgą didinančių priemonių turi šalutinį poveikį – didina pasipriešinimą

MILAN projektas



Johannes "Brezn" Achleitner | Late Night Soaring



Johannes "Brezn" Achleitner | Late Night Soaring

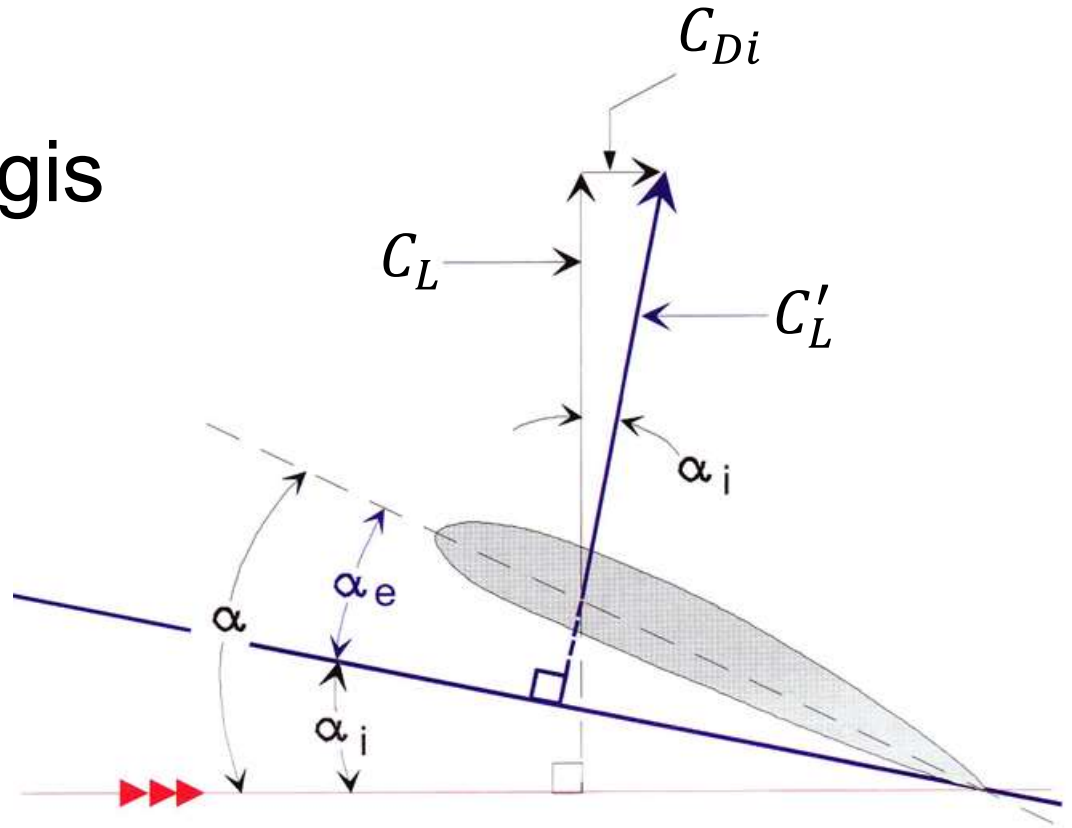
Indukcinio pasipriešinimo koeficientas

$$C_L \approx C'_L$$

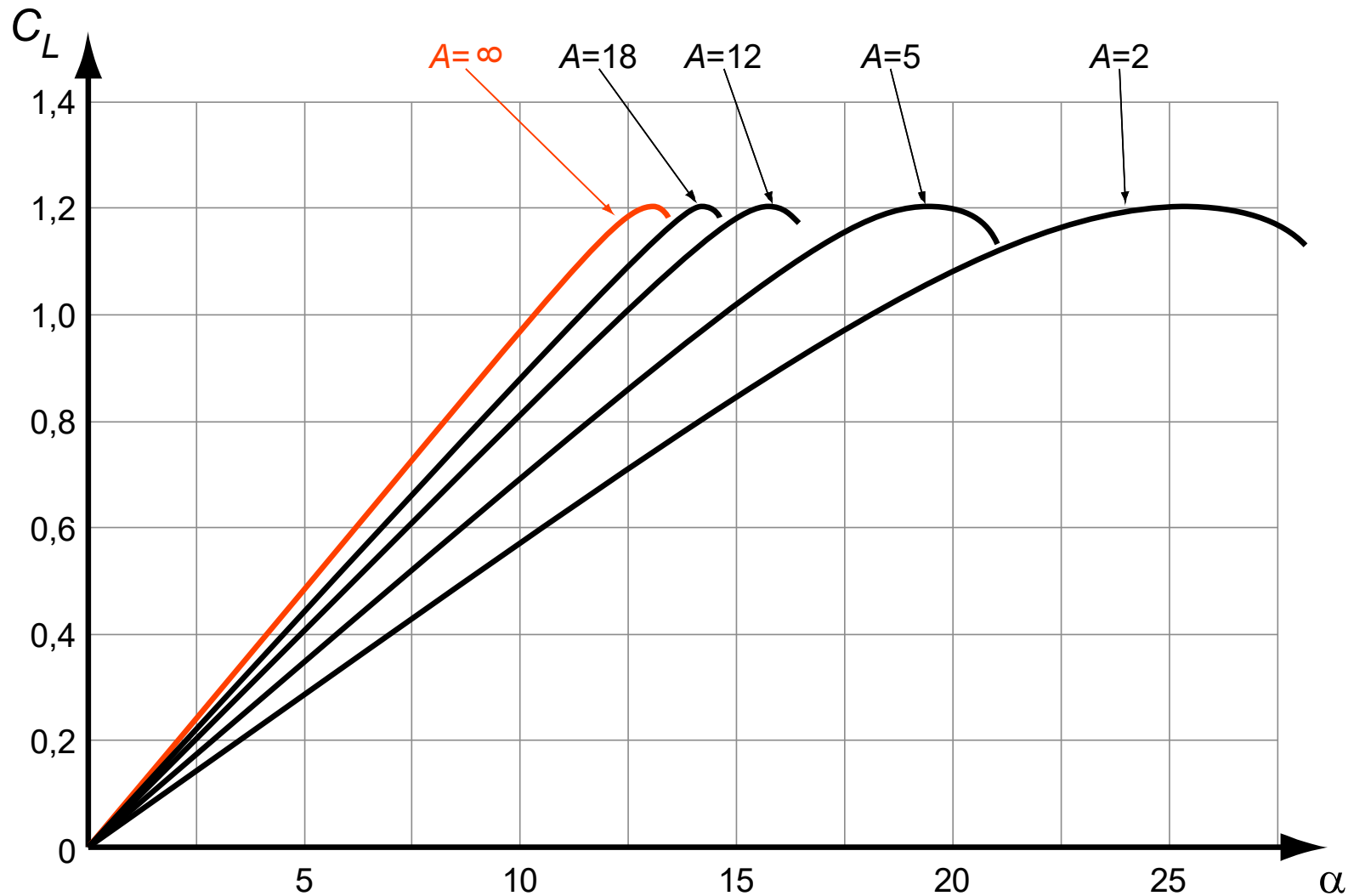
$$\alpha_i = \frac{C_L}{\pi A}$$

$$A = \frac{b^2}{s} - \text{sparno proilgis}$$

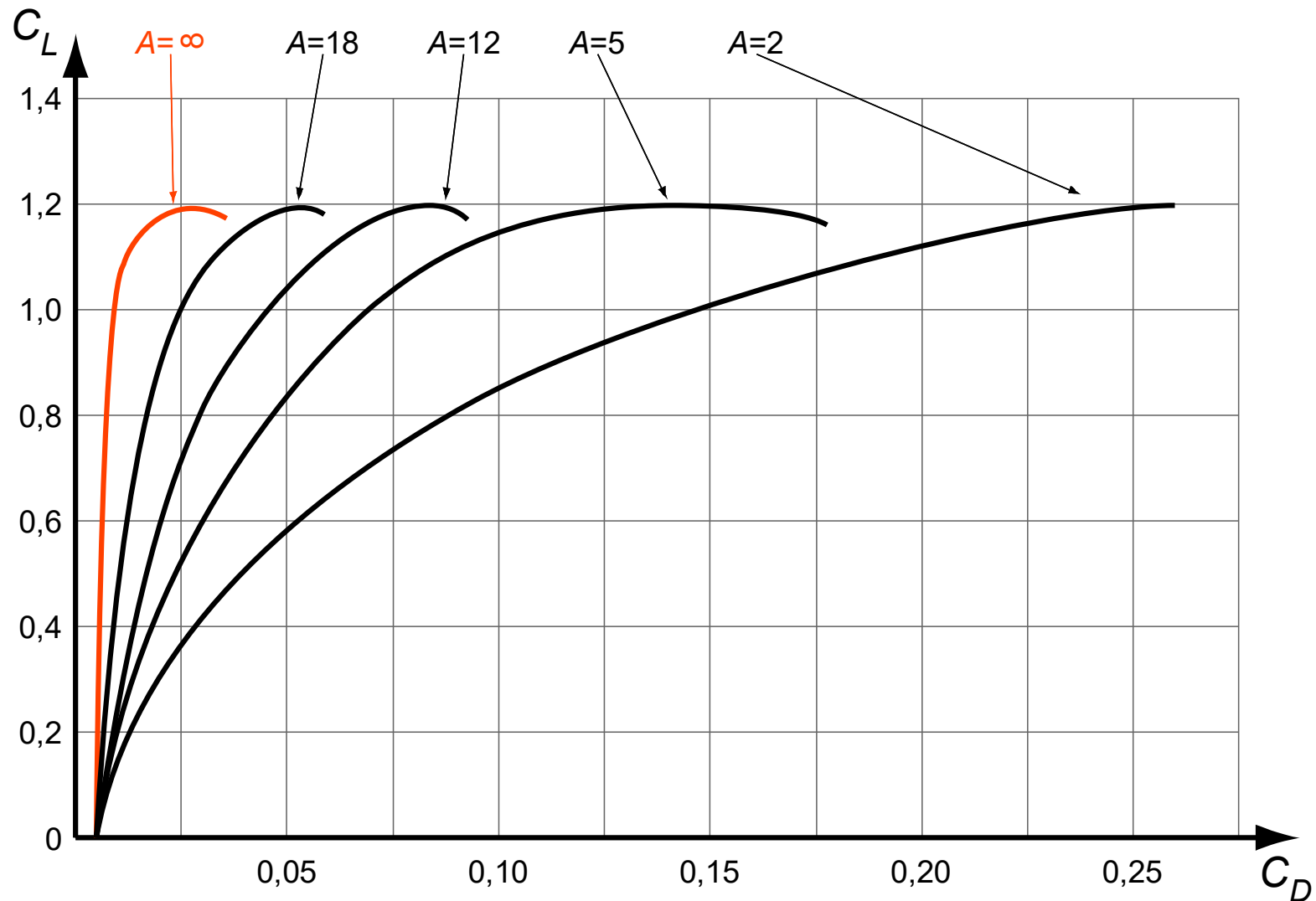
$$C_{Di} = \frac{C_L^2}{\pi A}$$



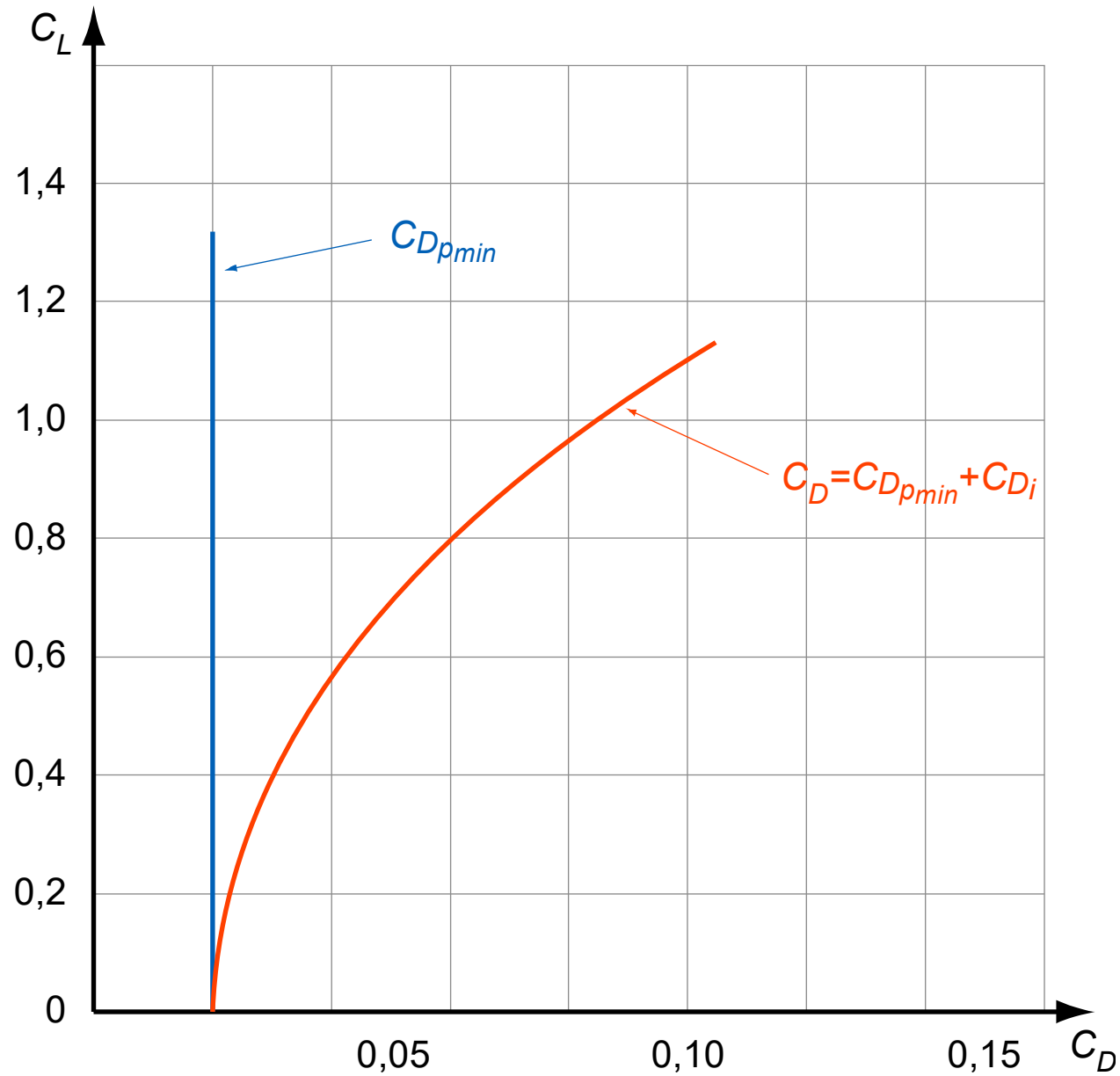
Sparno proilgio įtaka keliamajai jėgai



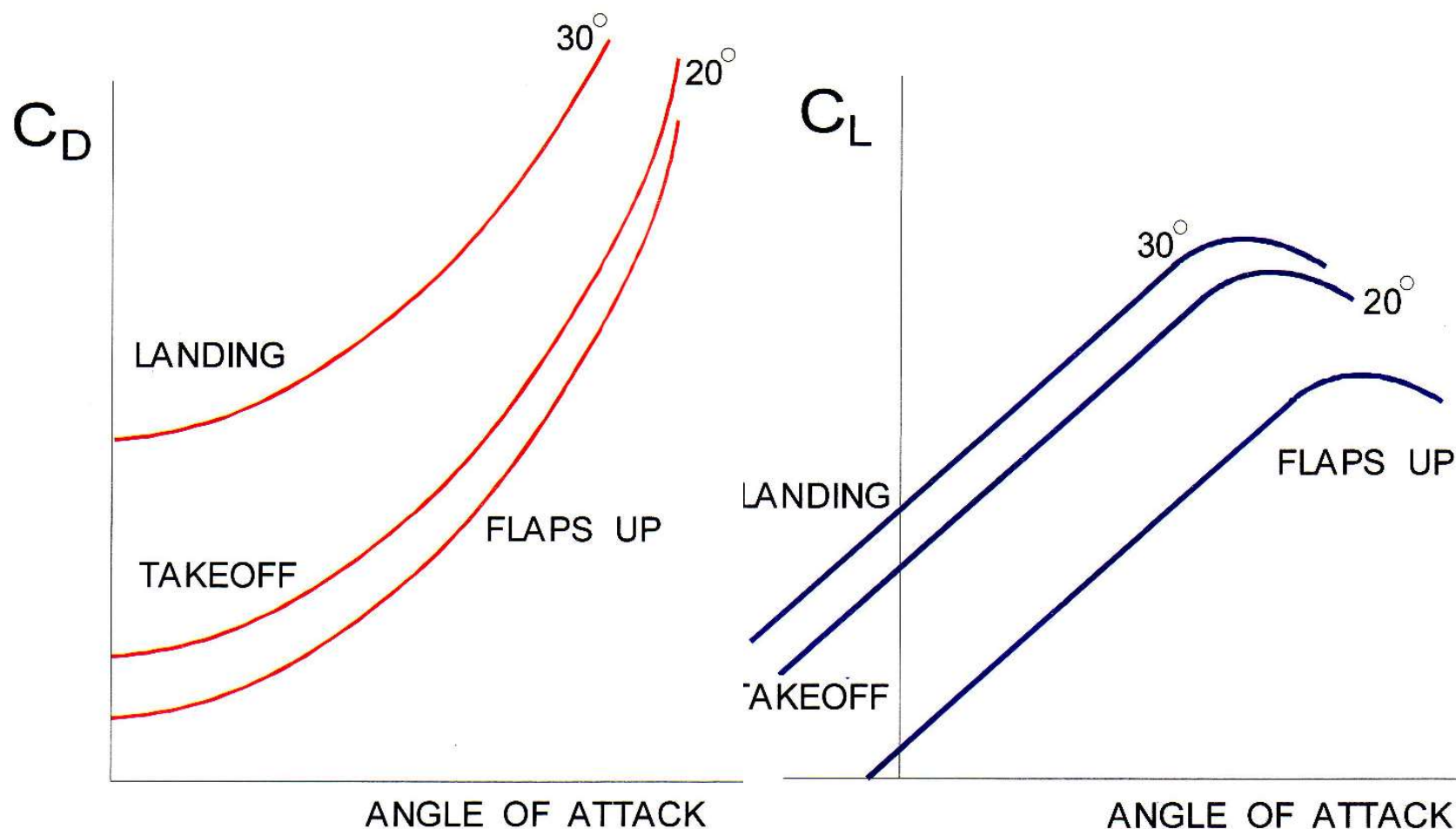
Sparno proilgio įtaka pasipriešinimui



Parabolinè poliarè



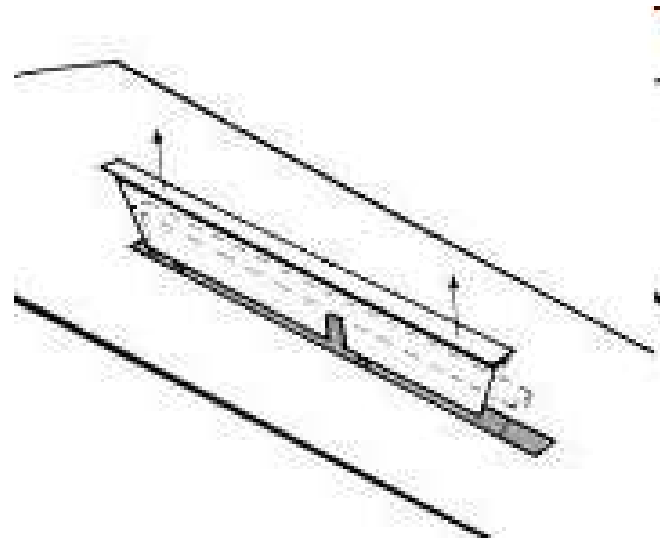
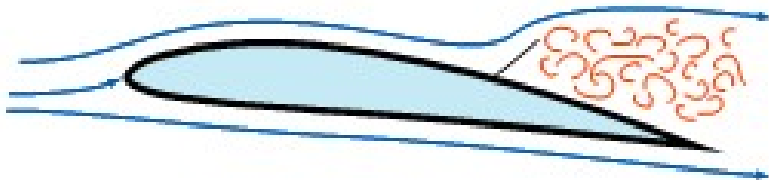
Kilimo ir tūpimo konfigurācija



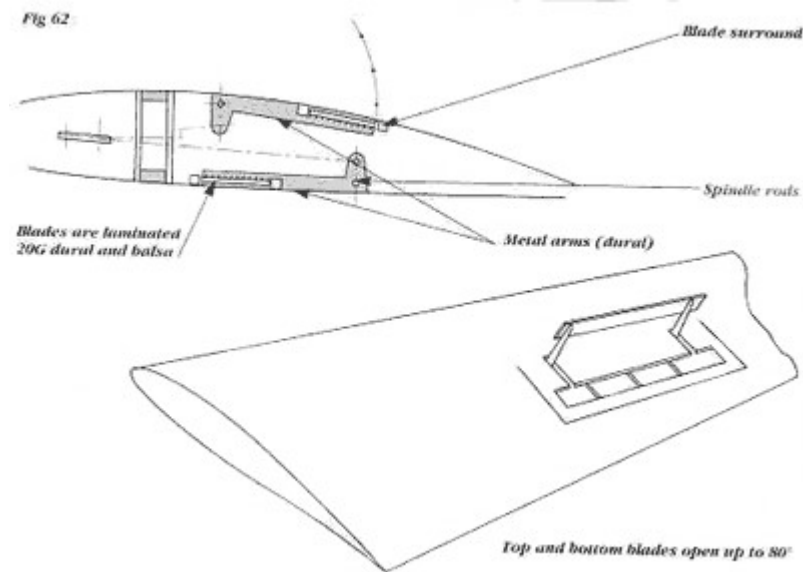
Kulti rekomenduojama su užsparniais tarpinėje padėtyje, nes pilnai atlenkus užsparnius pasipriešinimas padidėja žymiai daugiau negu keliamoji jėga

Oro stabdžiai

- Interceptoriai, jų tipai ir naudojimas
 - jų paskirtis – mažinti keliamąją jėgą ir didinti pasipriešinimą



Interceptoriai, oro stabdžiai



DFS Airbrake Installation MU13-D3

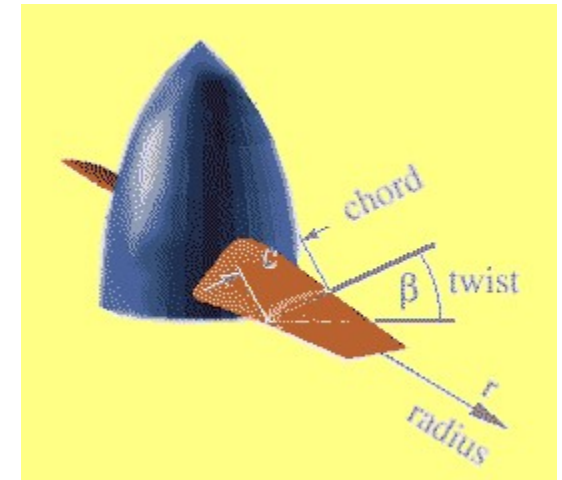


Propeleris

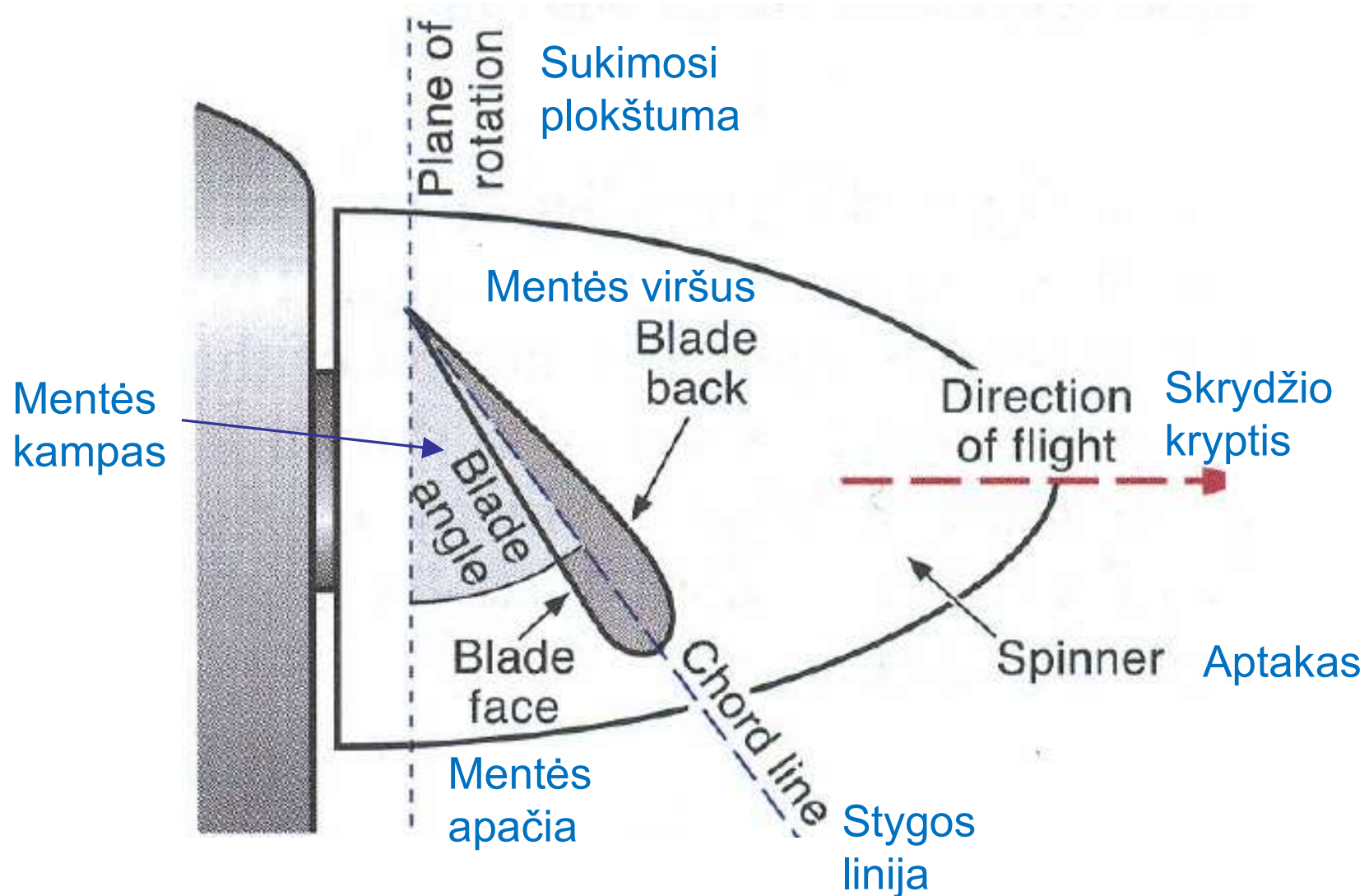


Propelerio geometrija

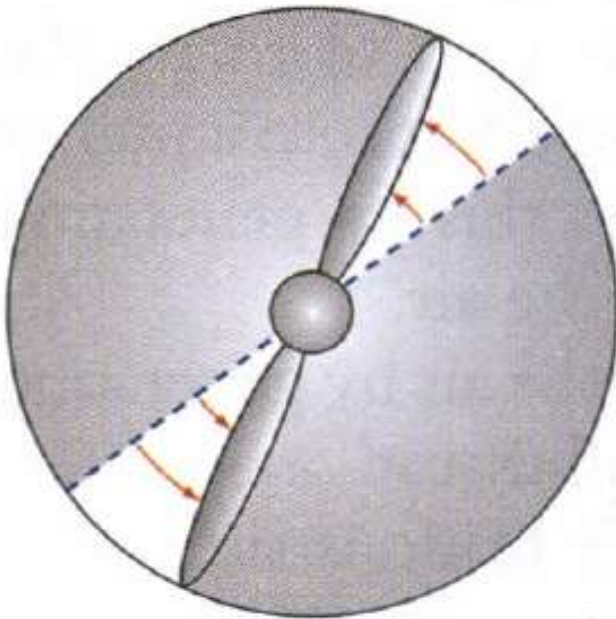
- Propelerio skersmuo, D
- Menčių skaičius
- Mėntė styga (kintama)
- Mėntės profilis (kintamas)
- Mėntės tvirtinimo kampas, $\beta_{0,75}$



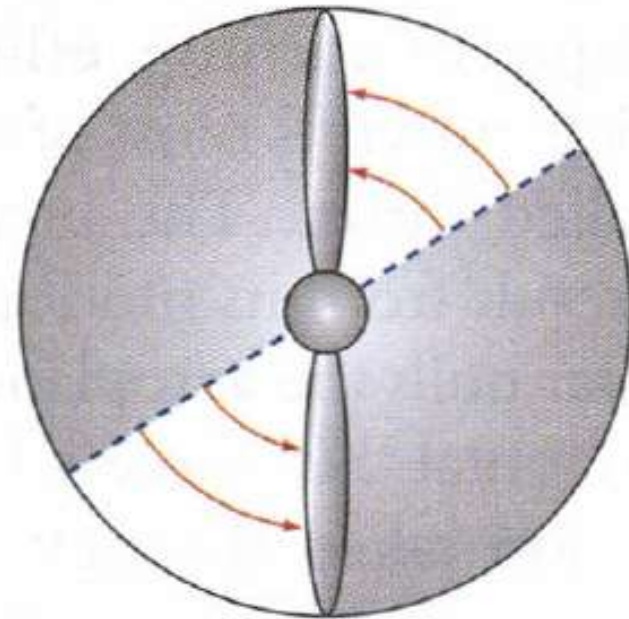
Propelerio terminologija



Apskritiminis greitis

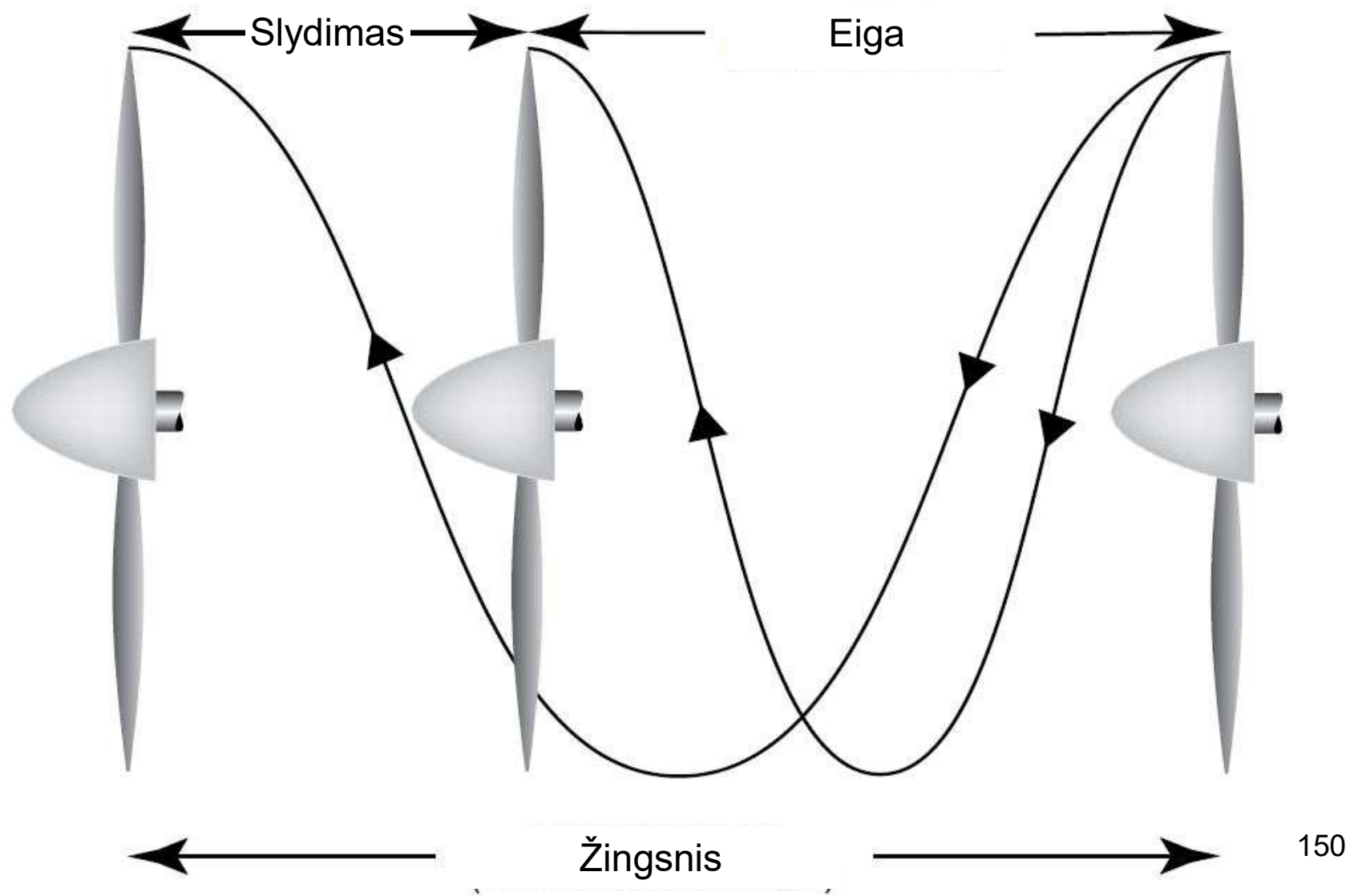


1200 rpm
1200 aps./min.

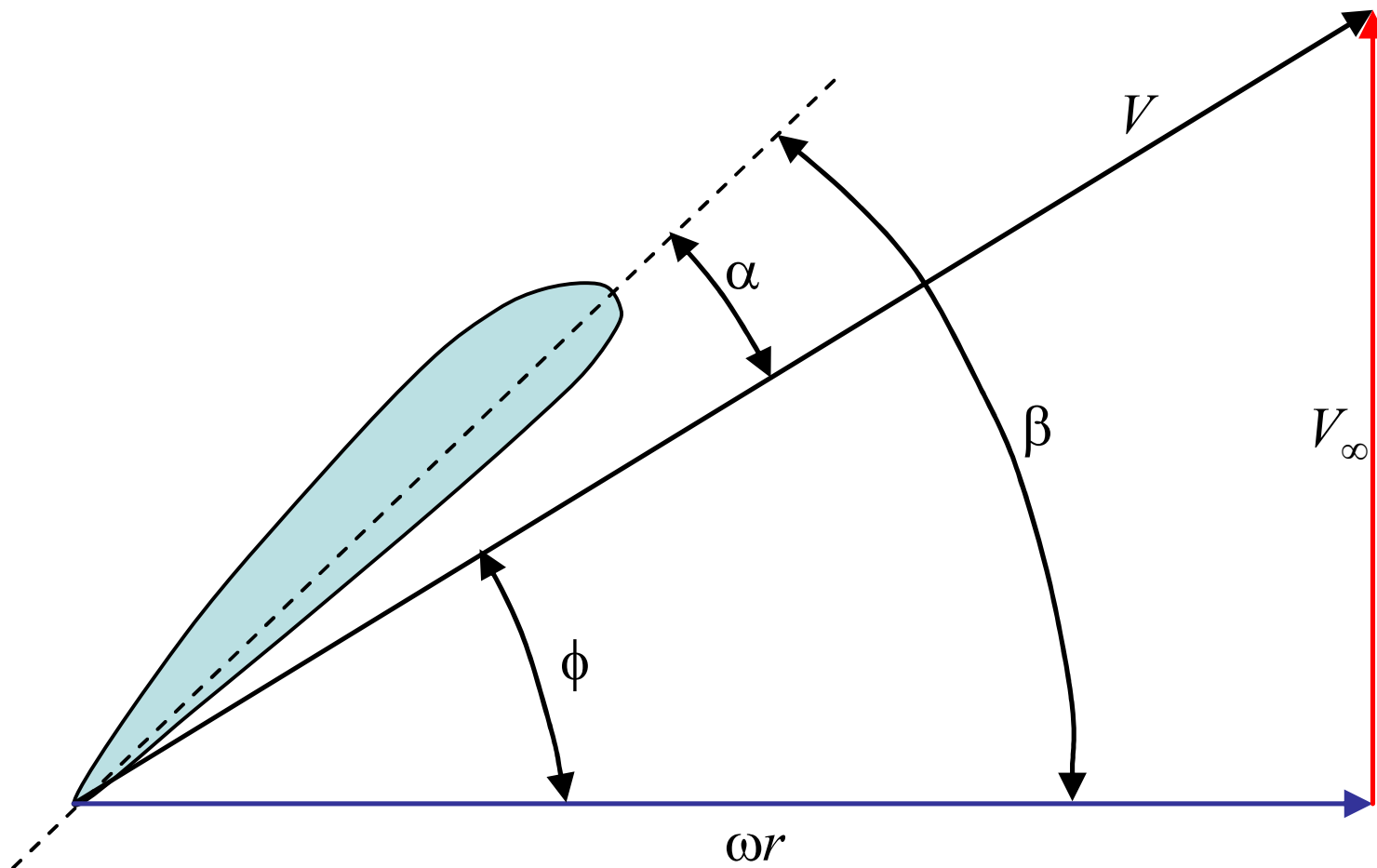


2400 rpm
2400 aps./min.

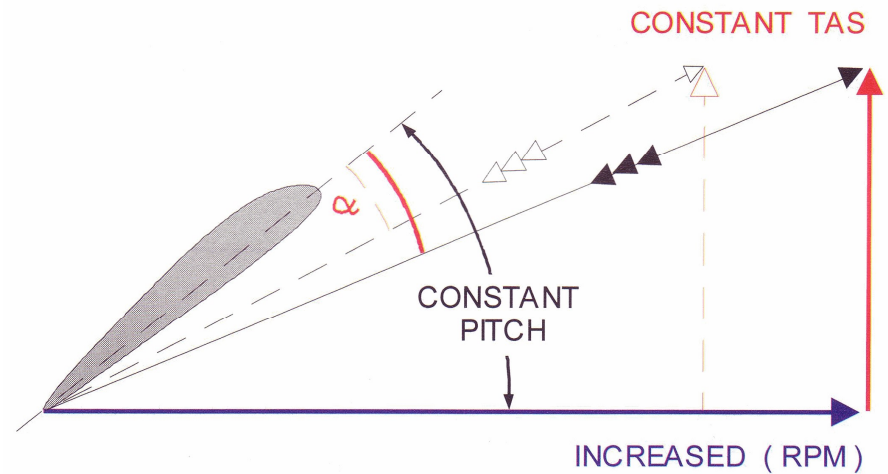
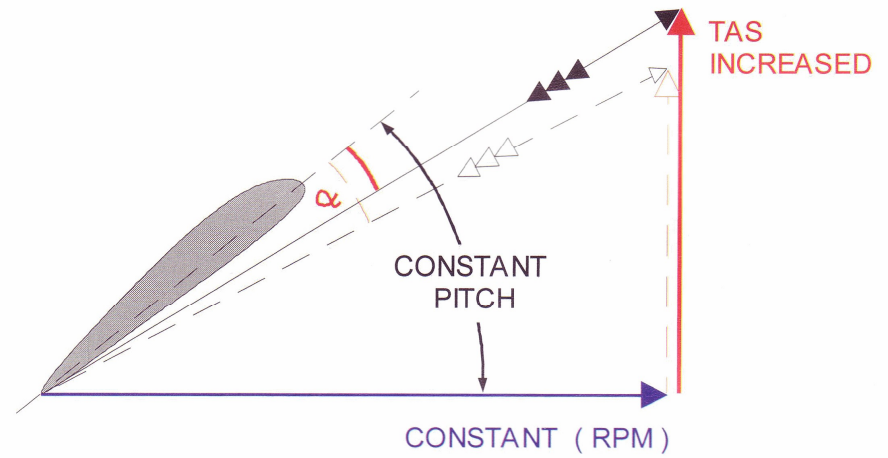
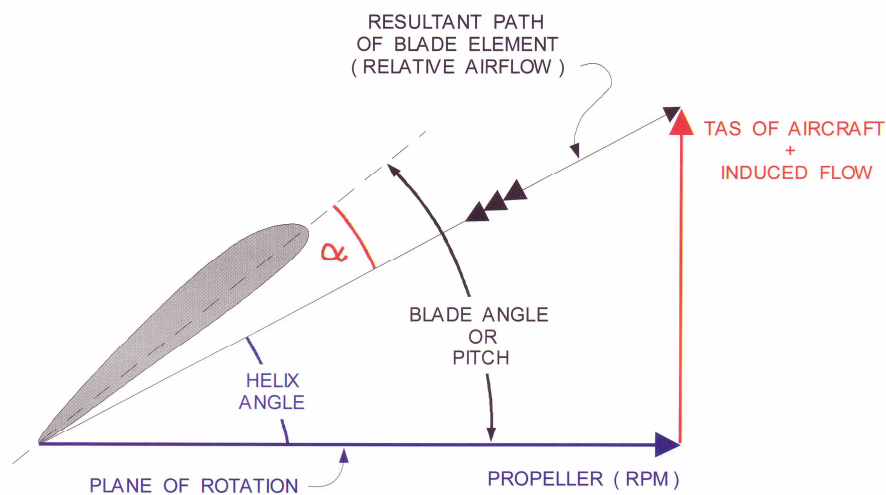
Propelerio žingsnis



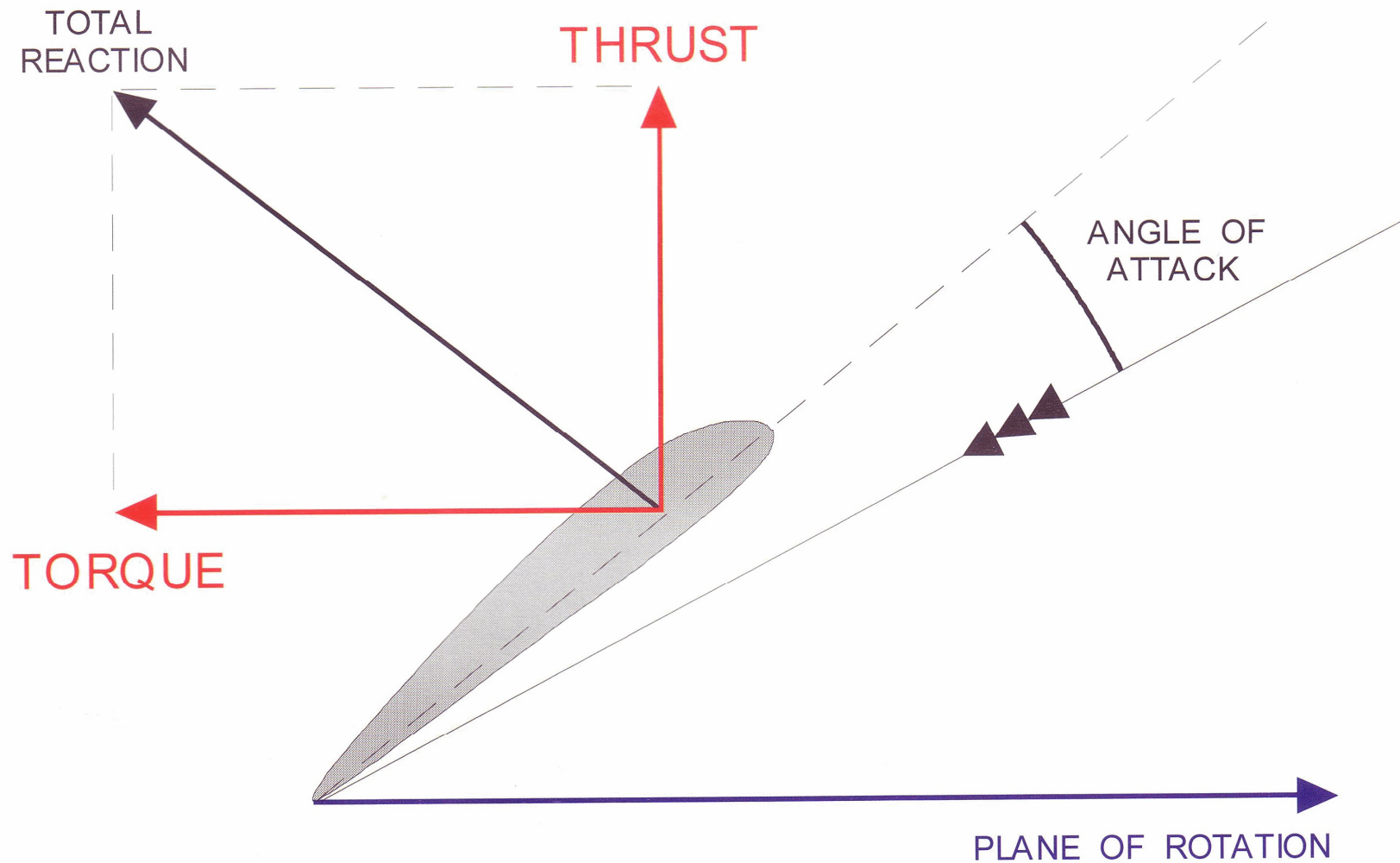
Propelerio mentės atakos kampas



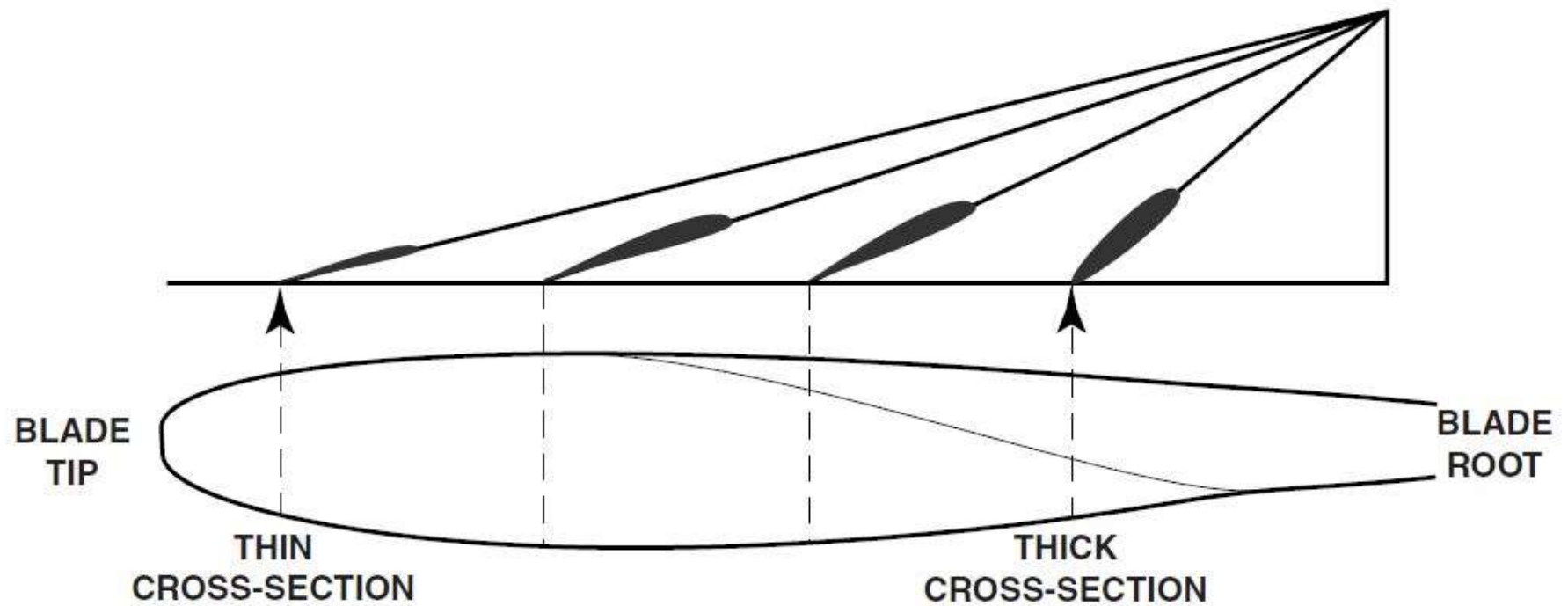
Propelerio mentès atakos kampas



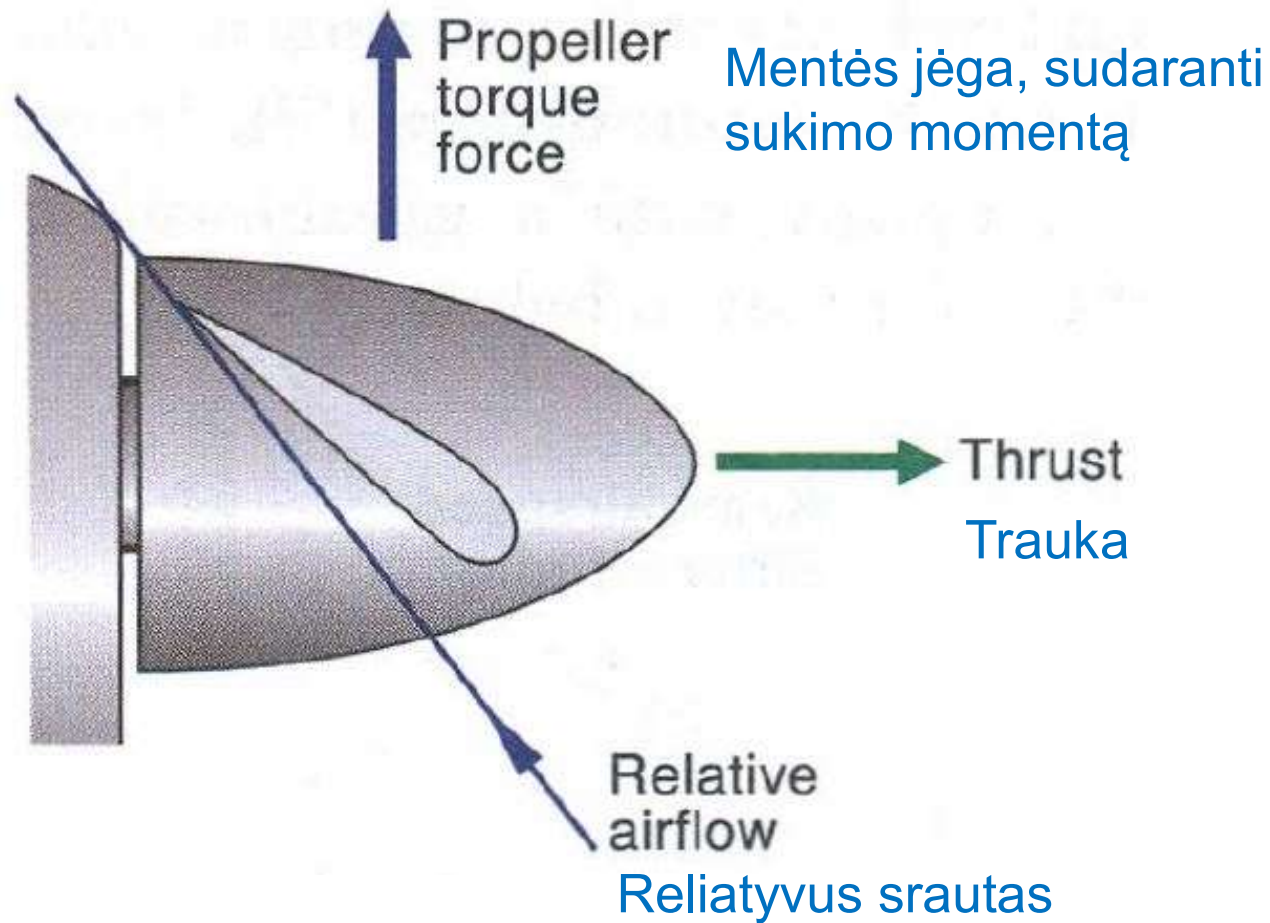
Trauka ir sukimo momentas



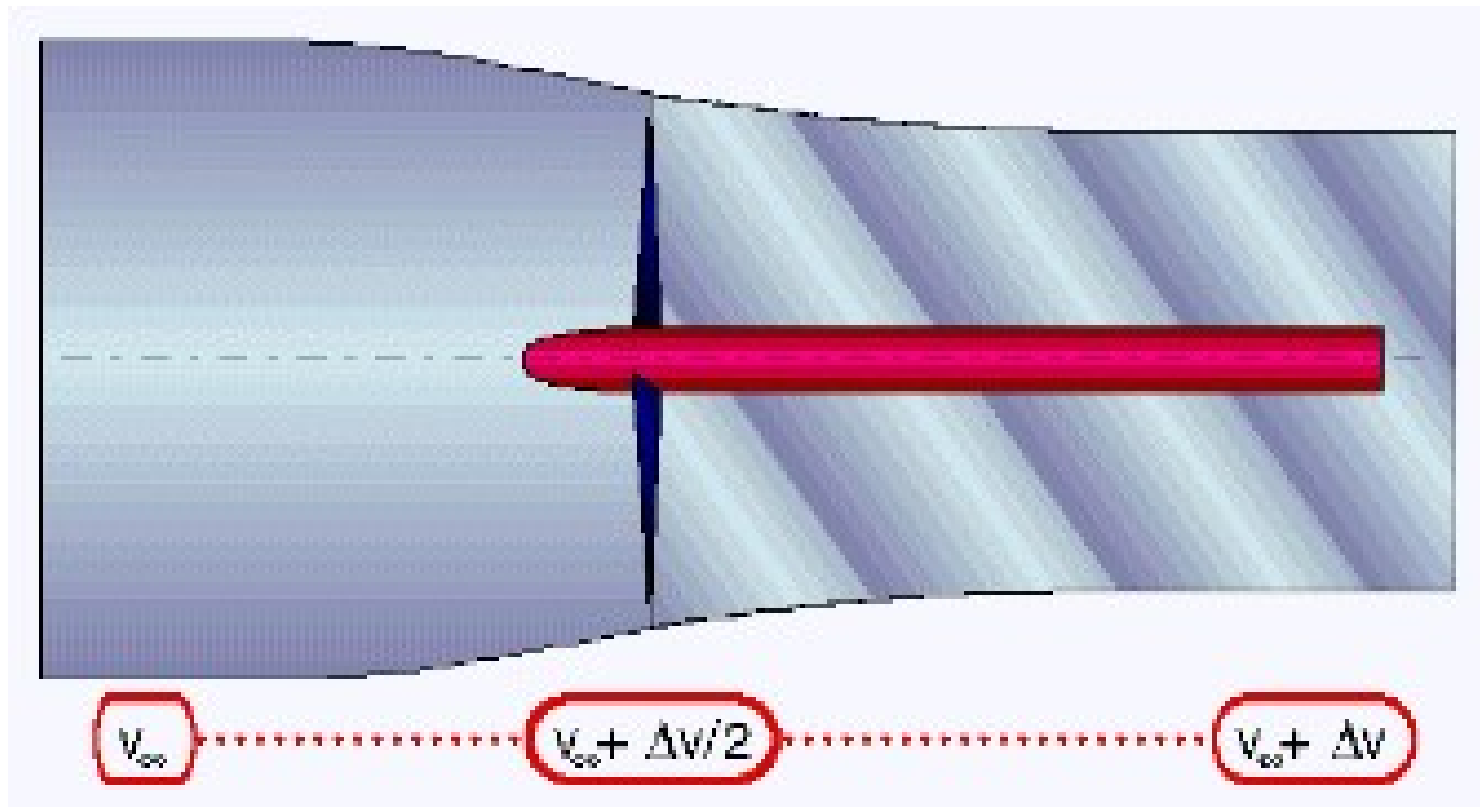
Mentès susukimas



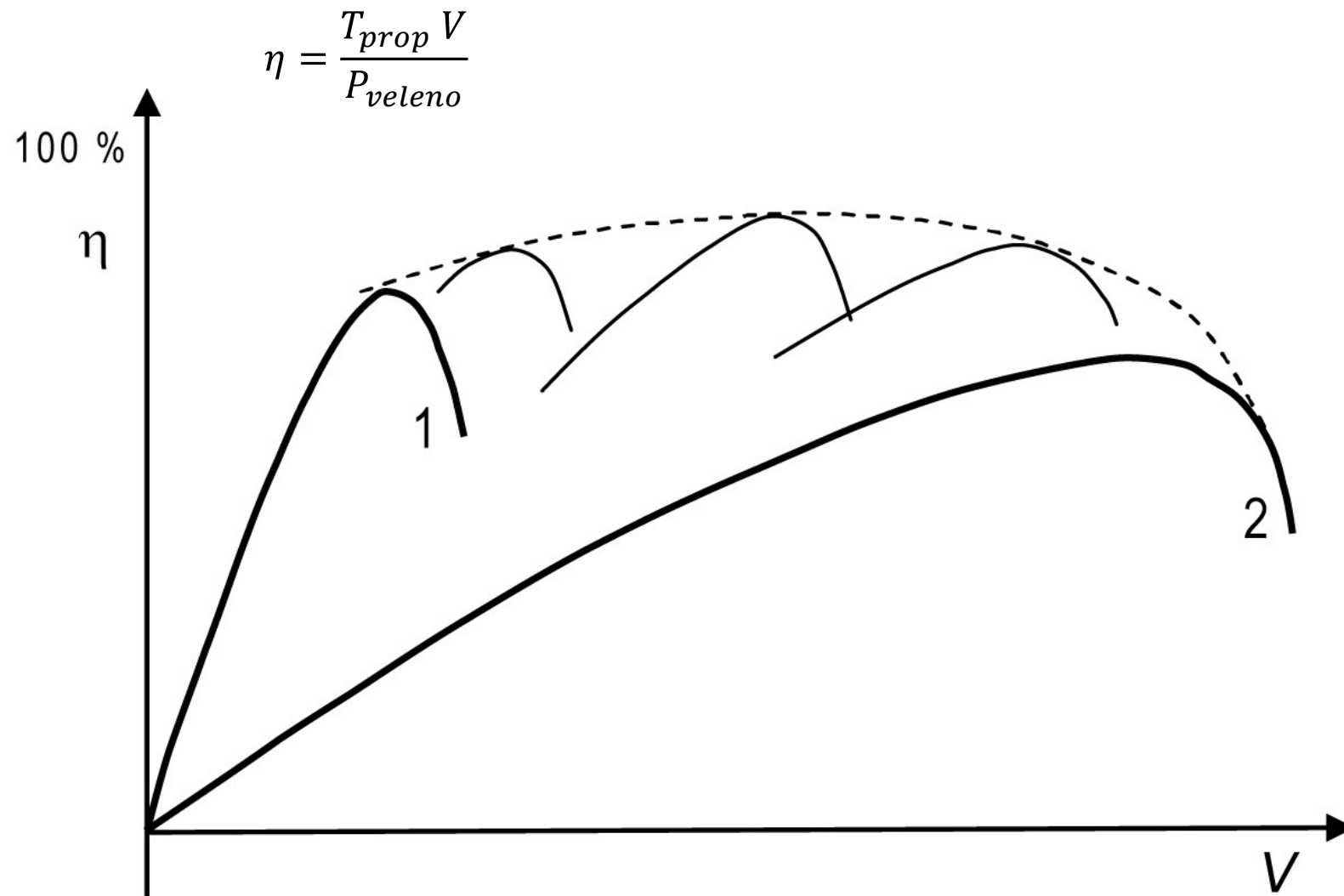
Mentės jėgos



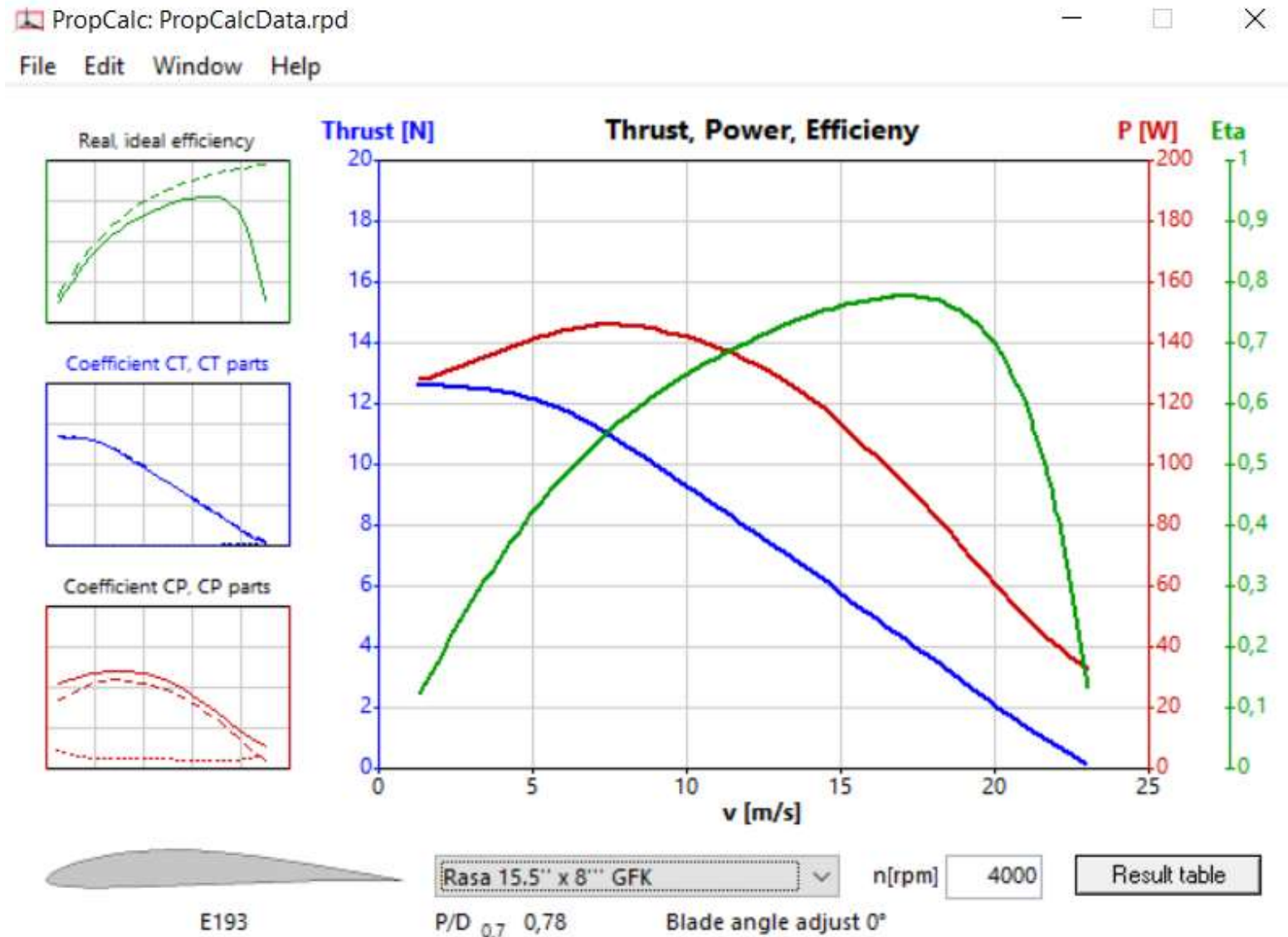
Propelerio srautas



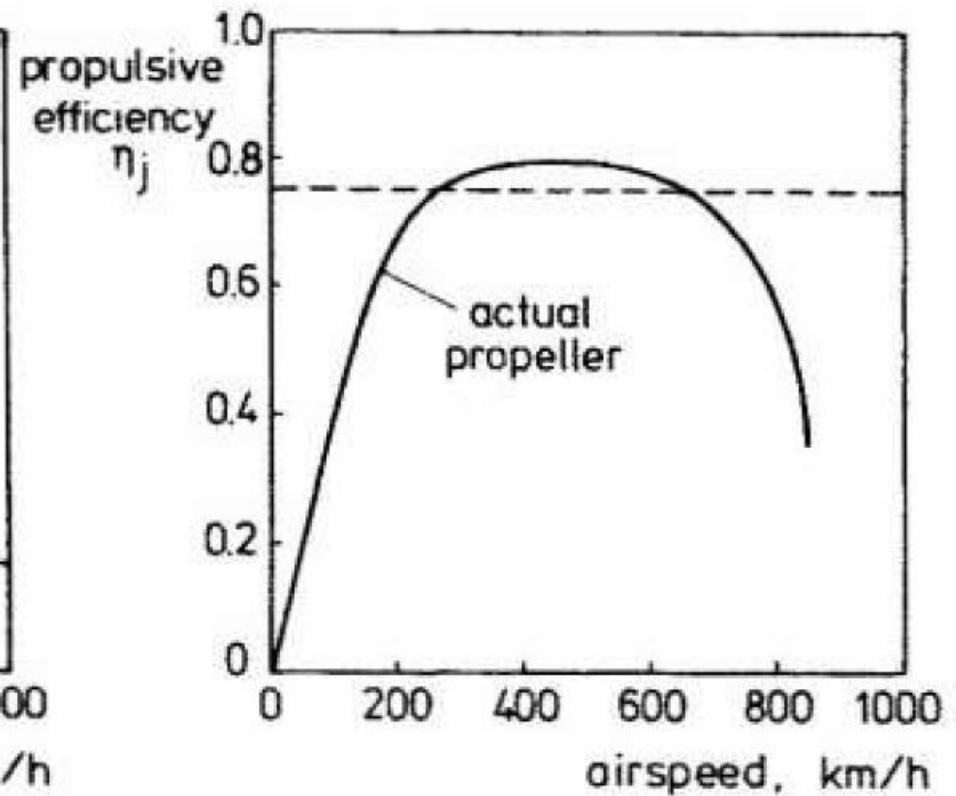
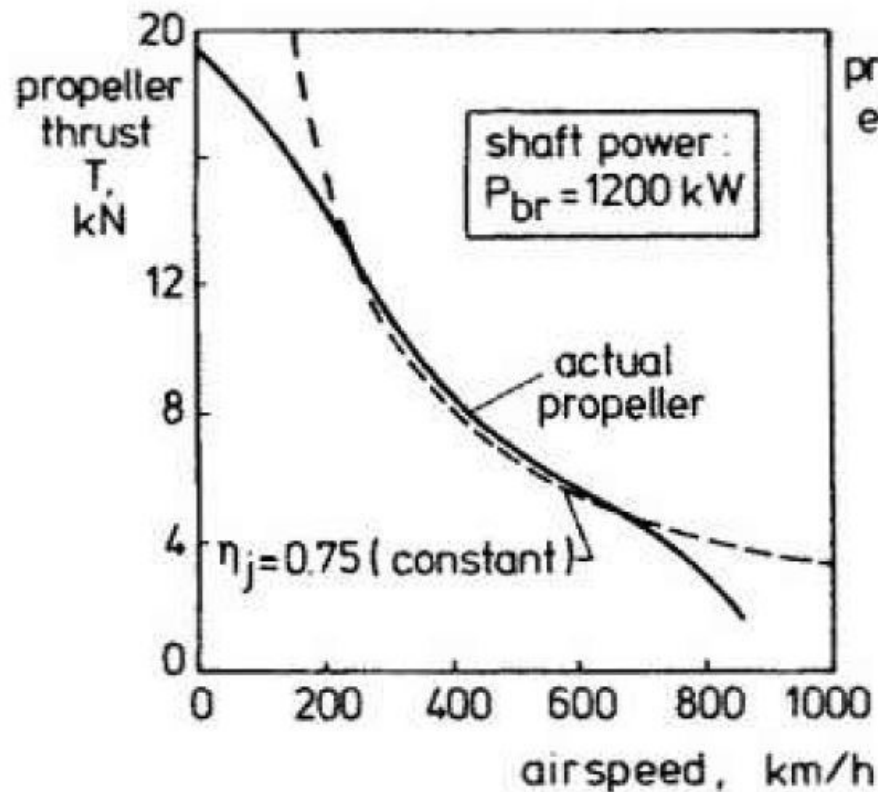
Propelerio naudingumo koeficientas



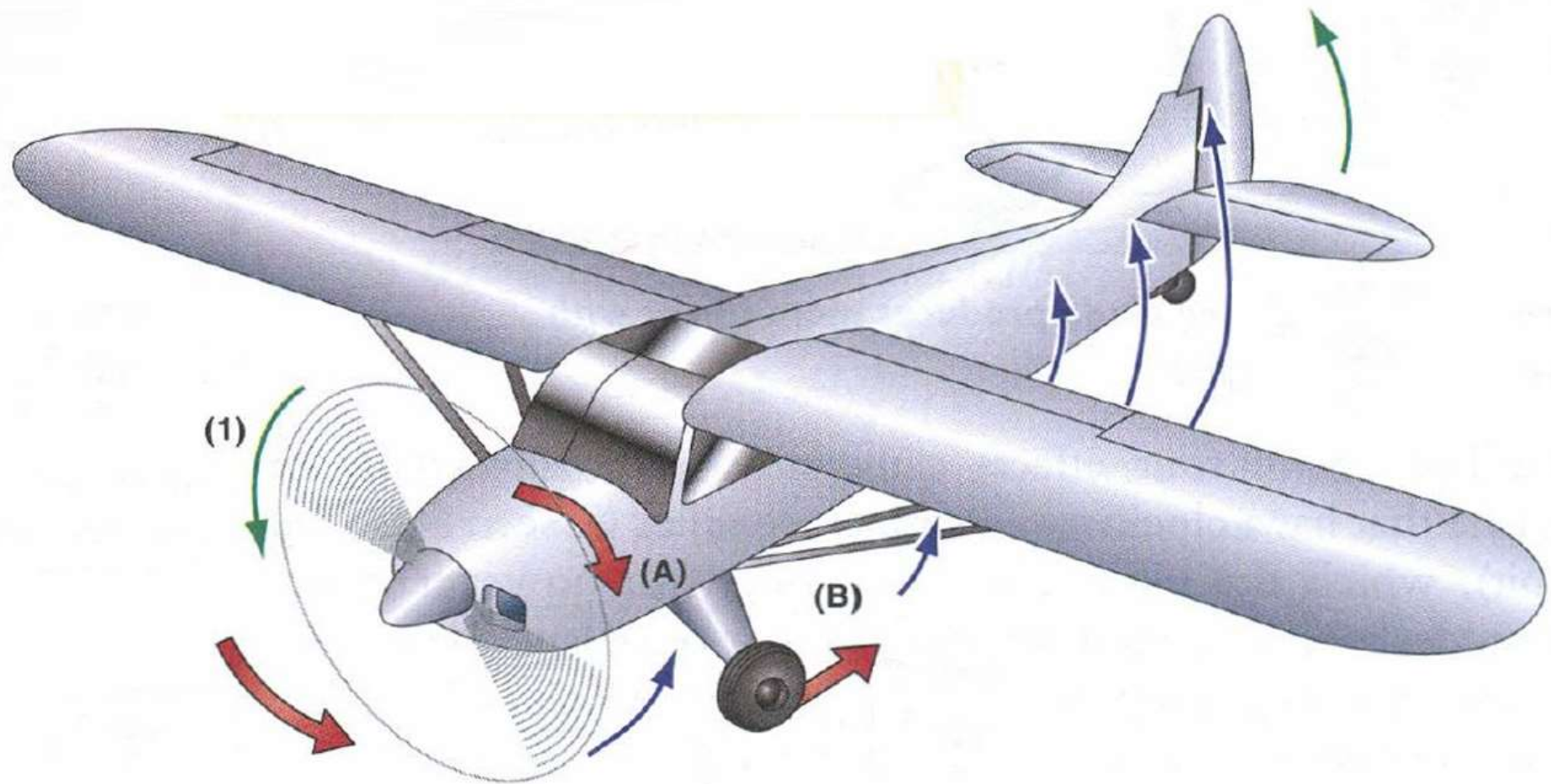
Propelerio charakteristikų pavyzdys



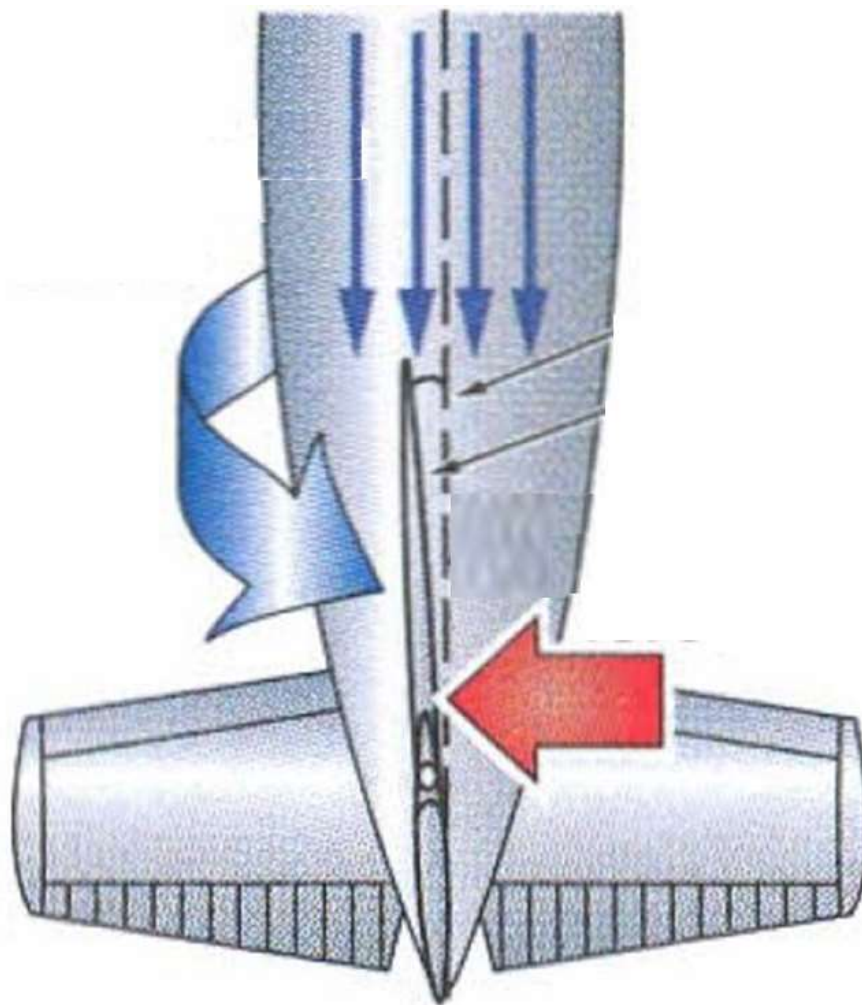
Tipinės propelerio charakteristikos



Šalutiniai efektai



Uodegos aptekējimas

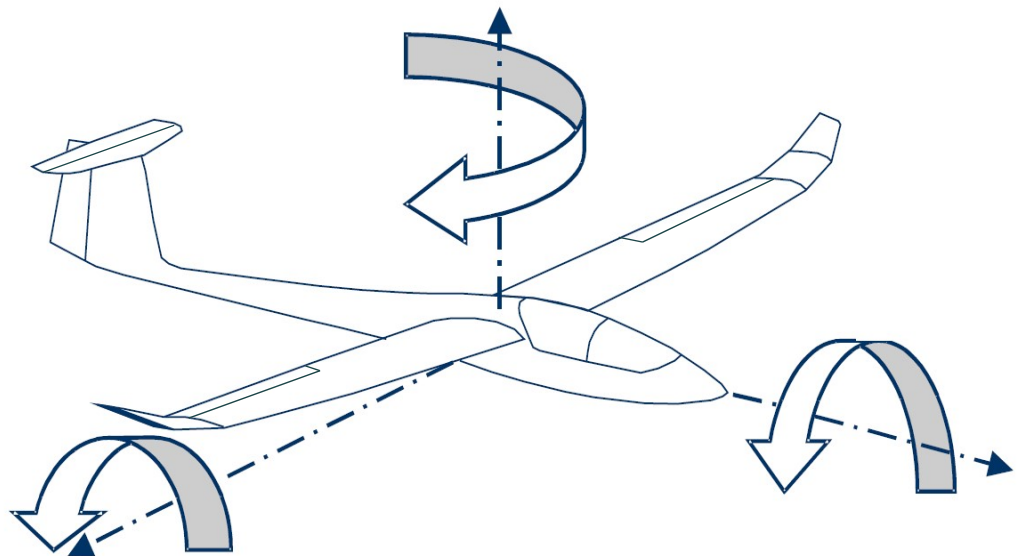


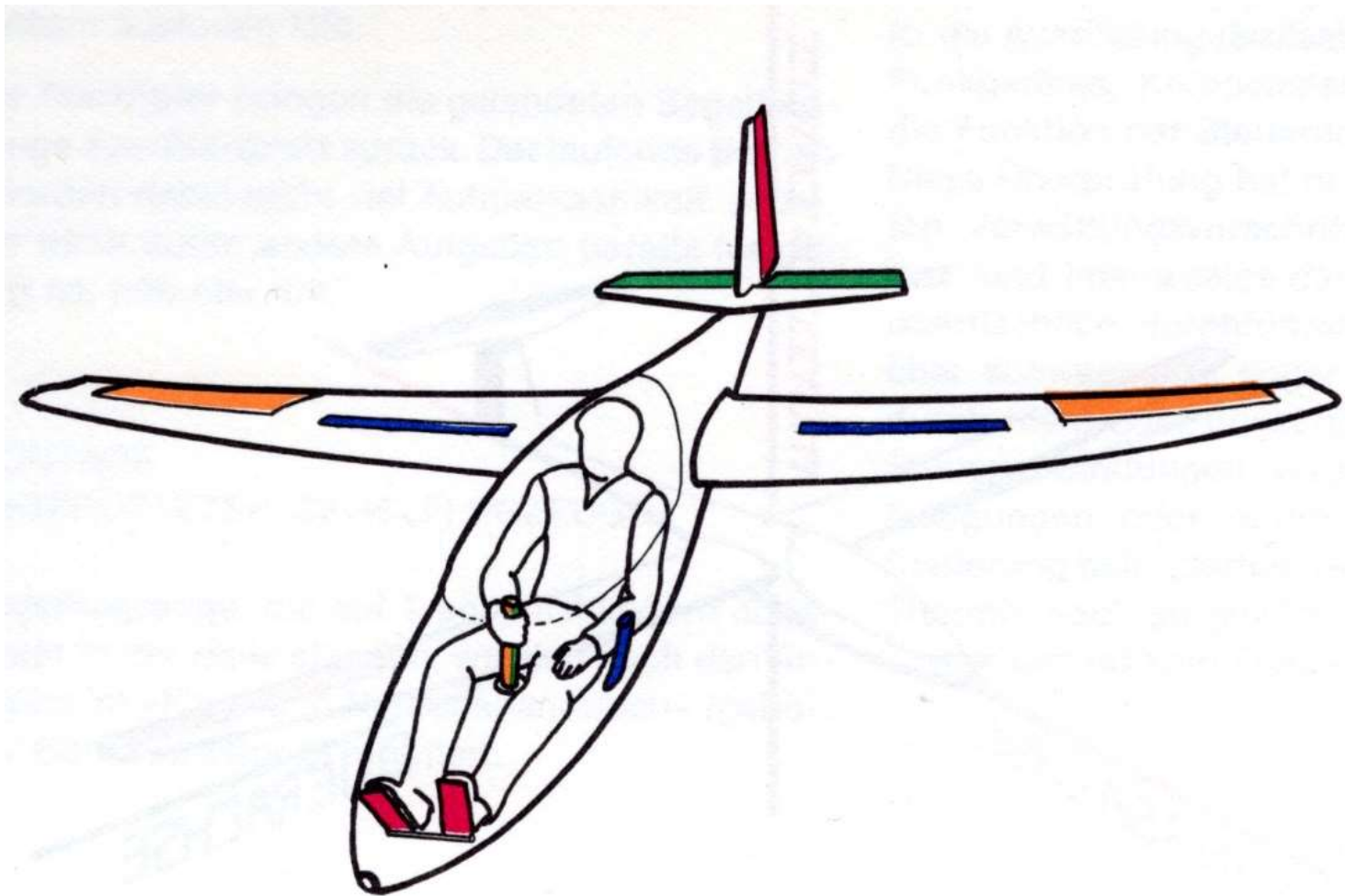
MOTOSKLANDYTUVO VALDUMAS

- Valdumas
 - vairų paveikto motosklandytuvo gebėjimas suktis apie ašis (keisti skrydžio režimą)
- Valdumas nustatomas pagal:
 - vairalazdės ir vairų atlenkimo kampus
 - jėgas, reikiamas vairų atlenkimui
 - sklandytuvo reagavimu į vairų atlenkimus ir kt.
- Priklauso nuo:
 - skrydžio greičio
 - vairų atlenkimo kampų
 - mechanizacijos padėties (užsparnių, interseptorių, važiuoklės)
 - atstumo tarp vairo ir masės centro

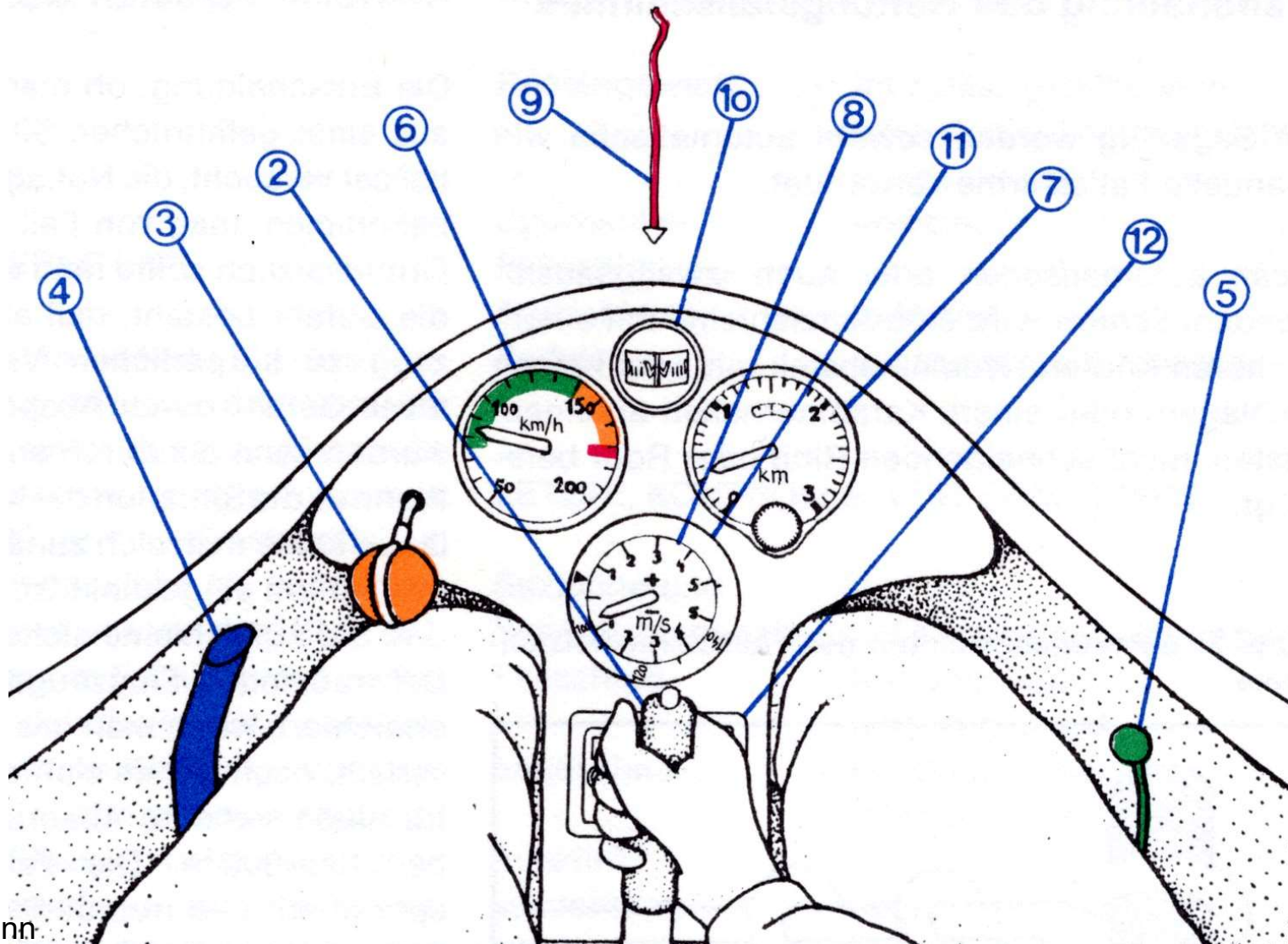
Valdumas

- IŠILGINIS valdumas
 - apie SKERSINĘ ašį
 - **AUKŠTUMOS VAIRU**
 - polinkis
- SKERSINIS valdumas
 - apie IŠILGINĘ ašį
 - **ELERONAIŠ**
 - posvyris
- KRYPTIES valdumas
 - apie VERTIKALIAJĄ ašį
 - **POSŪKIO VAIRU**
 - kryptis



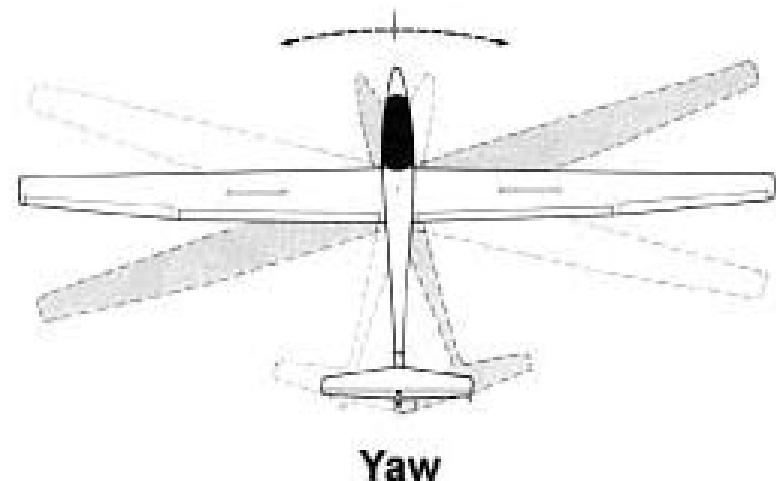
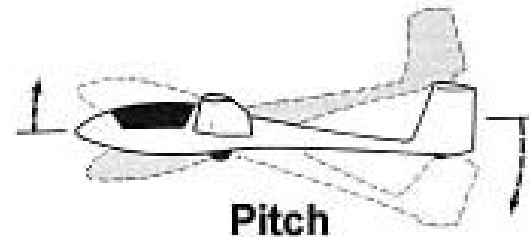
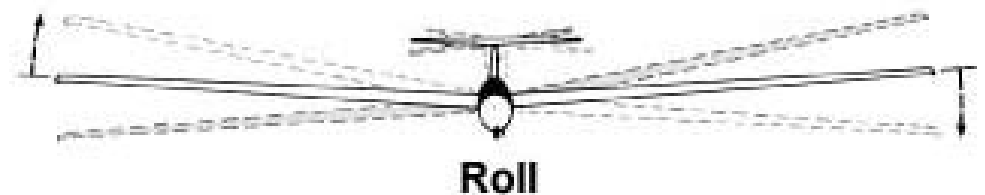


H. Reichmann



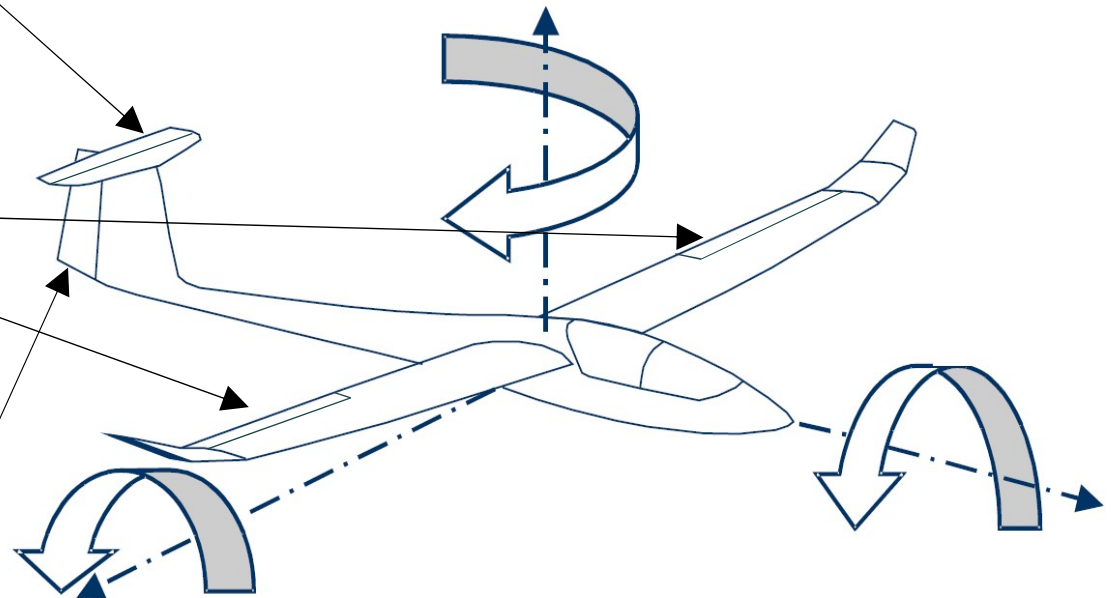
Sukimosi ašys

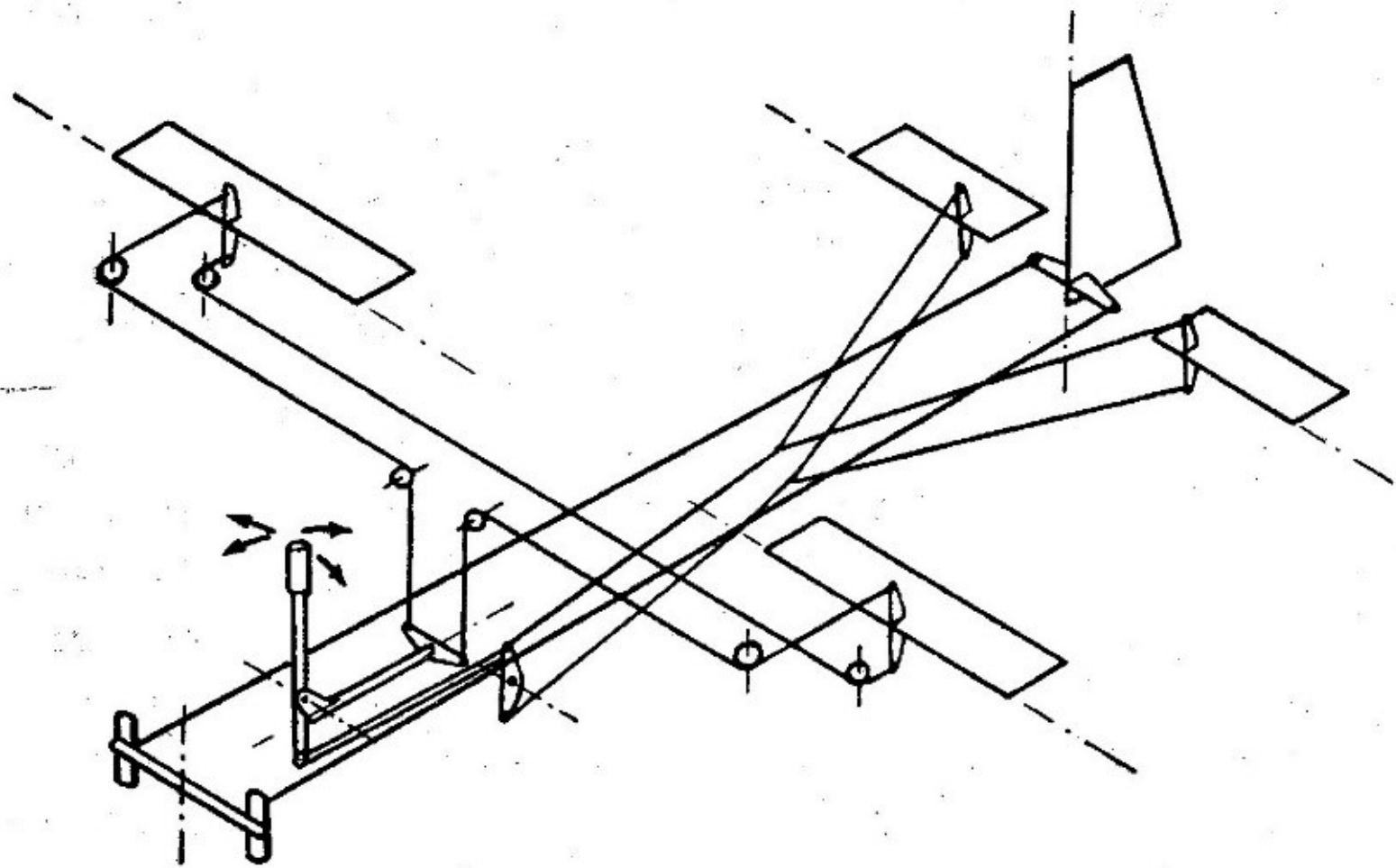
- Posvyris apie išilginę ašį, valdomas eleronais
- Polinkis apie skersinę ašį, valdomas aukščio vairo
- Pokrypis (krypavimas) apie vertikale ašį, valdomas krypties vairo



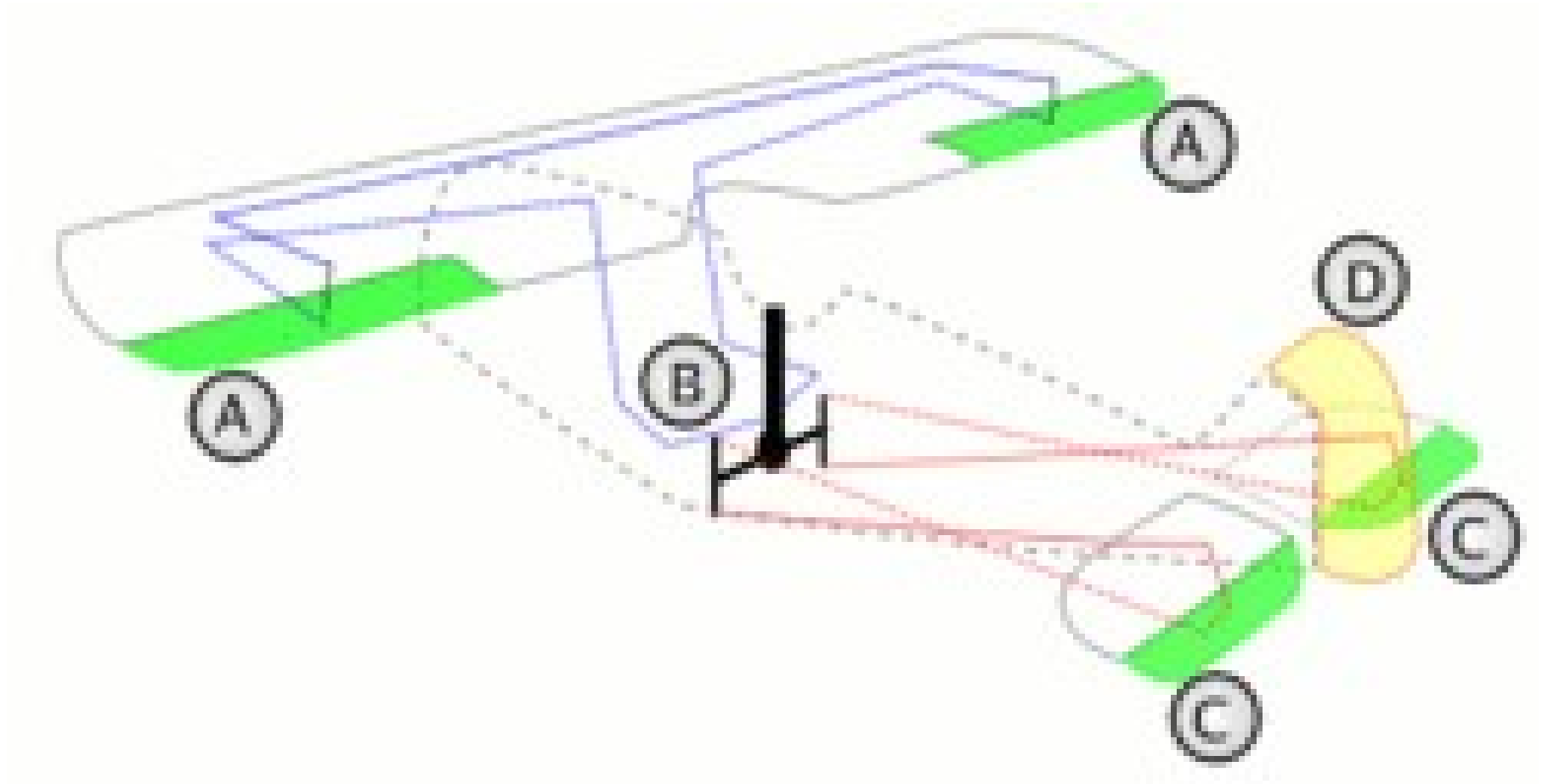
Valdymo plokštumos

- Aukštumos vairas
 - Valdymui apie SKERSINĘ ašį
 - **Polinkis**
- Eleronai
 - Valdymui apie IŠILGINĘ ašį
 - **Posvyris**
- Krypties vairas
 - Valdymui apie VERTIKALIAJĄ ašį
 - **Kryptis**, pokrypis





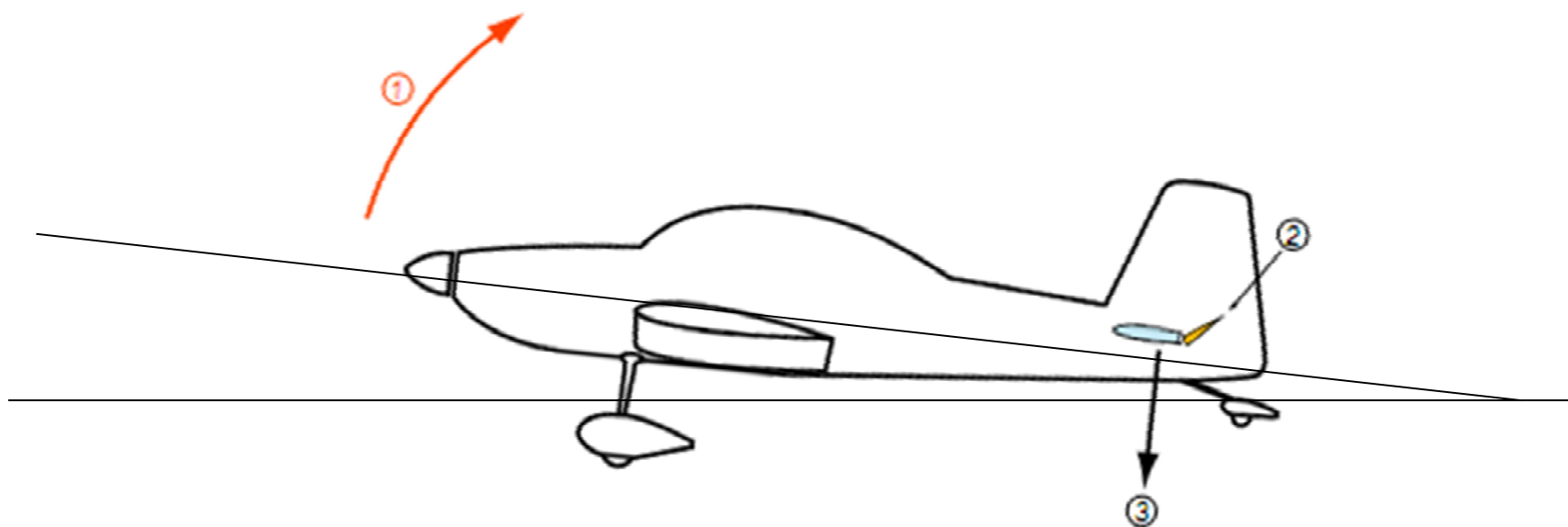
Trys valdymo kanalai

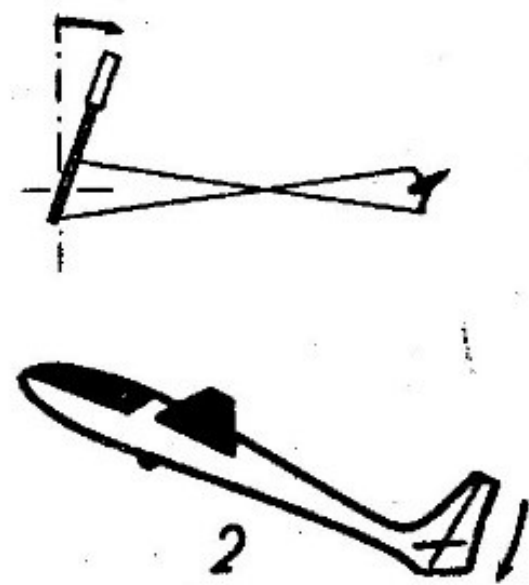
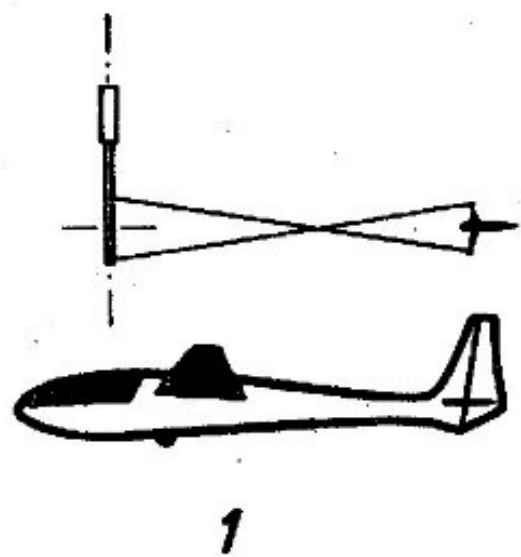
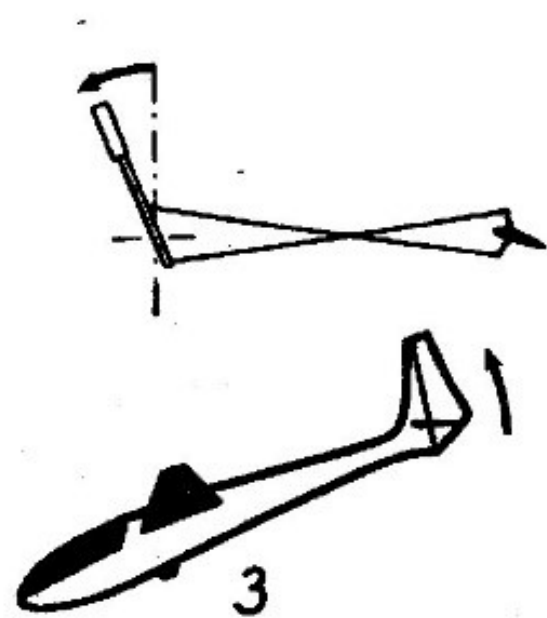


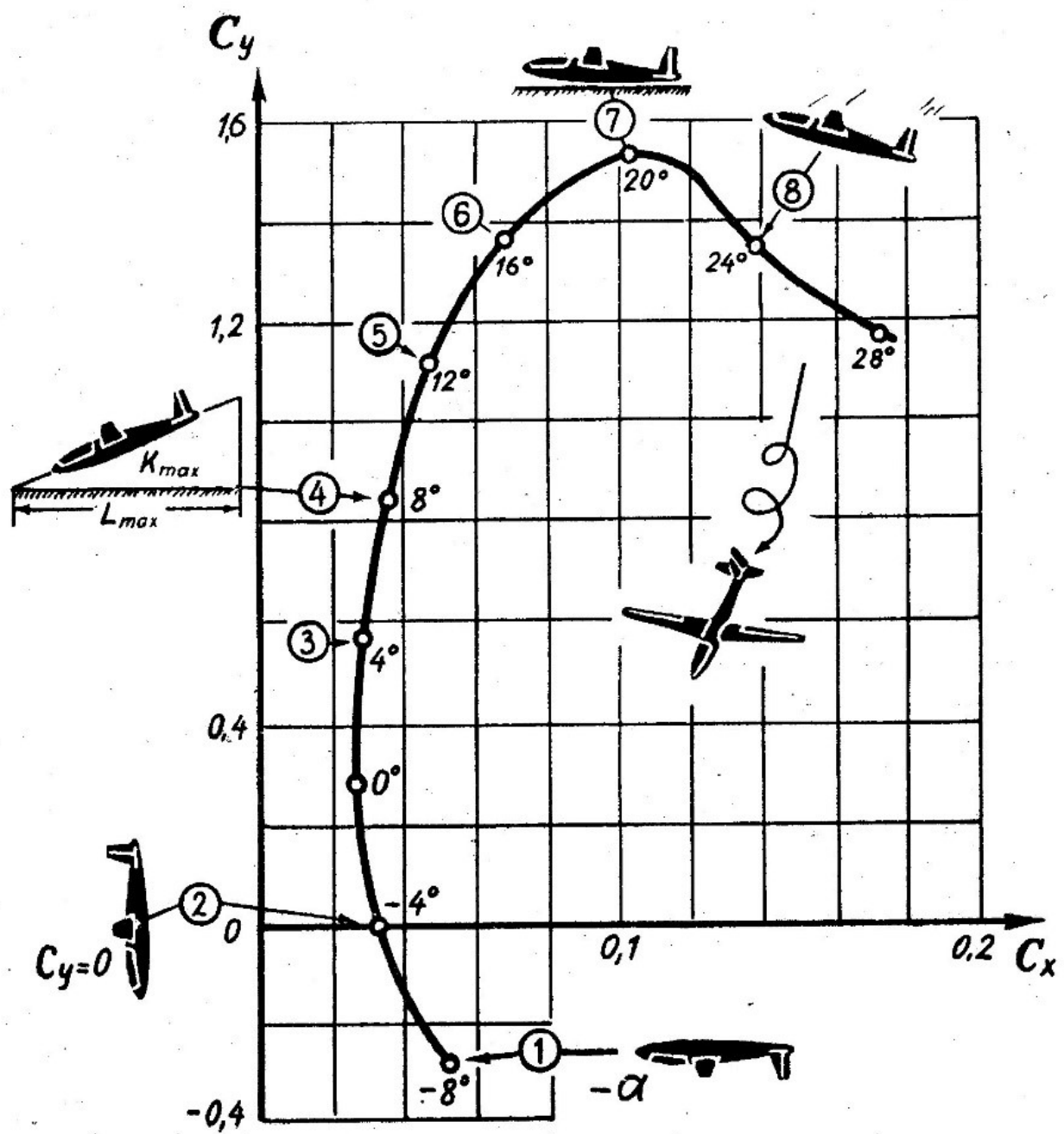
(Piotr Jaworski)

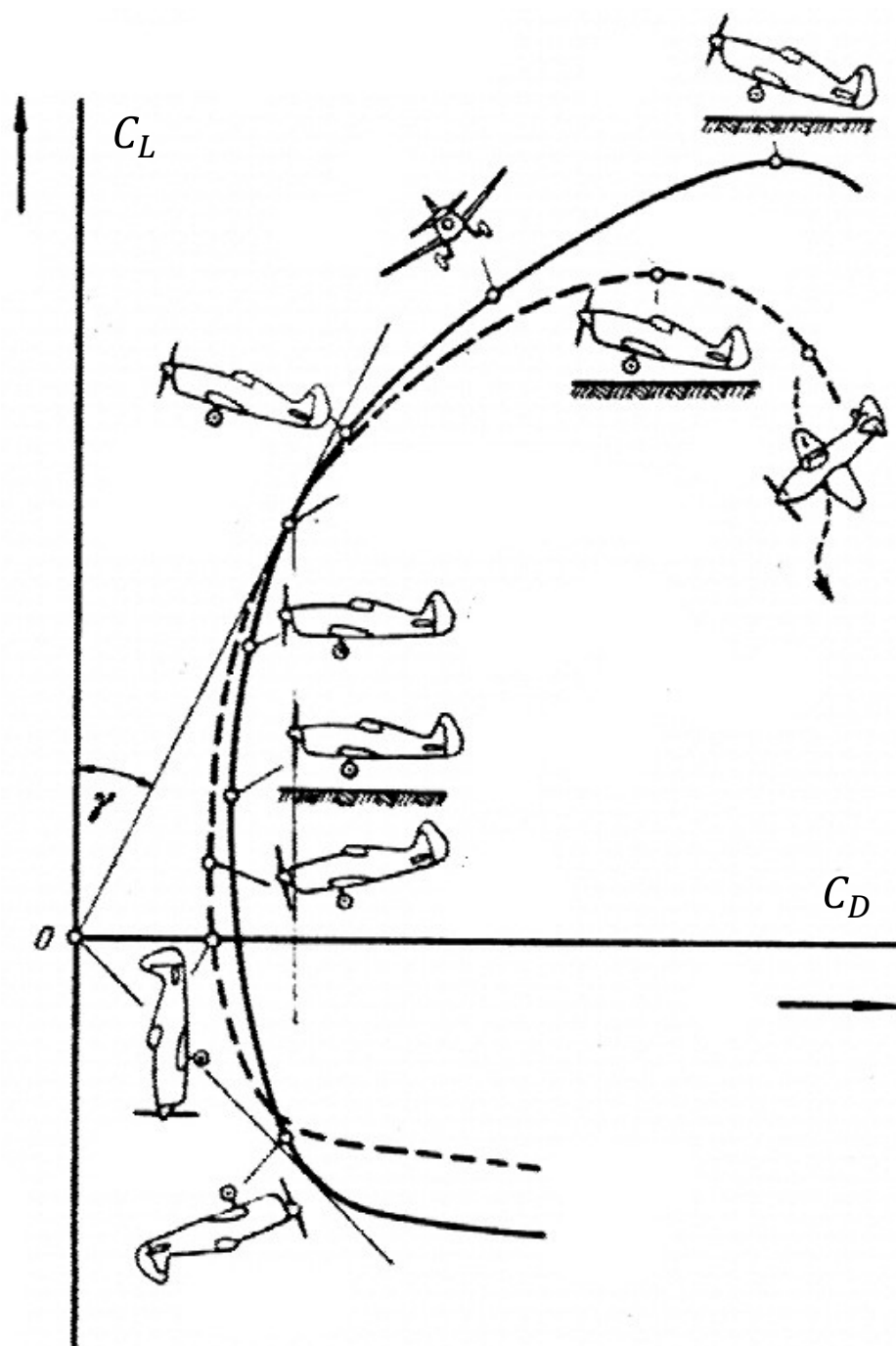
Išilginis valdumas

- IŠILGINIS valdumas
 - apie SKERSINĘ ašį
 - **AUKŠČIO VAIRU**
 - Polinkis - kampas tarp orlaivio išilginės ašies ir horizontalios plokštumos

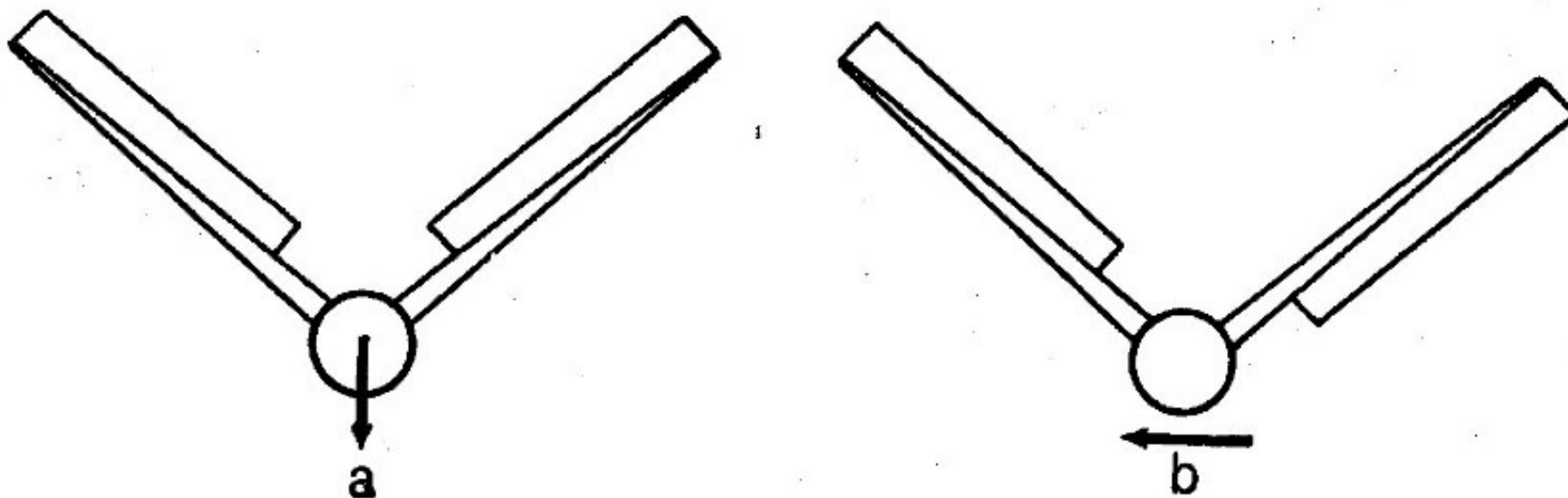








„V“ formos uodega

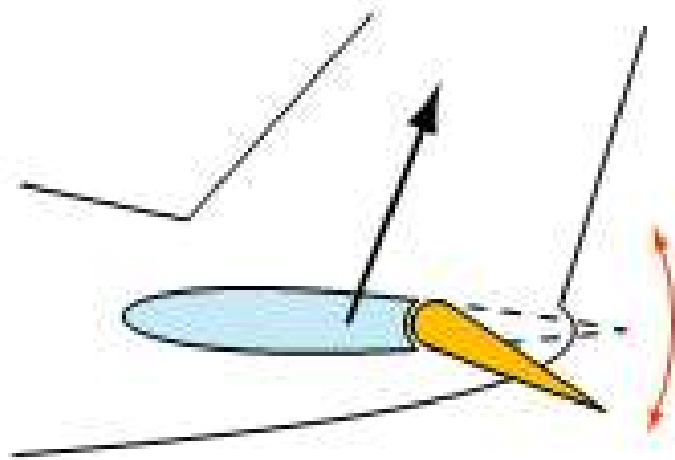


32 pav. V formos vairų veikimas:

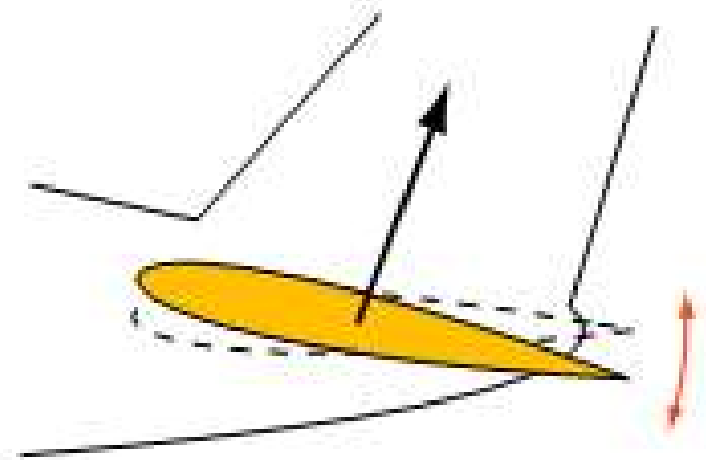
- a) vairalazdė patraukta į save — sklandytuvas kyla, b) dešinysis pedalas paspaustas — sklandytuvas sukasi į dešinę

Valdymo plokštumos

- Aerodinamines valdymo jėgas galima sukurti:
 - Keičiant aerodinaminio paviršiaus gabtumą (1)
 - Keičiant aerodinaminio paviršiaus atakos kampą (2)



1.



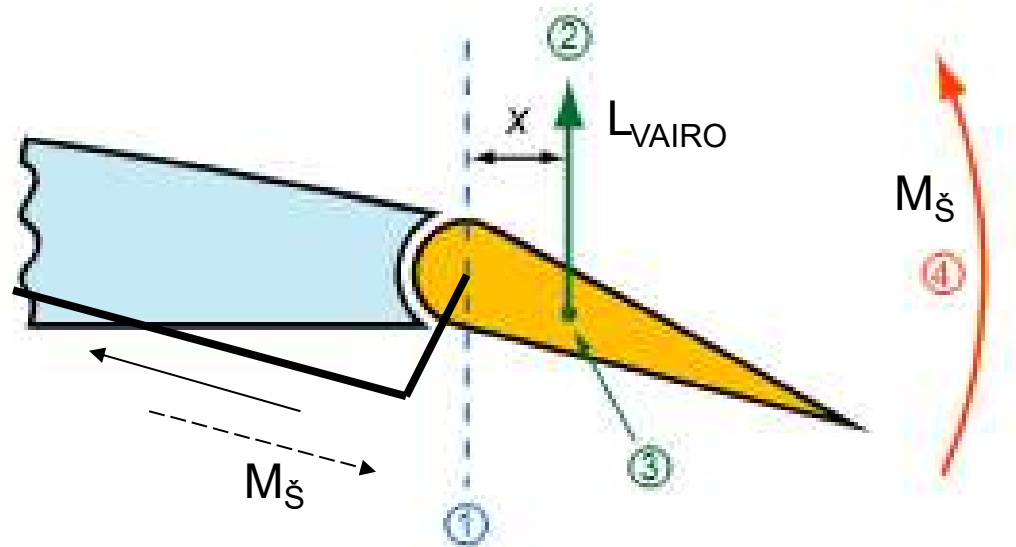
2.

Valdymo jėgų keitimas

- Jeigu aerodinaminiai vairai yra dideli, arba lėktuvas skraido dideliais greičiais, susidaro didelės valdymo jėgos
- Vairų kompensacija
 - aerodinaminė
 - ašinė
 - raginė
 - servokompensatoriai
 - svorinė
- Vairų apkrovos mažinimo būdai

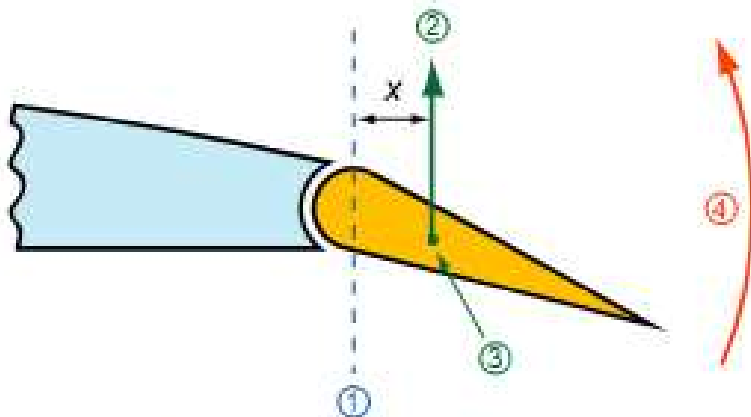
Šarnyrinis momentas

- Pasipriešinimas valdymo jėgoms susidaro dėl to, kad vairą veikiančių slėgio jėgų atstojamoji nesutampa su vairo ašimi
- Vairo atstojamosios jėgos ir jos atstumo iki sukimosi ašies sandauga yra ŠARNYRINIS MOMENTAS, kuris priešinas vairo atlenkimui

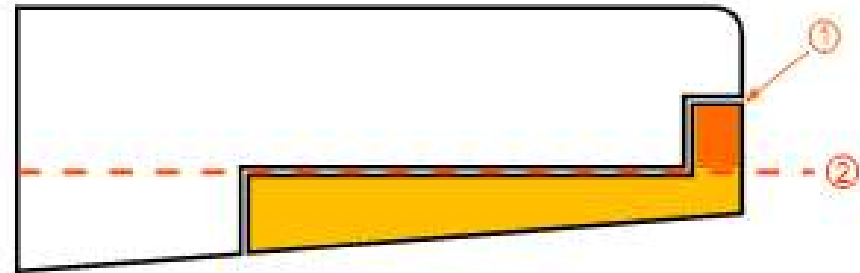


Aerodinaminė kompensacija

- Ašinė kompensacija
 - Sukimosi ašies perkėlimas toliau, nuo priekinės vairo briaunos arčiau vairo atstojamosios jėgos
- Raginė kompensacija
 - padidinant vairo plotą prieš ašį
 - plotas padidinamas ne visame vairo ilgyje, bet jo gale



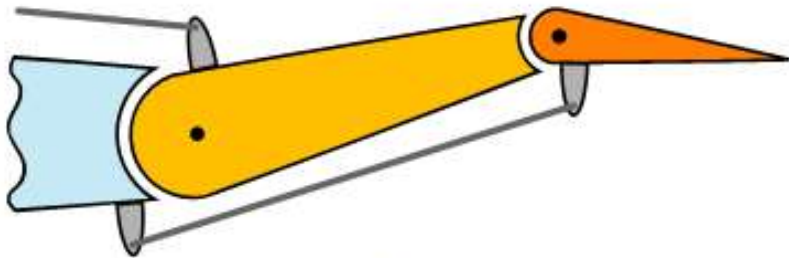
148 pav. Ašinė kompensacija



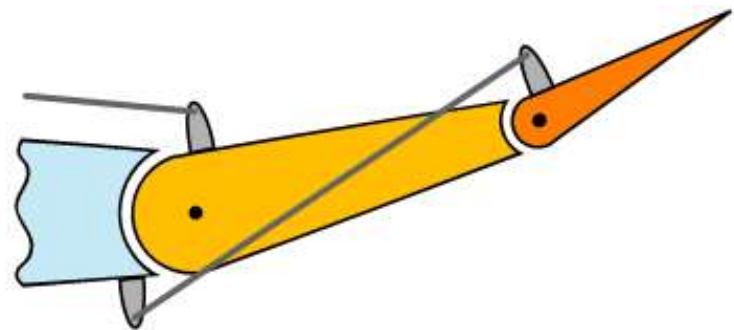
149 pav. Raginė kompensacija
1–aerodinaminė raginė kompensacija; 2–vairo ašis

Servo vairai

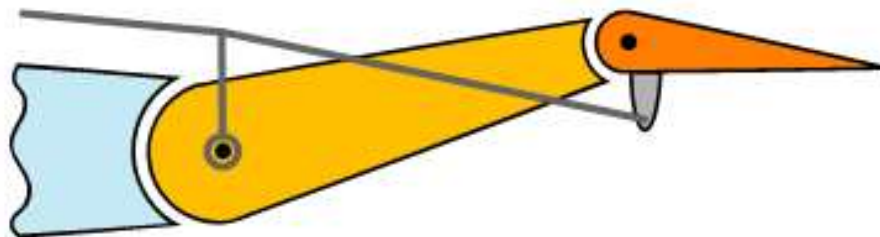
- Servokompensatoriai (povairiai)
 - povairiai pakeičia šarnyrinius momentus keisdami aerodinamines jėgas už vairo ašies



151 pav. Balansinis povairis



152 pav. Antibalansinis povairis



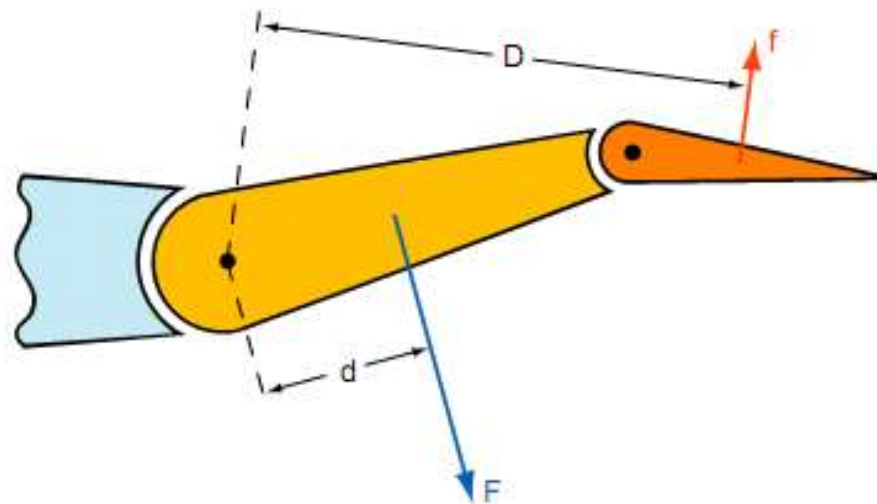
153 pav. Servo povairis

Masinė vairų kompensacija

- Flateris
 - Prie didelių greičių atsiradę konstrukcijos virpesiai, greitai progresuojantis – sklandytuvas gali sulūžti ore
 - Priežastis: vairų laisvumai ir svorių pasisikirstymas
- Svorinė (masinis balansavimas)
 - Vairo svorio centro perkėlimas į priekį papildomų svorių pagalba

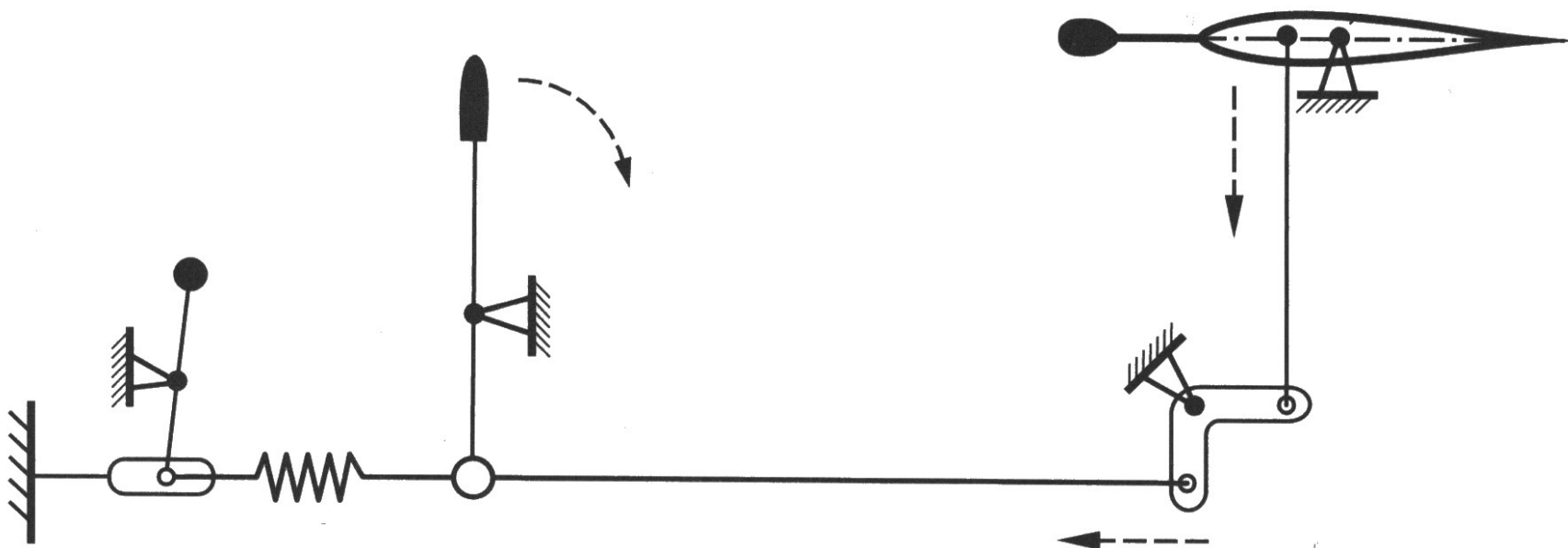
Trimeris

- Vairų apkrovos mažinimo būdai
 - Vairų kompensacija
 - Povairiai (trimeriai)
 - valdomi iš piloto kabinos



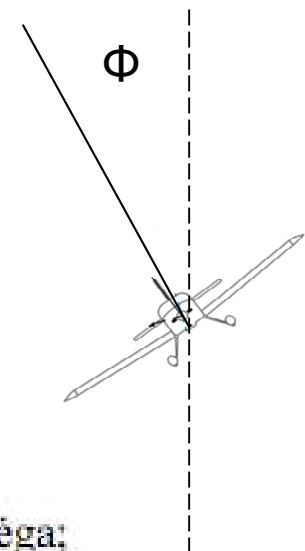
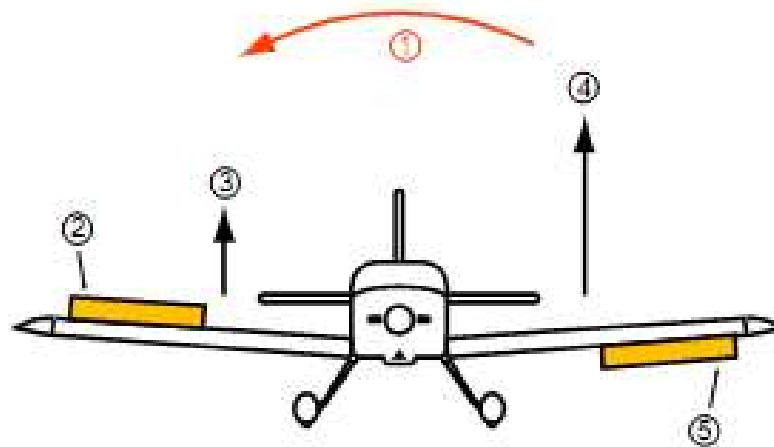
155 pav. Trimerio veikimo principas

Trimerio efekto mechanizmas



Skersinis valdumas

- SKERSINIS valdumas
 - apie IŠILGINE ašį
 - **ELERONAI**
 - posvyris (kampas tarp lėktuvo simetrijos plokštumos ir vertikalios plokštumos)

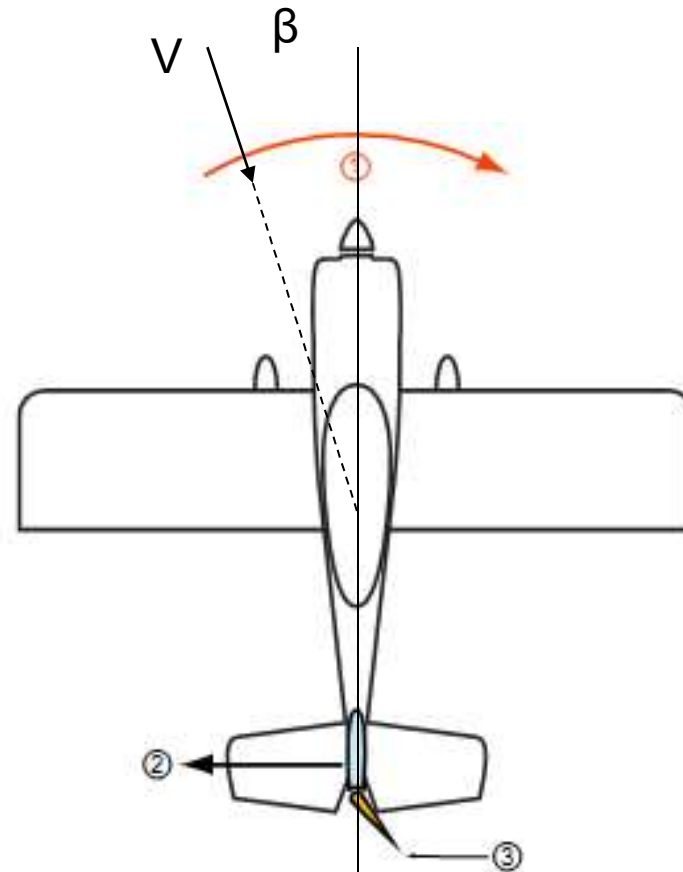


146 pav. Posvyrio valdymas

1–posvyrio momentas; 2–eleronas aukštyn; 3–sumažėjusi keliamoji jėga;
4–padidėjusi keliamoji jėga; 5–eleronas žemyn

Krypties valdymas

- KRYPTIES valdymas
 - apie VERTIKALIAJĄ ašį
 - **POSŪKIO VAIRU**
 - kryptis
 - slydimo kampas β (kampas tarp išilginės ašies ir greičio)



145 pav. Krypties valdymas

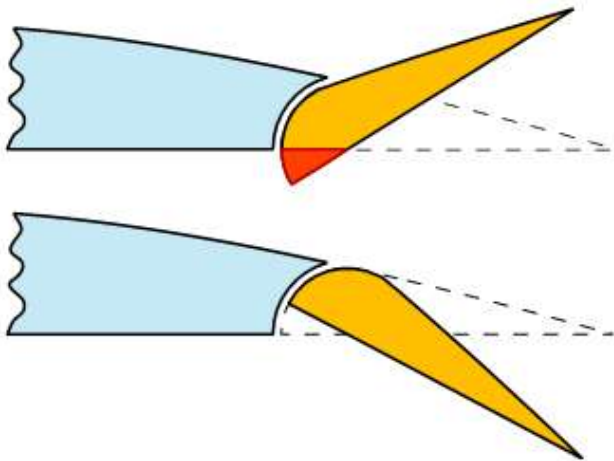
1–krypties momentas; 2–vertikalios uodegos šoninė jėga; 3–krypties vairas

Eleronų diferencinis valdymas

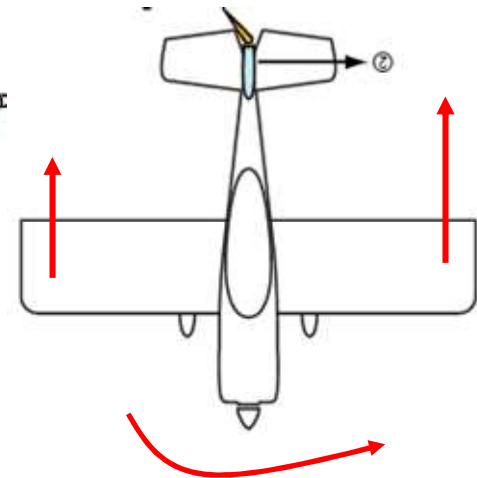
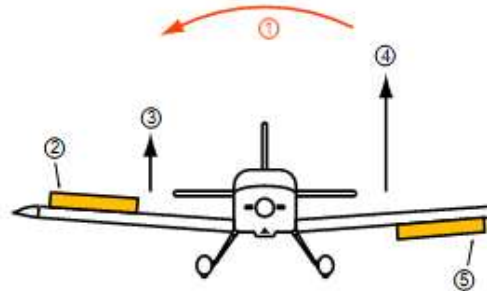
- Nepalankus krypties momentas dėl eleronų atlenkimo:
 - kur eleronas atlenktas žemyn, padidėja profilinis ir indukcinis pasipriešinimas
 - kur eleronas atlenktas aukštyn, sumažėja profilinis ir indukcinis pasipriešinimas
 - atsiranda krypties momentas, veikiantis į priešingą pusę (pvz. posvyris KAIRĖN – kryptis DEŠINĖN)

Eleronų diferencinis valdymas

- Nepalankaus krypties momento išvengimo būdai:
 - friser eleronai
 - diferenciniai eleronai
 - eleronai, kurie žemyn atsilenkia žymiai mažiau negu aukštyn



147 pav. Friser eleronai

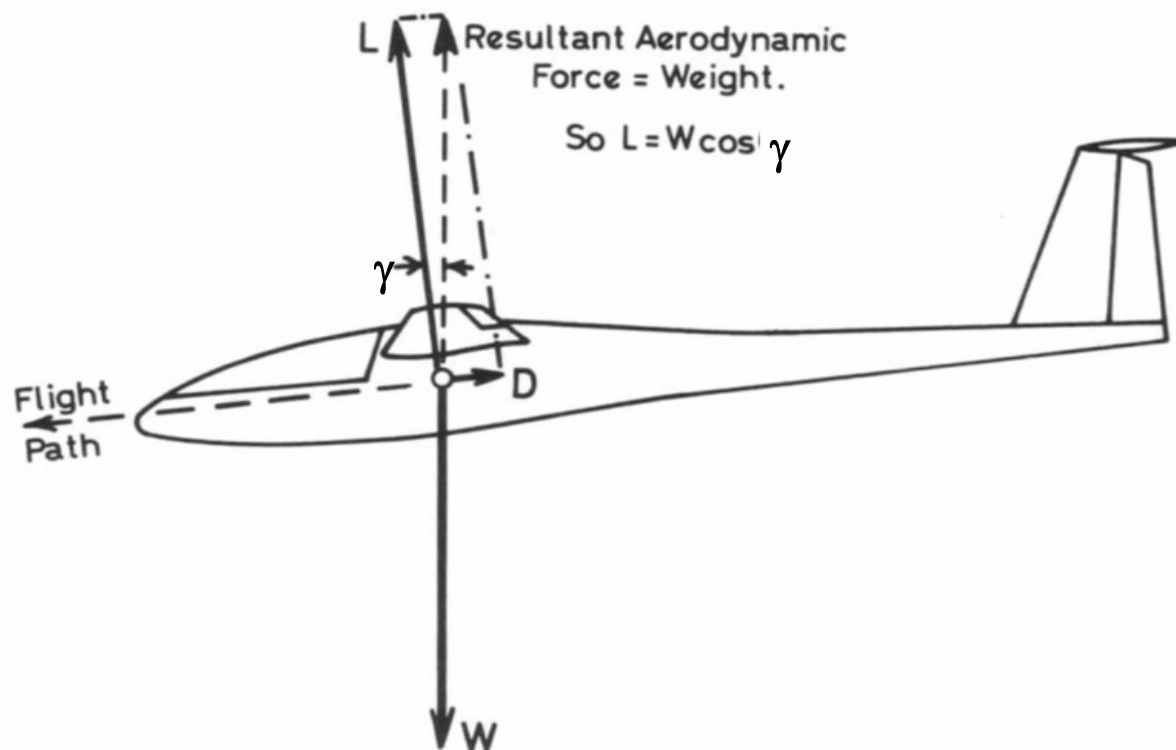


Eleronų reversas

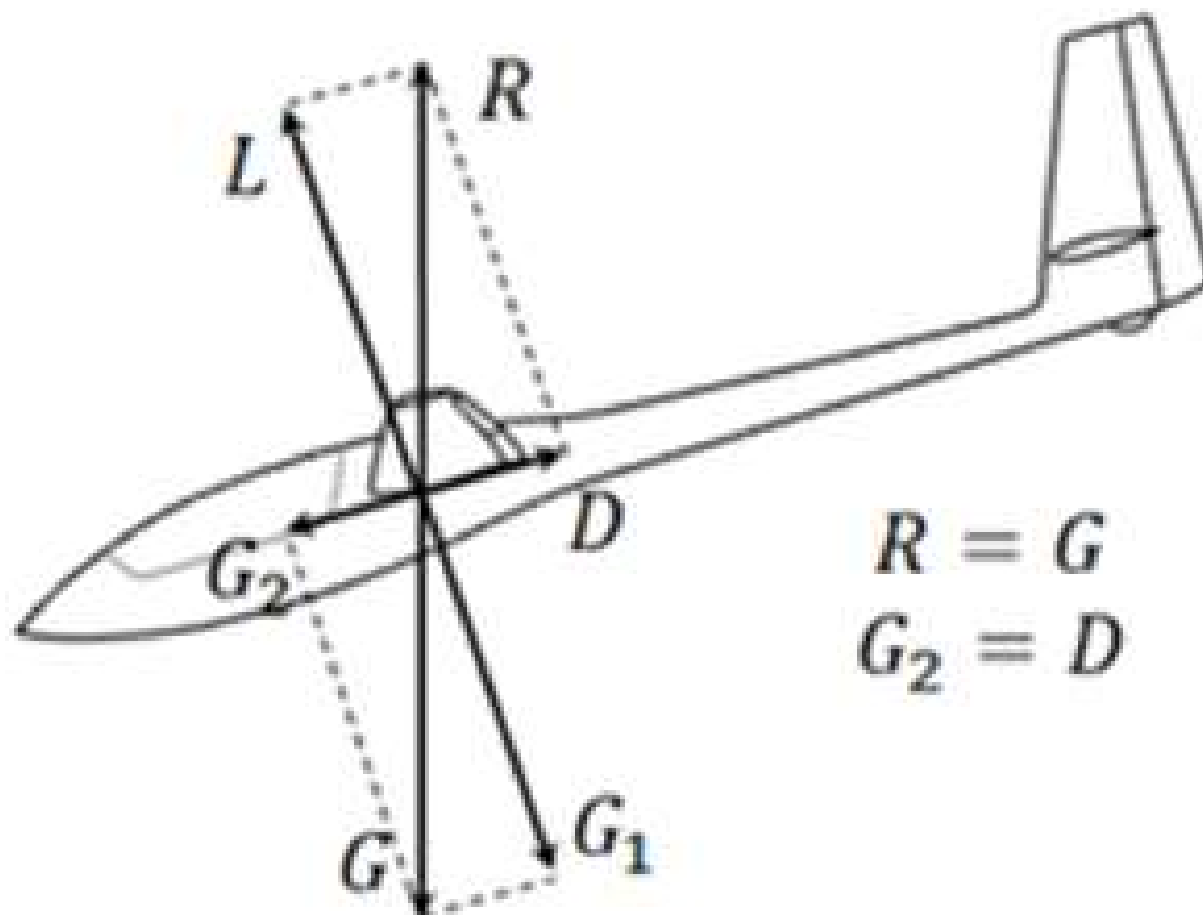
- Eleronų reversas prie didelių greičių
 - atlenkus eleronus sparnas susisuka sumažindamas eleronų efektyvumą, o nuo tam tikro greičio sparno susisukimo efektas viršija eleronų atlenkimo efektą
- Eleronų reversas prie mažų greičių
 - arti kritinių atakos kampų atlenkus eleroną žemyn sparnas viršija α_{kr} ir praranda keliamąją jėgą

JĒGOS, VEIKIANČIOS SKLANDYTUVĀ SKRENDANT

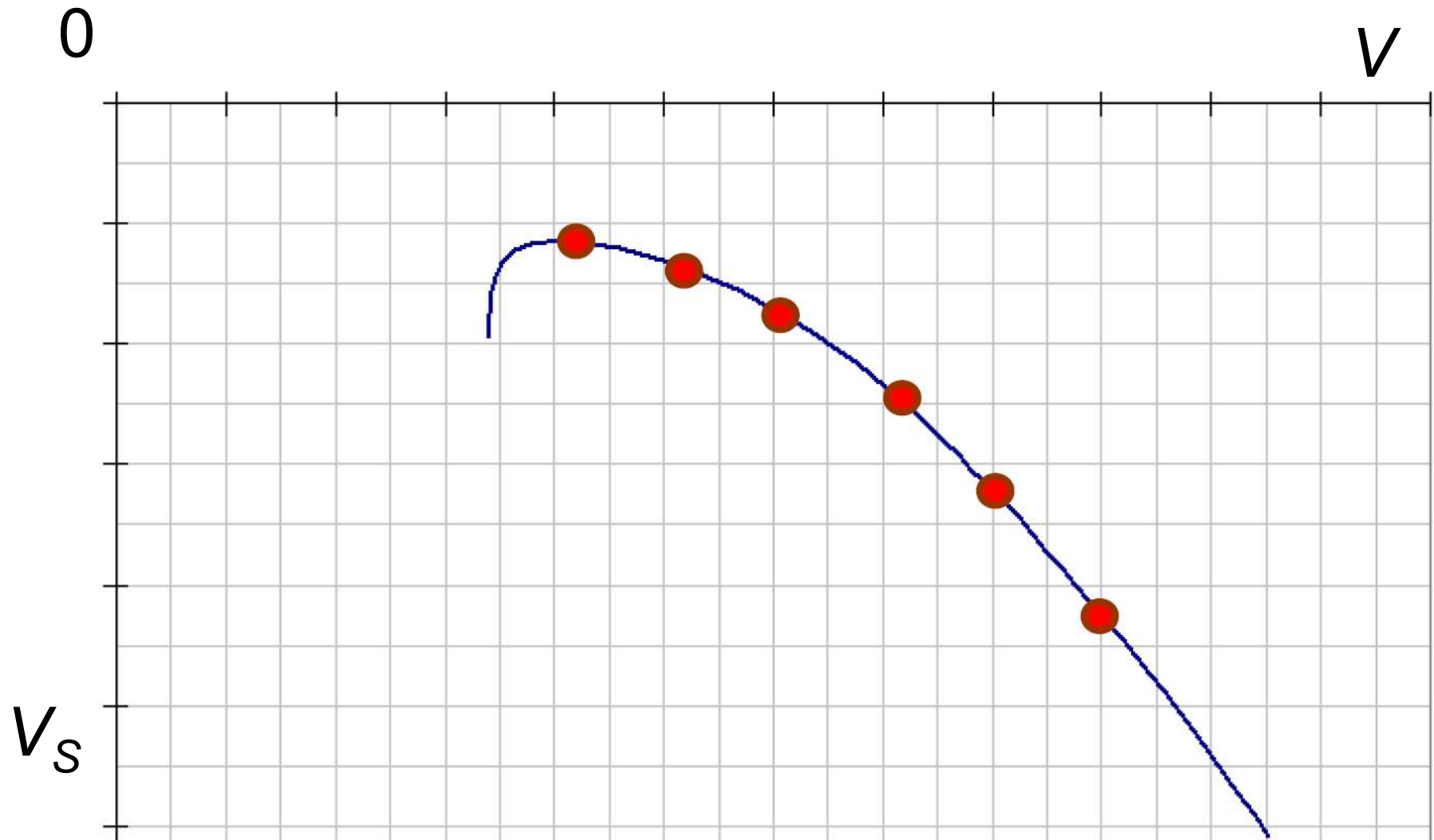
Keliamoji jēga L , svorio jēga W ir pasipriešinimas D



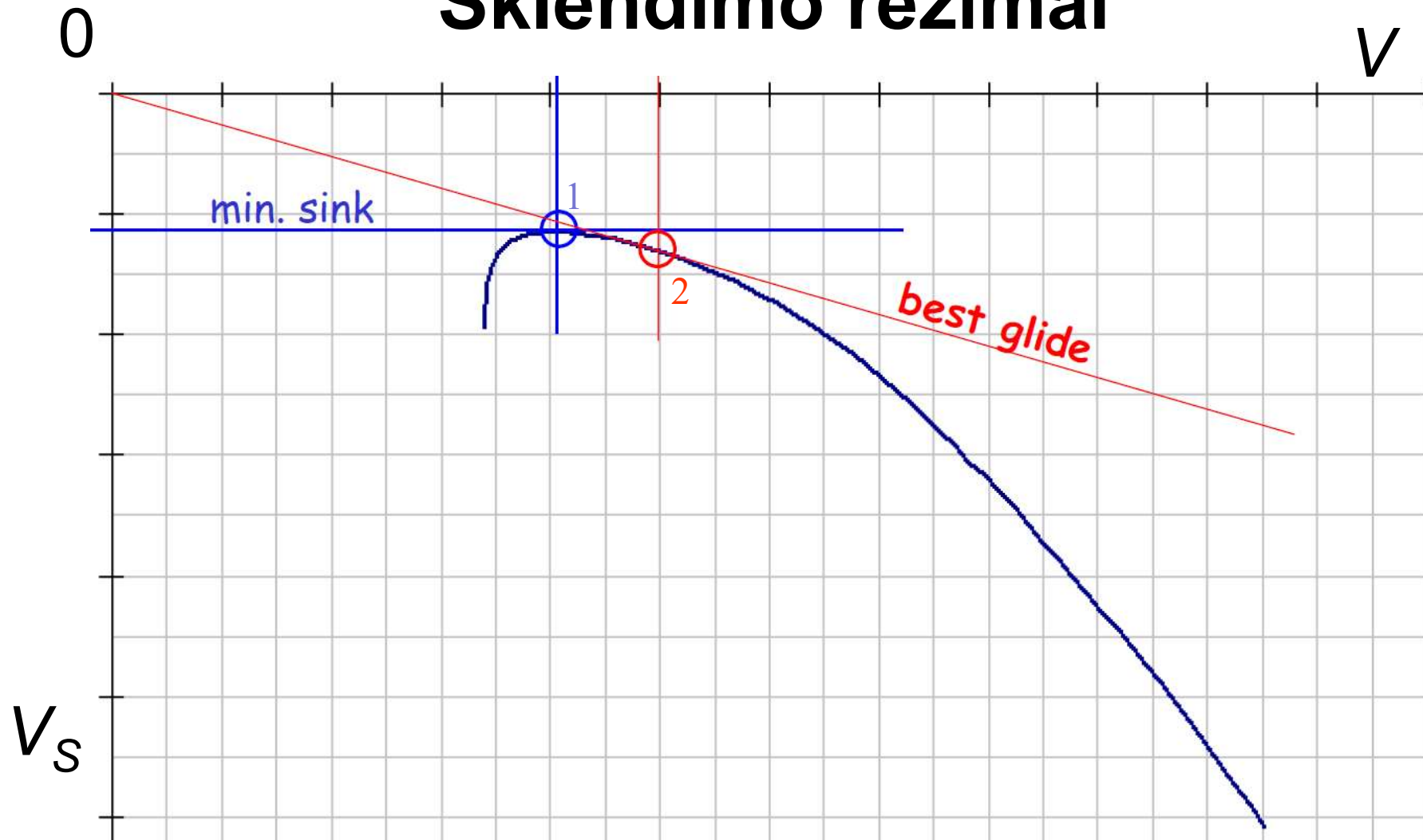
Jēgos nusistovējusiame sklendime



Sklendimo greičių poliarė



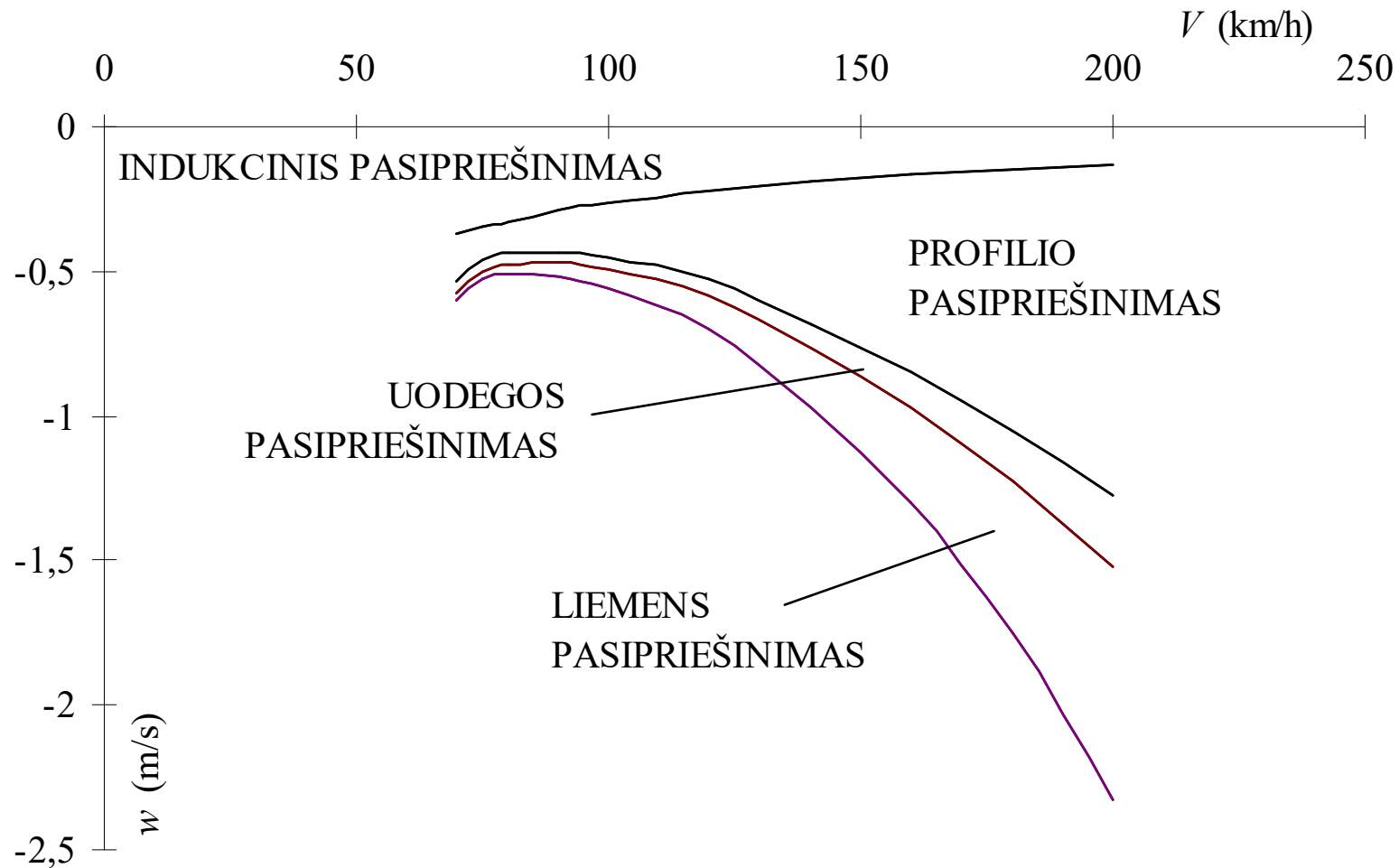
Sklendimo režimai



1 – ekonominis režimas, mažiausias žemėjimo greitis, ilgiausias sklendimo laikas

2 – naudingiausias režimas, maksimali aerodinaminė kokybė, toliausias sklendimas

Sklandytuvo dalių įtaka greičių poliarei

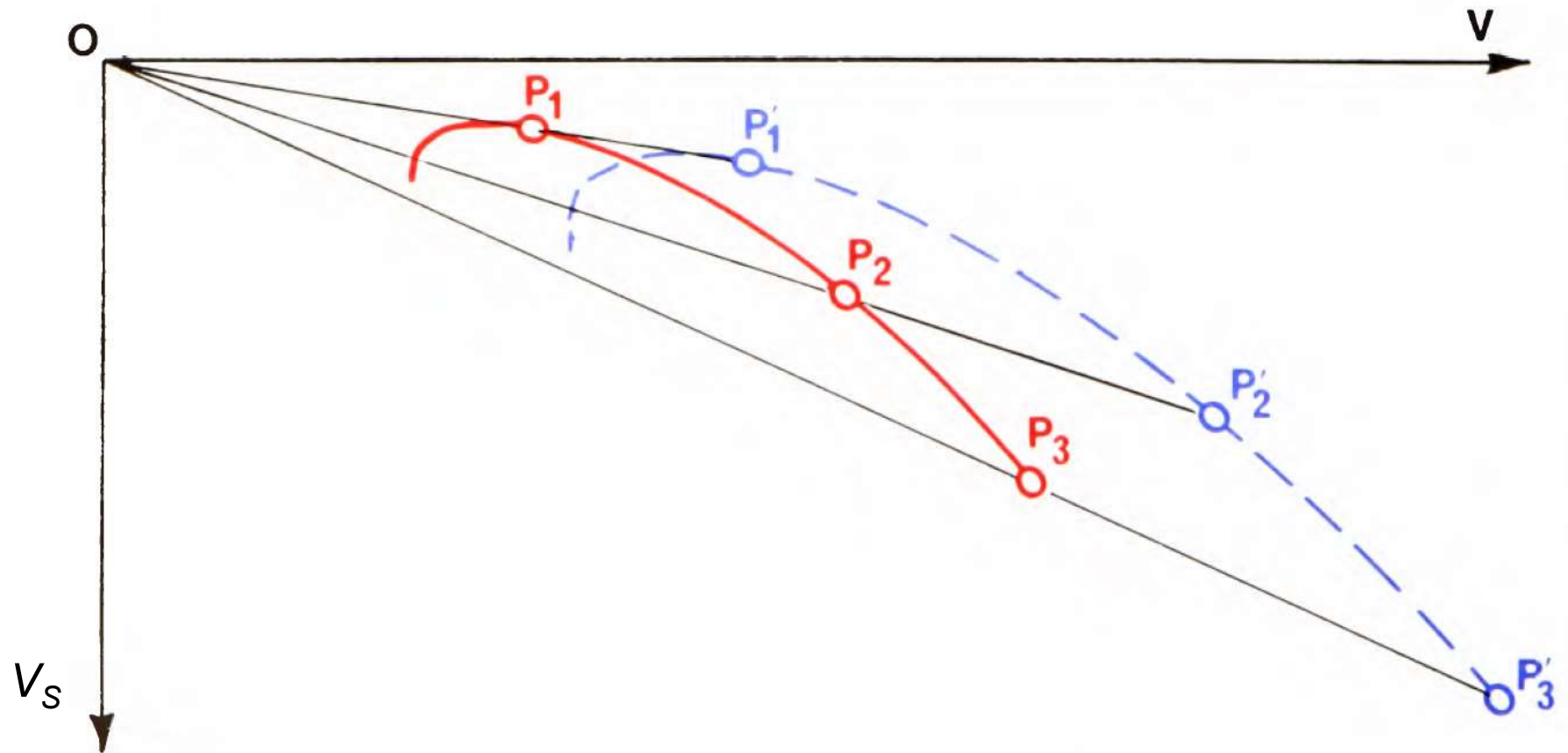


Aerodinaminė kokybė

Aerodinaminė kokybė nurodo, kokį atstumą nusklęs orlaivis. Pvz., kiek kilometrų nusklęs orlaivis iš vieno kilometro aukščio (ramiame ore).

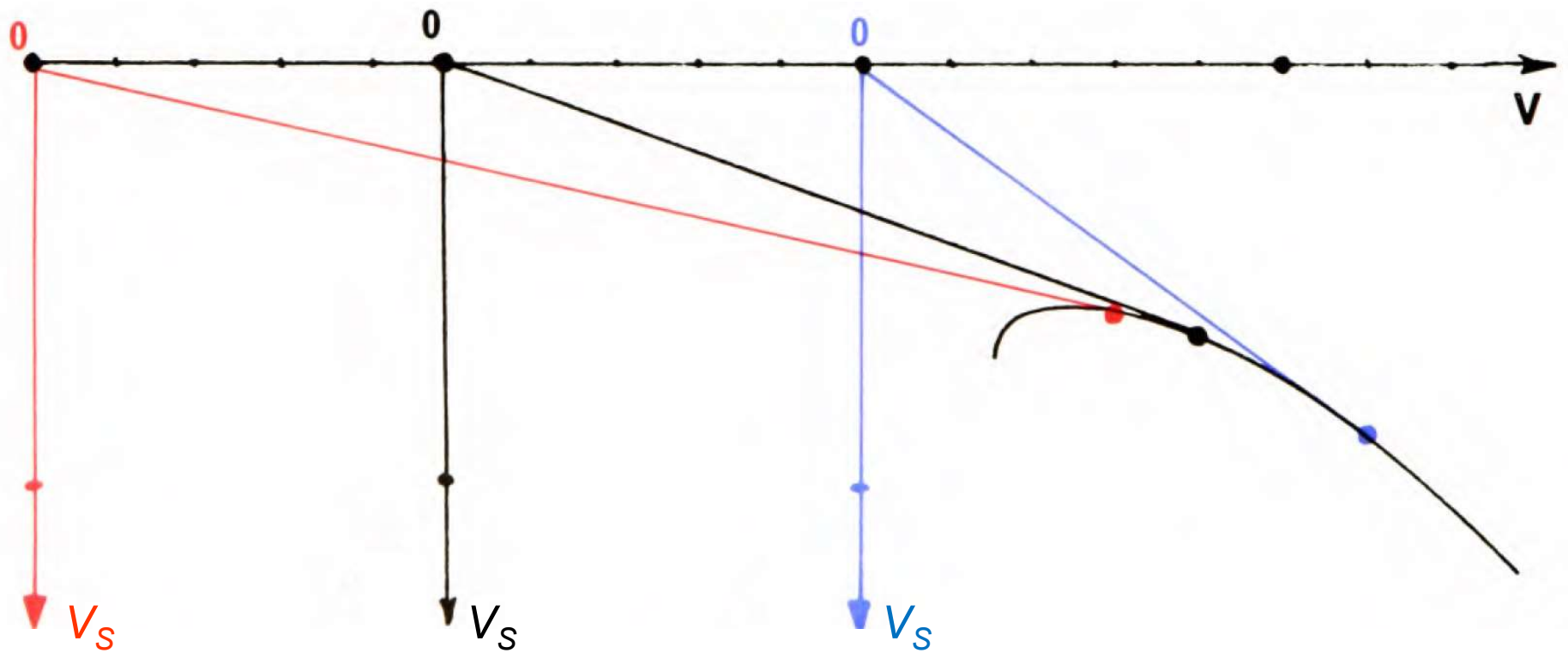
Aerodinaminė kokybė taip pat nurodo, kiek kartų keliamoji jėga yra didesnė už pasipriešinimo jėgą.

Masės įtaka poliarei



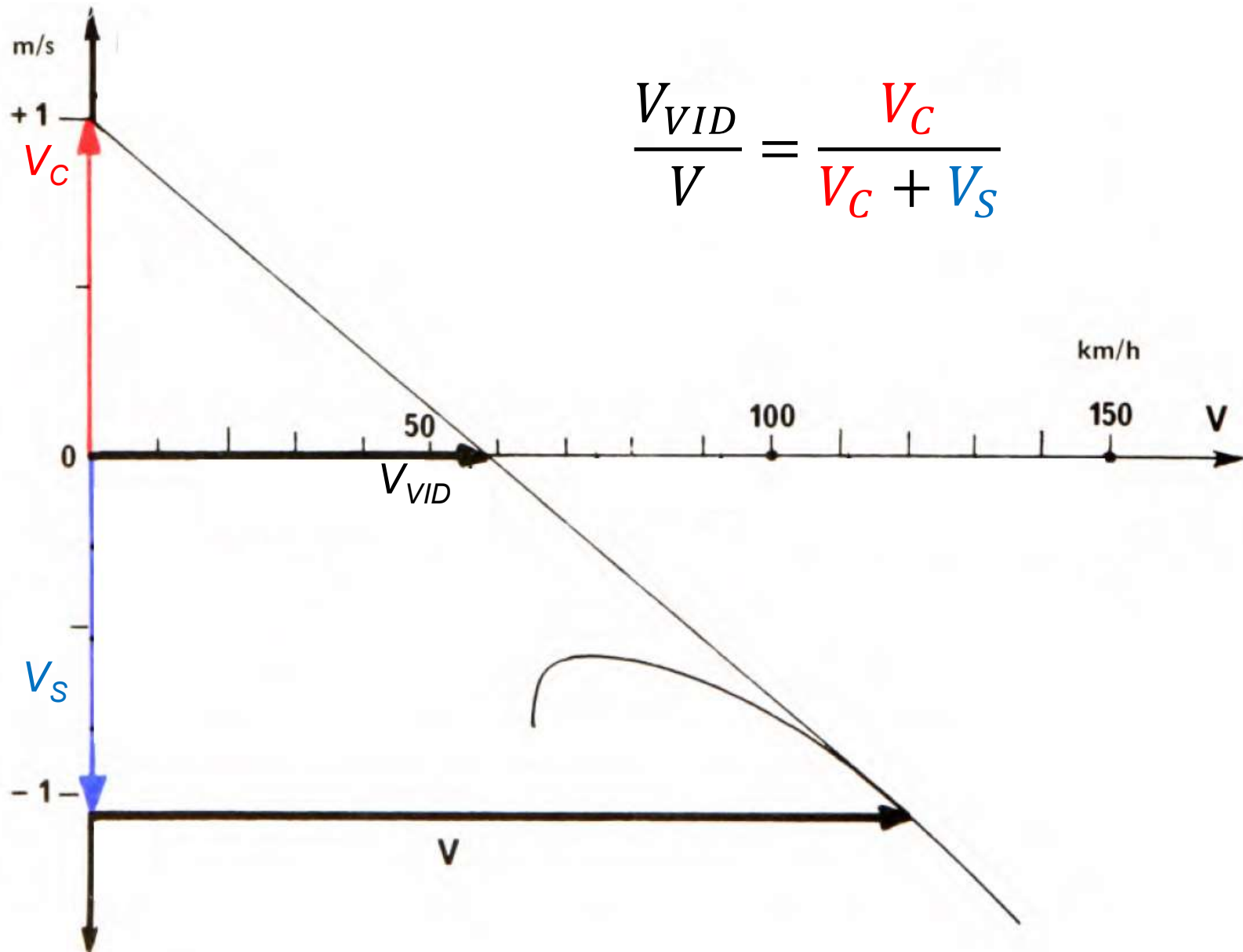
$$\frac{OP_1}{OP'_1} = \frac{OP_2}{OP'_2} = \frac{OP_3}{OP'_3} = \sqrt{\frac{m}{m}}$$

Vėjo įtaka sklendimo toliui



Sklandytuvo vidutinis greitis

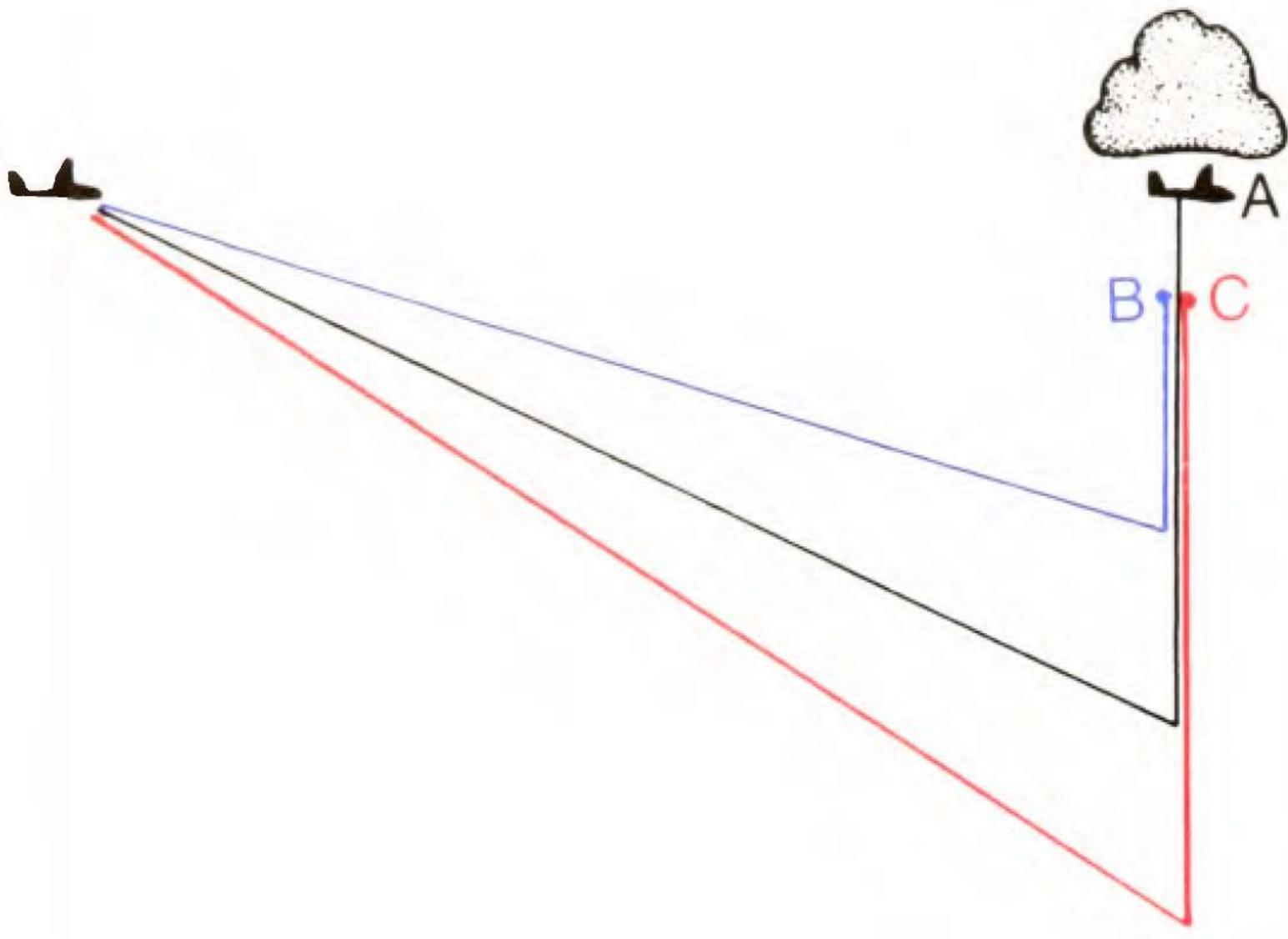
(H. Reichmann)



$$\frac{V_{VID}}{V} = \frac{V_C}{V_C + V_S}$$

Sklandytuvo skrydžio etapas

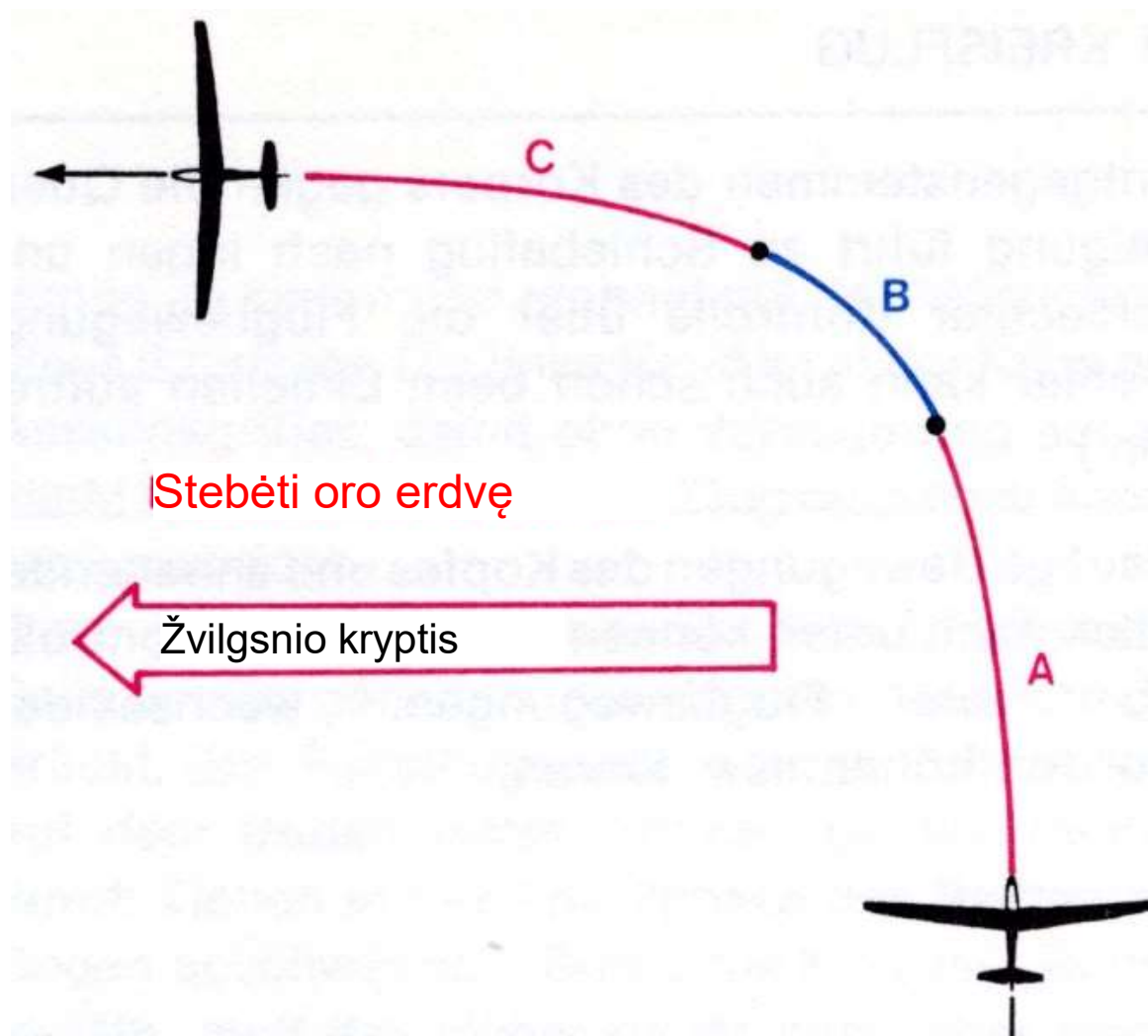
(H. Reichmann)



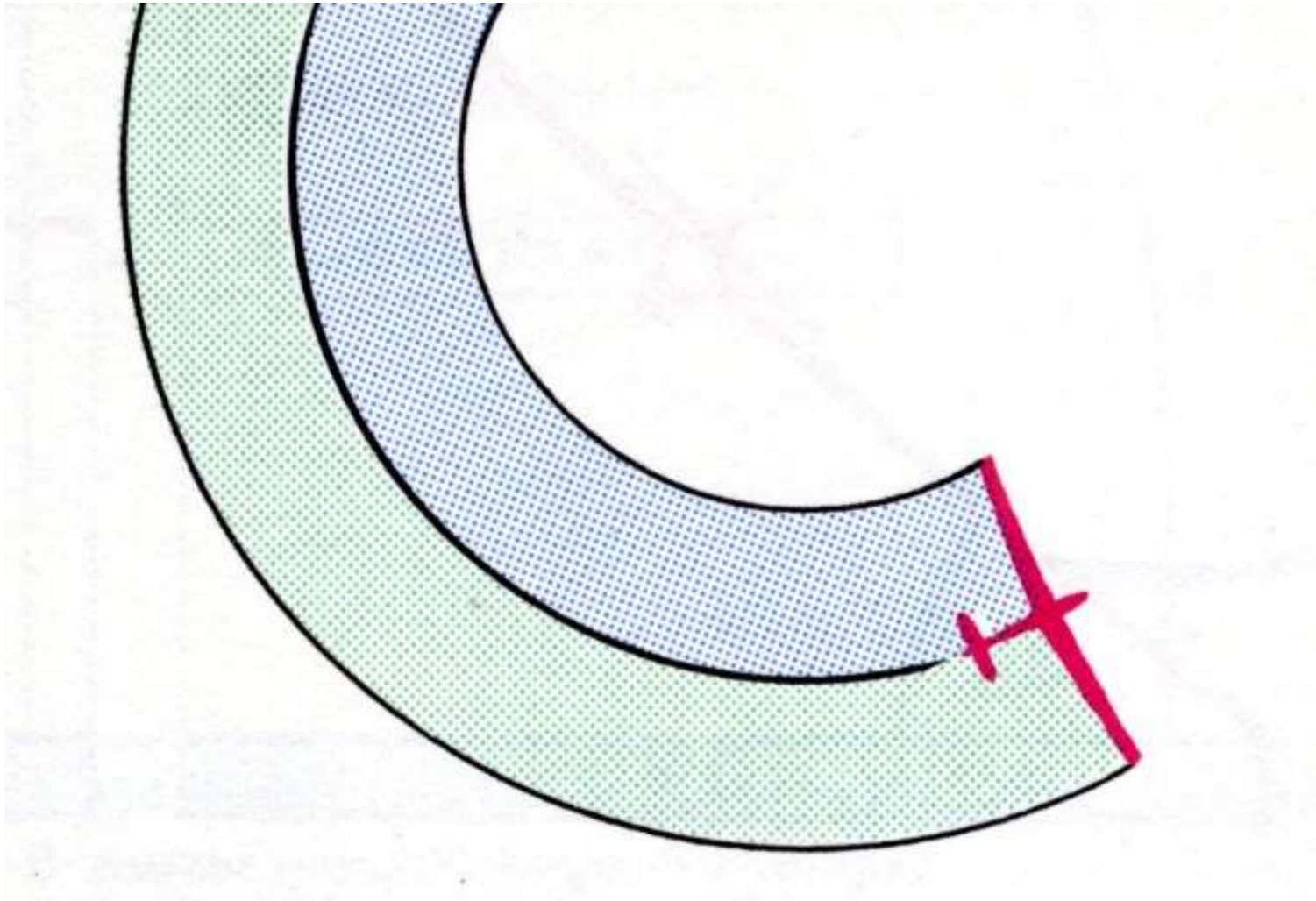
Viražas, spiralė

- Viražas
 - Tai posūkis horizontalioje plokštumoje su posvyriu ir be slydimo, išlaikant aukštį
- Spiralė
 - Tai posūkis horizontalioje plokštumoje atliekamas su žemėjimų arba aukštėjimų

90° laipsnių posūkis

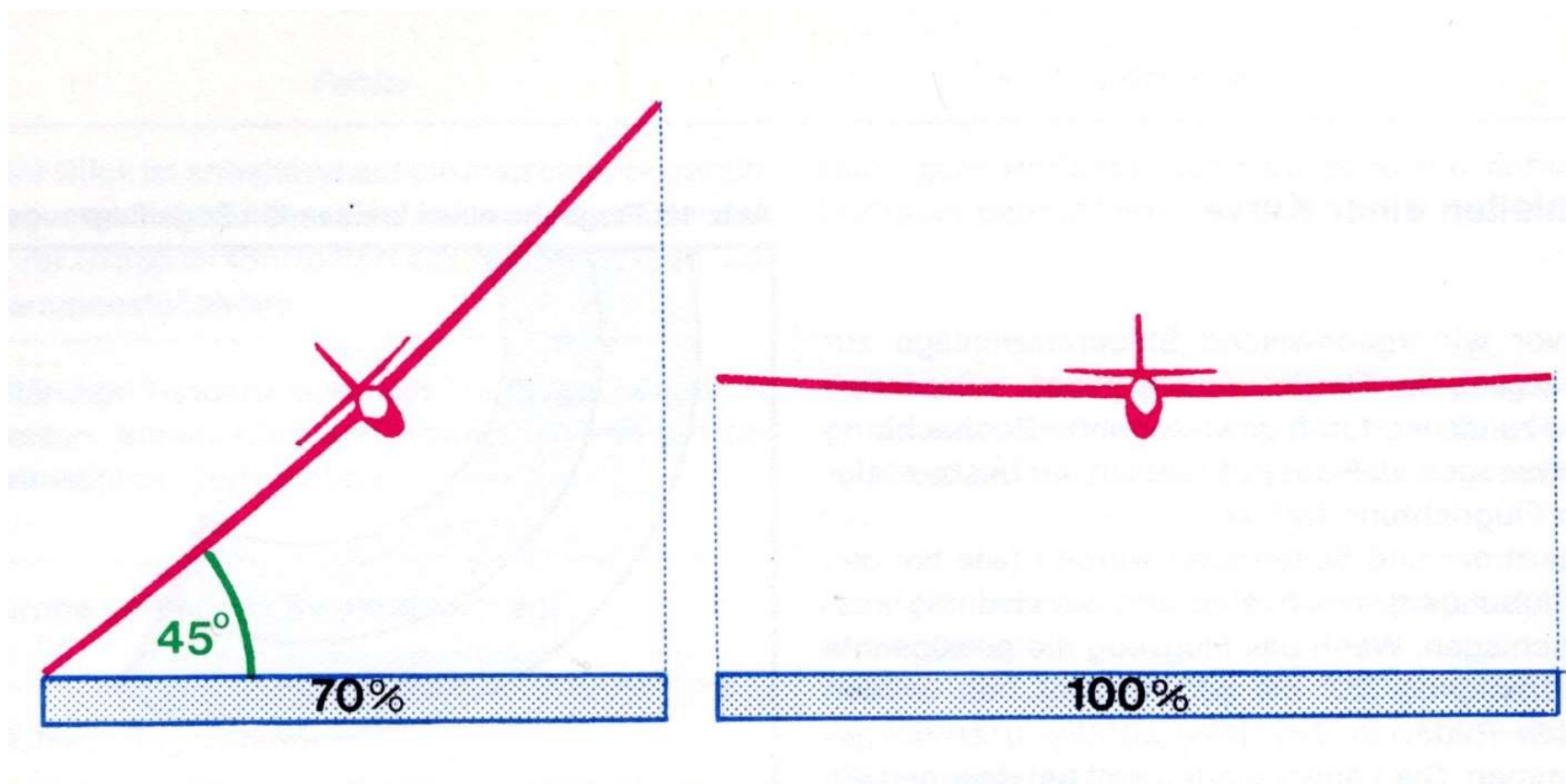


Skirtingi greičiai sparnų galuose

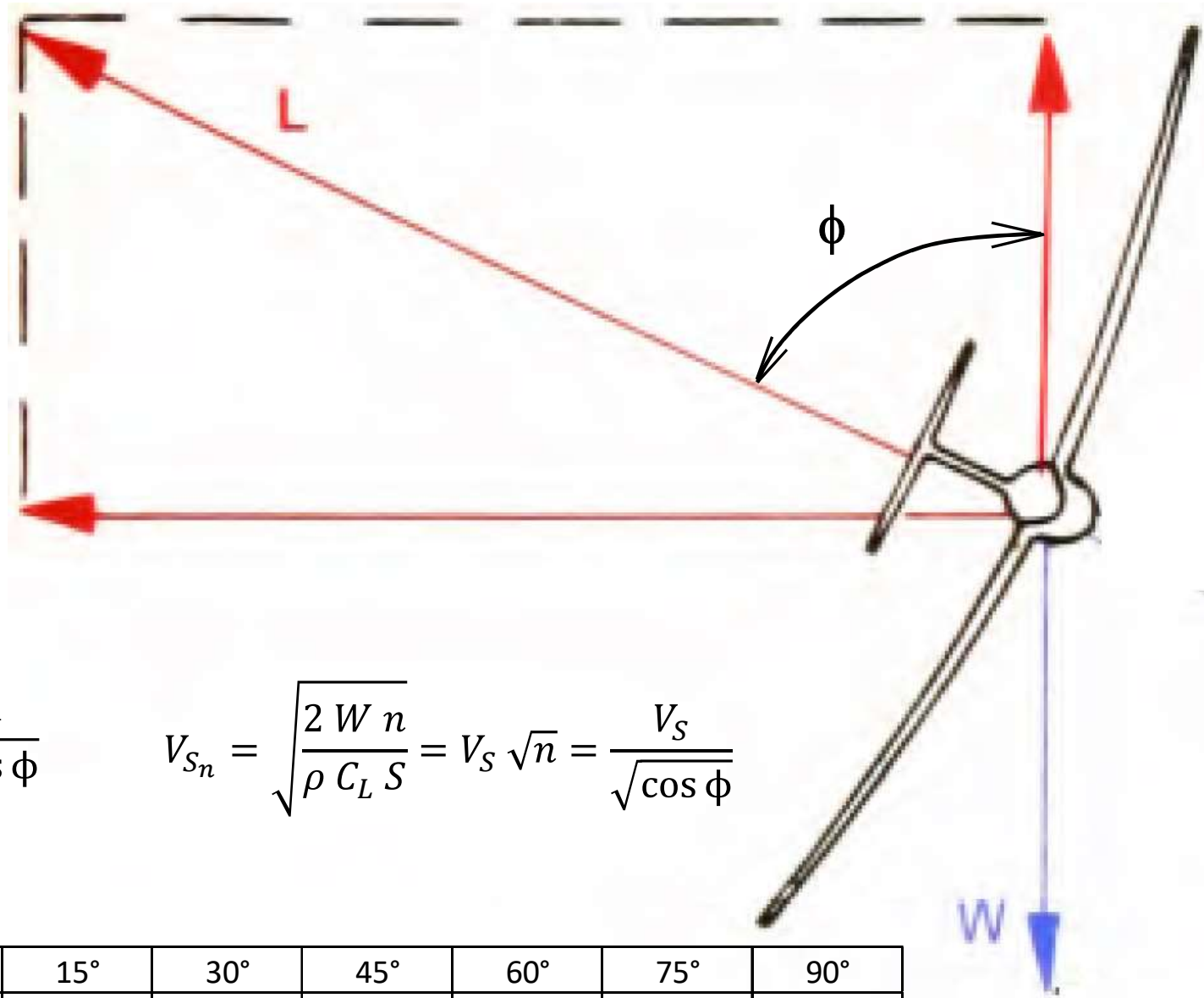


H. Reichmann

Sparno projekcijos priklausomybė nuo posvyrio



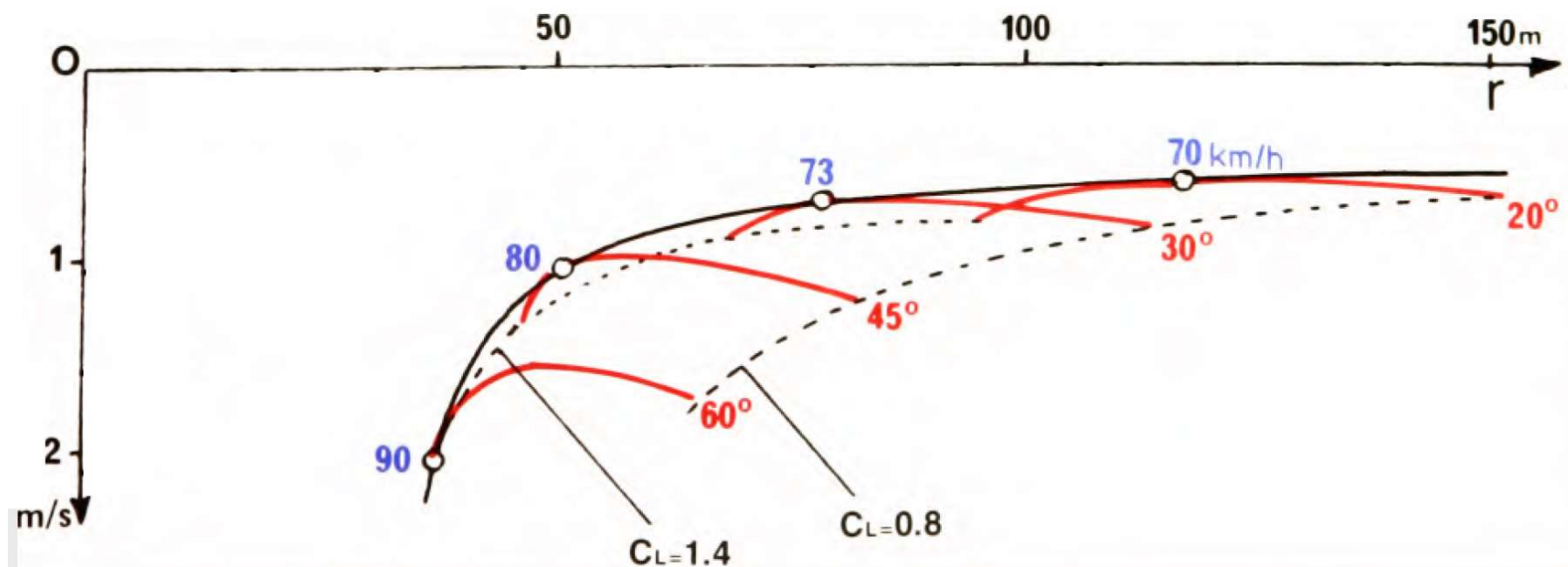
Posūkis



$$n = \frac{L}{W} = \frac{1}{\cos \phi} \quad V_{Sn} = \sqrt{\frac{2 W n}{\rho C_L S}} = V_S \sqrt{n} = \frac{V_S}{\sqrt{\cos \phi}}$$

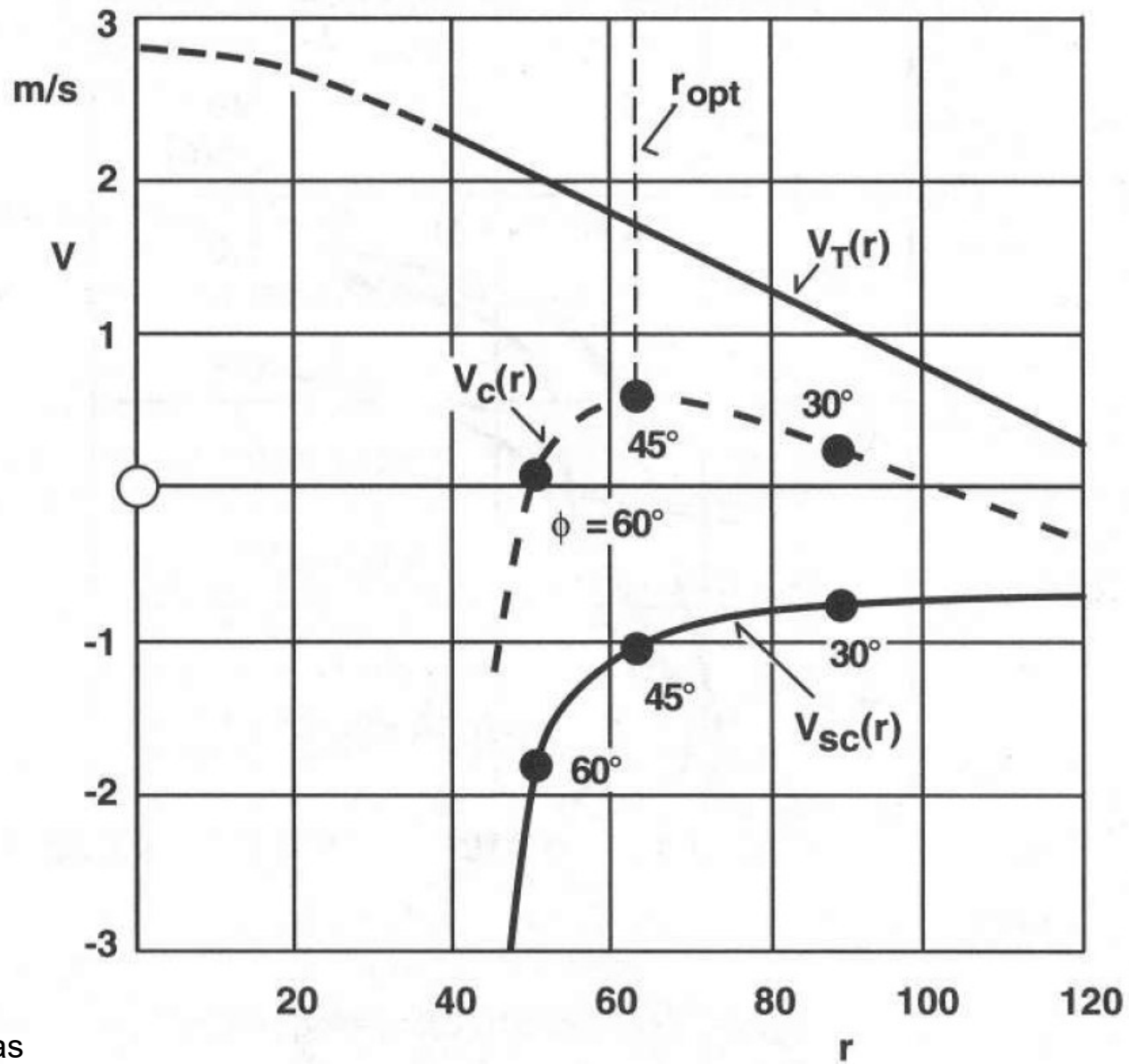
ϕ	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
n	1	1.04	1.15	1.41	2.00	3.86	∞
V_{Sn}/V_S	1	1.02	1.07	1.19	1.41	1.97	∞

Žemėjimas spiraleje

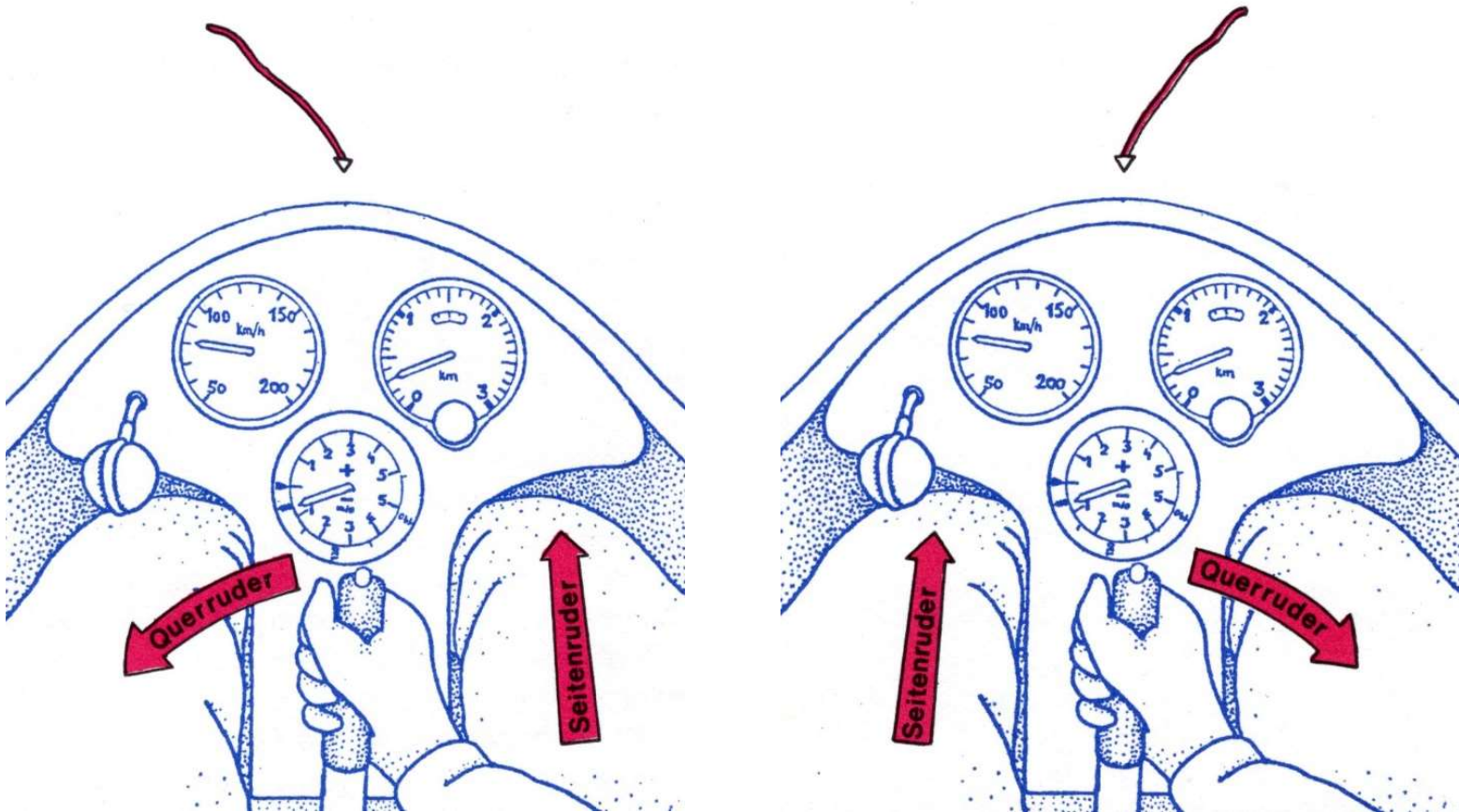


Kilimas termike

(F. Thomas)



Slydimos taisymas



Slydimo taisymas



Koordinuotas posūkis

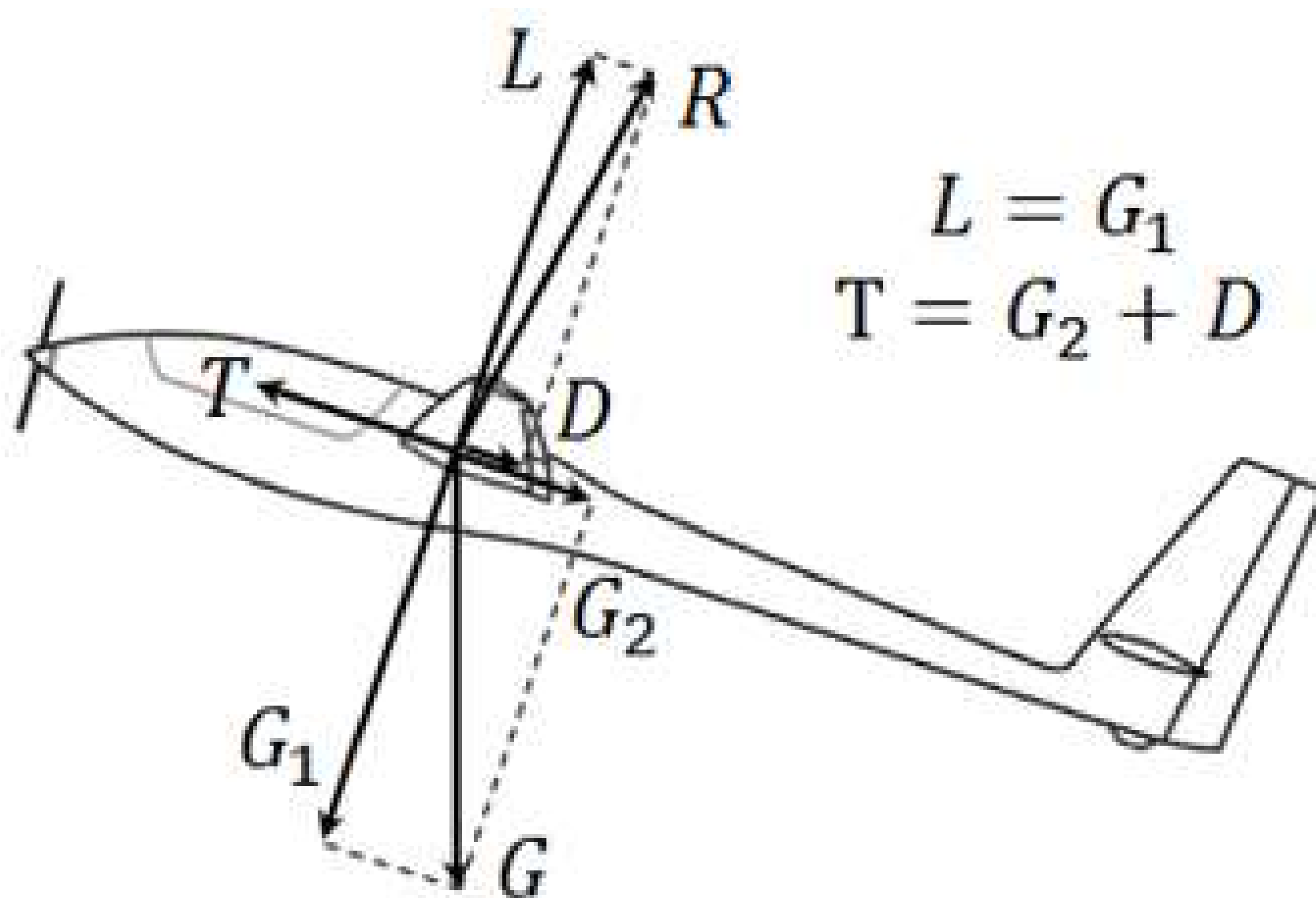


Slydimas dešinèn

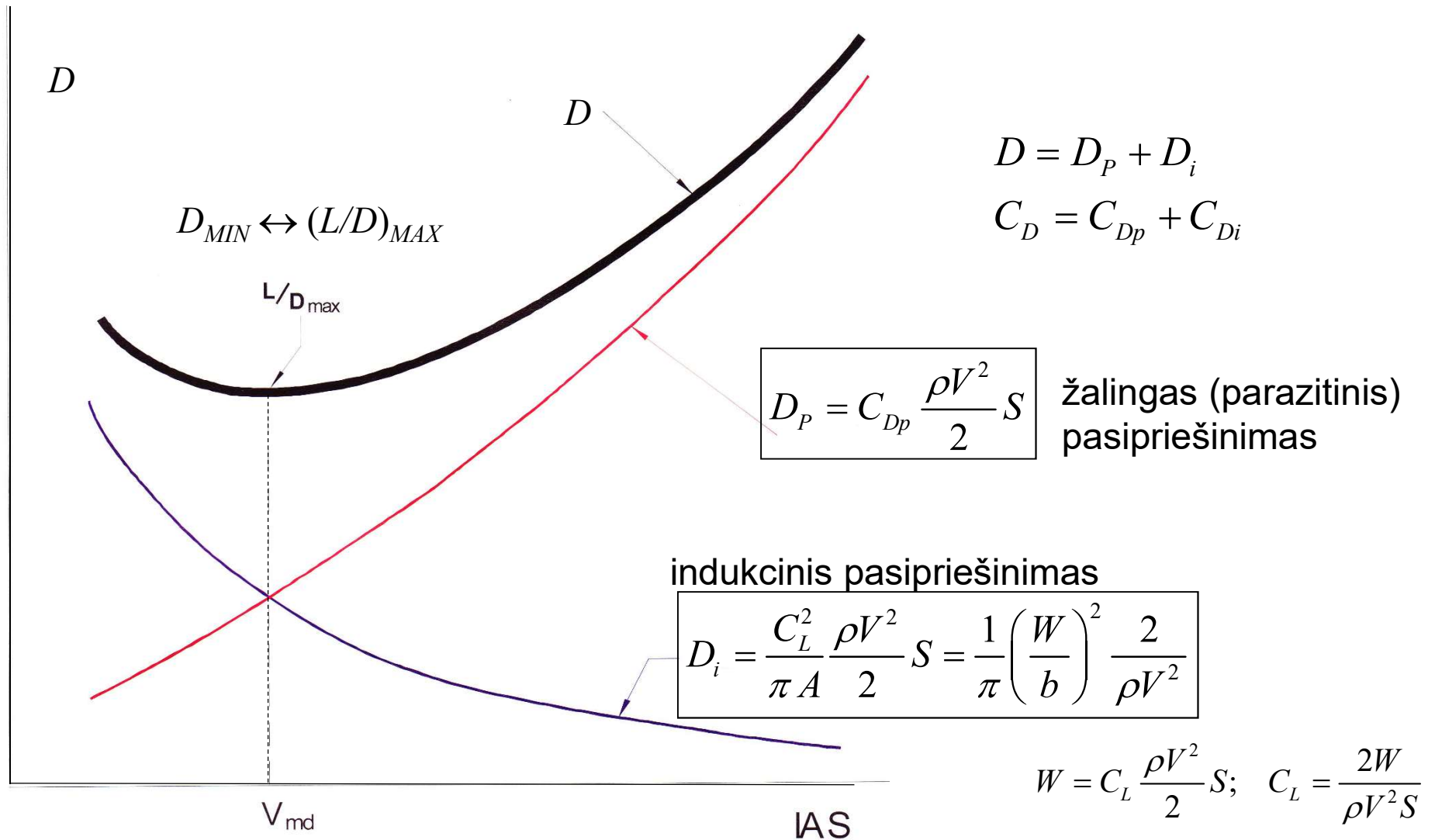


Taisymas: Krypties vairs dešinèn
ir/arba eleronais kairèn

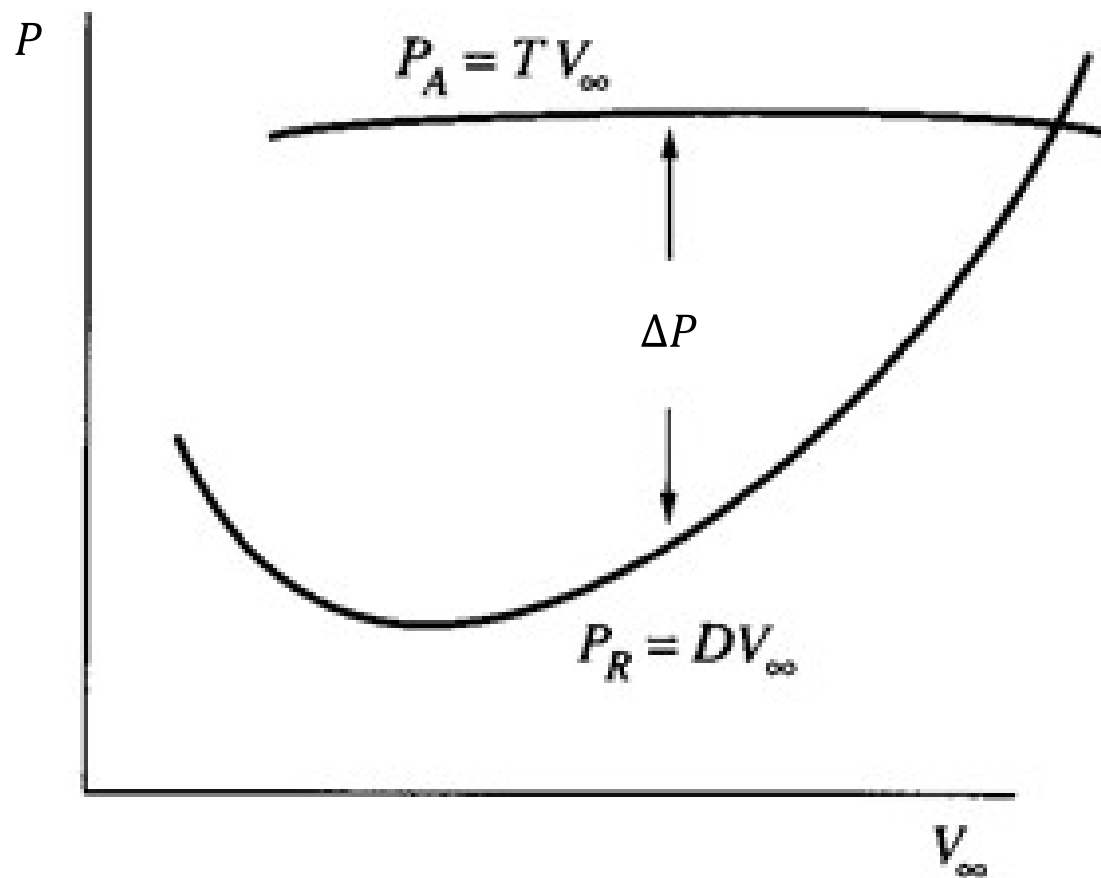
Jēgos nusistovējusiame kilime



Pilnasis pasipriešinimas

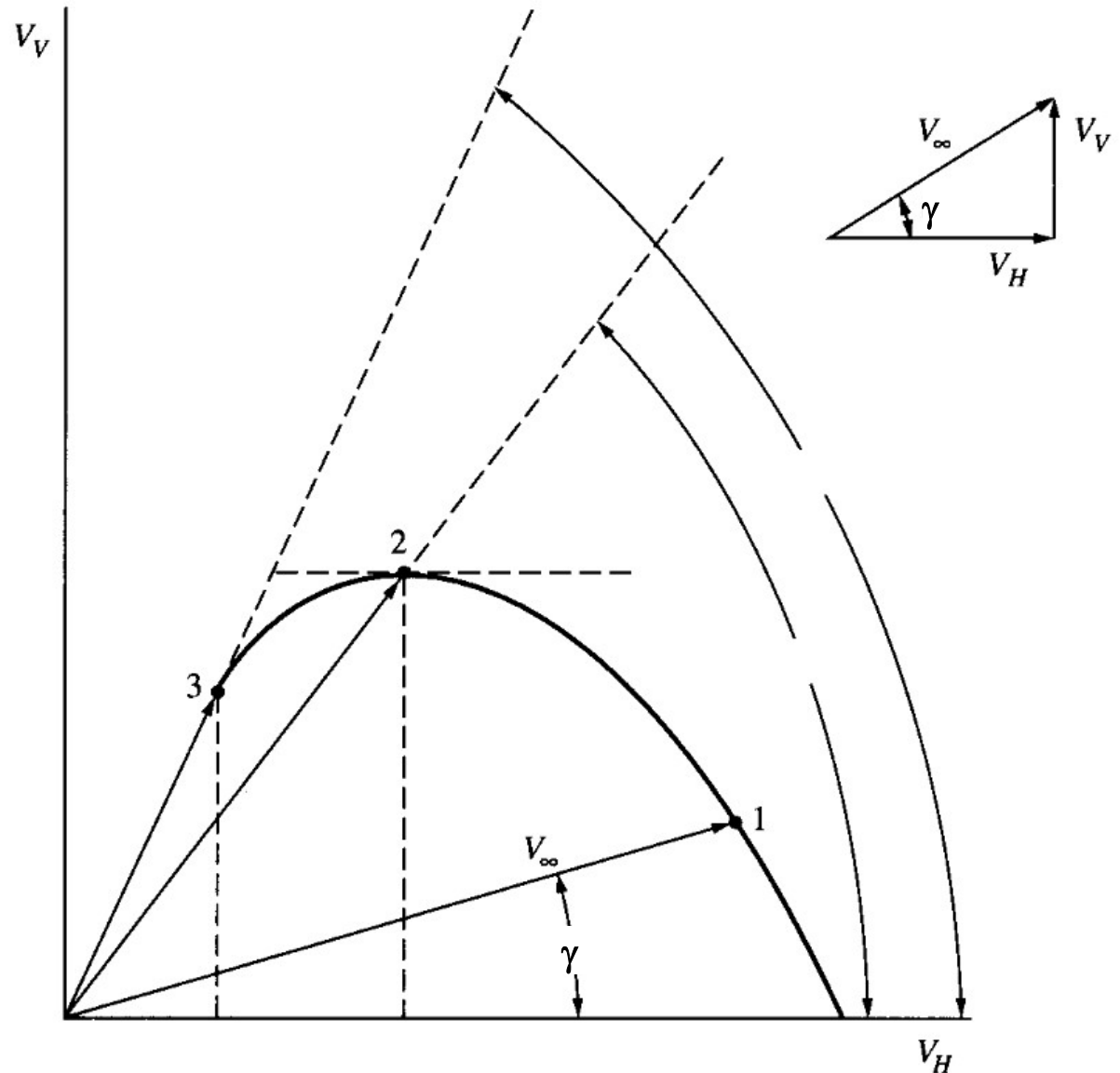


Motosklandytuvo galios kreivės

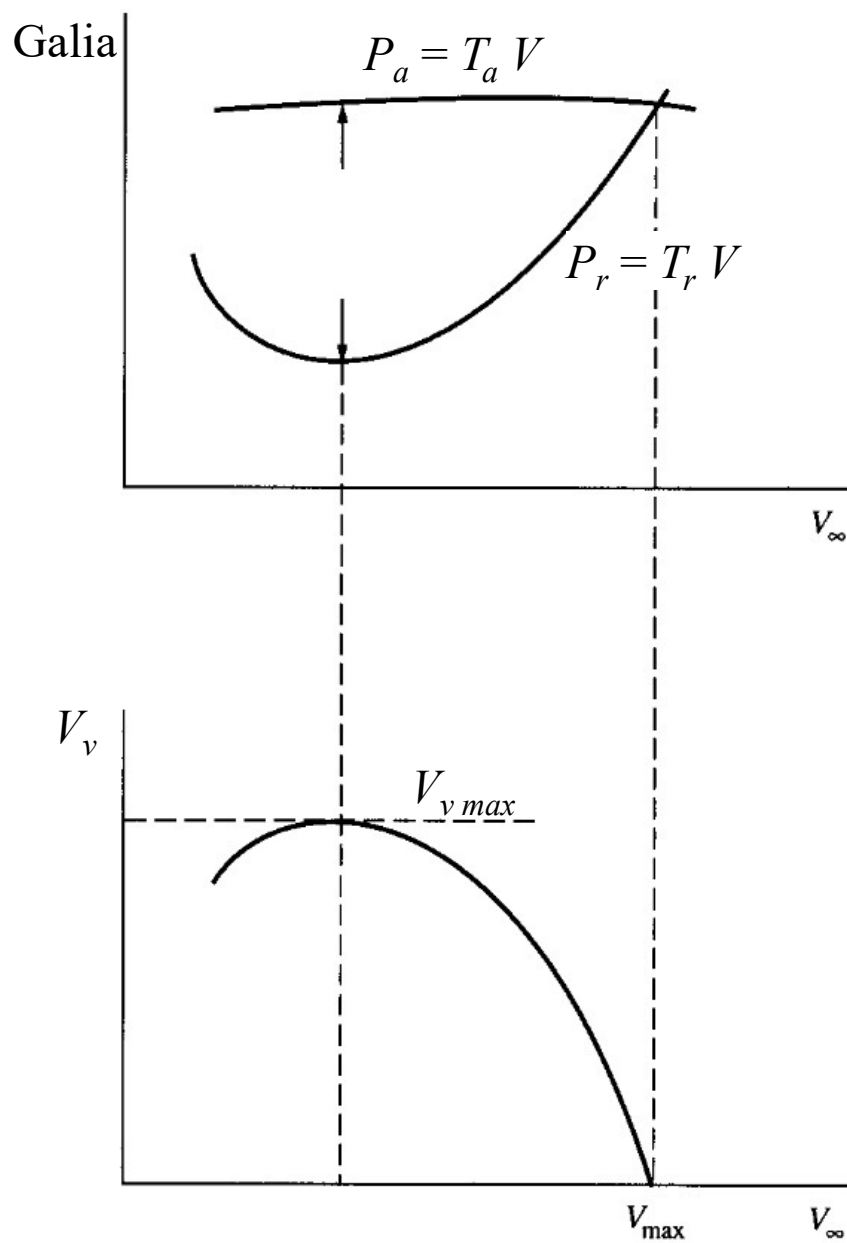


Motosklandytuvo aukštėjimo greičių poliarė

- Kopimo (aukštėjimo) poliarė
- $\gamma_{\max}$ pasiekiamas prie α_{ek}
- $V_{v \max}$ pasiekiamas prie α_{naud}



Motosklandytuvo aukštėjimas



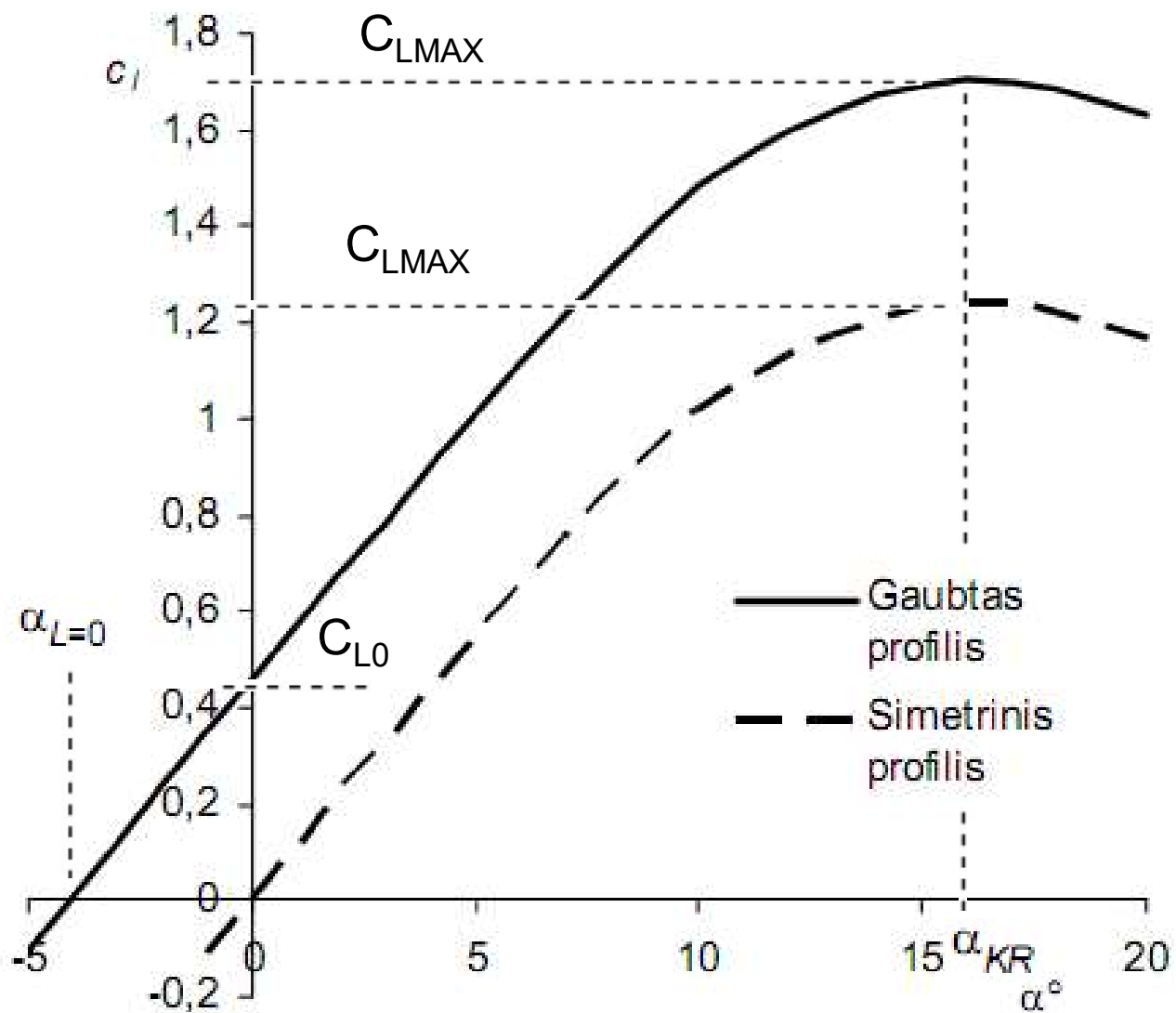
SMUKA IR SUKTUKAS

- Smuka
 - tai sklandytuvo svyravimai atsiradę dėl srauto nutrukimo nuo sparno ir kompensuojami tik sumažinus atakos kampą
- Suktukas
 - nevaldomas orlaivio kritimas žemėjančia įvija, sukantis apie išilginę ir vertikaliąją ašis didesniais už kritiniais atakos kampais

SMUKA

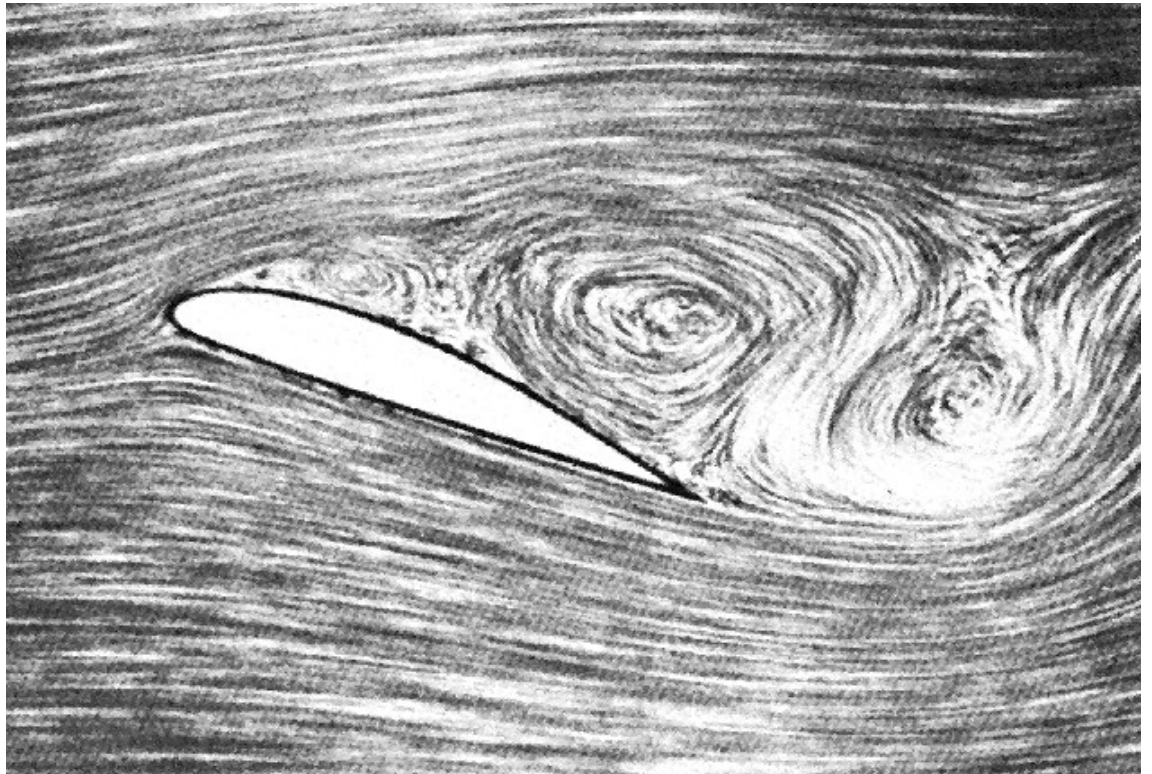
- Kritinis atakos kampas (smukos) α_{krit}
 - atakos kampas, kuriam esant keliamoji jėga yra didžiausia
- Oro srauto nutrūkimas
- L sumažėjimas, D padidėjimas

α_{krit}



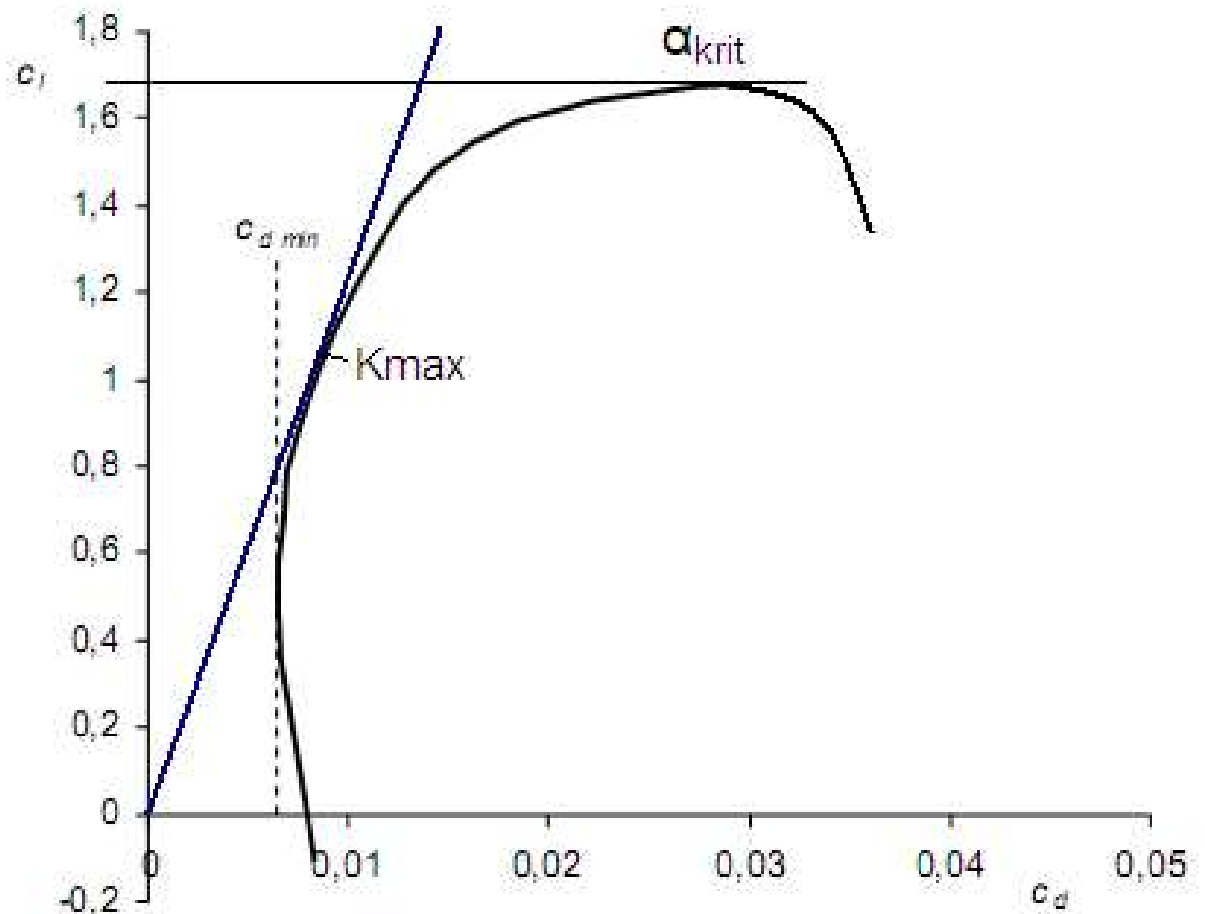
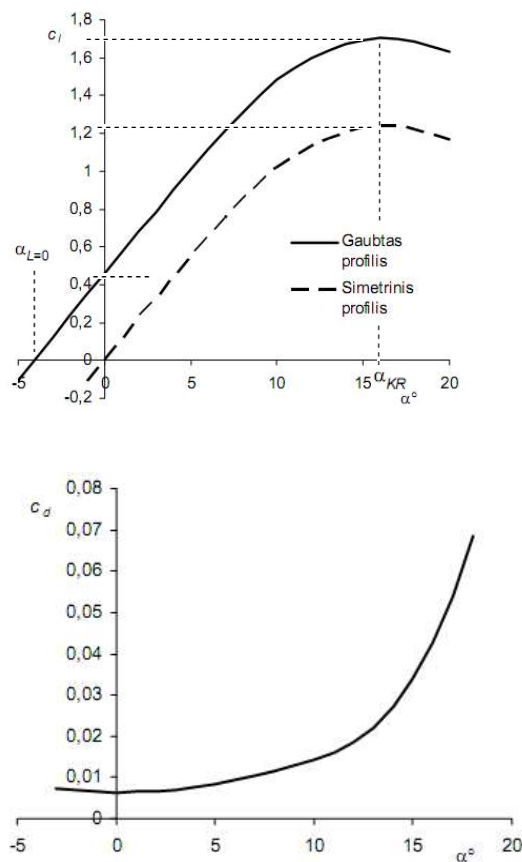
Srauto atitrūkimas

- L – mažėja, D - didėja



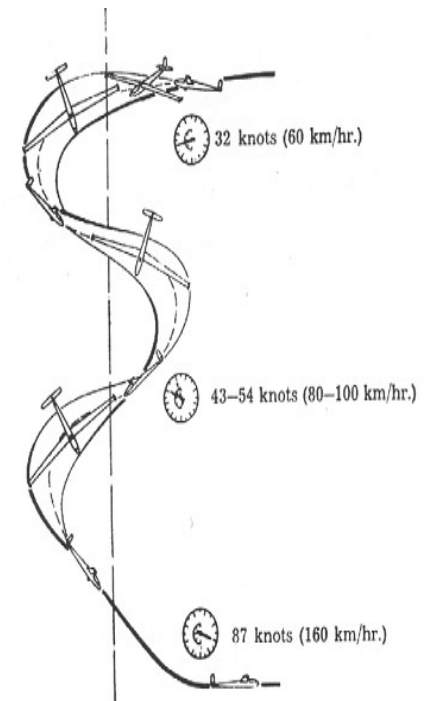
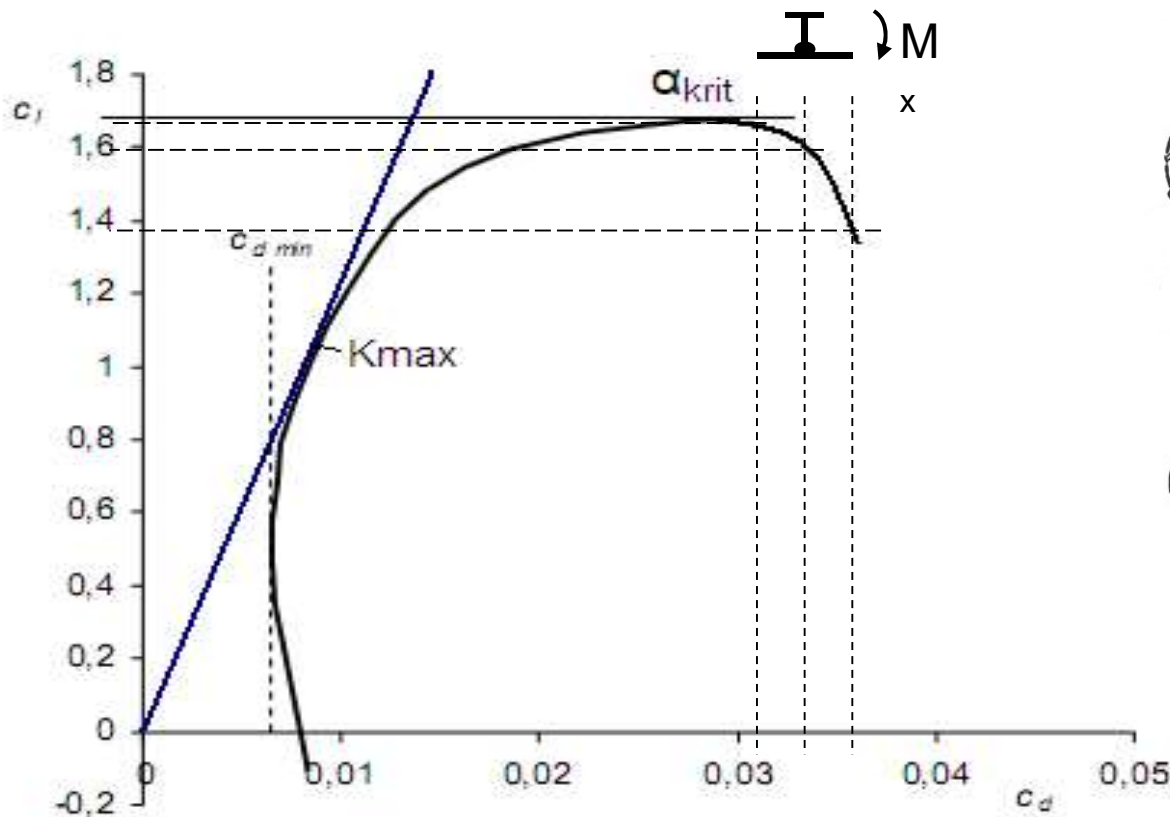
Profilio poliarė

- Profilio poliarė – tai $C_L(\alpha)$ ir $C_D(\alpha)$ viename grafike



Priežastis ir sukimosi ašys

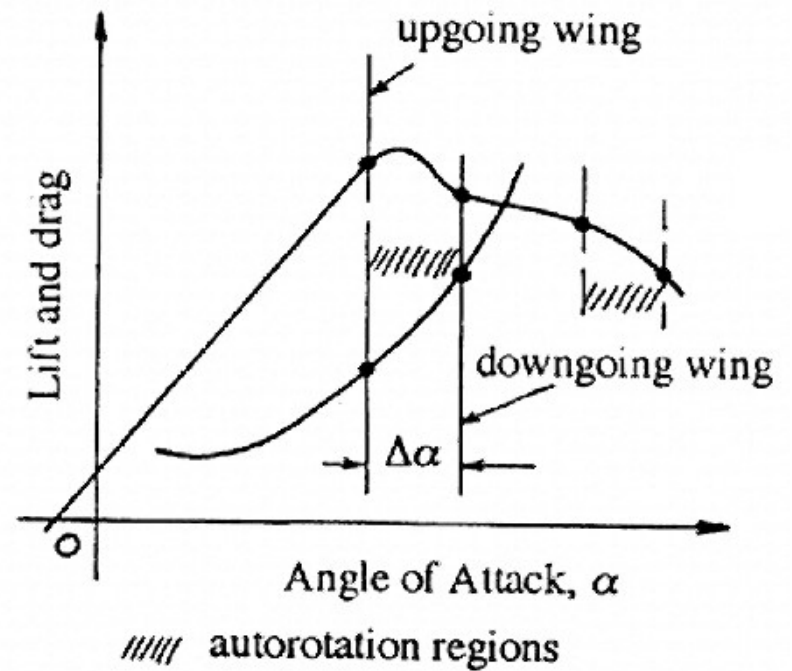
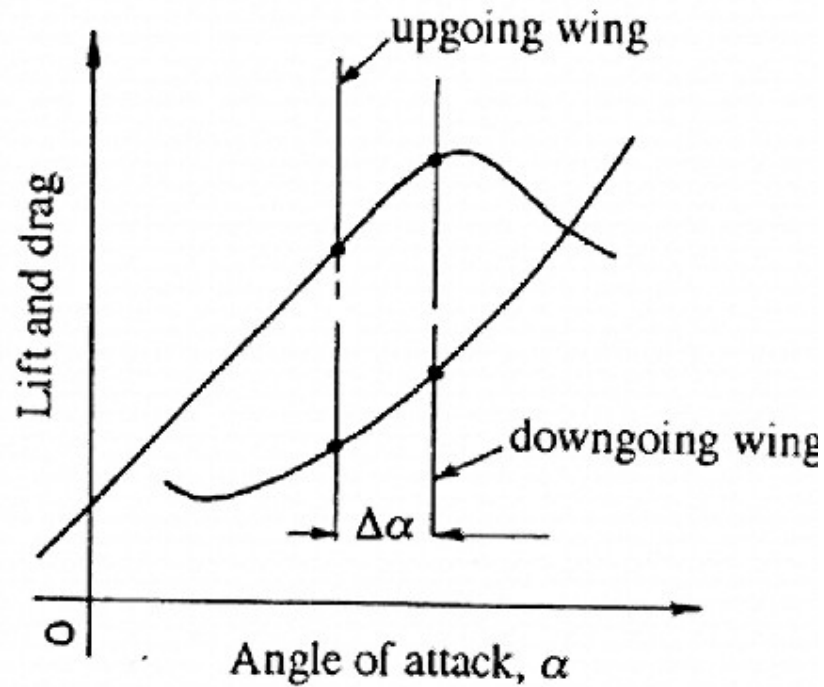
- Sparno savisukos (autorotacijos) režimas
- Sukimasis:
 - apie išilginę ašį – dėl keliamosios jėgos L skirtumo
 - apie vertikalią ašį – dėl pasipriešinimo D skirtumo



SMUKA IR SUKTUKAS

- Artėjimo prie α_{krit} (smukos) požymiai:
 - prasideda aiškia išreikštas sklandytuvo drebėjimas
 - sklandytuvo nosis kniumba žemyn arba sklandytuvas virsta ant sparno ir negalima lengvai sulaikyti
 - vairalazdė pilnai pritraukta ir polinkio kampas daugiau nebedidėja

Autorotacija

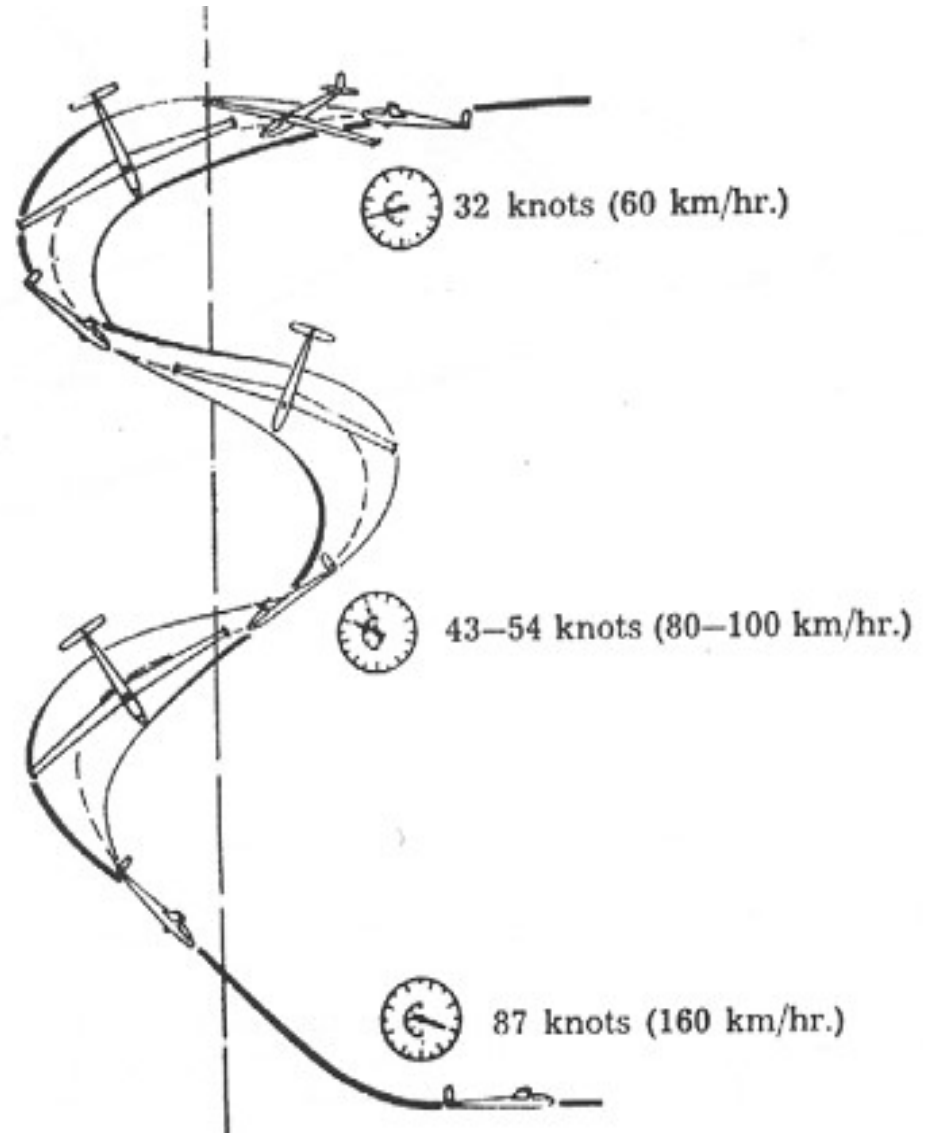


SUKTUKAS

- Suktukas – tai nevaldomas orlaivio kritimas žemėjančia įvija, sukantis apie išilginę ir vertikaliają ašis didesniais už kritiniais atakos kampais
- Suktuko rušys:
 - normalusis ir apverstasis
 - statusis (kampas tarp horizonto linijos ir išilginės ašies $>45^0$) ir plokščiasis ($<45^0$)
 - nusistojęs (sukasi į vieną pusę, sukimosi greičiai pastovūs) ir nenusistojęs
 - kairysis ir dešinysis
- Suktuko spindulys būna ne didesnis už sparno moją

SUKTUKAS (L-13)

- Greičiui esant 5% didesniau už V_s kyla nežymios vibracijos
- Smukos metu sklandytuvas nuleidžia nosį
- Įvestas į suktuką – daro staigų suktukinį kritimą be tendencijos pereiti į plokščią



SMUKA IR SUKTUKAS

- Suktuko etapai:
 - suktuko pradžia
 - nusistovėjęs suktukas
 - išvedimas iš suktuko

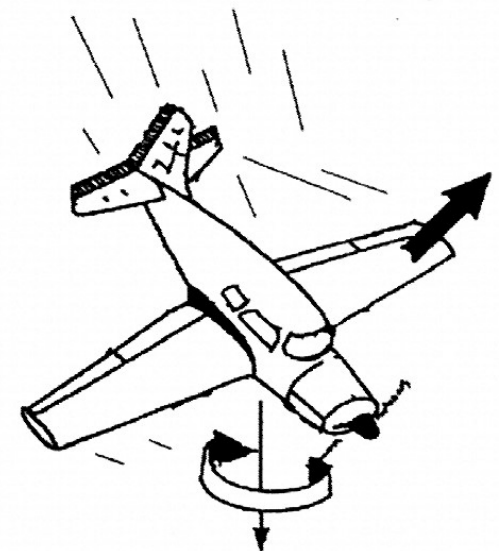
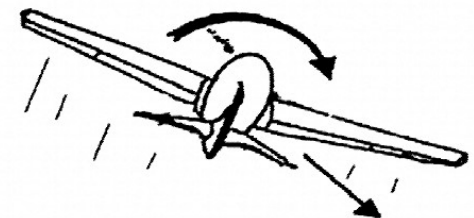
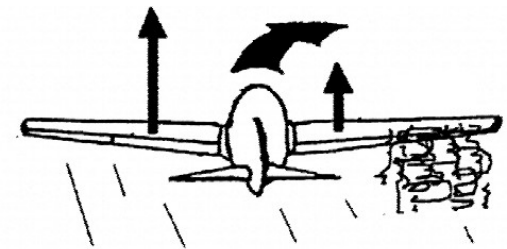
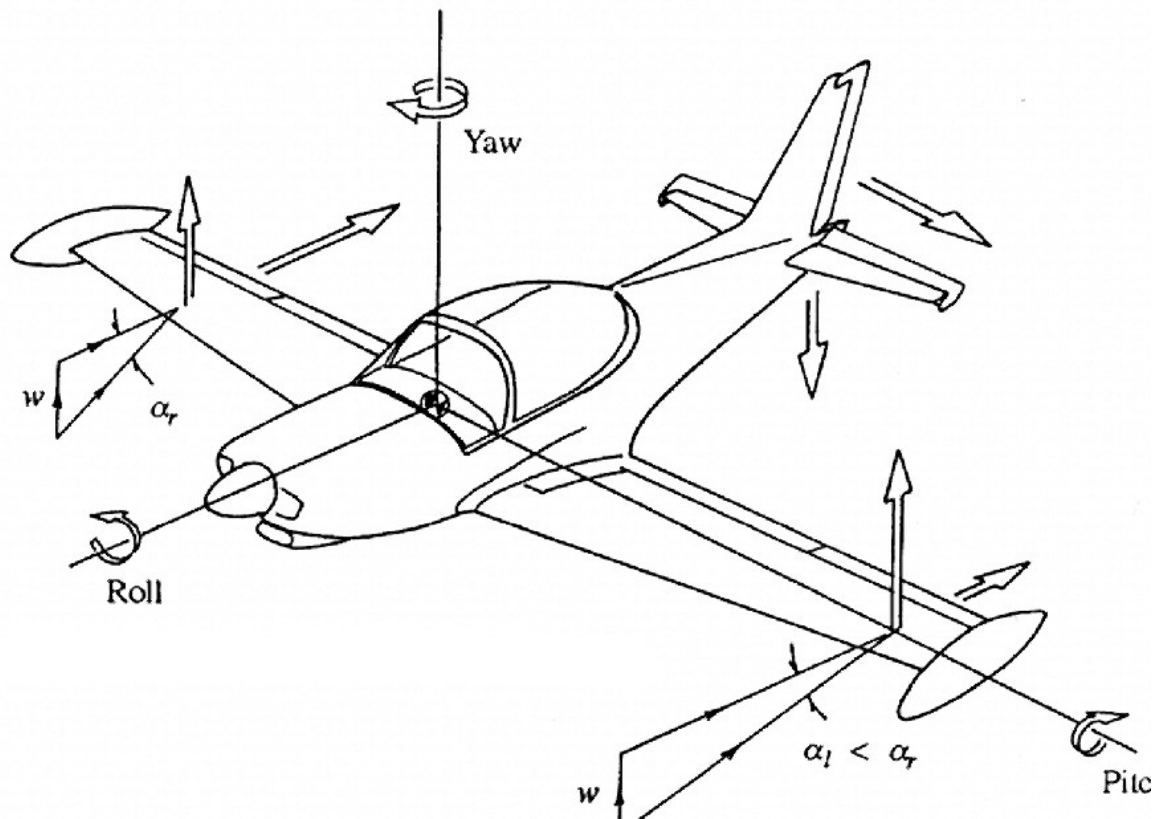
Suktuko požymiai

- **Lėktuvas žemėja stačia spirale**
- **Abiejų sparnų atakos kampai virškritiniai**
- **Lėktuvo kampinis greitis yra didelis**
- **Suktuko spiralės spindulys paprastai yra mažesnis už pusę sparnų mosto**
- **Lėktuvas gali būti “normaliame” arba “nugariniame” suktuke**

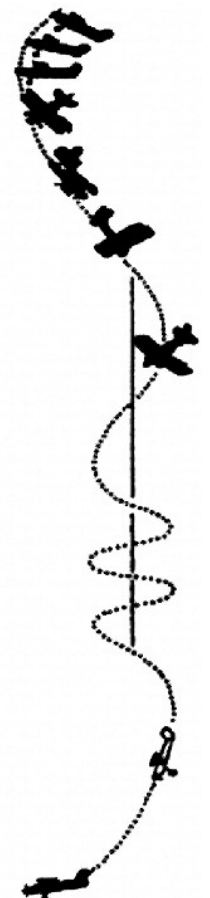
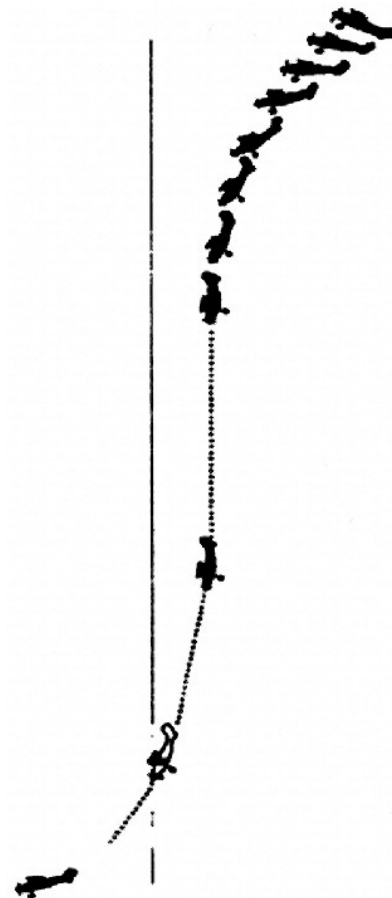
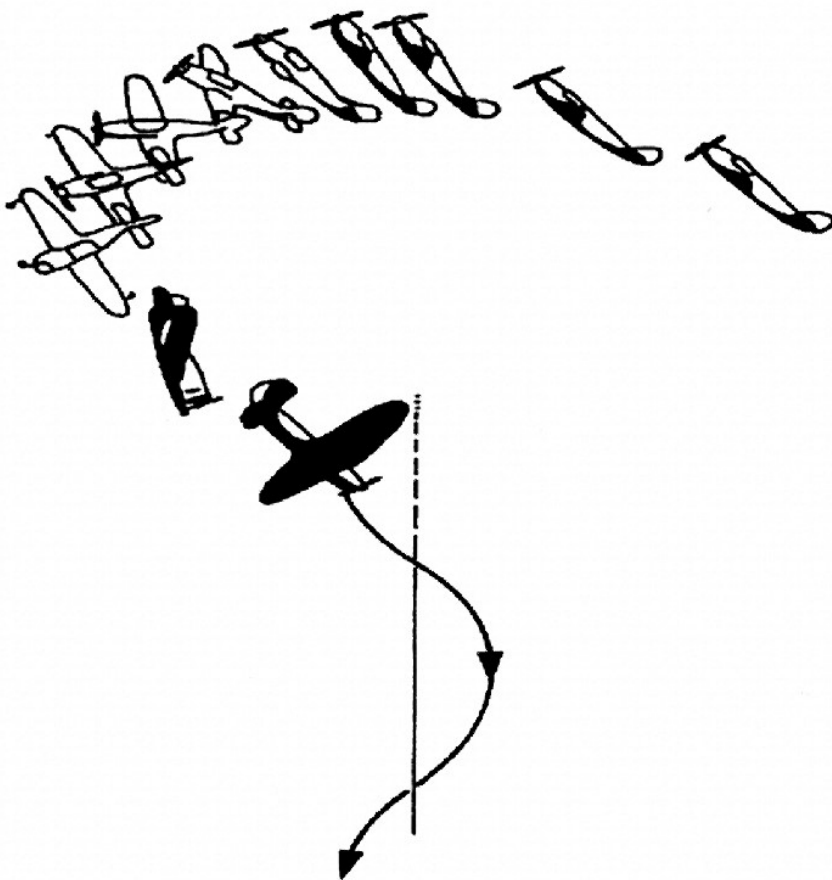
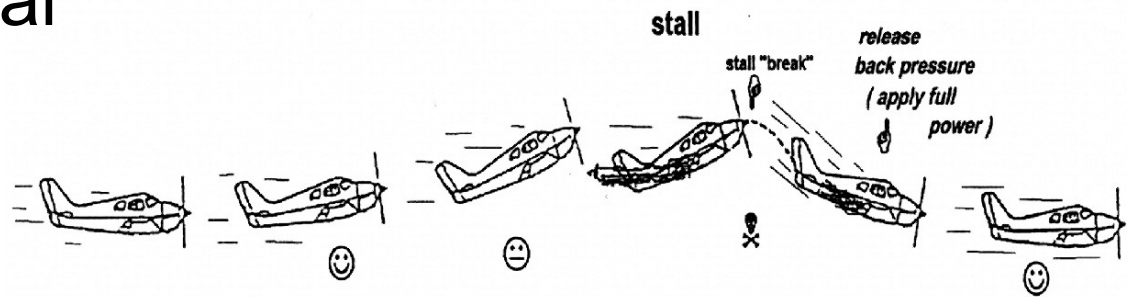
Suktuko etapai

- **Suktuko pradžia**
- **Nusistovėjęs suktukas**
- **Išvedimas iš suktiko**
- **Masės ir centruotės įtaka**

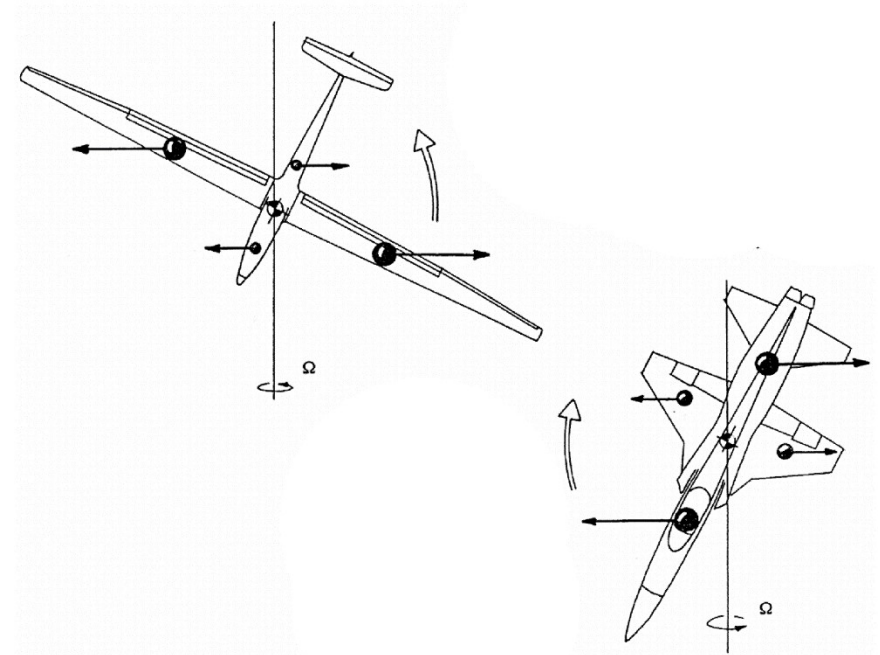
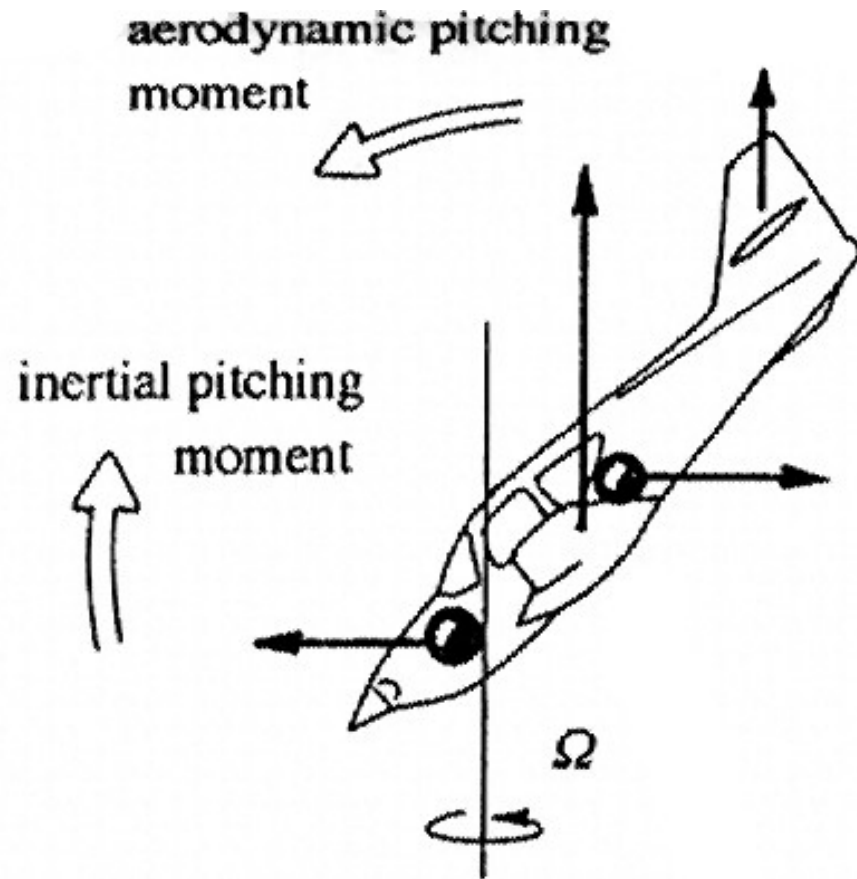
Suktuko pradžia

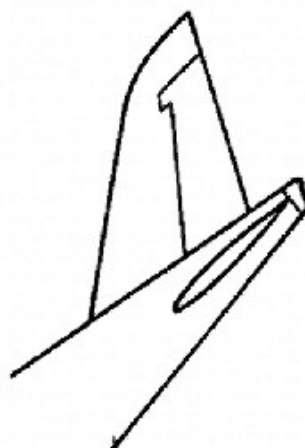
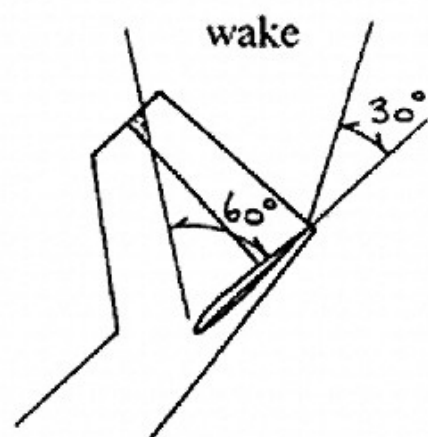
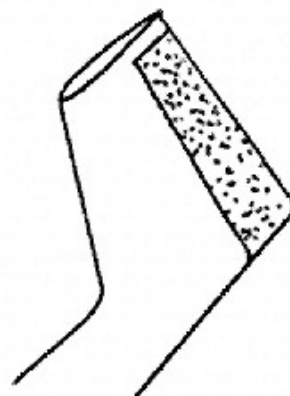
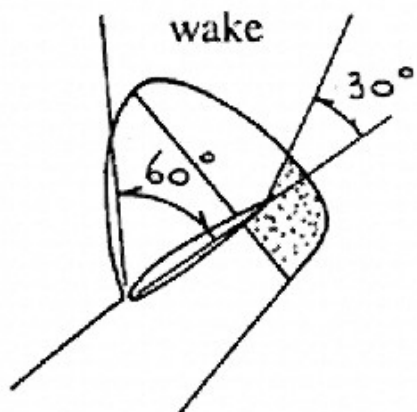


Ļvairūs virtimo atvejai

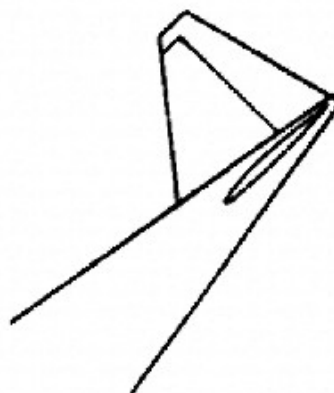
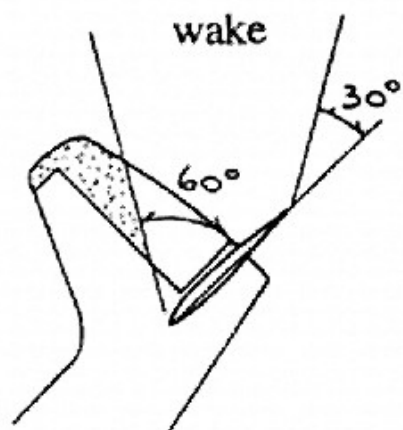


Inercijos momentų įtaka





Uodegos
formas
įtaka



Tipinis išvedimas iš suktuko (tinka ne visiems)

- **Sumažinti jėgainės galingumą**
- **Eleronus nustatyti neutraliai**
- **Krypties vairą atlenkti pilnai prieš sukimosi kryptį**
- **Nustumti vairalazdę nuo savęs (psichologinės problemos)**
- **Laikyti vairus reikiamoje padėtyje, kol nustos sukimasis**
- **Išvesti iš pikiravimo**

SMUKA IR SUKTUKAS

- Smukos greitis
- Smuka skirtinguose skrydžio etapuose

Smukos greitis V_s

- Apskaičiuojamas iš L formulės, kai C_{LMAX}
- Svorio W įtaka
 - Prie didesnių $W \rightarrow V_s$ didesnis
- Centruotės įtaka
 - priekinė $\rightarrow V_s$ didesnis,
galinė $\rightarrow V_s$ mažesnis
- Perkrovos n įtaka
 - Didėjant $n \rightarrow V_s$ didėja

$$V_s = \sqrt{\frac{2W}{\rho C_{LMAX} S}}$$

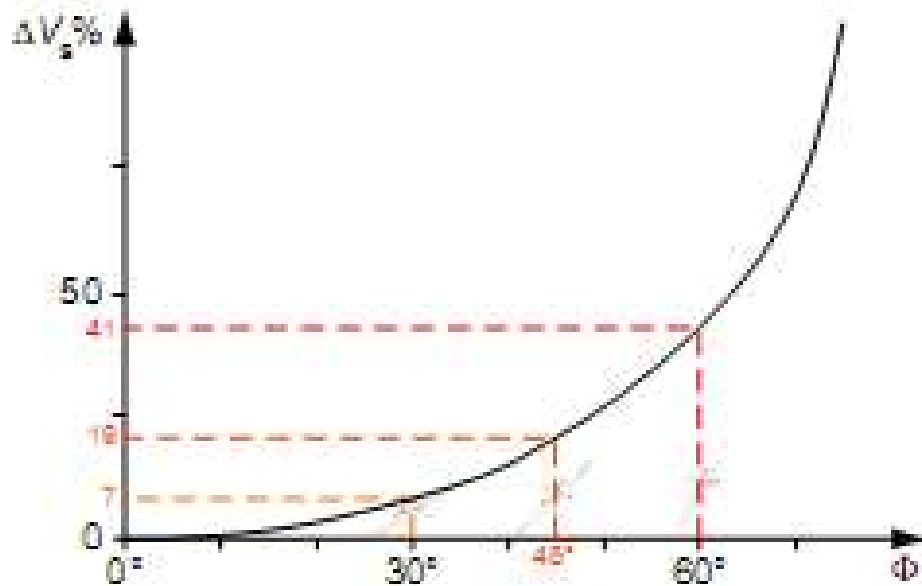
$$V_{Sn} = \sqrt{\frac{2Wn}{\rho C_{LMAX} S}} = V_{S1g} \sqrt{n}$$

Smukos greitis V_s

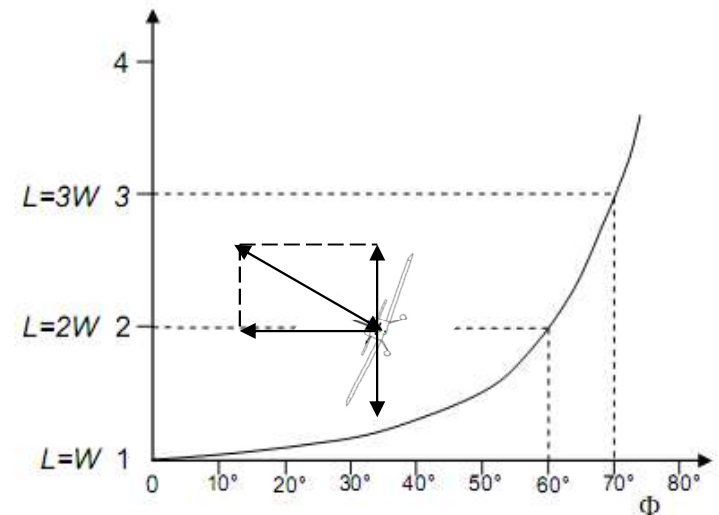
- Perkrovos n įtaka
 - Didėjant n – V_s didėja
- V_s posūkyje

$$V_{Sn} = \sqrt{\frac{2Wn}{\rho C_{LMAX} S}} = V_{S1g} \sqrt{n}$$

$$n = \frac{L}{W} = \frac{1}{\cos \Phi}$$



71 pav. Posvyrio įtaka smukos greičio padidėjimui viraže



SKLANDYTUVO STABILUMAS

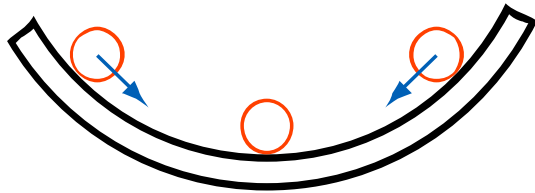
- STABILUMAS
 - tai sklandytuvo gebėjimas savarankiškai, be piloto pagalbos, išlikti arba grįžti į buvusį skrydžio režimą po to, kai sklandytuvą paveikė trumpalaikė, nedidelė išorinė jėga
 - tai sklandytuvo gebėjimas savarankiškai išlaikyti sutrikdytą pusiausvyrą
- Kad skrydis būtų stabilus, turi būti patenkinamos dvi sąlygos:
 - sklandytuvas turi būti statišškai stabilus
 - turi būti pakankamas svyravimų slopinimas
- Stabilumas
 - išilginis (apie skersinę ašį)
 - skersinis (apie išilginę ašį)
 - krypties (apie vertikalią ašį)

Statinis ir dinaminis stabilumas

- Stabilizuojantis momentai
 - momentai, kurie stengiasi grąžinti sklandytuvą į pirmąją būseną
- Destabilizuojantys momentai
 - momentai, bloginantys sutrikdytą pusiausvyrą
- **Statinis stabilumas**
 - sklandytuvo gebėjimas, paveikus išorės jėgai, sukurti stabilizuojančius momentus (nusako pirmąją tendenciją po trikdžio)
- **Dinaminis stabilumas**
 - sklandytuvo gebėjimas slopinti svyravimus (parodo realų judesį laiko bėgyje)

Statinis stabilumas

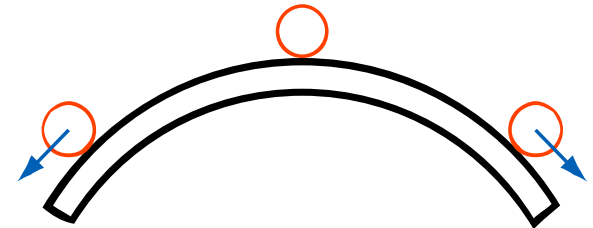
- Statinis stabilumas



Stabilus

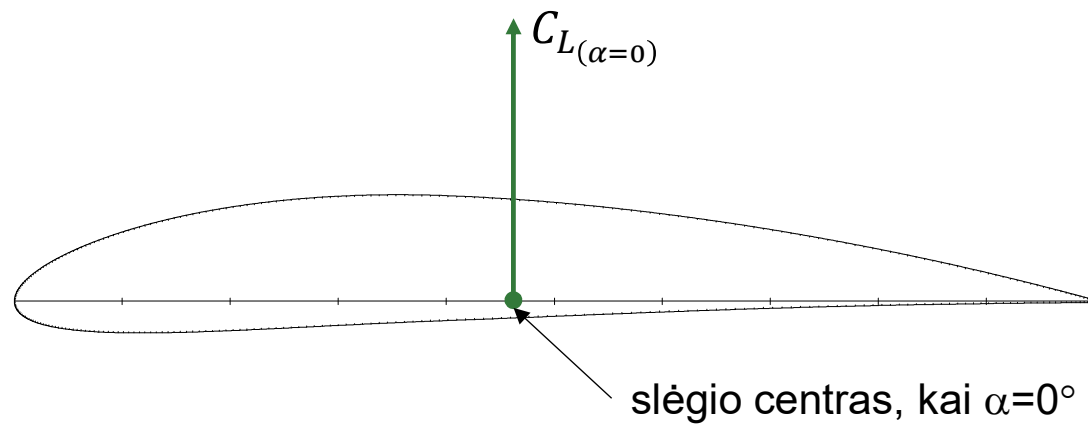
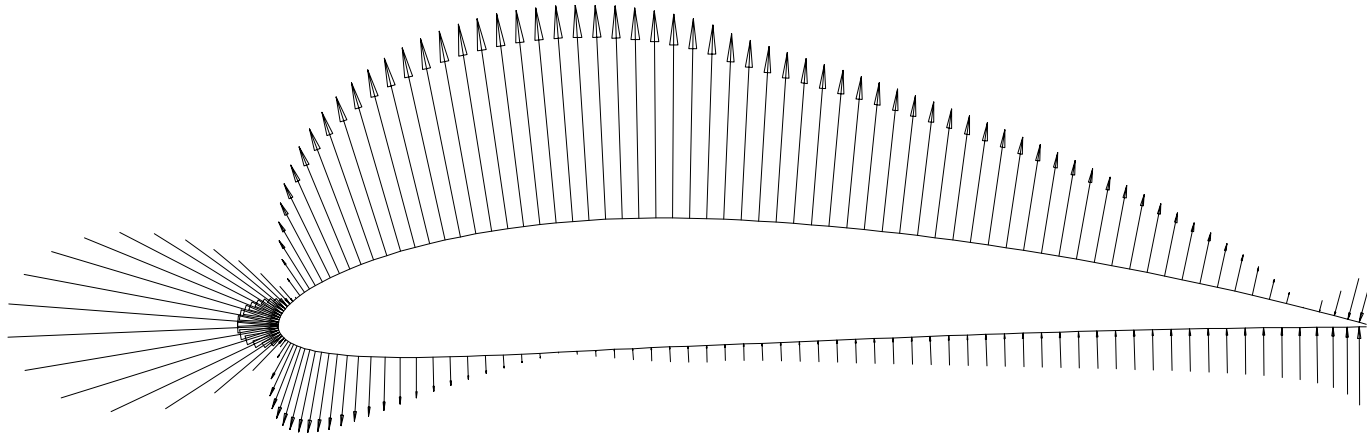


Neutralus

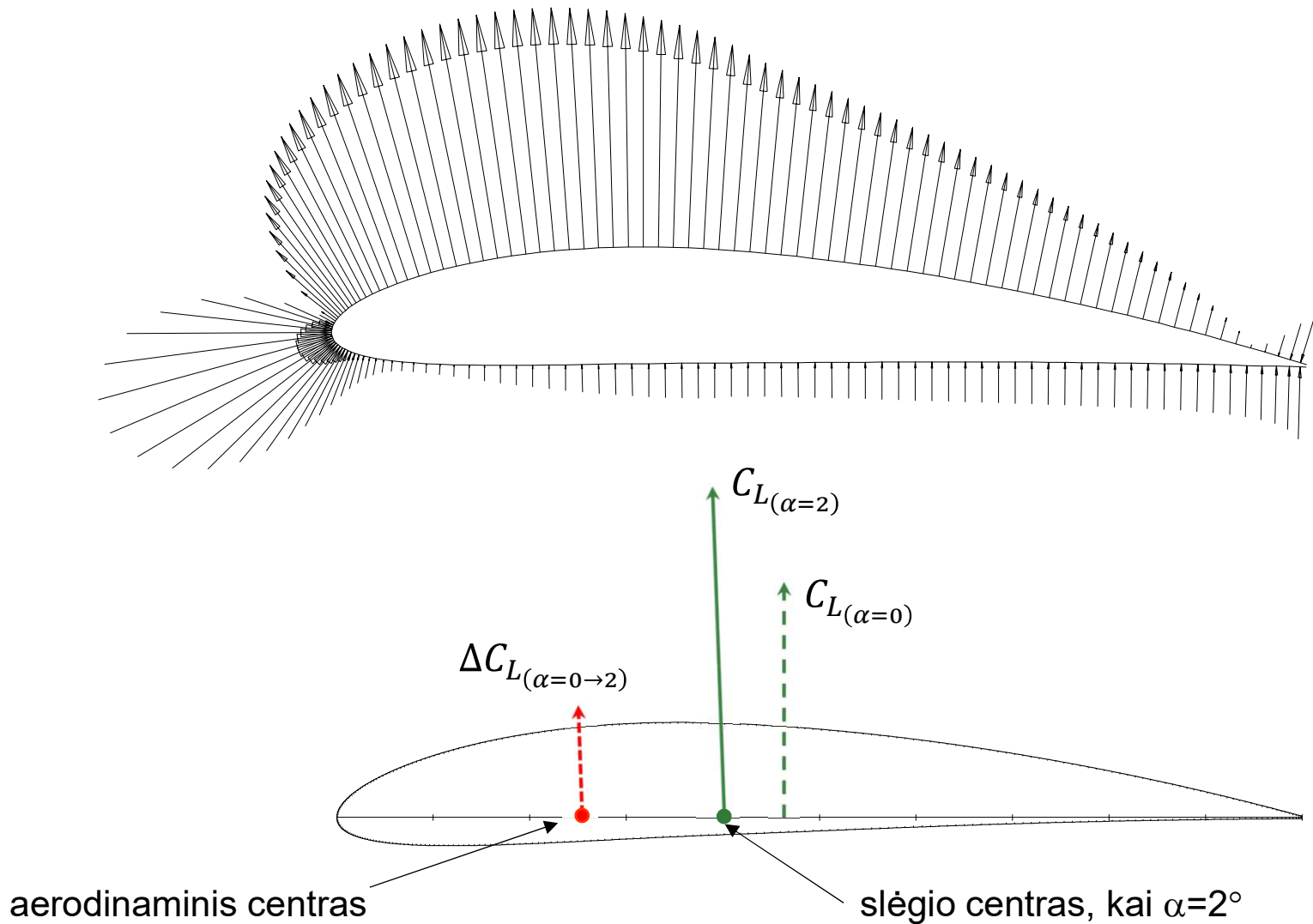


Nestabilus

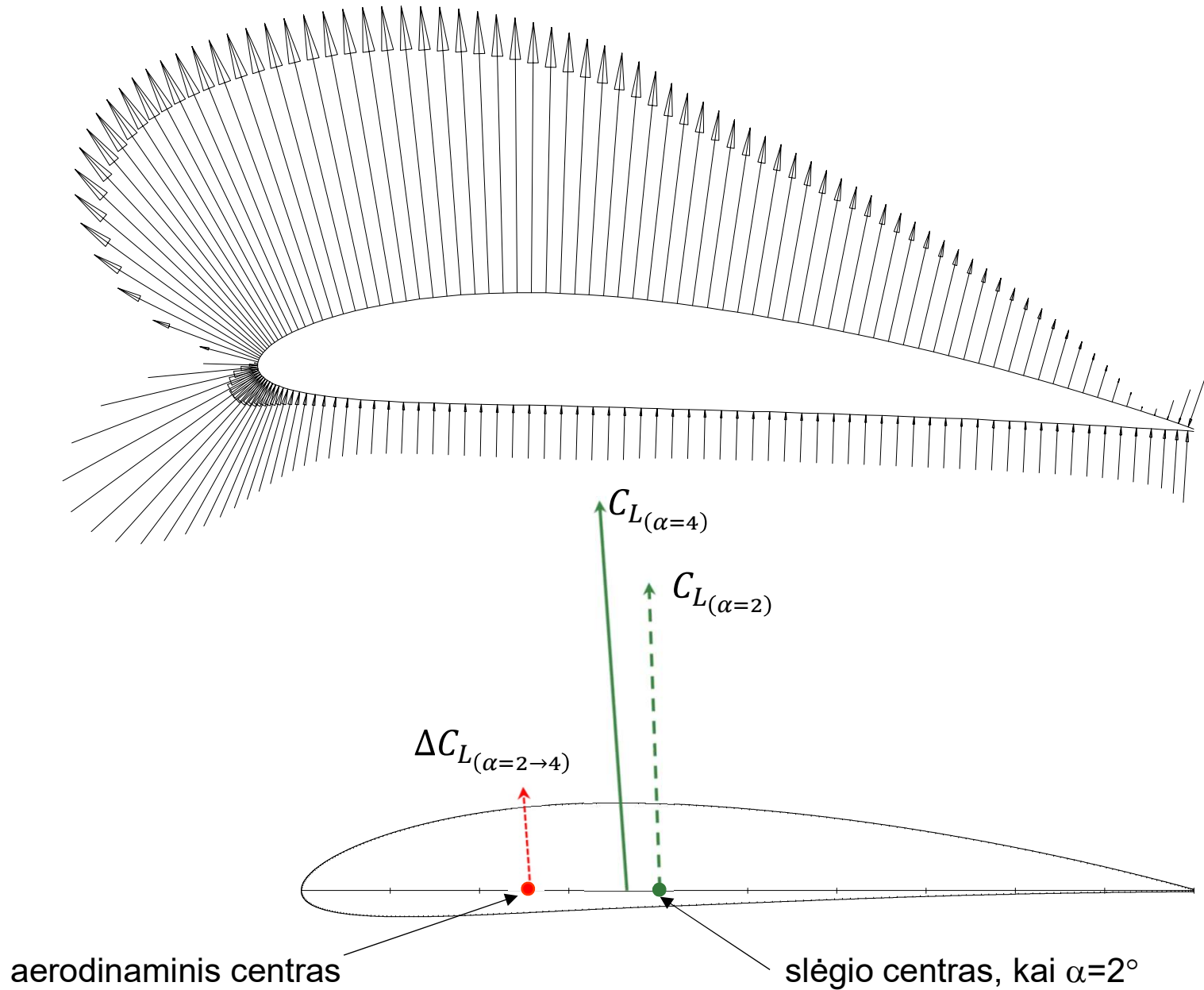
Slégio centras, $\alpha=0^\circ$



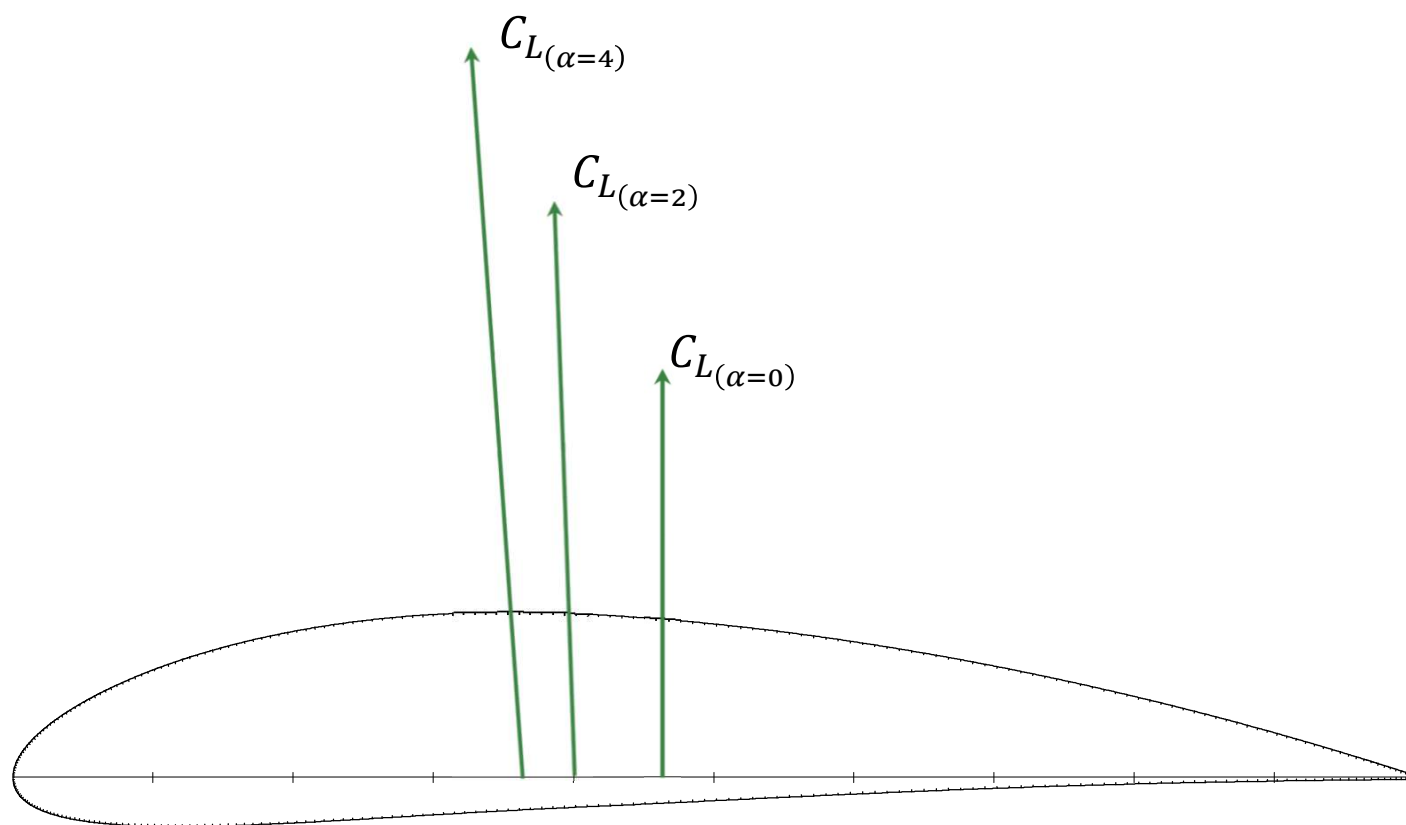
Slėgio centras ir aerodinaminis centras, $\alpha=2^\circ$
(aerodinaminis centras dar vadinamas: židinytis arba fokusas)



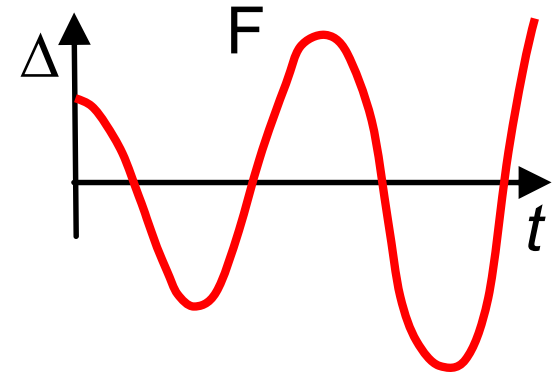
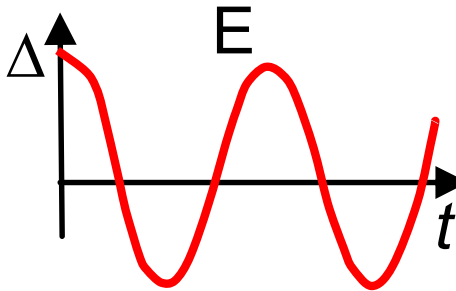
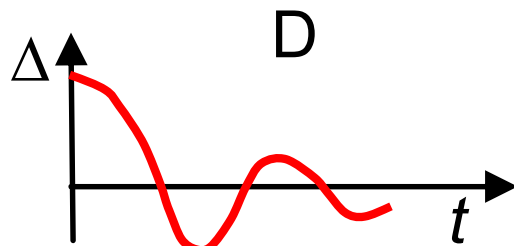
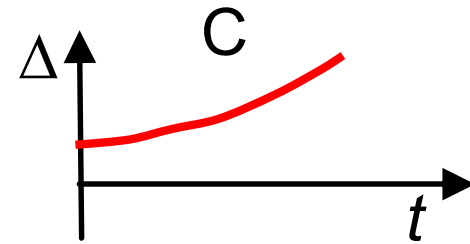
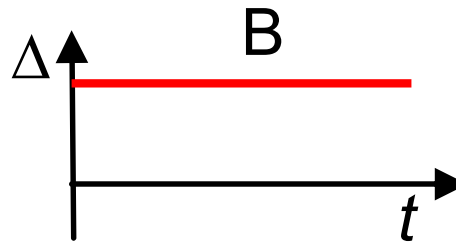
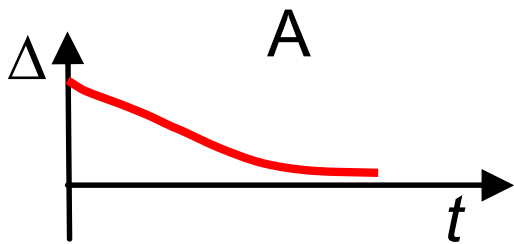
Slėgio centras ir aerodinaminis centras, $\alpha=4^\circ$



Slègio centro kitimas

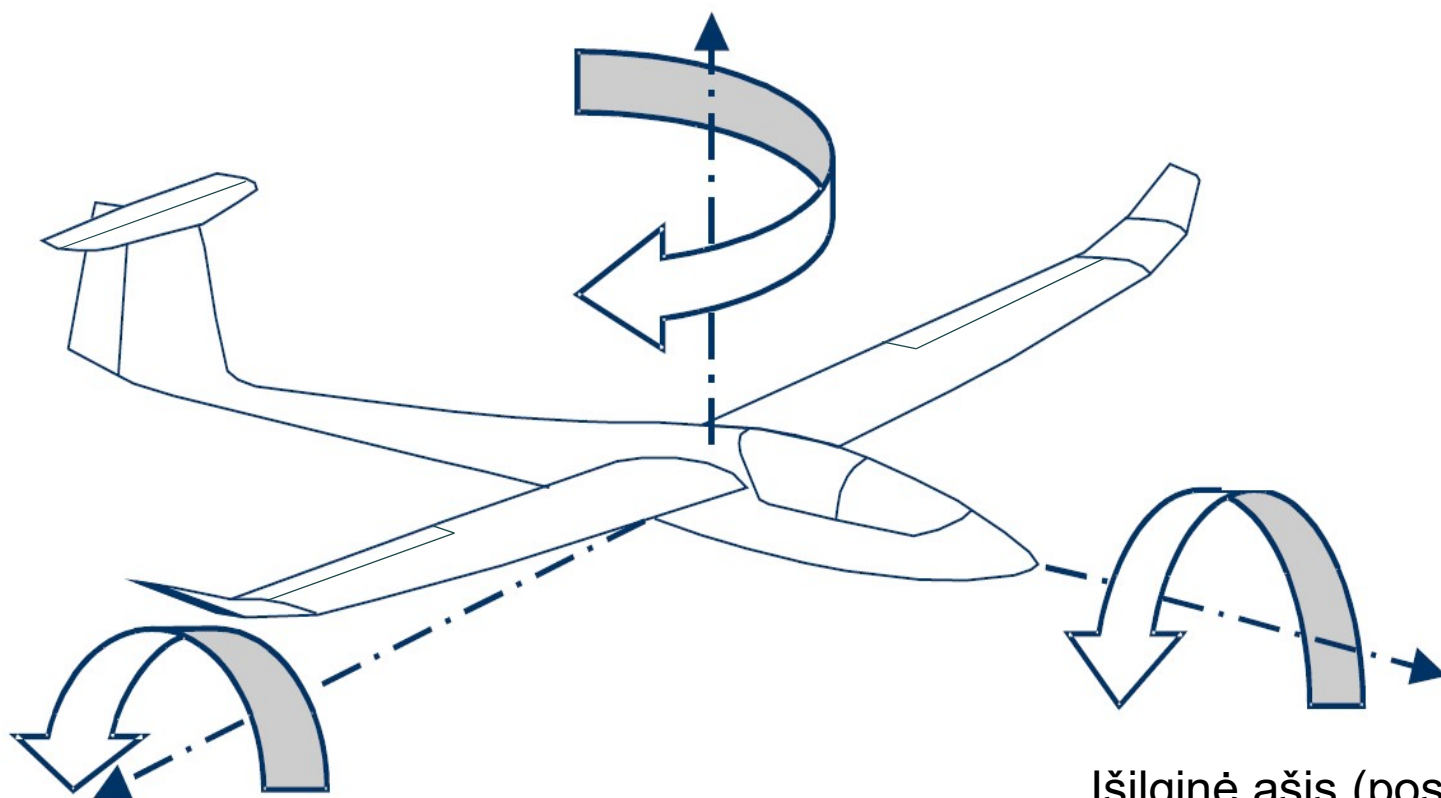


Dinaminis stabilumas



Ašys

Vertikali ašis (kryptis)



Išilginė ašis (posvyris)

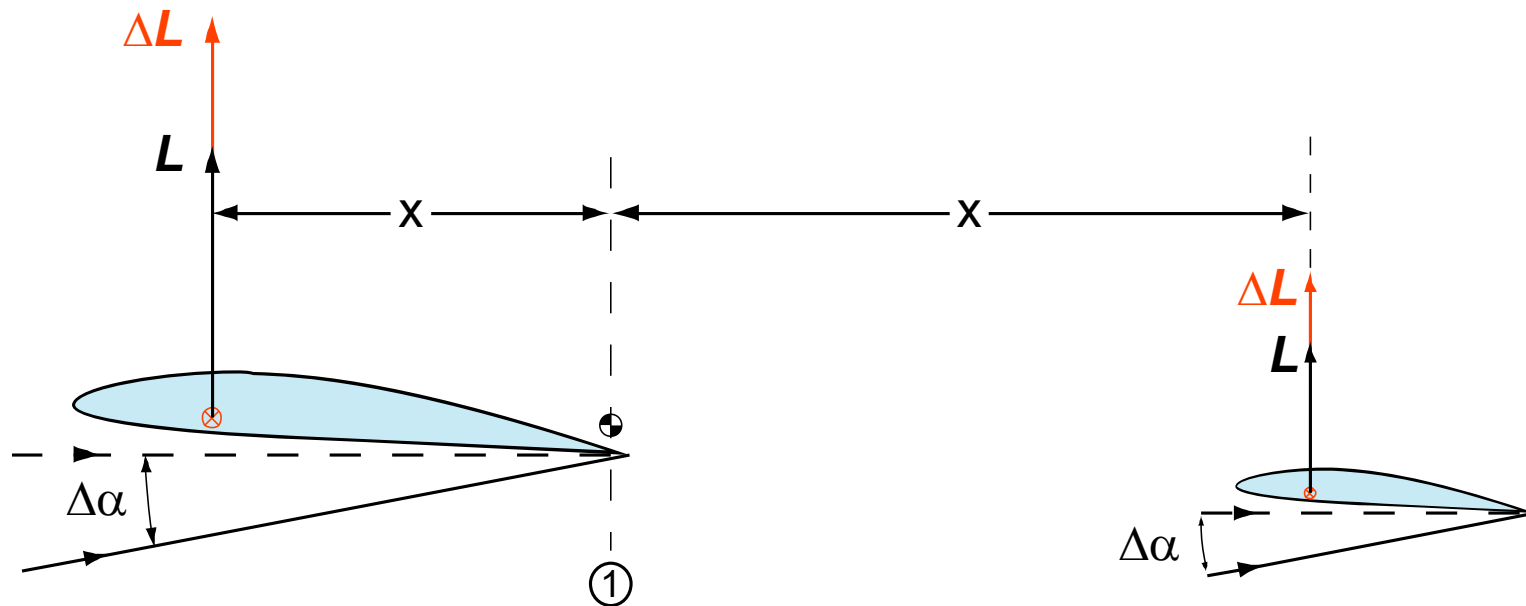
Skersinė ašis (polinkis)

Išilginis stabilumas skersinės ašies atžvilgiu

- **IŠILGINIS STABILUMAS** – trumpalaikės, mažos išorinės jėgos paveikto sklandytuvo gebėjimas išsaugoti polinkio pusiausvyrą (taip pat vadinamas *stabilumas perkrovai* arba *stabilumas atakos kampui*)
- Vidutinė aerodinaminė styga (VAS)
 - styga tokio tariamojo stačiakampio sparno, kurio plotas S ir aerodinaminės savybės prilygsta duotajam nestačiakampiui sparnui
 - yra nurodyta techniniame apraše (L-13: 1,235 m)
- Centruotė
 - sklandytuvo svorio centro padėtis VAS priekinės dalies atžvilgiu, išreikšta % (L-13: 23% - 38% VAS)

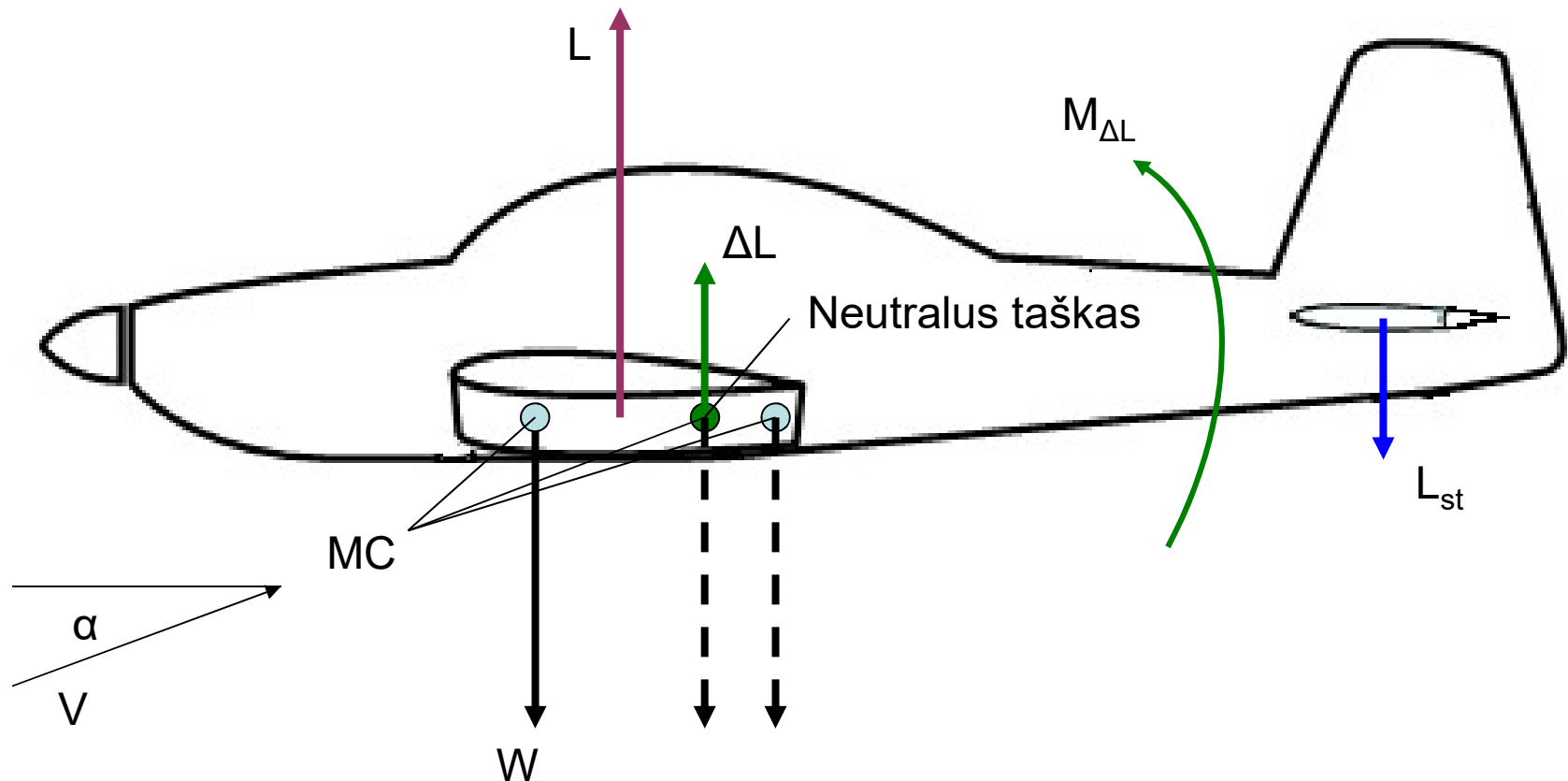
Išilginis stabilumas

- Sklandytuvo (aerodinaminis centras, židinyš) - **neutralus taškas**:
 - yra visų sklandytuvo dalių keliamųjų jėgų pokyčio veikimo taškas, kai keičiasi atakos kampas
 - taškas, kurio atžvilgiu momentas nepriklauso nuo atakos kampo



Išilginis stabilumas

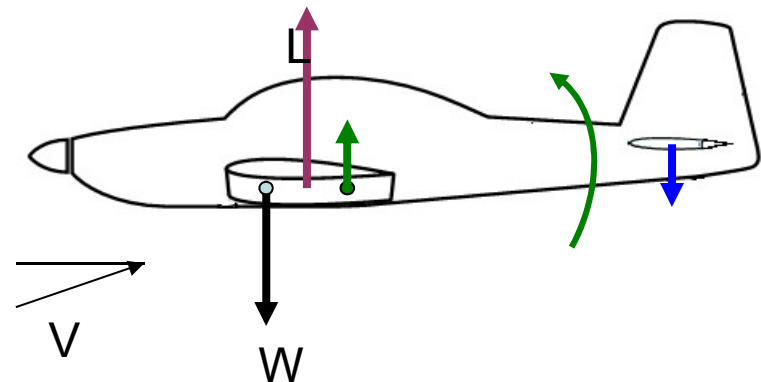
- Svorio centro padėties įtaka išilginiam stabilumui
- Lėktuvas statiškai stabilus, kol svorio centras yra prieš neutralųjį tašką



Keliamoji jėga dažniausiai sudaro neigiamą polinkio (pikiravimo) momentą.

Išilginis stabilumas

- Svorio centro padėties įtaka išilginiam stabilumui:
 - kuo centruotė labiau priekinė – tuo sklandytuvas stabilesnis
 - stabilumas mažėja centruotei slenkant atgal
- Centruotės ribojimai
 - galinė ribinė – dėl stabilumo
 - priekinė ribinė – dėl valdumo, ypač prie mažų greičių



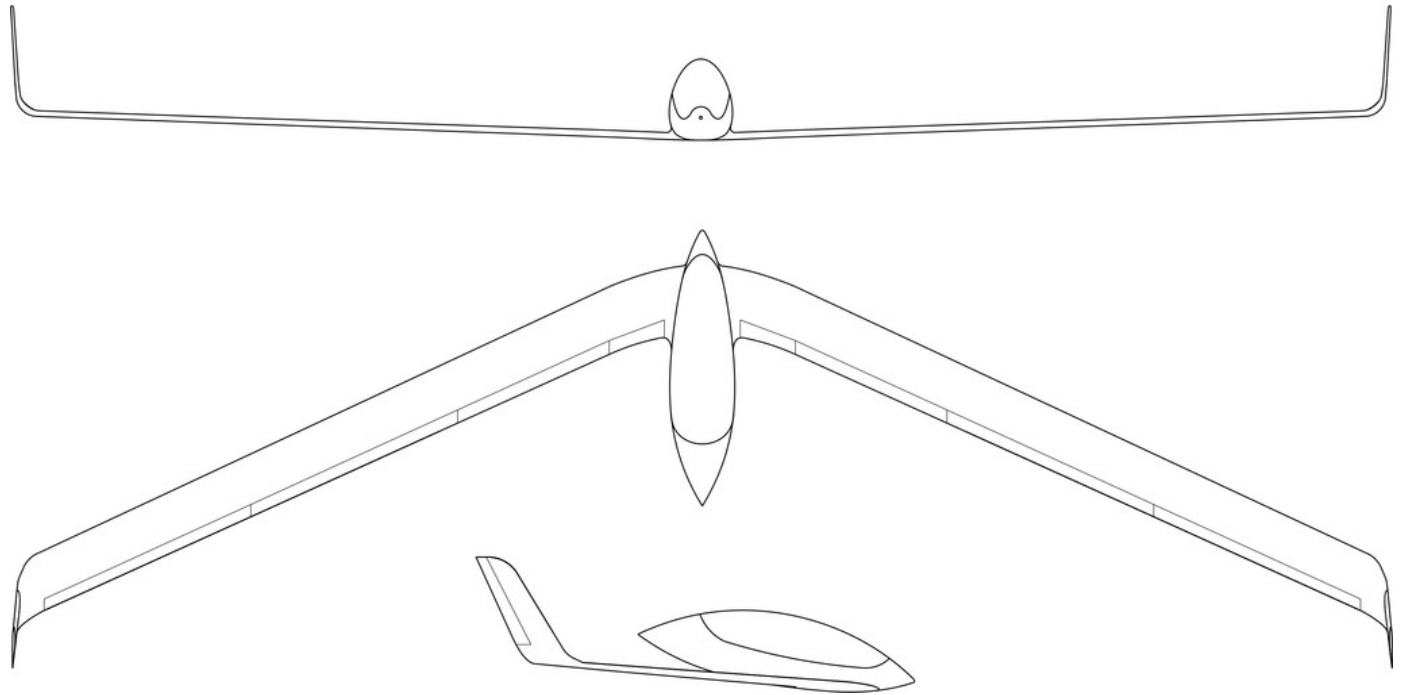
LAK17bfes (15, 18, 21 m)



SB 13



AK-X

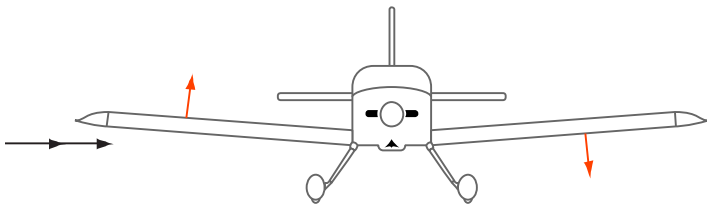


Skersinis stabilumas išilginės ašies atžvilgiu

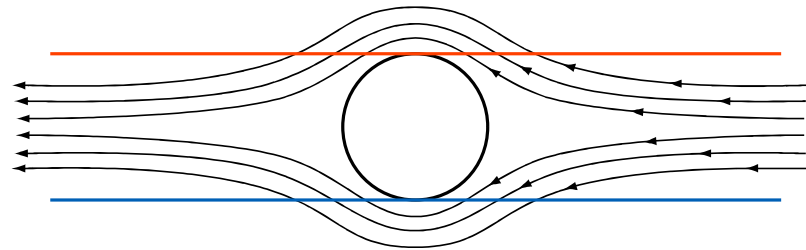
- **SKERSINIS STABILUMAS**
 - sklandytuvo gebėjimas išsaugoti posvyrio pusiausvyrą, paveikus trumpalaikiai išoriniai jėgai

Skersinis stabilumas (išilginės ašies atžvilgiu)

- Įvairių faktorių įtaka:
 - skersinio „V“ kampas (teigiamas - gerina)
 - aukštasparnis, žemasparnis (aukštasparnis - gerina)



Teigiamo skersinio „V“ kampo
įtaka posvyrio momentui



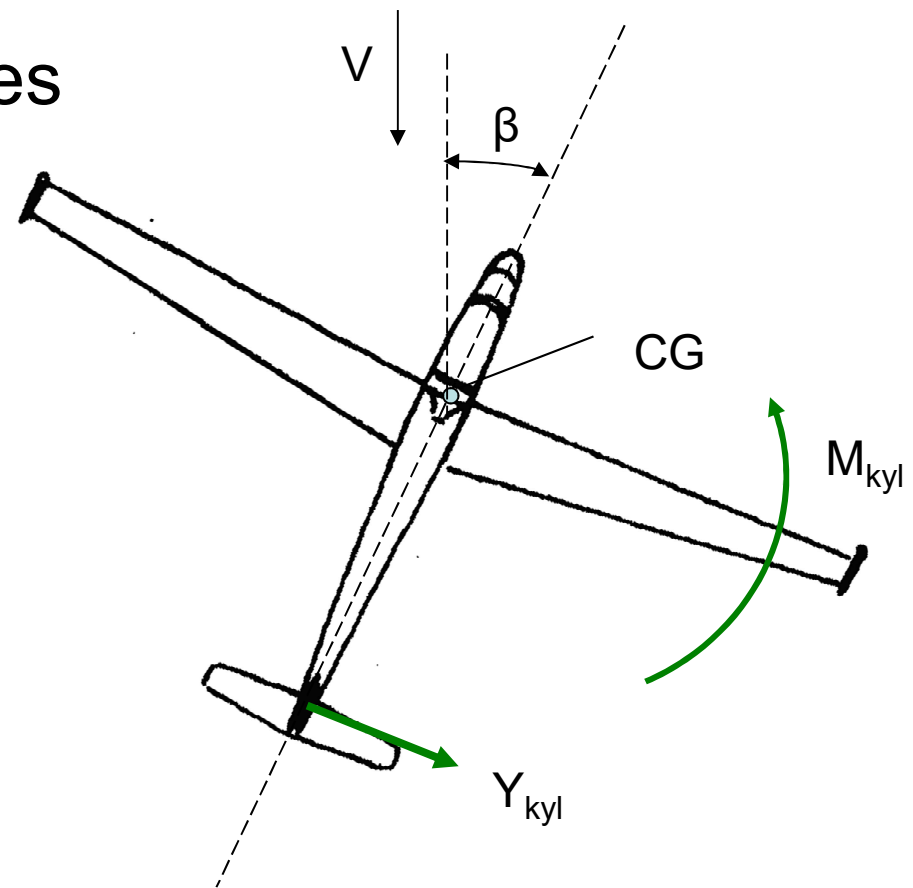
Sparno padėties įtaka
posvyrio momentui

Krypties stabilumas vertikalios ašies atžvilgiu

- KRYPTIES STABILUMAS
 - sklandytuvo gebėjimas išsaugoti krypties (pokrypio) pusiausvyrą, paveikus trumpalaikiai išoriniai jėgai
 - Krypties stabilumą užtikrina vertikali uodegos plokštuma (kilis)

Krypties stabilumas

- Kryptinėjimą stabilizuojantis momentas
- Priklauso nuo:
 - Svorio centro padėties
 - Kylio ploto



Šoninis stabilumas

- ŠONINIS STABILUMAS
 - posvyrio (skersinio) ir pokrypio stabilumų visuma
 - sklandytuvo gebėjimas savarankiškai išlaikyti šoninę pusiausvyrą, paveikus trumpalaikiai, nedidelei šoninei jėgai

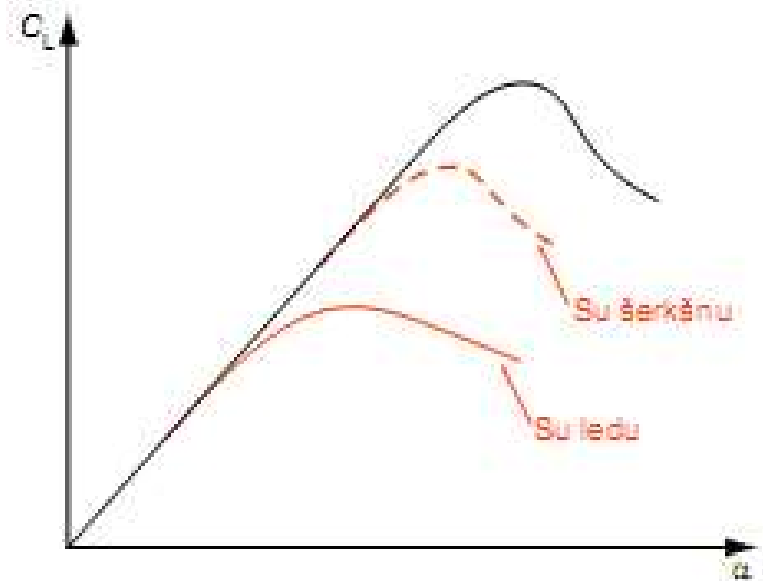
Šoninis stabilumas

- Santykis tarp posvyrio (skersinio) ir krypties stabilumu – ***k***
- $k=1$
 - šoninis stabilumas geriausias
- $k<1$ - Krypties stabilumas didesnis už posvyrio
 - *spiralinis šoninis nestabilumas*
 - sklandytuvas gali turėti nedidelį šoninį nestabilumą
- $k>1$ - Posvyrio stabilumas didesnis už krypties
 - “olandiškas žingsnis”
 - nepageidaujama savybė (periodas iki 1 sek.)
 - lėktuvuose montuojamas krypties slopintuvas

$$k = \frac{\omega_{posv}}{\omega_{krypt}}$$

Užterštumų įtaka

- C_L , C_D , E
 - C_L mažėja
 - C_D didėja
 - $E = \frac{C_L}{C_D}$ mažėja
- V , V_v , γ
 - V reikiamas – didėja
 - V_v – didėja
 - γ – didėja



Muselès ant sparno

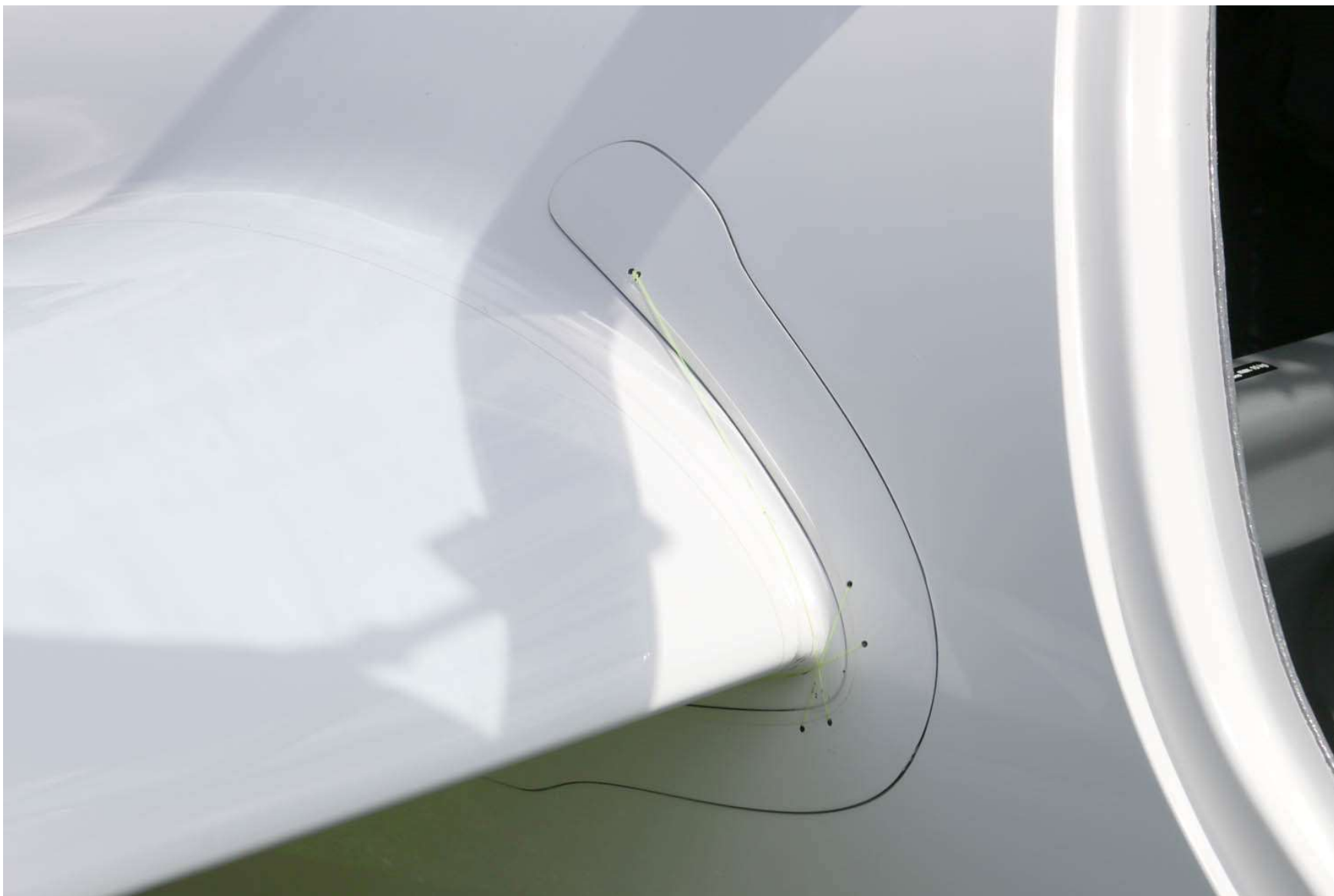


Valymas skrydžio metu



Integruotas valytuvas

(ASG 32)



PAKILIMAS

- Įsibėgėjimas
- Išlaikymas
- Aukštėjimas
- (Sklandytuvo atsikabinimas)

Pakilimo etapai

- Įsibėgėjimas (rieda)
 - Greitis auga ($T > D$)

- Atplyšimas
 - $W = L$

$$L = C_L \frac{\rho V^2}{2} S$$

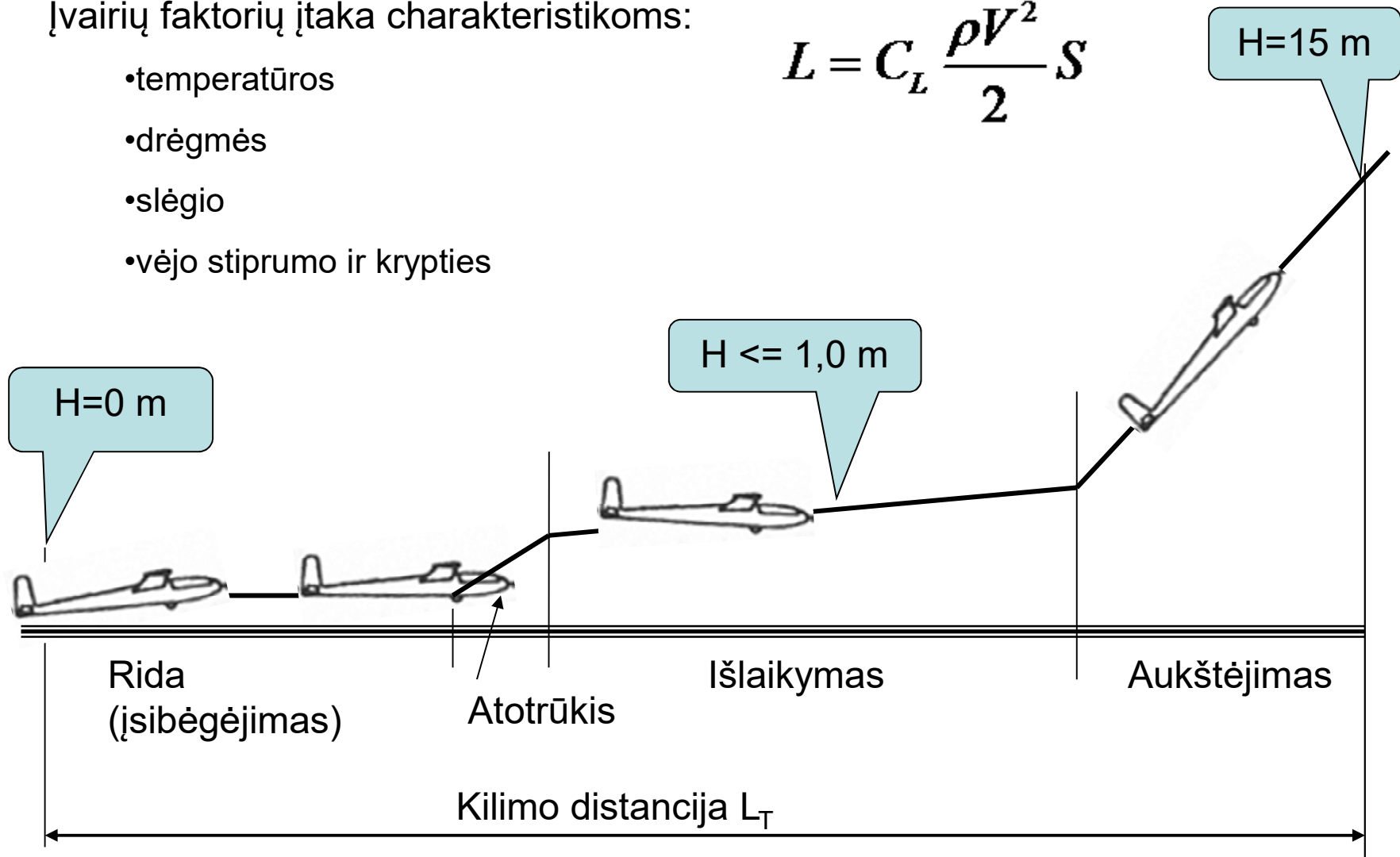
- Išlaikymas
 - $H \leq 1,0\text{m}$
- Aukštėjimas

Pakilimo etapai

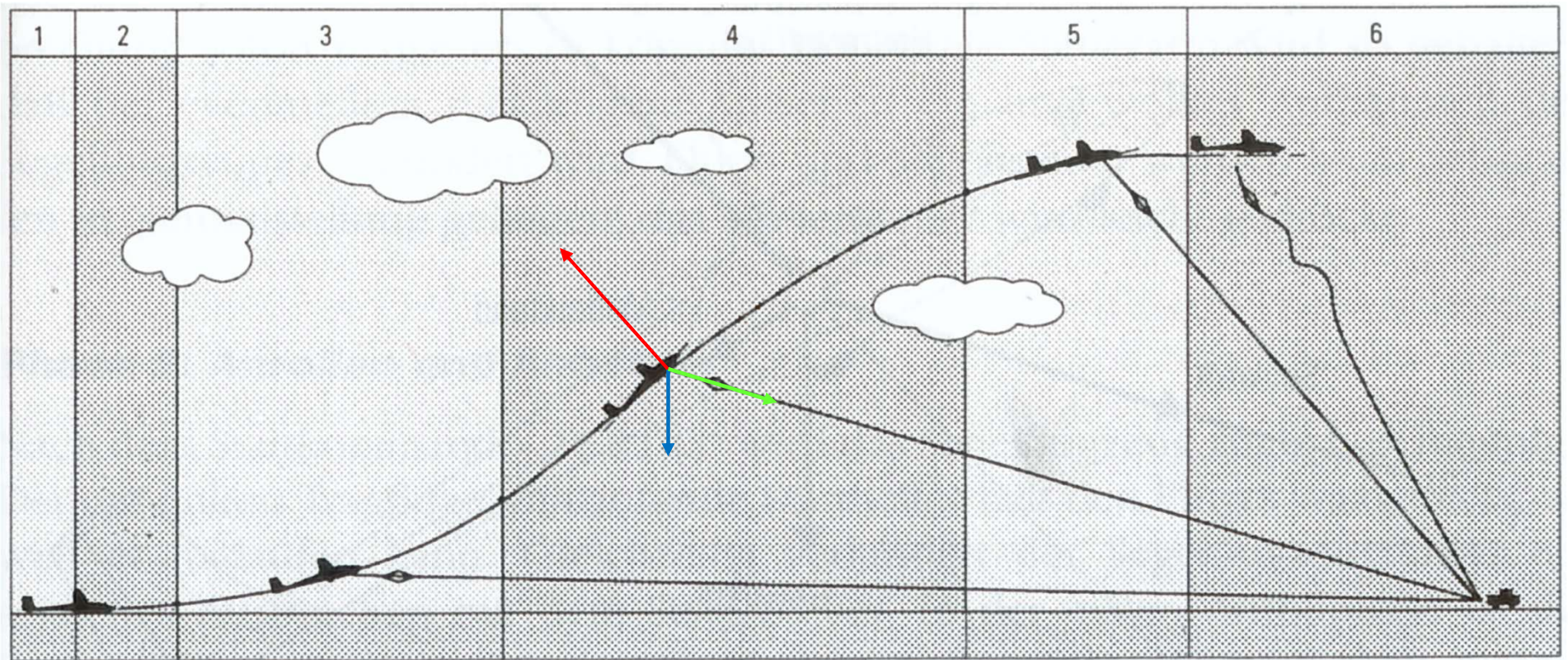
Ivairių faktorių įtaka charakteristikoms:

- temperatūros
- drėgmės
- slėgio
- vėjo stiprumo ir krypties

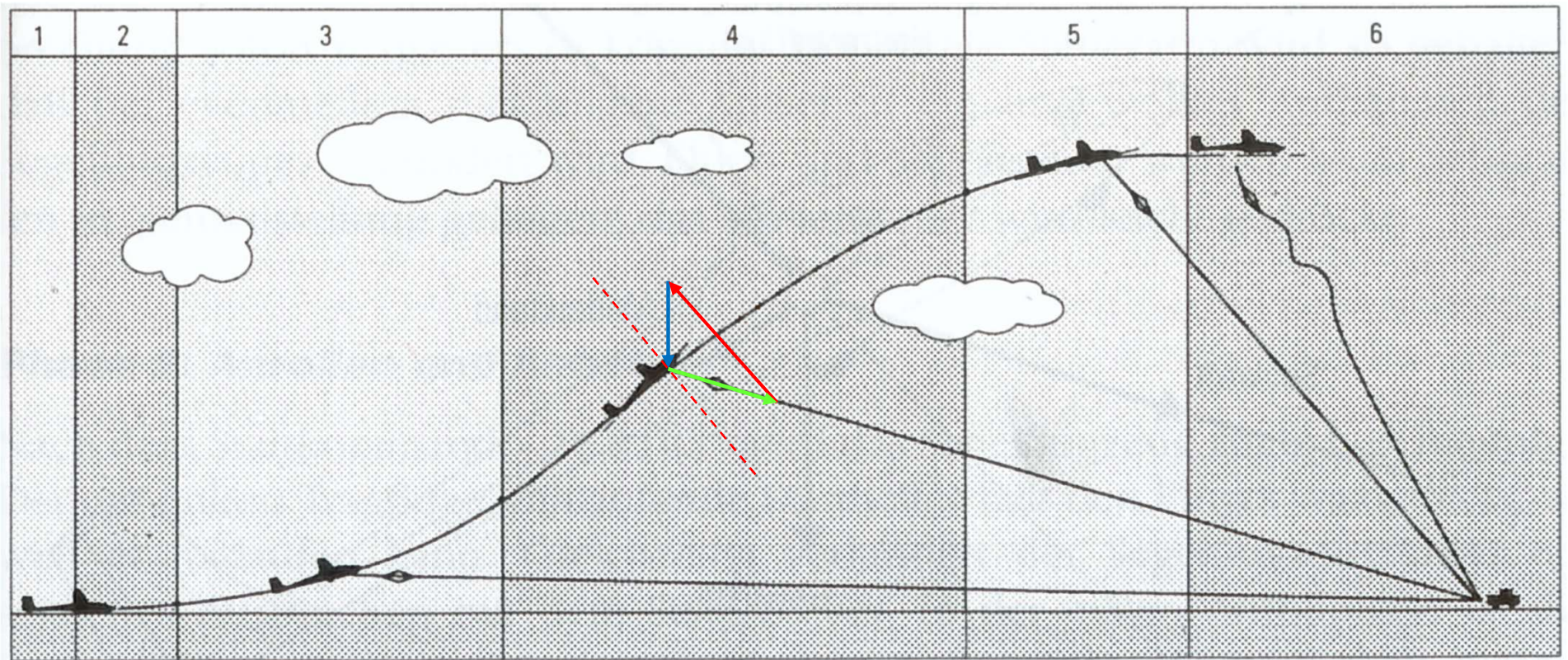
$$L = C_L \frac{\rho V^2}{2} S$$



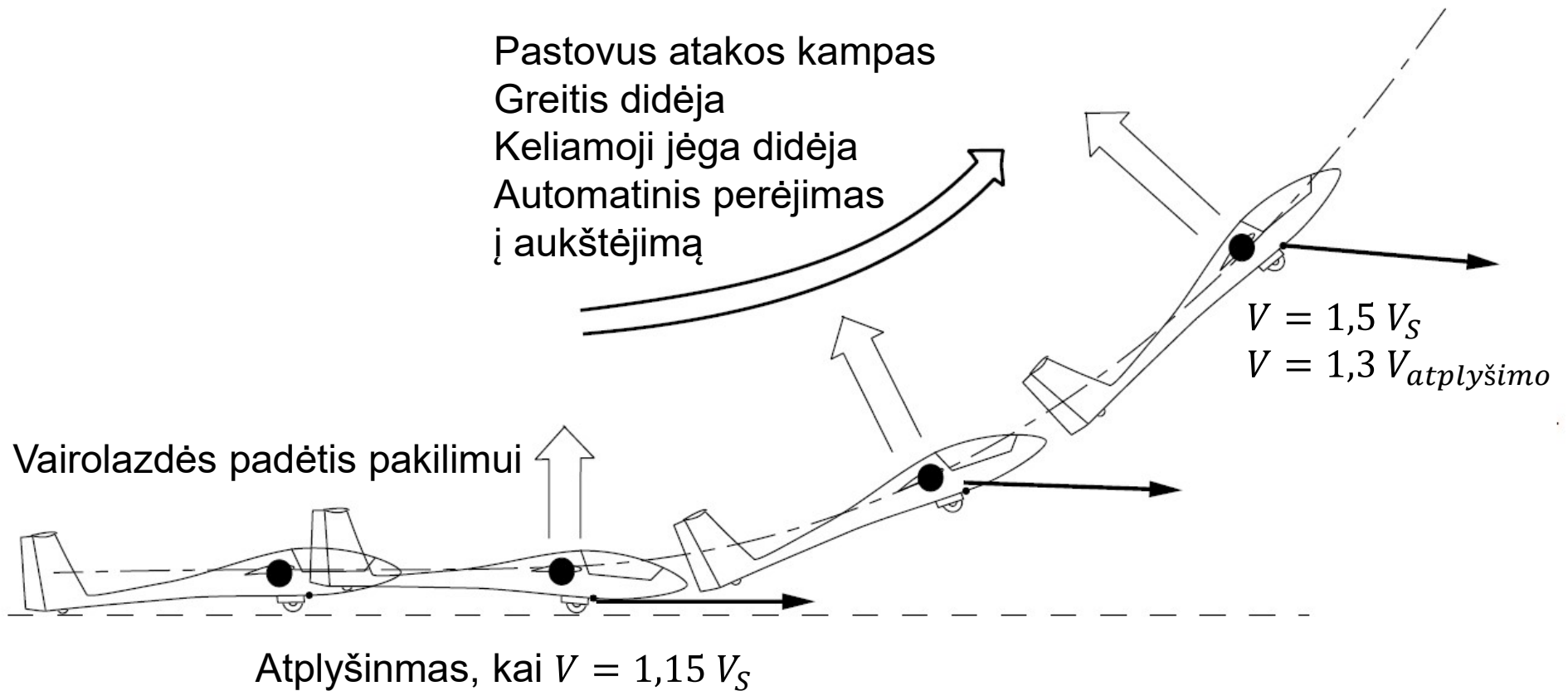
Startas išvilktuvu



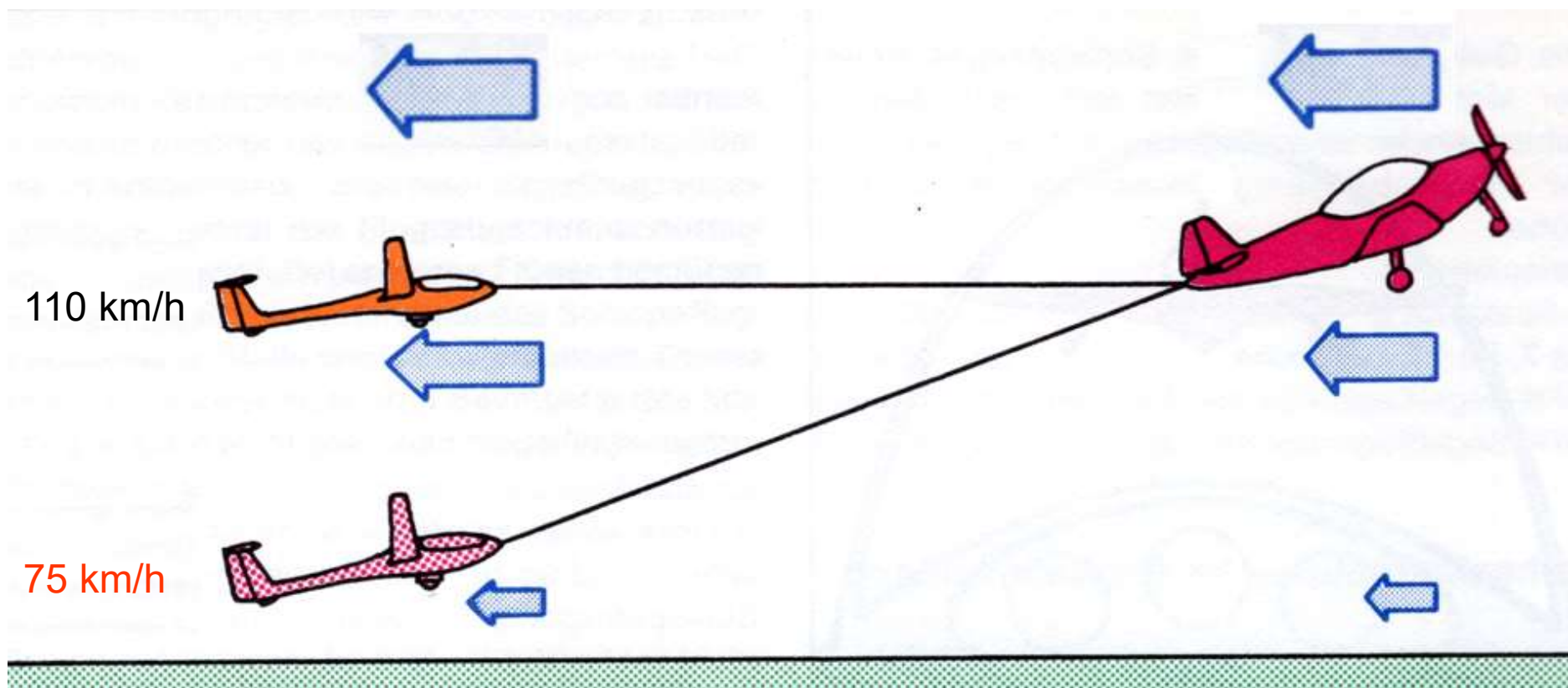
Startas išvilktuvu



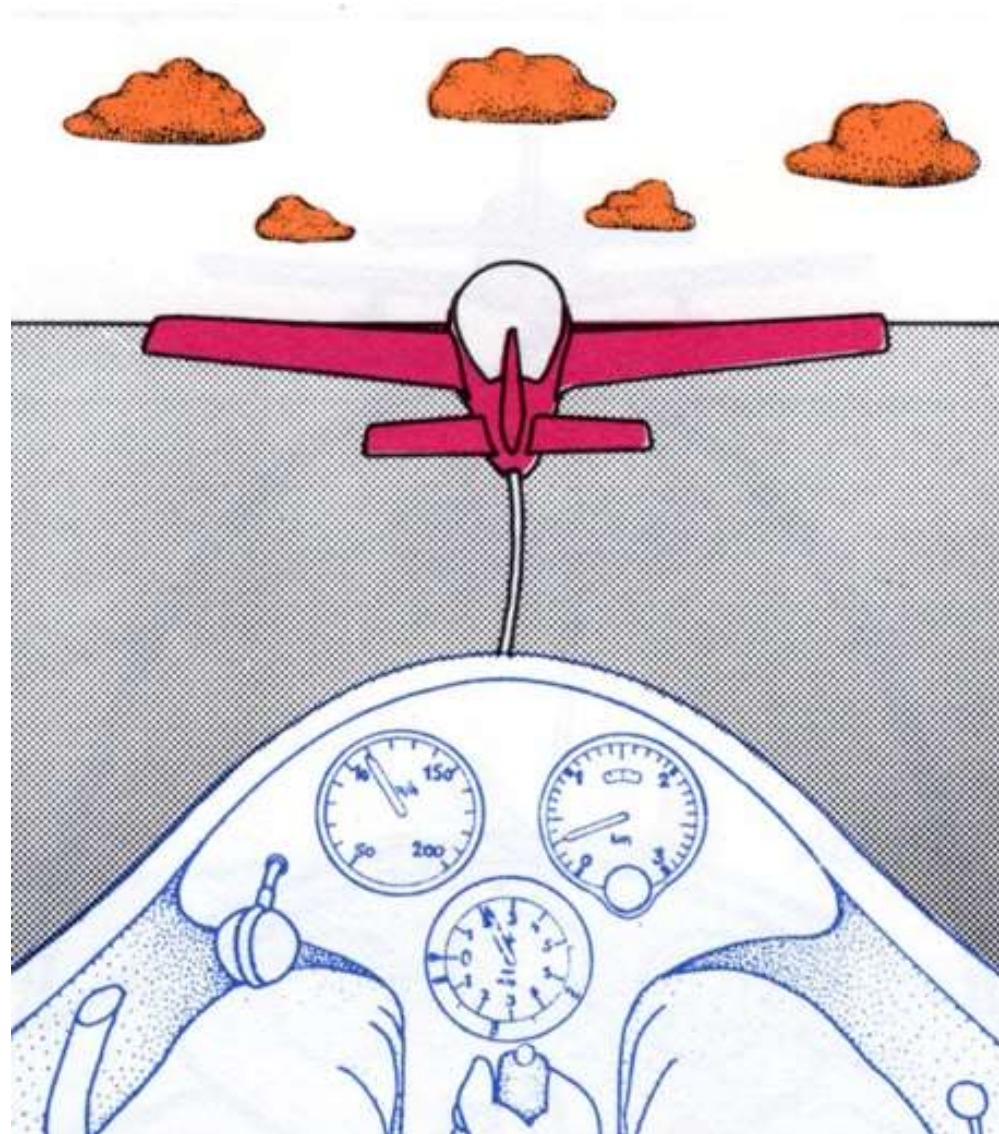
Startas išvilktuvu



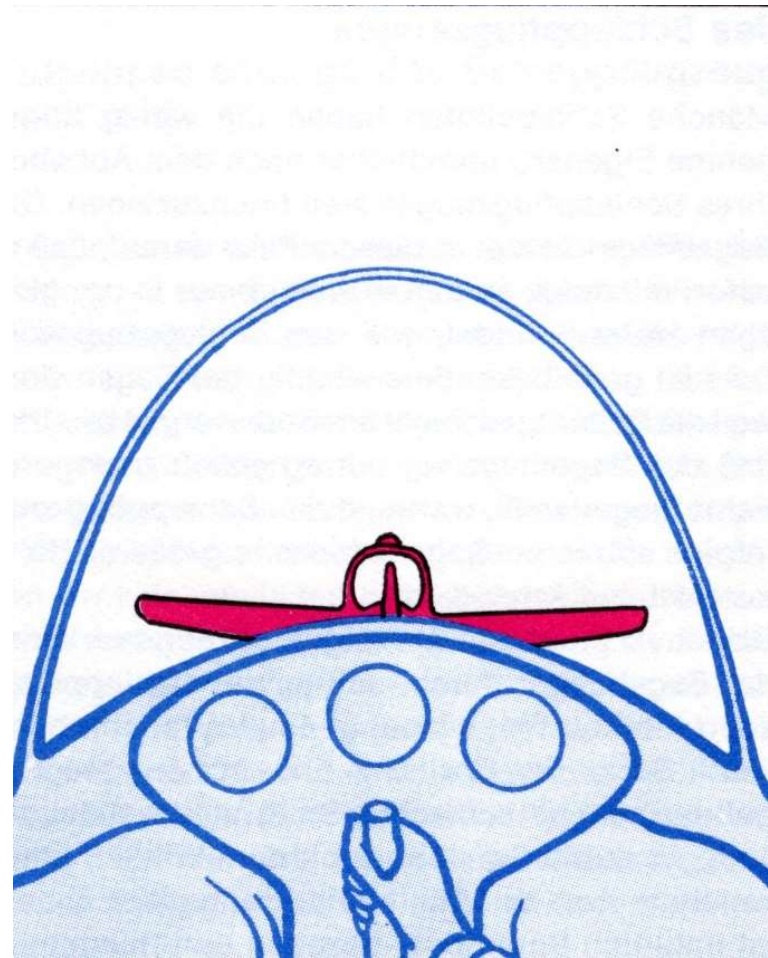
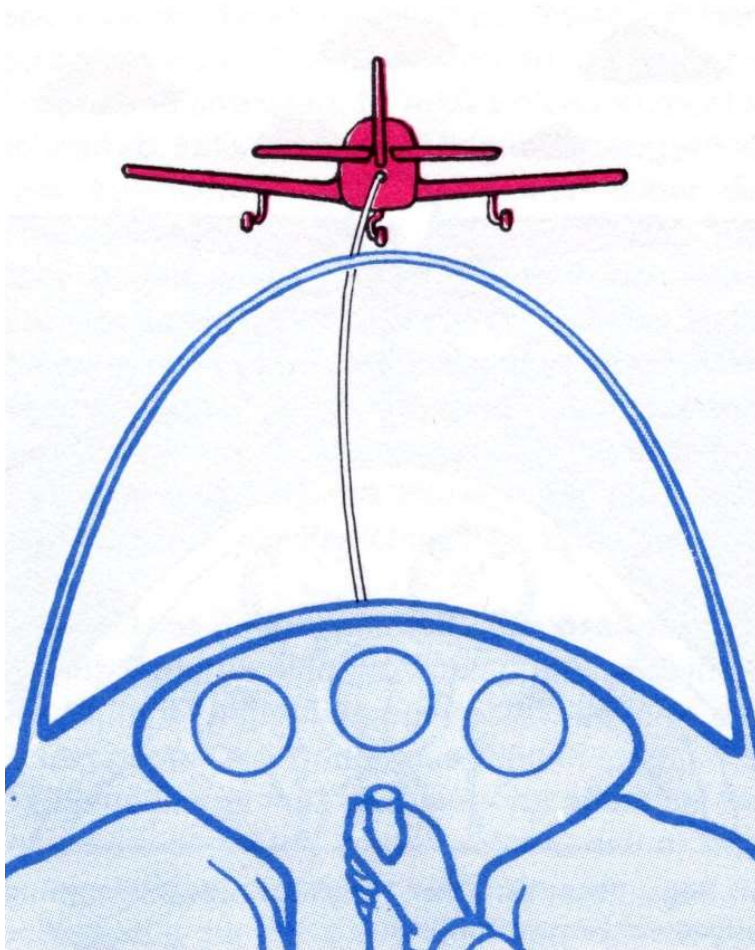
Pakilimas paskui lėktuvą

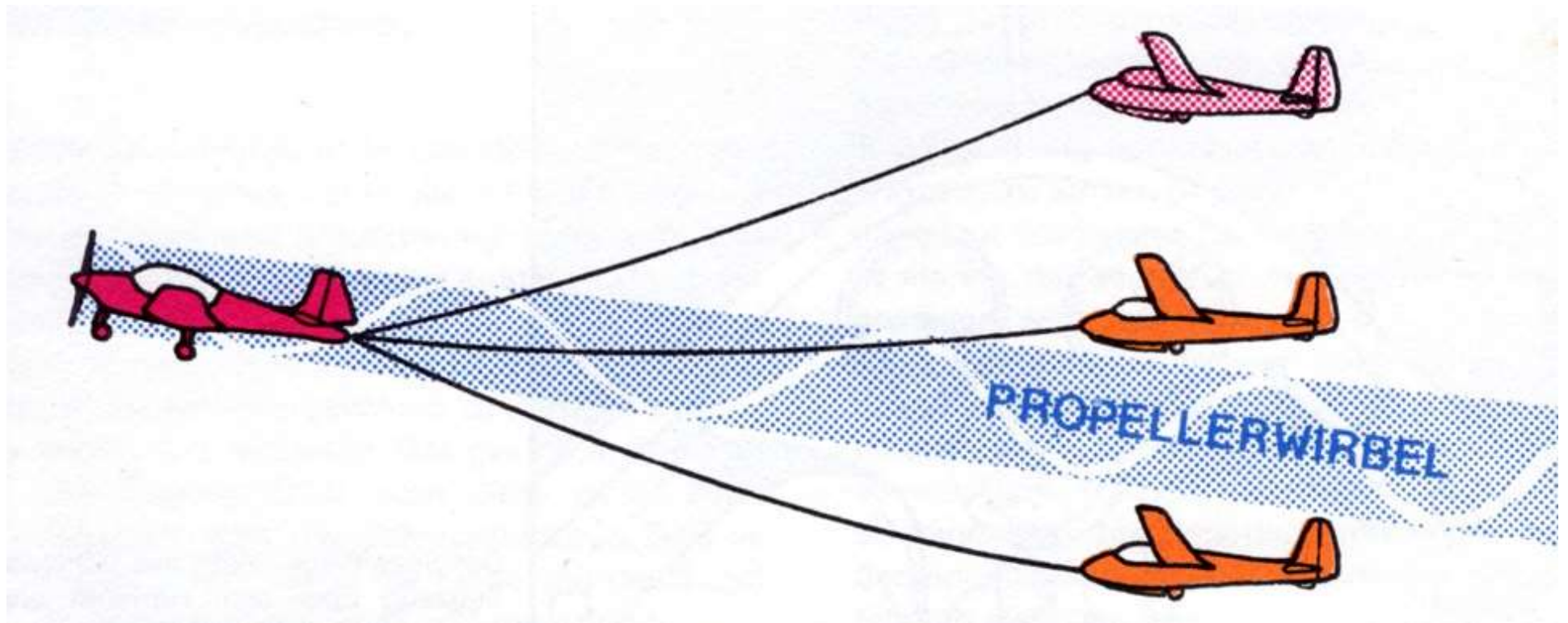


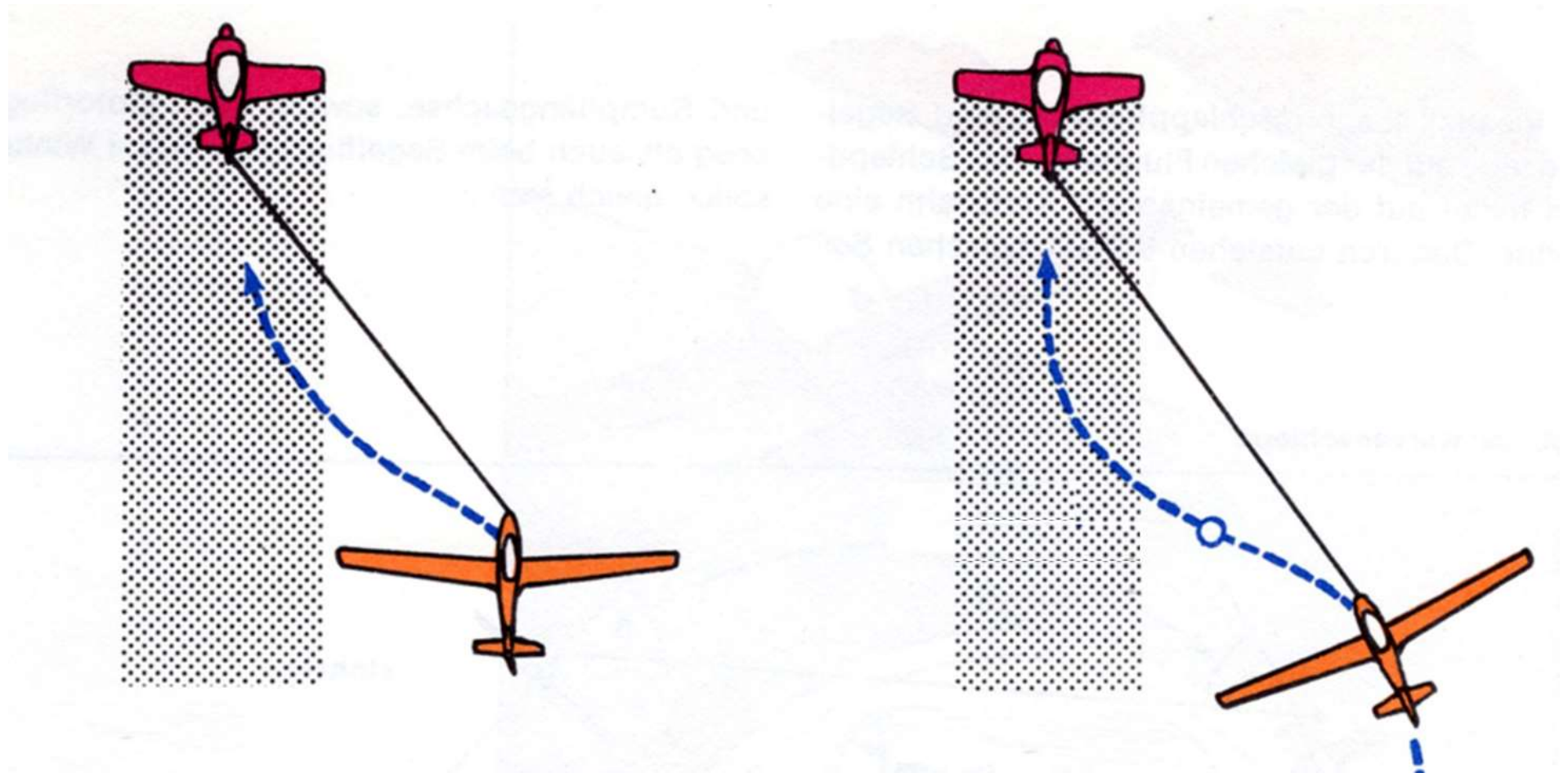
Teisinga padėtis

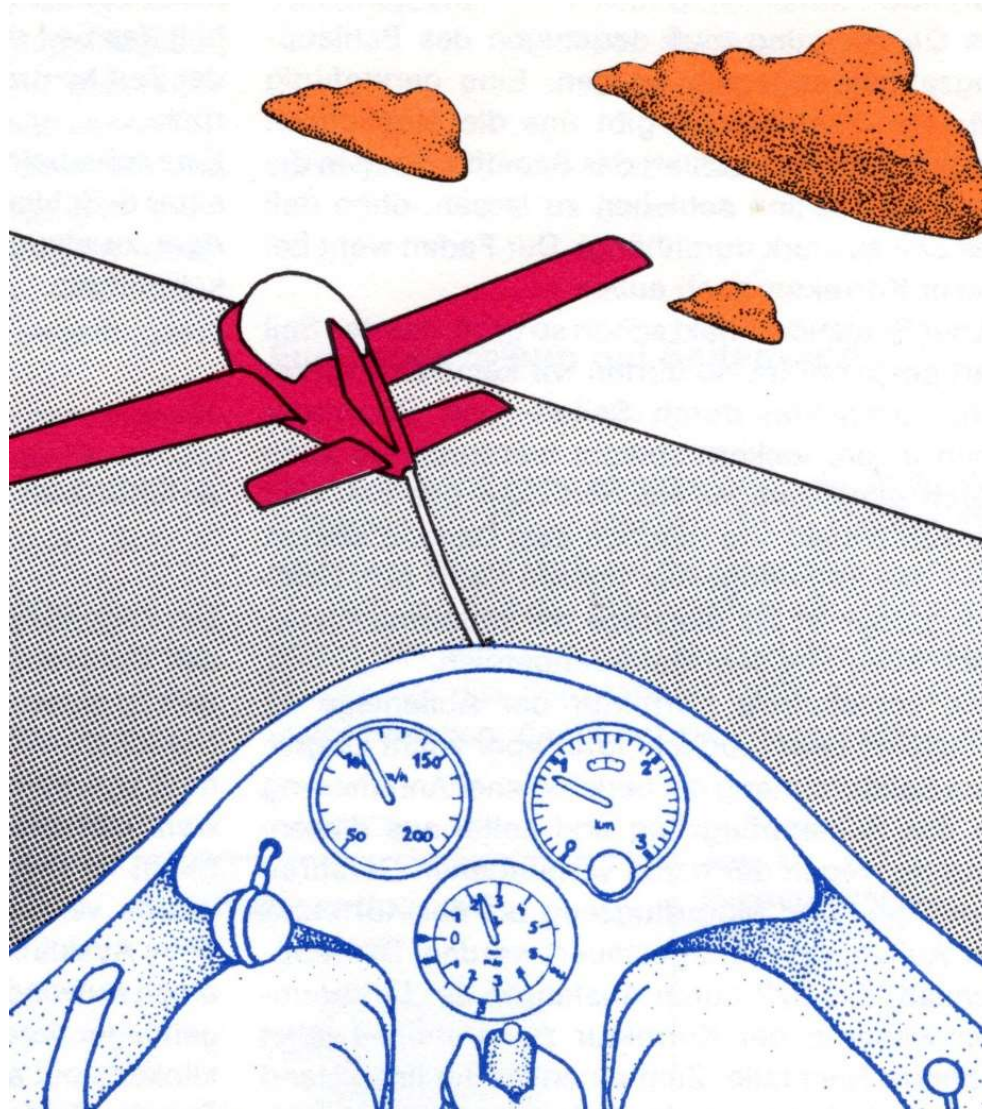


Per žemai ir per aukštai

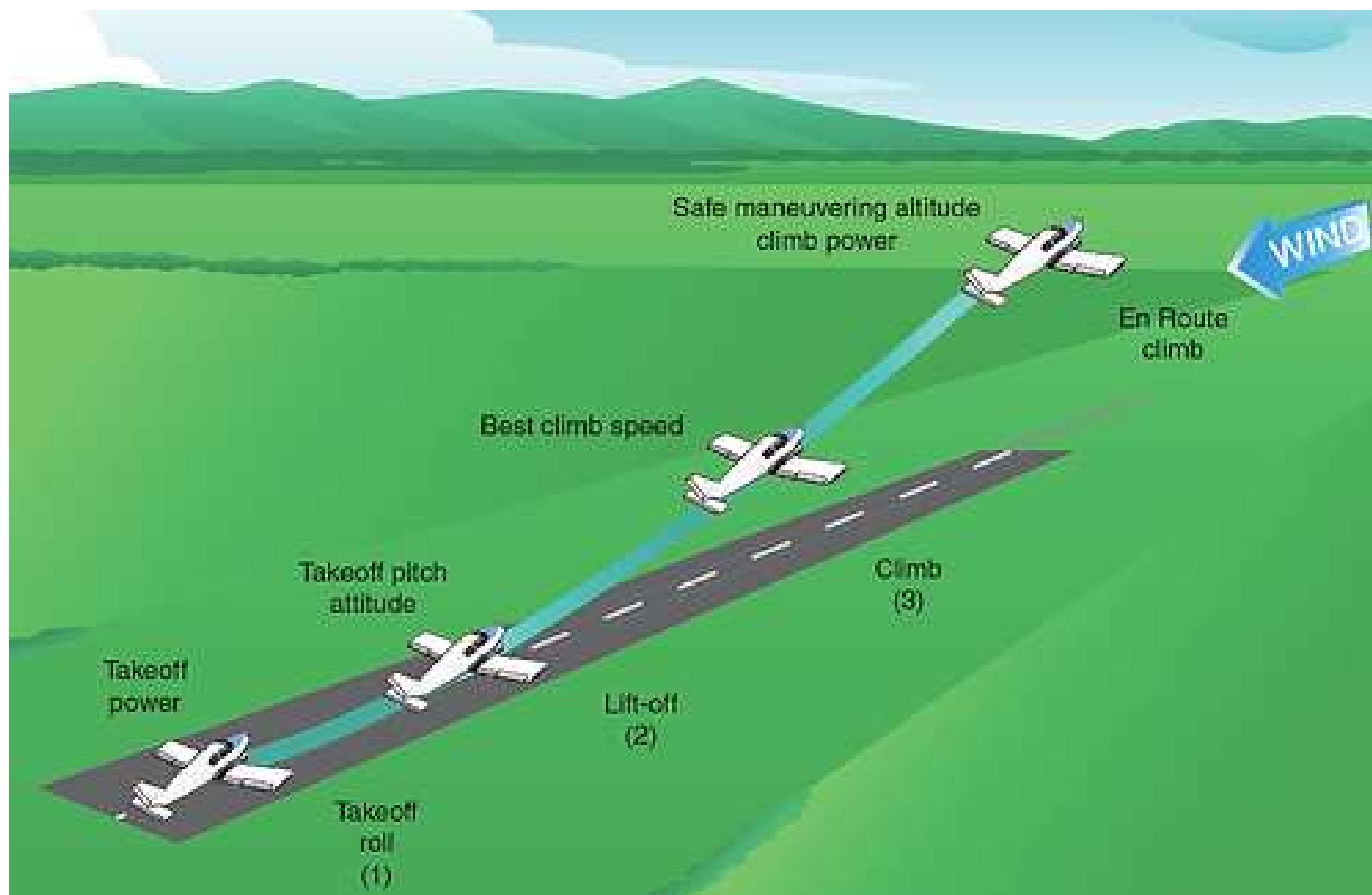








H. Reichmann



Tūpimas

Tūpimo etapai

– Žemėjimas

- Nuo 15 m iki ~2 m
- Žemėjimo kampas priklauso nuo sparno mechanizacijos

– (Iš)lyginimas

- Nuo 2 m iki 0,5 m
- Mažinamas V_y

– Išlaikymas

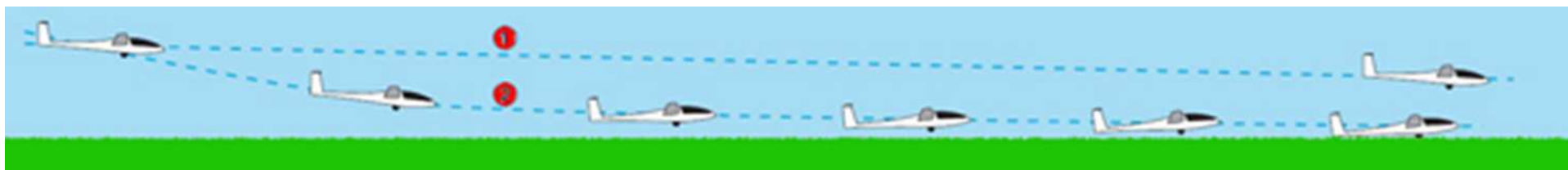
- Nuo 0,5 m iki ~0,15-0,20 m
- Mažėja greitis, didiname atakos kampą, išlaikome mažą V_y
- Užimam tūpimo padėtį

– Nutūpimas

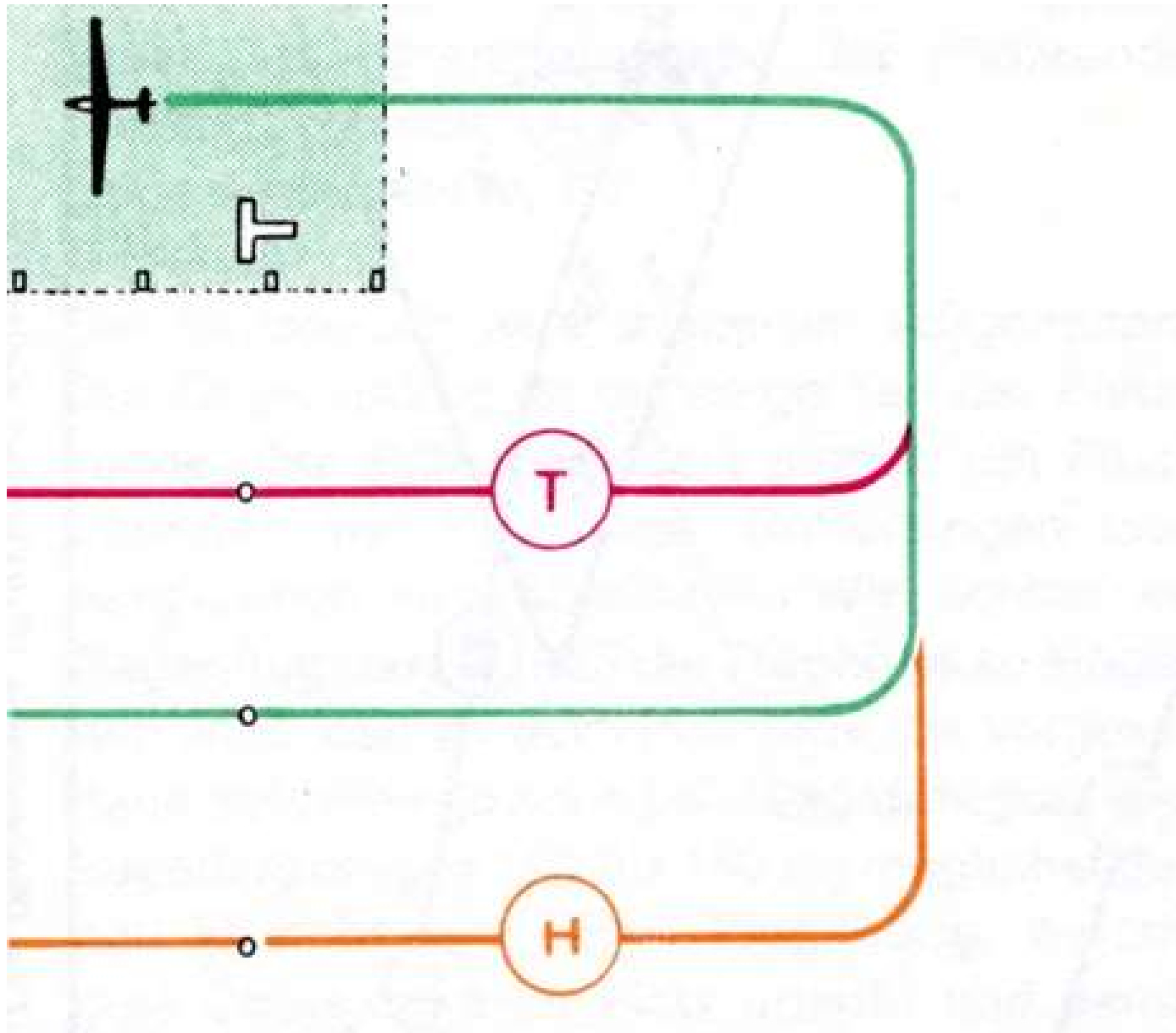
- Nuo ~0,15 m aukščio sklandytuvą paliečia žemę

– Rieda

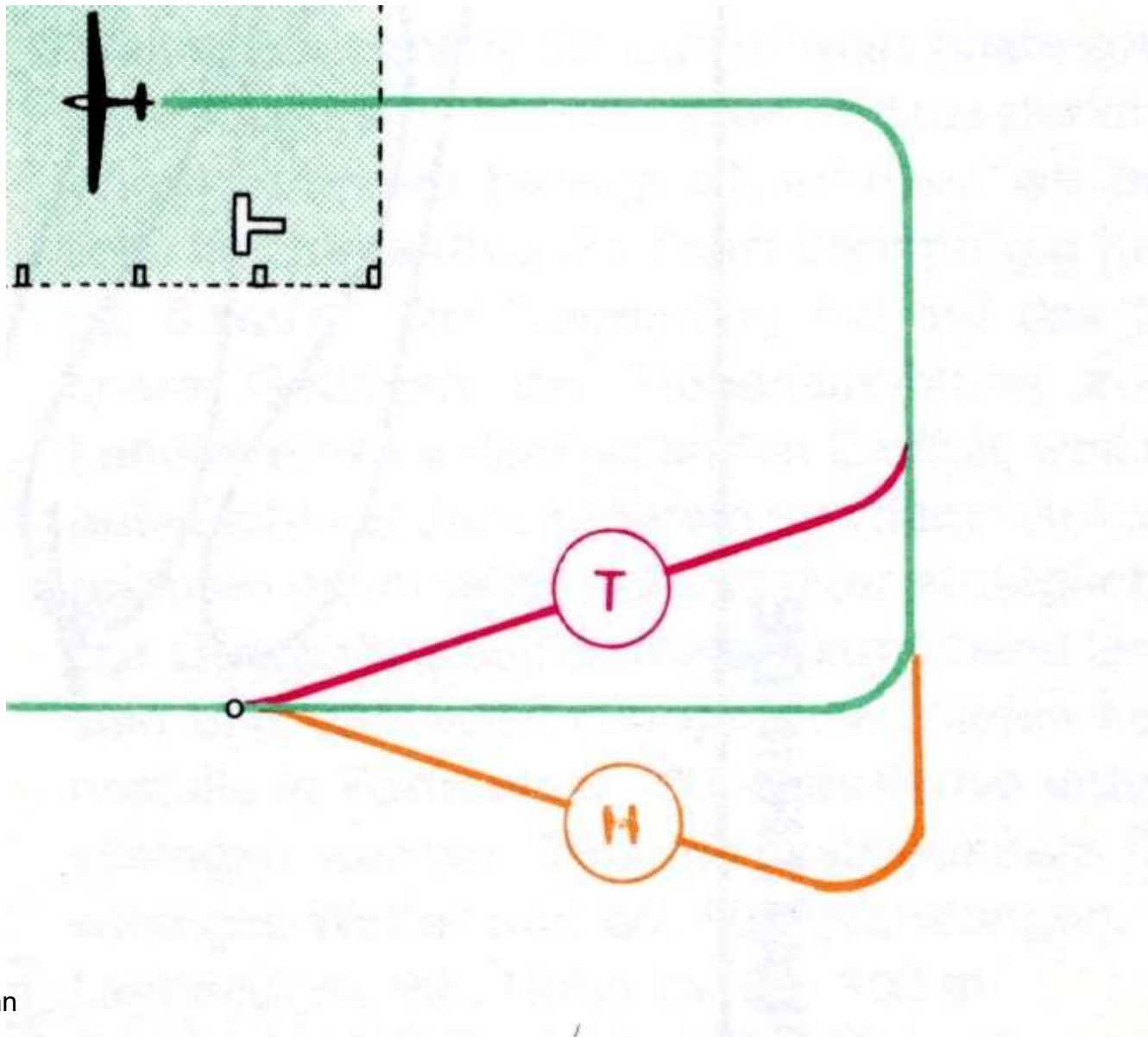
- Nuo žemės palietimo vietos iki sustojimo



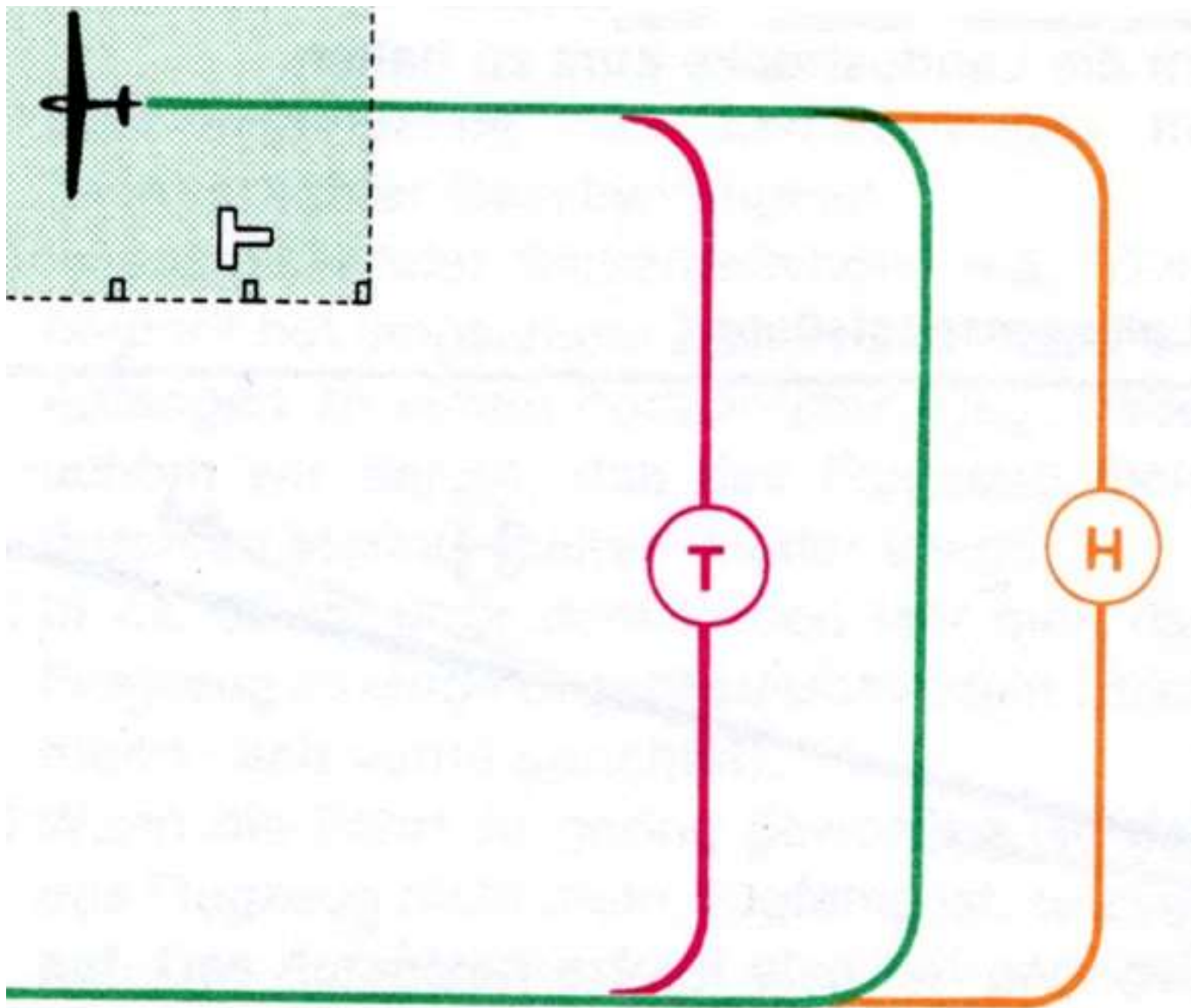
Tūpimo manevro koregavimas



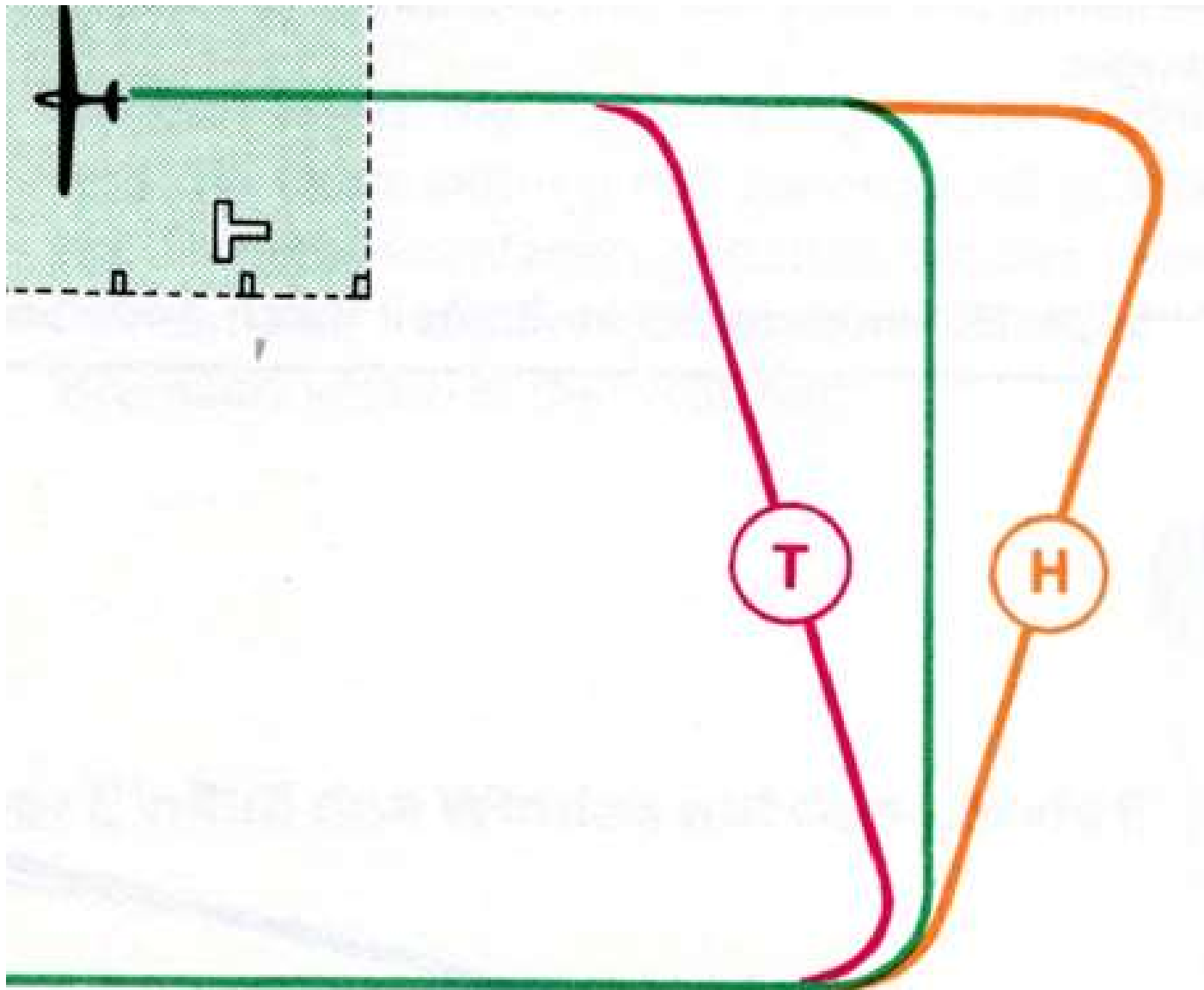
Tūpimo manevro koregavimas



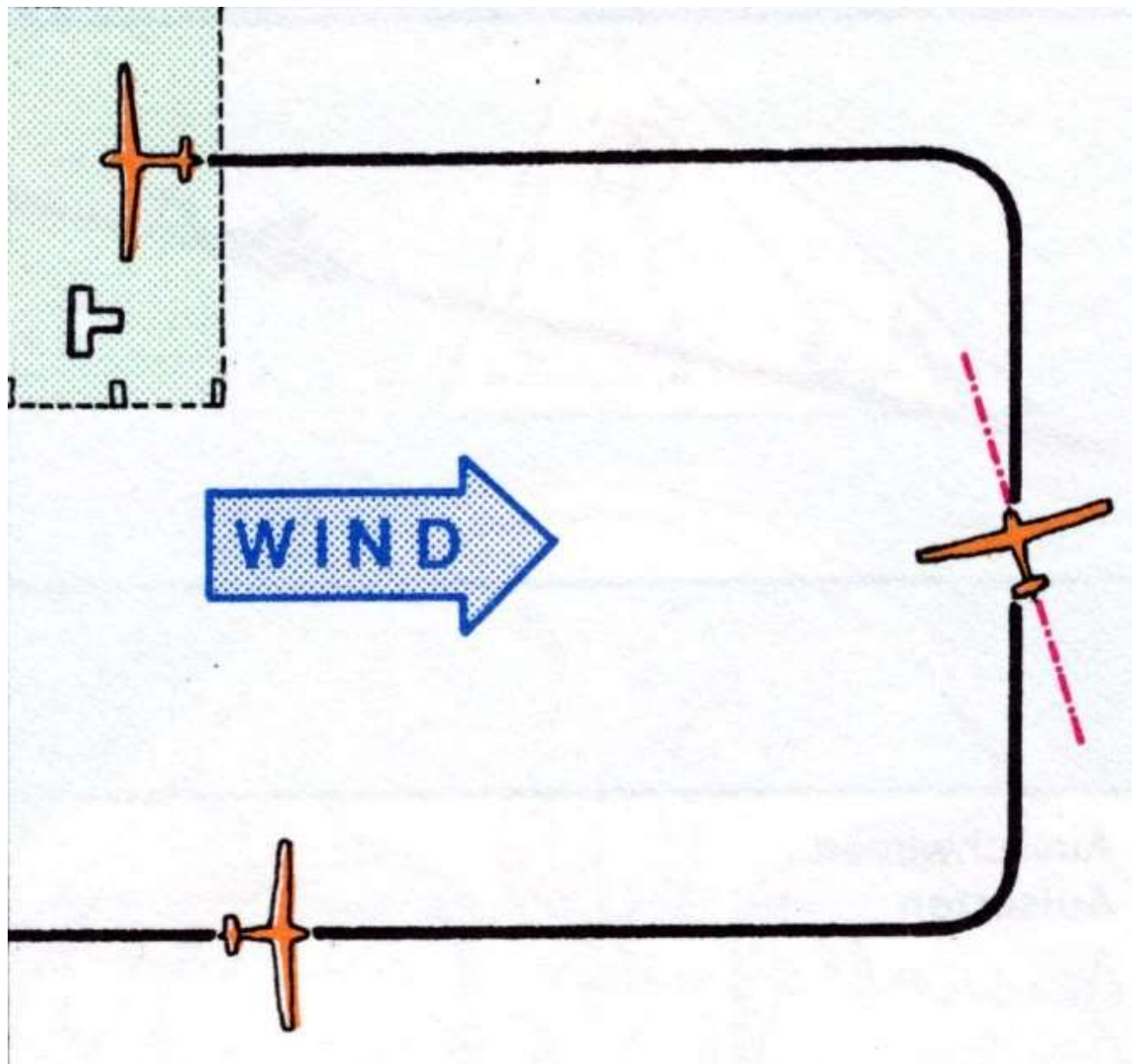
Tūpimo manevro koregavimas



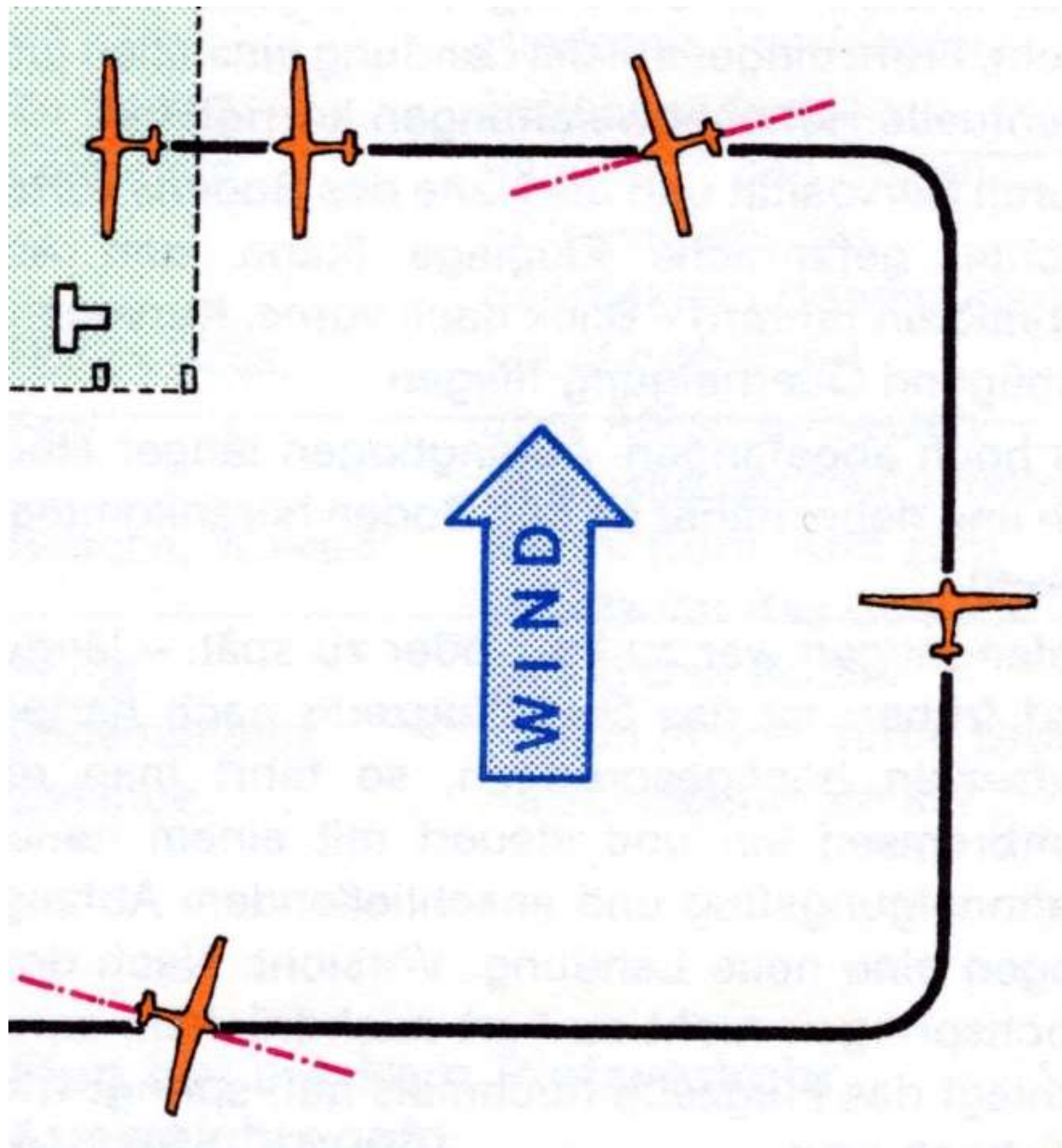
Tūpimo manevro koregavimas



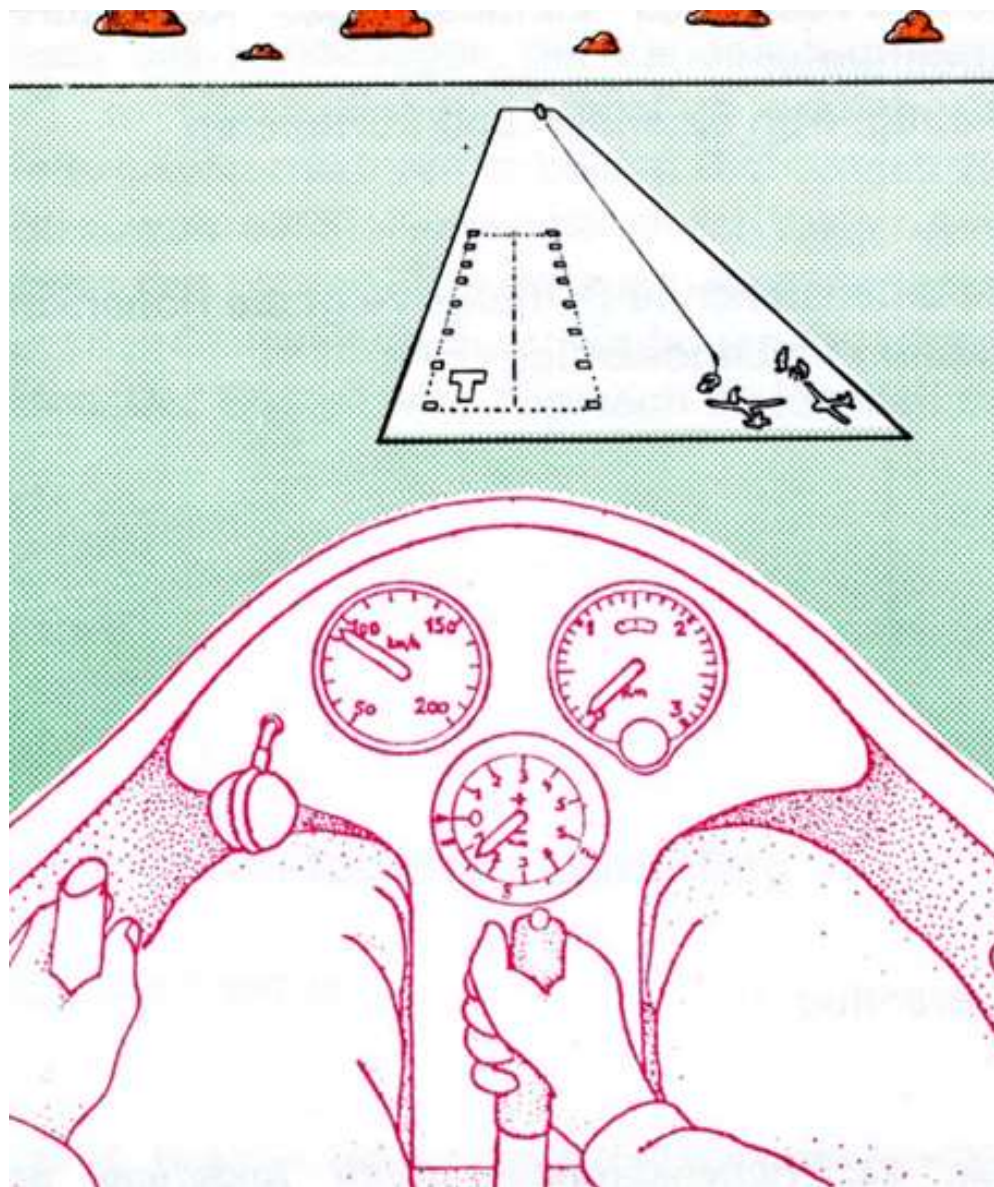
Priešinis vējas



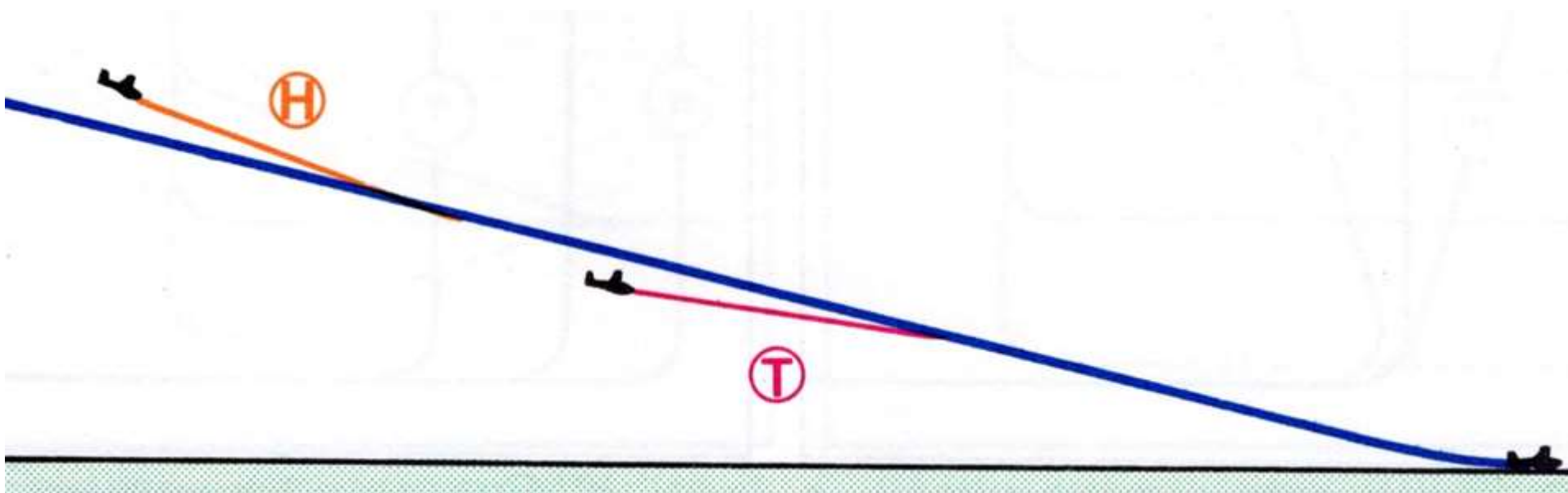
Šoninis vējas



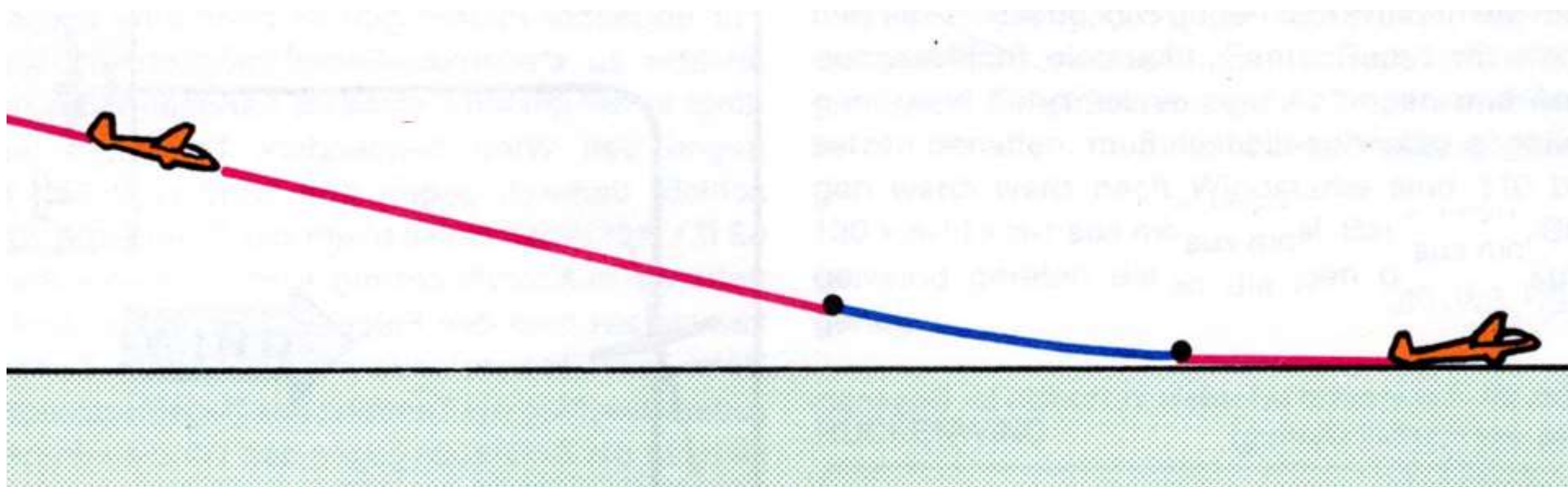
Sklendimas tūptinėje



Tūptimēs koregavimas



Lyginimas, išlaikymas, tūpimas

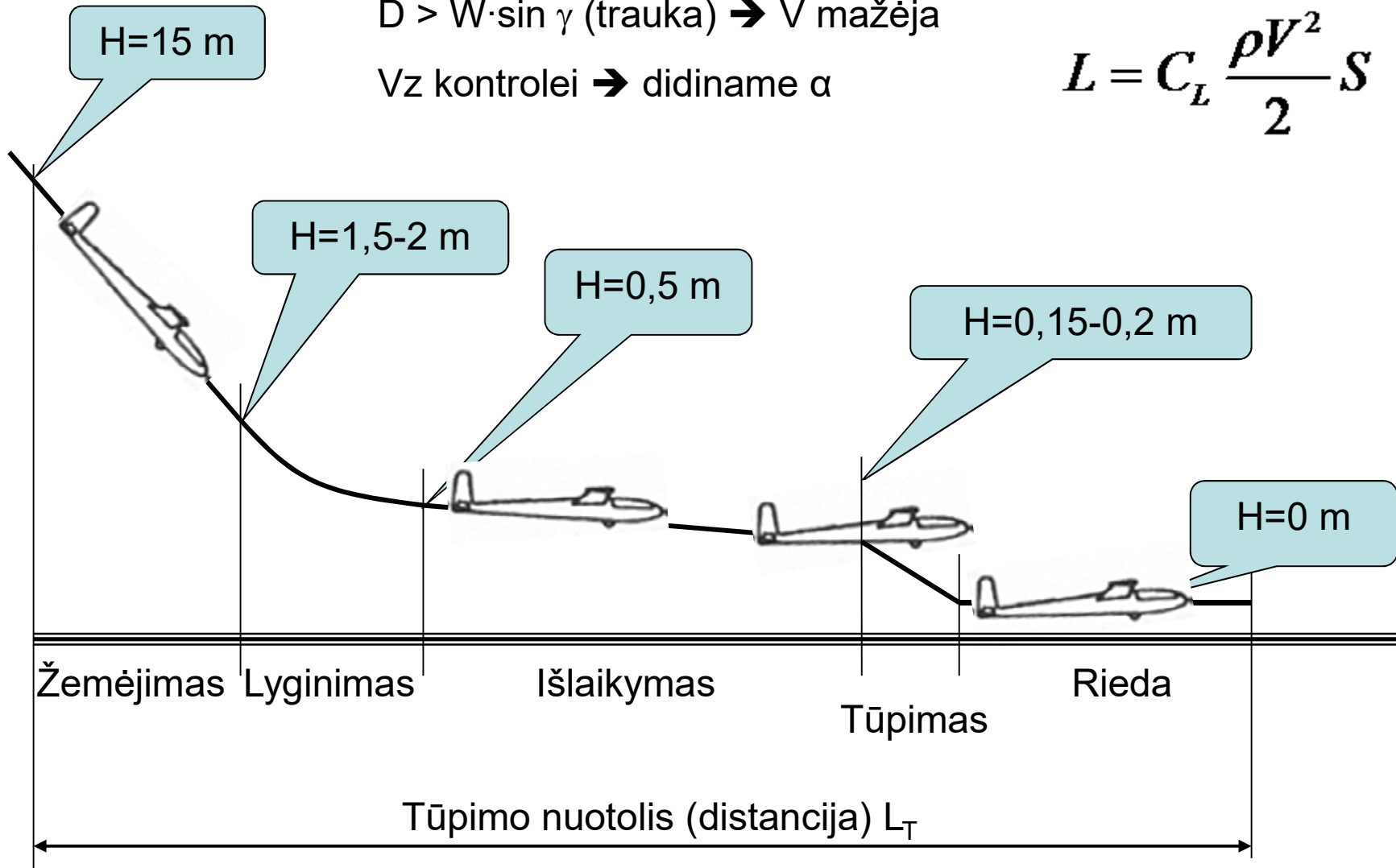


Tūpimo etapai

$D > W \cdot \sin \gamma$ (trauka) $\rightarrow V$ mažėja

V_z kontrolei $\rightarrow$ didiname α

$$L = C_L \frac{\rho V^2}{2} S$$



Tupdimu klaidos

- Aukštas išlyginimas
 - Išlyginimas užbaigtas aukštai ($> \sim 0,5$ m) arba sklandytuvą pradėjo aukštėti
 - Greitas vairalazdės traukimo “į save” tempas
 - Taisydas: užlaikyti vairalazdę, kai sklandytuvą nužemės – tęsti išlyginimą ir tupimą
- Žemas išlyginimas
 - Išlyginimas pradėtas vėlai
 - Taisydas: pagreitinti vairalazdės traukimo “į save” tempą
- Pakartotinas tupimas – “ožys”
 - Priežastis: didelis Vz ir lėtas vairalazdės traukimas išlaikimo metu
 - Taisydas: užlaikyti vairalazdę, kai sklandytuvą nužemės – tęsti tupimą. Dėl sumažėjusio greičio reikės DIDELĖS VAIRŲ EIGOS!!

2.6.4 Tūpdimo kļaidos

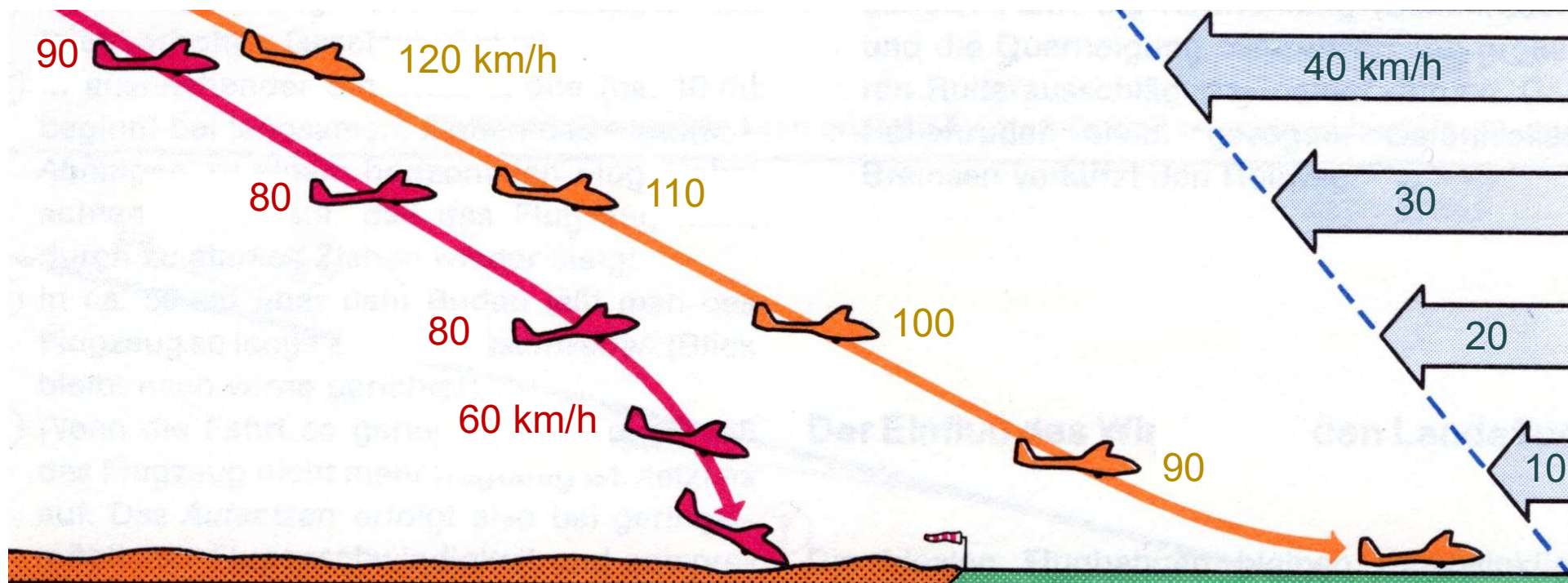


Aukštas išlyginimas



“Ožys”

Tūpimas pretī stiprū vējā



MANEVRINĖ PERKROVA n

- Manevruojant
- Blaškoje
- Posūkyje
- Keičiantis α
- Greičių ribojimai skrendant

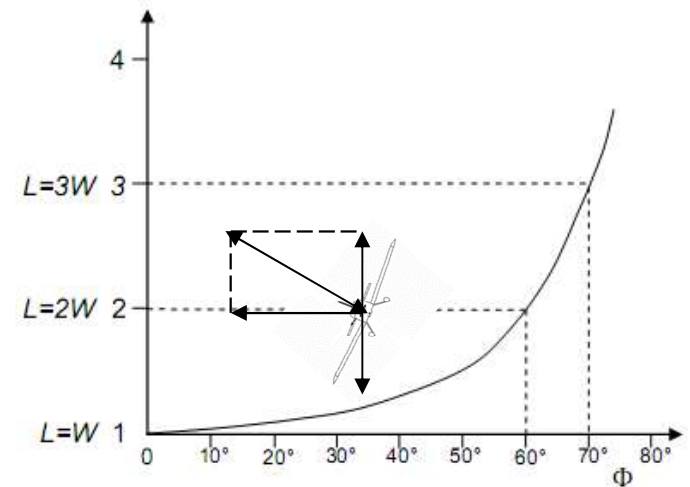
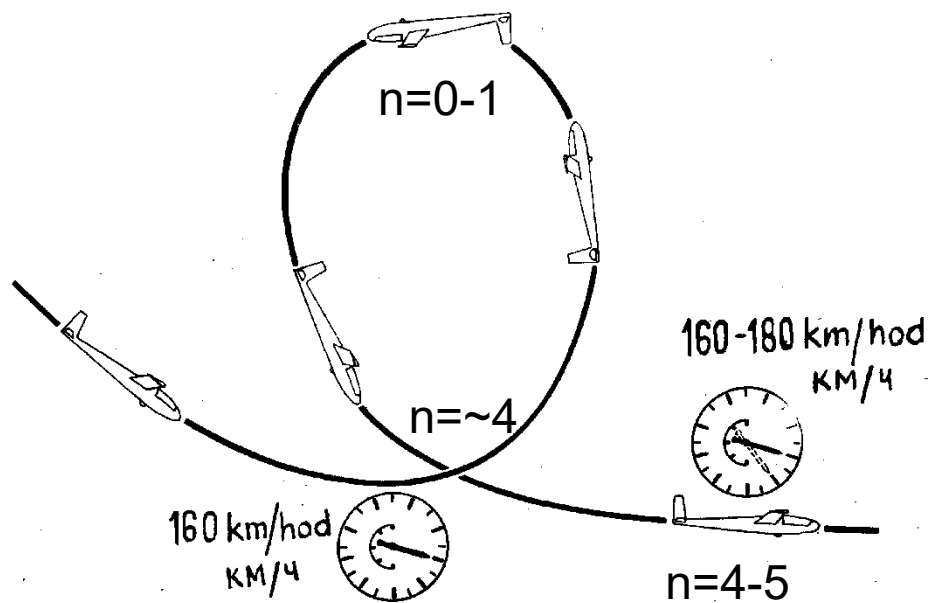
MANEVRINĖ PERKROVA n

Manevruojant
Posūkyje
Keičiantis α

$$n = \frac{L}{W}$$

$$L = C_L \frac{\rho V^2}{2} S$$

$$n = \frac{1}{\cos \phi}$$

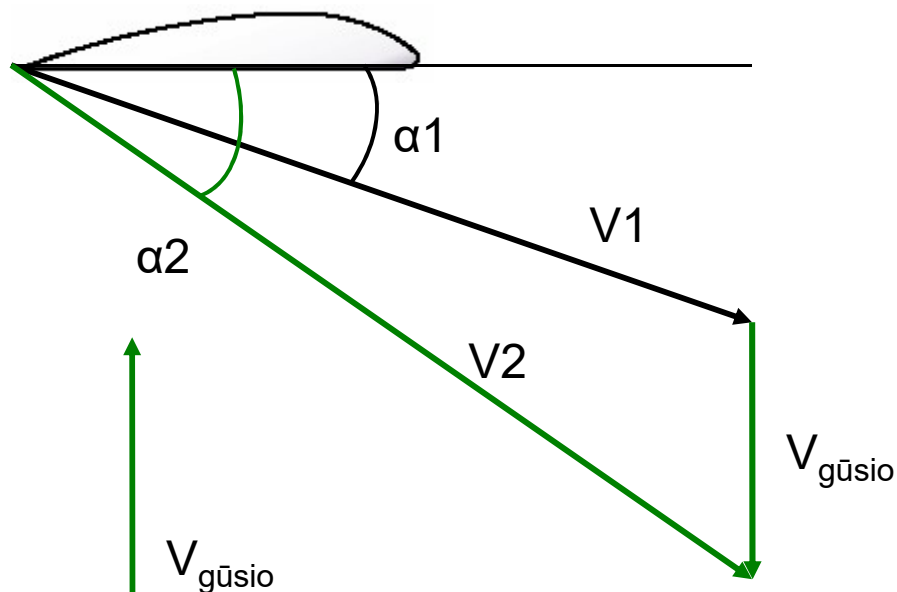


GŪSIŲ PERKROVA n

- Blaškoje
 - stiprumo atsarga turi būti pakankama, kad patekęs į vertikalų oro gūsį išlaikytų padidėjusias apkrovas
 - skrydžio greitis turi būti pakankamas, kad patekus į vertikalų oro gūsį nebūtų viršytas kritinis atakos kampa
- Greičių ribojimai skrendant (η atsarga)
 - Manevrinis greitis V_A (L-13: 145 km/h)
 - Maksimalus leistinas greitis (L-13: 253 km/h) – ribojamas dėl dinaminio slėgio ir sklandytuvo konstrukcijos stiprumo

GŪSIŲ PERKROVA n

- Vertikalus oro gūsis
 - padidėja $\alpha \rightarrow$ padidėja $L \rightarrow$ padidėja n
 - $V_2 > V_1$



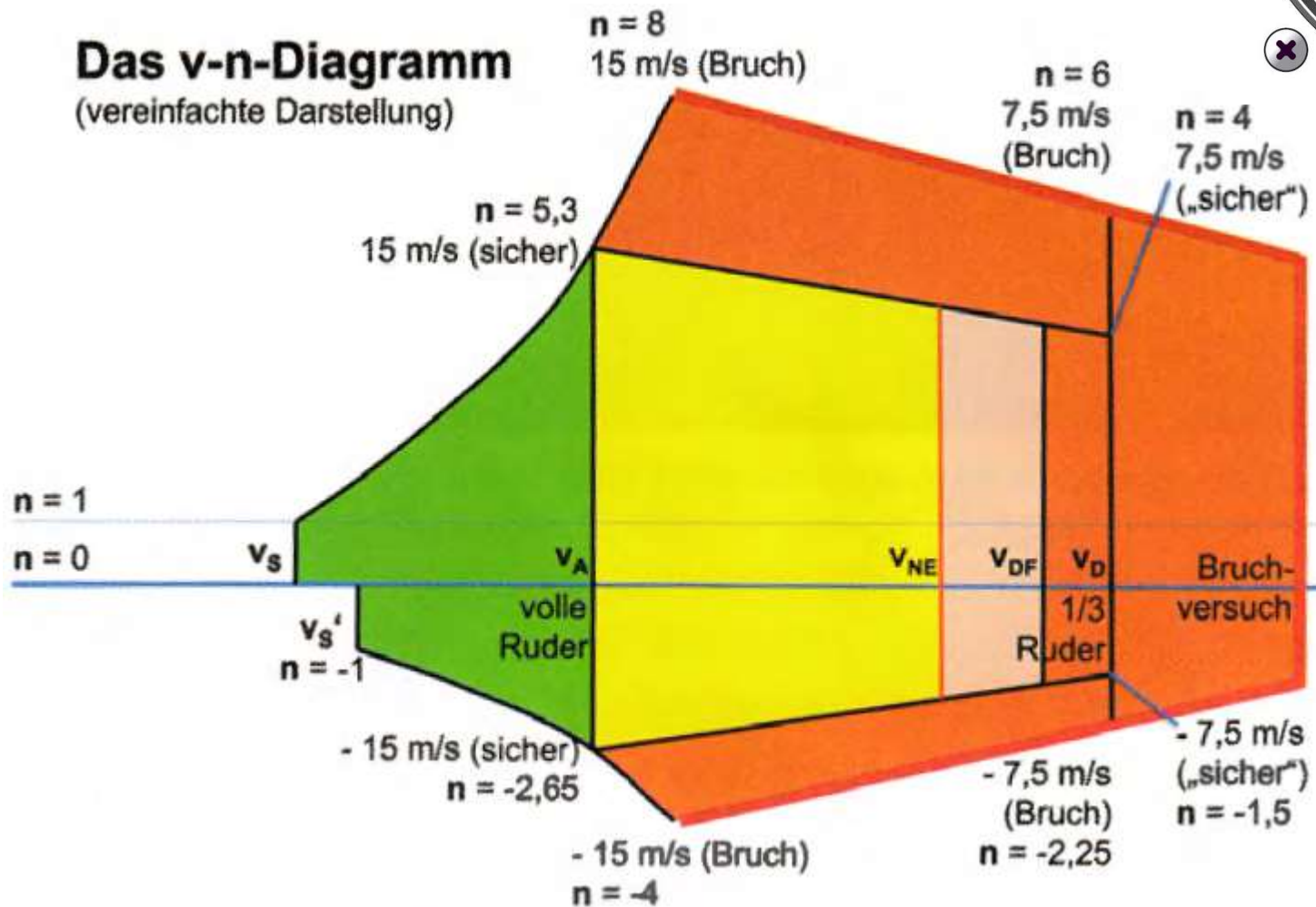
$$n = \frac{L}{W}$$

$$L = C_L \frac{\rho V^2}{2} S$$

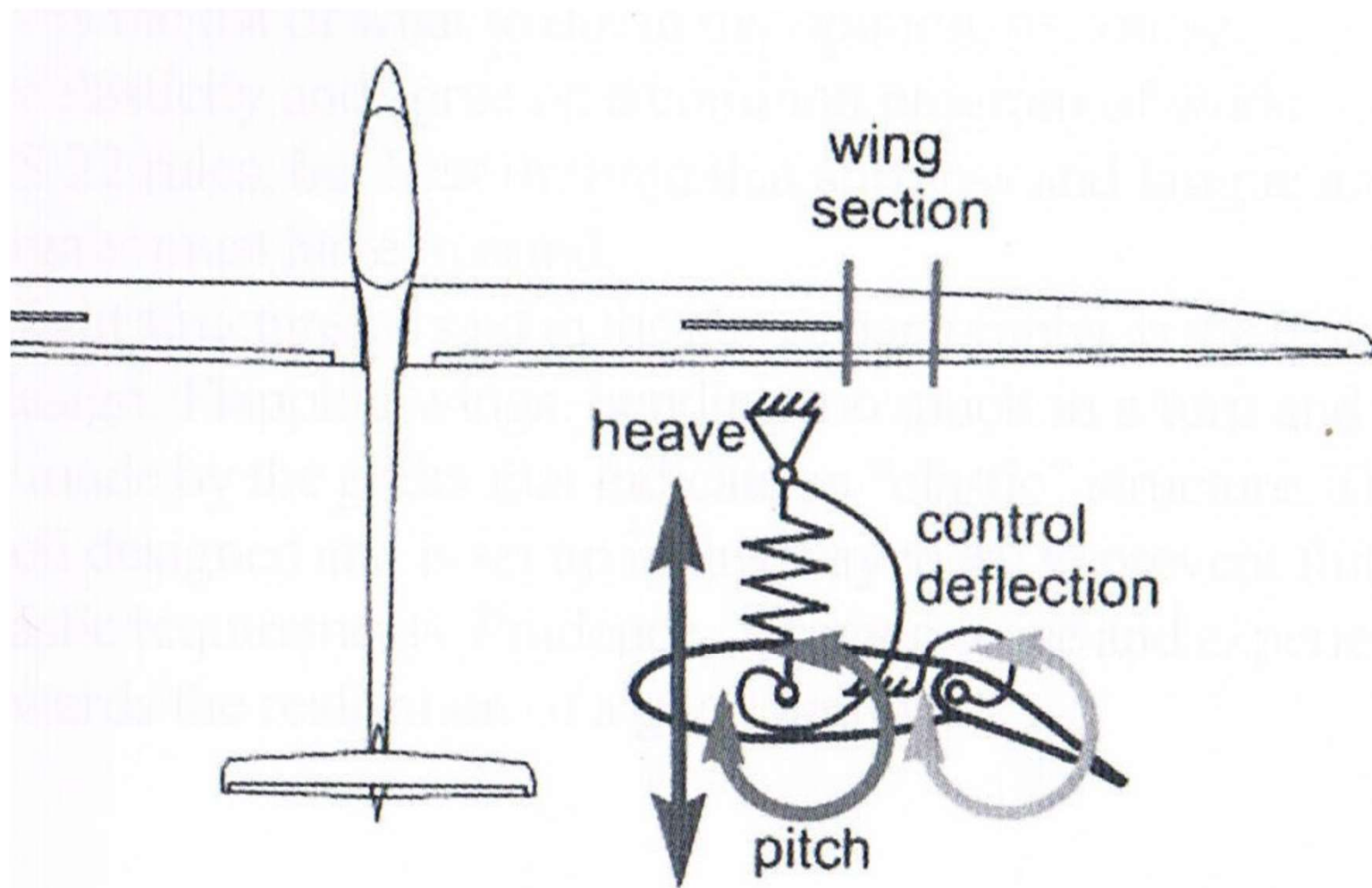
Skrydžio režimai



Das v-n-Diagramm
(vereinfachte Darstellung)



Flateris



SB 9 Flateris

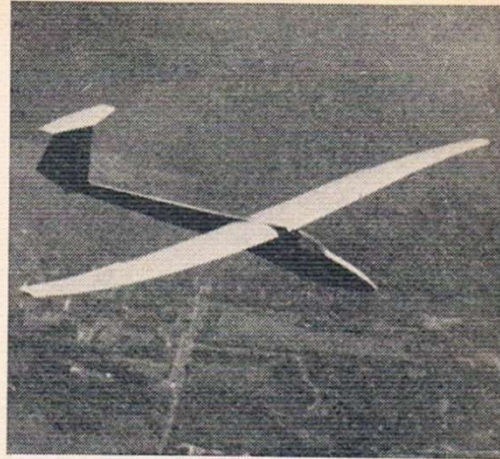


Figure 1 and 2: Anti-symmetric wing bending oscillation $f=3.3$ Hz at $V=90$ km/h.

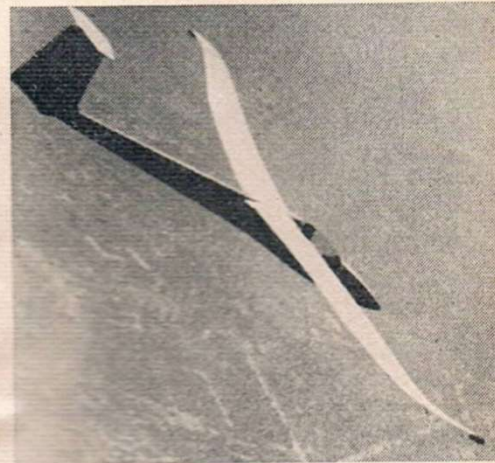
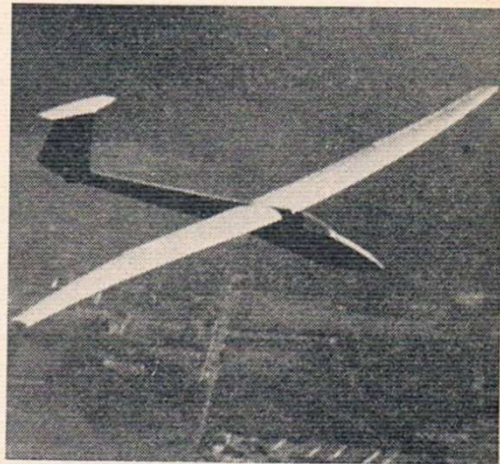


Figure 3 and 4: Anti-symmetric wing bending oscillations $f=5.8$ Hz at $V=140$ km/h.

