

AERODYNAMIIKKA - PERUSKÄSITTEET JA MÄÄRITELMÄT

Aerodynamiikassa tarkastellaan niitä voimia, jotka syntyvät tai muuttuvat kun:

- a) liikkeessä oleva ilma kohtaa paikallaan olevan kiinteän kappaleen
- b) kiinteä kappale liikkuu ilmassa
- c) ominaisuuksiltaan erilaiset ilmavirtaukset vaikuttavat toisiinsa

Se ilmakehän alin osa jossa lennämme, on nimeltään **troposfääri**.

Aerodynaamiset voimat riippuvat mm. seuraavista tekijöistä:

paine =	symboli ("P") =	voima / pinta-ala.
lämpötila =	- " - ("T") =	aineen molekyylien liikkuvuus
tiheys =	- " - ("ρ") =	massa / tilavuus

PV/T = Vakio

ICAO:n standardi-ilmakehä

ICAO:n standardi-ilmakehän tärkeimmät oletusarvot

ICAO on laatinut tiettyjä oletusarvoja muodostaen **standardi-ilmakehän** (International Standard Atmosphere).

Standardi-ilmakehä on **vertailupohja**, joka helpottaa ilmatieteellisten ja aerodynaamisten mittaustulosten käsittelyä.

Tärkeimmät ISA:n oletusarvot ovat lämpötila, ilman pystysuora lämpötilagradientti sekä ilmanpaine.

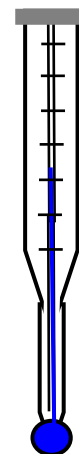
Ilmanpaine - voima / pinta-ala

- Ilmanpaine on tietyn korkeuden yläpuolella olevan ilmapatsaan paino.
- **Normaali-ilmakehän** paine MSL tasolla on **1013,25 hPa** = 29,92 in Hg.
- **Ilmanpaine alenee korkeuden lisääntyessä**
- Ilmanpaine vaikuttaa ilman tiheyteen – **kun paine laskee, tiheys laskee**
- N. 5,5 km korkeudessa paine on puolet verrattuna MSL tasoon.

Lämpötila

Lämpötila voidaan ilmaista eri asteikoilla, esimerkiksi:

	jään sulamis- lämpötila	ICAO:n std lämpötila MSL	veden kiehumis- lämpötila
Celsius	0° C	+ 15° C	+100° C
Fahrenheit	+32° F	+ 59° F	+212° F
Kelvin	+ 273° K	+ 288° K	+ 373° K



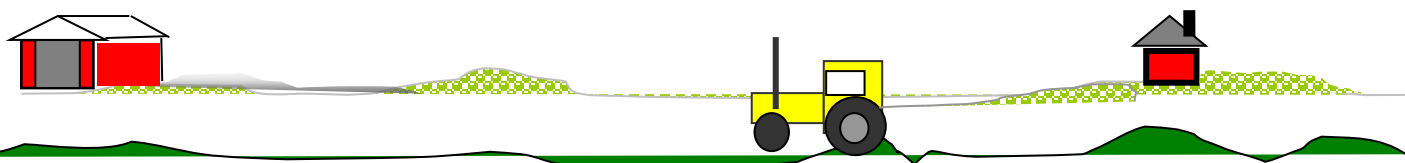
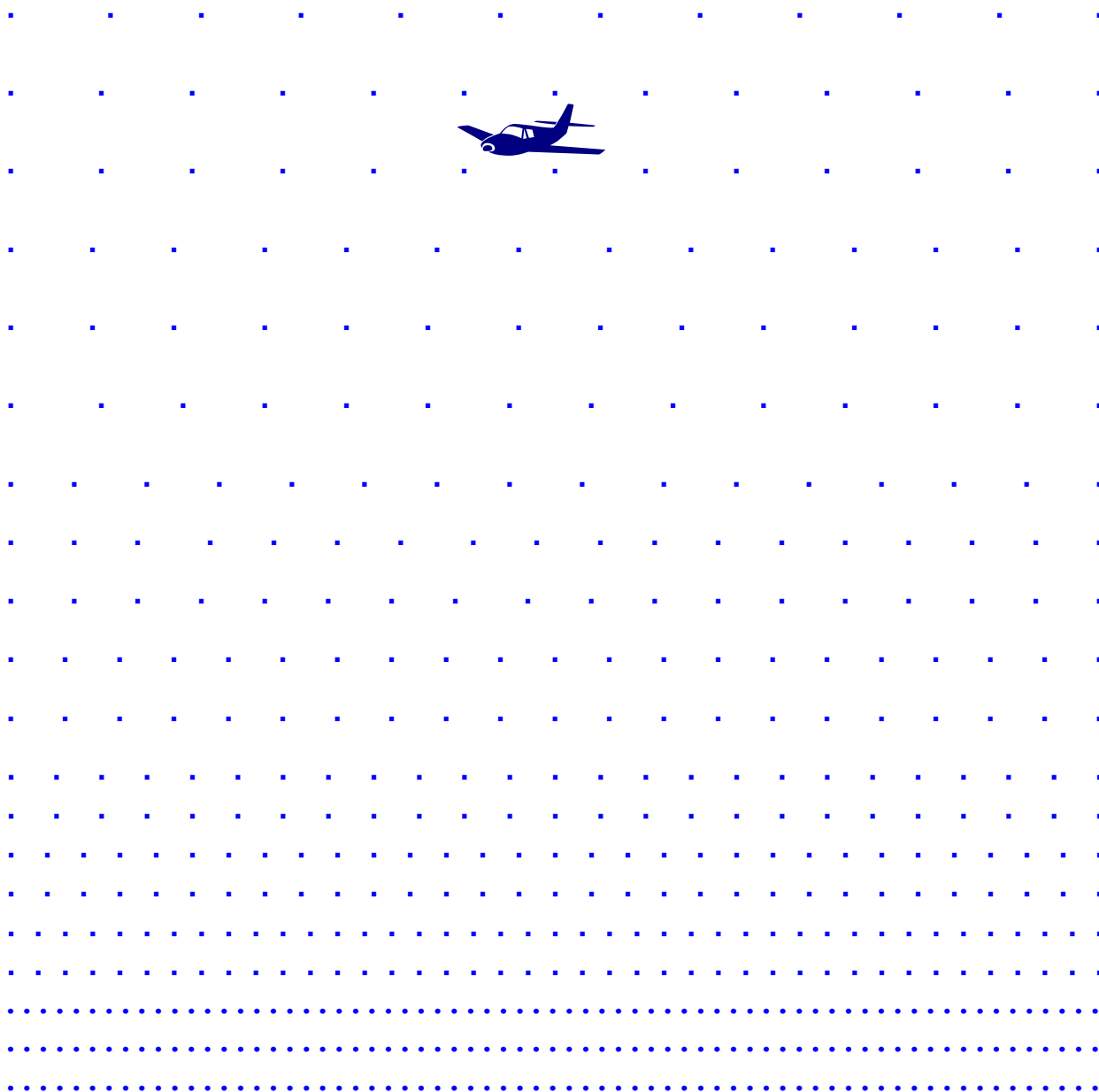
- **Lämpötila alenee tasaisesti korkeuden lisääntyessä ISA:ssa.**
- Lämpötila vaikuttaa ilman tiheyteen – **lämpötila nousee = tiheys laskee**
- Lämpötila on n. 5000 FT:ssa laskenut +5,09° C:een = -0,65°C/100m.

Ilman tiheys

- Ilman tiheys on ainemäärän massan suhde tilavuuteen eli $\rho = m/v$.
- ICAO:n normaali-ilmakehän tiheys meren pinnalla on $1,225 \text{ kg/m}^3$.

- Ilman tiheys vähenee korkeuden kasvaessa ilmanpaineen laskun takia

Noin 6,5 km:ssä tiheys on vain puolet MSL tasolla olevasta tiheydestä (ilmamolekyylit ovat harvassa).



Fysiikan yleinen kaasulaki - johtopäätöksiä ilman tiheydestä:

Paineen, lämpötilan ja tiheyden välinen yhteys: Kun tiheys muuttuu:

Ilmanpaine nousee → tiheys kasvaa
 Lämpötila nousee → tiheys vähenee
 Kosteus lisääntyy → tiheys vähenee

Tiheydellä on paljon merkitystä liittyen lentokoneiden suoritusarvoihin.

Painekorkeus ja tiheyskorkeus:

Painekorkeudella tarkoitetaan standardi-ilmakehän mukaista korkeutta.

Tiheyskorkeus on vertailukorkeus, joka ilmaisee ilman tiheyden.

Jos esimerkiksi todellinen tiheys on ICAO:n standardi-ilmakehän arvoon verrattuna pienempi, sanotaan että tiheyskorkeus on suuri.

Suuri tiheyskorkeus:

- ilma on huokoista
- kone nousee huonosti
- moottori kehittää heikosti tehoa
- kone tuntuu "veltolta"

= kone käyttäytyy niin kuin se lentäisi painekorkeutta korkeammalla

Pieni tiheyskorkeus:

- ilma on tiheätä
- kone nousee hyvin
- moottori kehittää hyvin tehoa

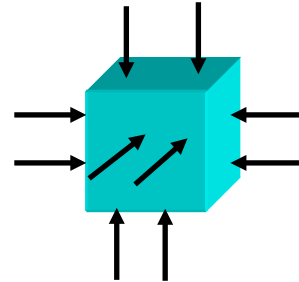
= kone käyttäytyy niin kuin se lentäisi painekorkeutta alempana

Ilmanpaineet

Staattinen paine:

Lepotilassa oleva ilma aiheuttaa **tasaisen paineen** kohtisuoraan minkä tahansa kappaleen **kaikkia pintoja vastaan.**

Tätä nimitetään staattiseksi paineeksi (p).



Dynaaminen ”paine”:

Dynaaminen paine ei tarkoita mitään painetta vaan se on ilman liike-energian mittari.

Sillä selvitetään paine-erojen ja ilman liike-energian välistä yhteyttä.

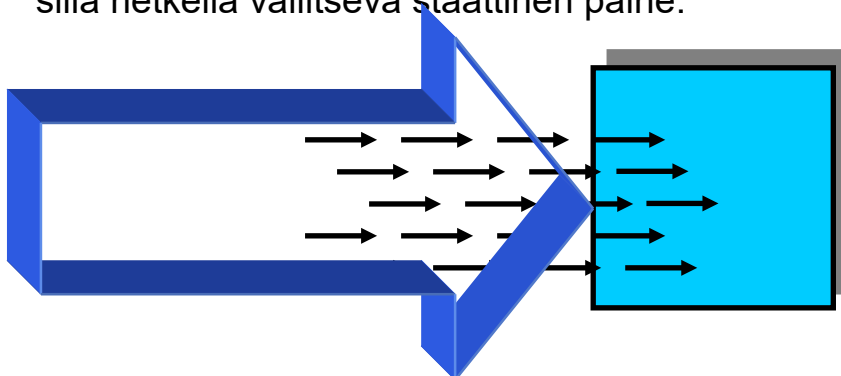
Dynaaminen paine (q) eli **ilman liike-energia** on puolet ilman massa-tiheydestä kertaa ilmavirran **nopeus neliöön.**

Tästä seuraa, että **aerodynaamiset voimat** kasvavat ilmanopeuden **neliön suhteessa.**

Ilman liike-energia:

Liikkeellä oleva ilma aikaansaa **paikallisia paine-eroja** kun se kohtaa kiinteän kappaleen.

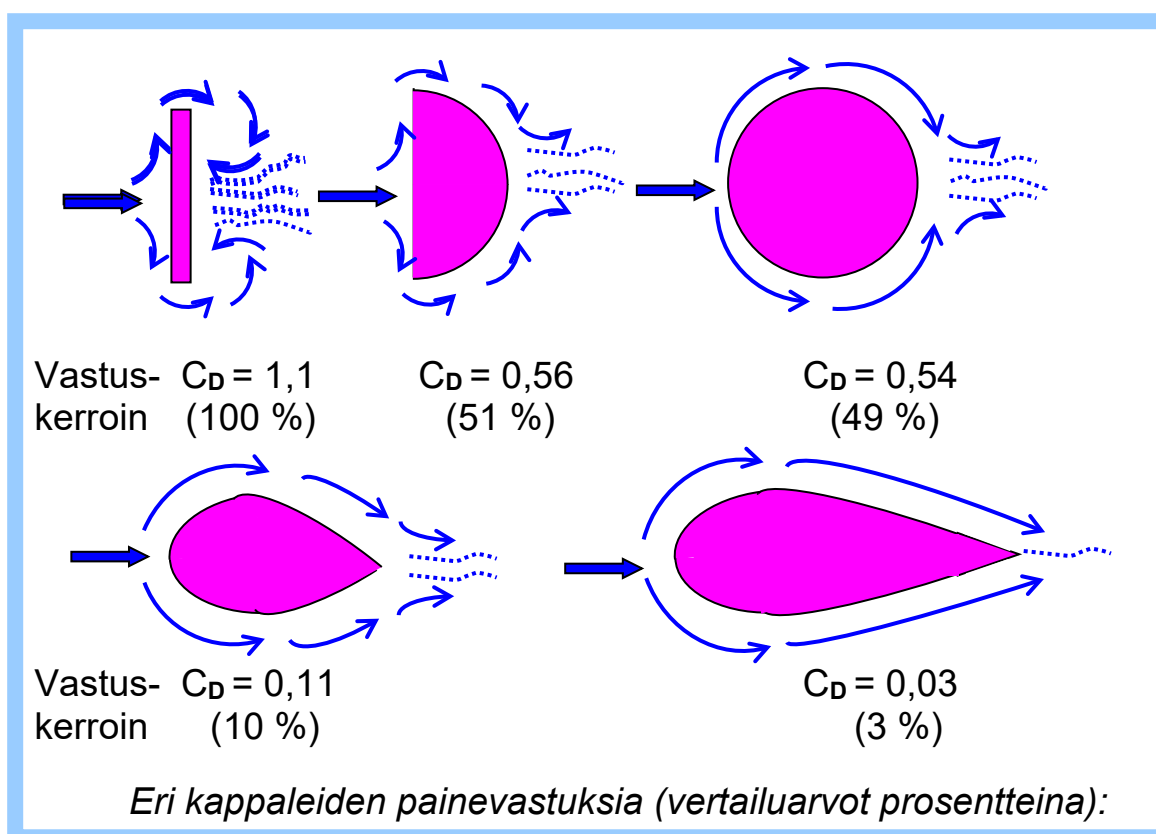
Dynaaminen paine on suure, joka konkreettisesti **voidaan mitata vasta kun virtaus pysäytetään**, ts. mitattava paine on eri havaintopisteissä sillä hetkellä vallitseva staattinen paine.



Ilmanvastus:

Ilmanvastuksen perusmuodot:

- **painevastus**, joka muodostuu lähinnä muotokappaleen etu- ja takapuolella syntyvistä paine-eroista.
- **kitkavastus**, joka muodostuu muotokappaleen pinnan epätasaisuudesta ja sen ympäröivästä rajakerroksesta.
- painevastus ja kitkavastus yhdessä muodostavat siiven **profiilivastuksen (C_{D0})** eli ns. haitallisen vastuksen.
- lyhyt ja paksu esine kehittää suurempaa painevastusta kuin pitkä virtaviivainen kappale.

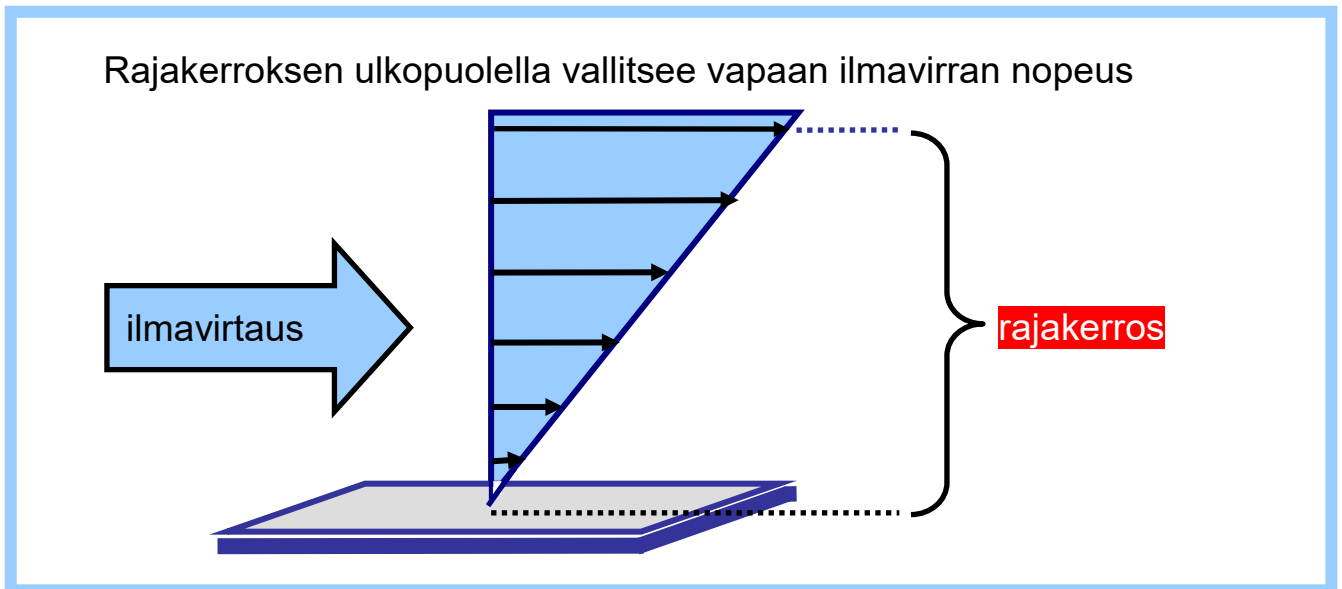


Mitä **virtaviivaisempi** muotokappale on, sitä kapeammaksi jää jättöpyörteiden irtoamisalue, mikä tarkoittaa **pienempää painevastusta**.

Ilmanvastus on myös riippuvainen ilman tiheydestä.

Mitä tiheämpi ilma on sitä suurempi on ilmanvastus.

Rajakerros ja kitkavastus:



Mitä rajakerroksessa tapahtuu:

Kun ilma virtaa lähellä kiinteän kappaleen pintaa ja sen suuntaisesti:

- aivan **pinnassa** olevat **ilmamolekyylit pysähtyvät**
- pinnassa oleva ilmakerros aiheuttaa kitkaa seuraavalle kerrokselle
- seuraava kerros liikkuu taas sitä seuraavan kerroksen vaikutuksesta jne.
- riittävän etäällä pinnasta saavutetaan vapaan ilmavirran nopeus
- **kerrosta, jossa virtaus on hidastunut, nimitetään rajakerrokseksi**

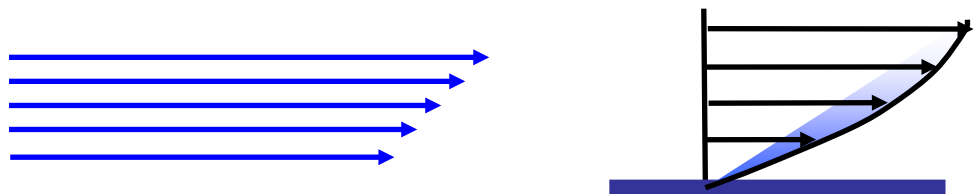
Johtopäätöksiä rajakerroksesta:

- rajakerros aiheuttaa kitkavastuksen
- rajakerroksen paksuus määräytyy kappaleen pinnan sileydestä
- rosoisella pinnalla on paksu rajakerros ja suuri kitkavastus
- siksi on tärkeää, että siipi on puhdas (vapaa huurteesta ym.)
- **huurteisella siivellä on vaarallista lentää – nostovoimahäviö!**

Laminaarinen virtaus

- Kun ilman virtaus on häiriötöntä ja kitkatonta virtaus on laminaarinen

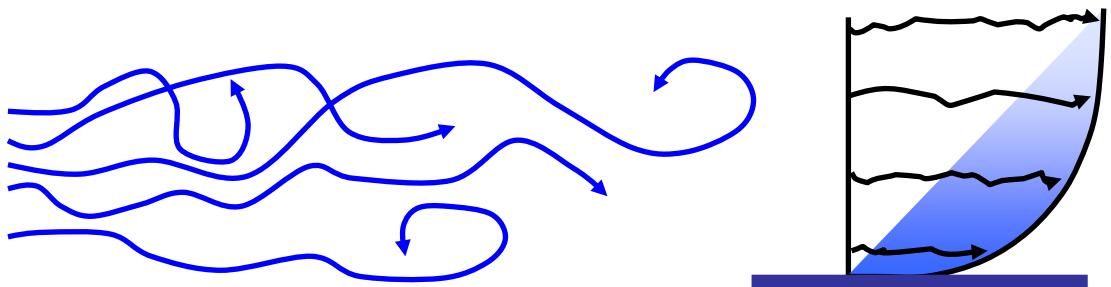
- Laminaarisessa virtauksessa **ilmamolekyylit etenevät samansuuntaisina**
- Ilmamolekyylien eteneminen on siis suoraviivaista
- Laminaarisessa virtauksessa **rajakerros on ohut**
- Rajakerroksen nopeusprofiili on jokseenkin parabelimuotoinen



Turbulenttinen eli kitkallinen virtaus

- Kitkallisessa virtauksessa ilmamolekyylit liikkuvat epäjärjestyksessä

- Ilmamolekyylien epämääräiset liikkeet aiheuttavat **keskinäistä kitkaa**
- Ilmamolekyylit törmäävät toisiinsa aiheuttaen **pyörteisyyttä**
- Turbulenttisessa virtauksessa **rajakerros on verraten paksu**
- Rajakerroksen nopeusprofiili on pyöreämpi laminaariseen verrattuna

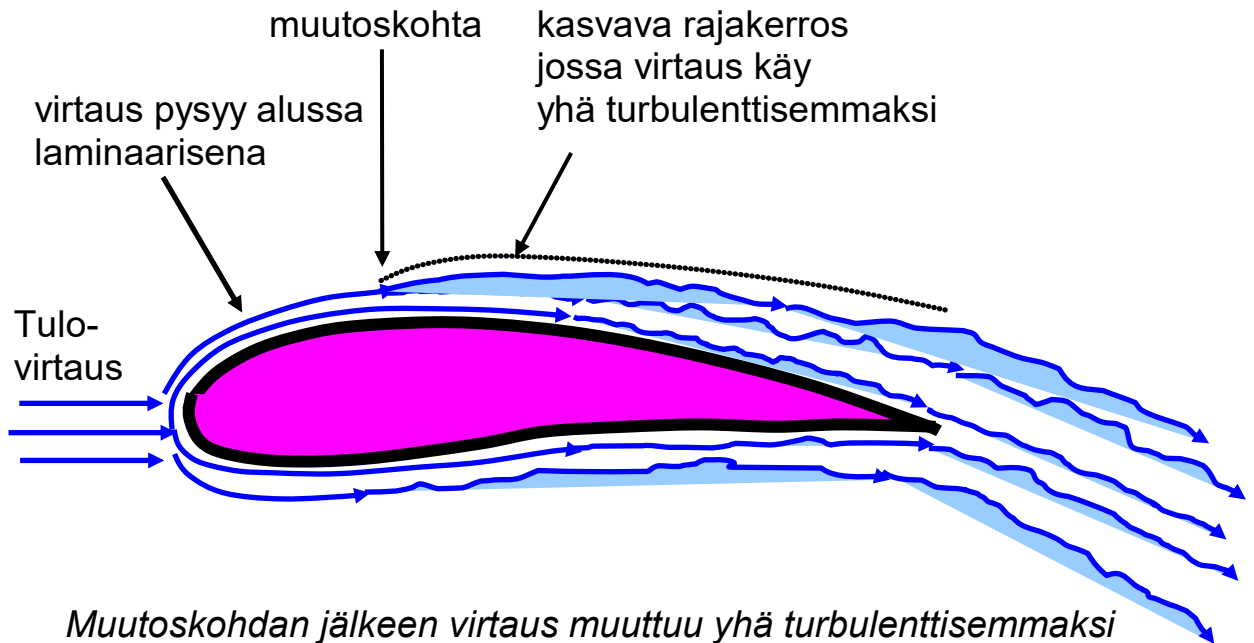


Lentokoneen siiven ylä- ja alapinnalla kulkeva ilma muodostaa sekä laminaarista että turbulenttista virtausta.

Virtaus lentokoneen siiven ympärillä – eri profiilityytit

1 Koverat turbulenssiprofiilit

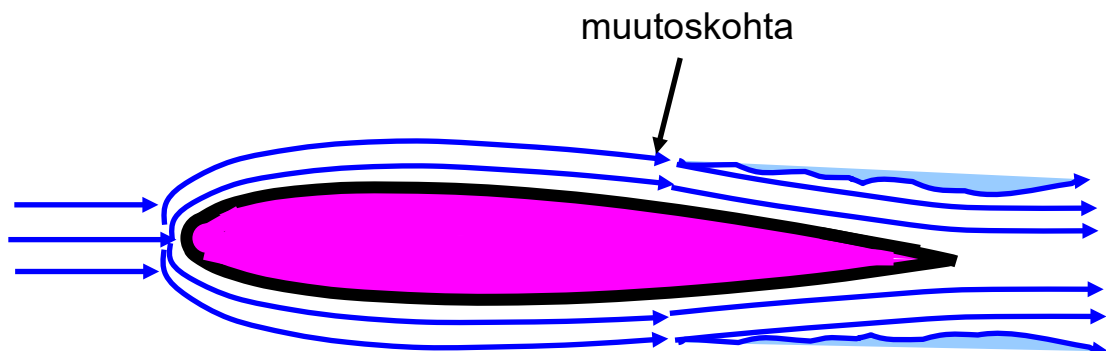
Virtausta tarkasteltaessa on käytännöllistä valita poikkileikkauskuva siivestä, jota nimitetään siipiprofiiliksi. Alla n.s. **kovera turbulenssiprofiili**.



2 Laminaariprofiilit

Alla on **symmetrinen laminaariprofiili**. Laminaariprofiilin muutoskohta sijaitsee taaempänä verrattuna turbulenssiprofiiliin.

Laminaariprofiilit ovat herkkiä epäpuhtauksille, jotka huomattavasti pystyvät heikentämään profiilin aerodynaamisia ominaisuuksia.



Laminaariprofiilissa ilmvirtaus pysyy laminaarisena pitempään ja rajakerros jää kapeammaksi. Kitkavastus jää melko pieneksi.

Bernoullin laki ja venturi-ilmiö

Sveitsiläinen fyysikko, Daniel Bernoulli (1700–1782) totesi että:

Laminaarisessa virtauksessa **paine- ja liike-energian summa** $p + q = \text{vakio}$,

jossa: p = staattinen paine ja

$q = (\frac{1}{2} \rho V^2)$ = dynaaminen paine (eli ilman liike-energia)

Tästä teemme seuraavat johtopäätökset:

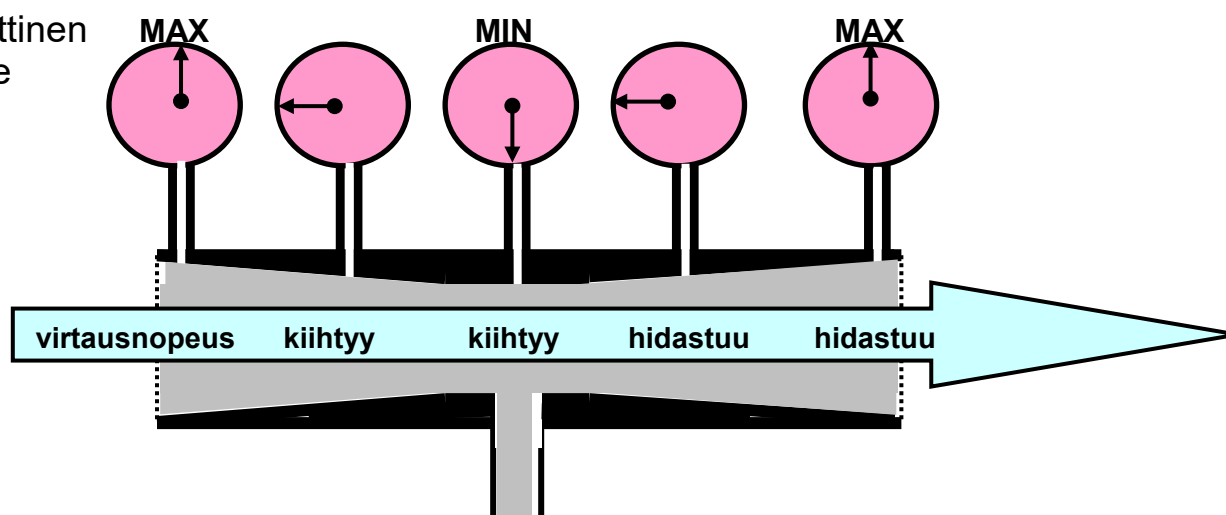
kun virtausnopeus kasvaa → staattinen paine pienenee
kun virtausnopeus pienenee → staattinen paine suurenee

Venturi-ilmiö

Venturiputki = suora putki, joka on supistettu keskeltä

- Oletamme, että putken seinämässä on sarja reikiä pituussuunnassa
- Jokainen reikä on yhdistetty painemittariin
- Putken etupään kautta syötetään ilmaa tietyllä virtausnopeudella
- **Ilmavirran nopeus kasvaa kohti venturiputken kapeinta kohtaa**
- **Putken ahtaimmassa kohdassa staattinen paine on alhaisin**
- Paine palautuu takaisin alkuperäiseen arvoonsa kun se jättää putken

Staattinen
paine

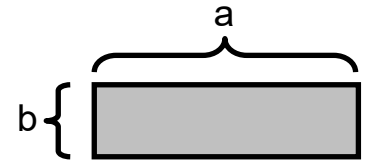


Siiven ulkomuoto – eri rakenneratkaisuja

Sivusuhte =

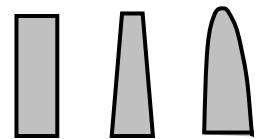
Siiven jännevälin (a) suhde leveyteen (b)

Tai tarkemmin: **jännevälin neliön suhde siipipinta-alaan**

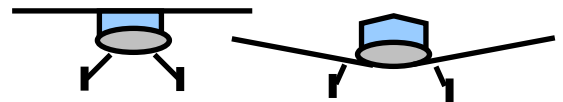


Siiven muoto =

tasaleveä, trapetsimuotoinen, elliptinen

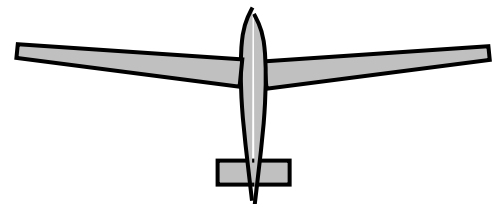
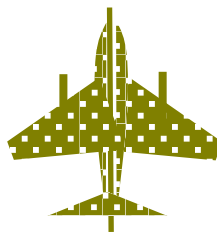


Suora siipi – V-kulmalla rakennettu siipi



Siiven nuolimuuoto

positiivinen tai negatiivinen



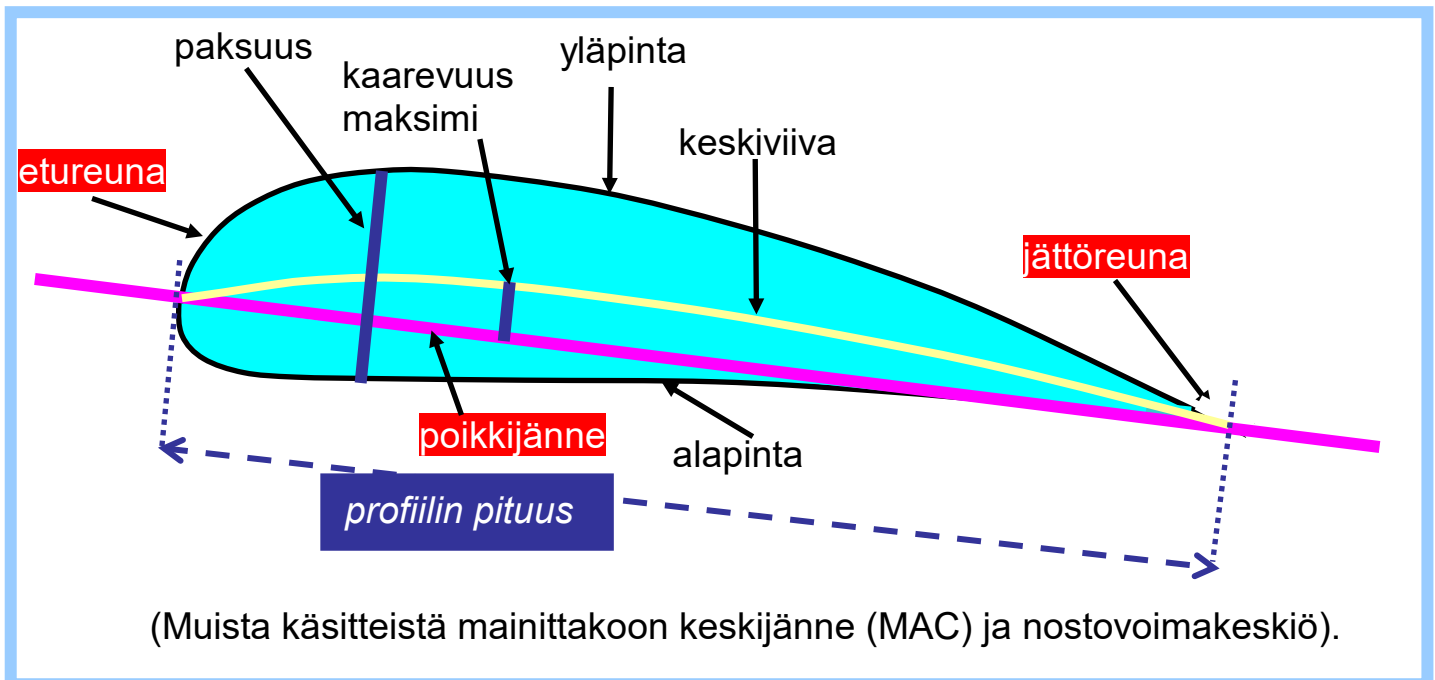
Siipiprofiili

Siipiprofiili on **siiven poikkileikkauskuva**

Profiilin muoto määrää ratkaisevasti siiven aerodynaamiset ominaisuudet

Profiilin ominaisuudet vaihtelevat riippuen käyttötarkoituksesta

Siipiprofiiliin liittyvät tärkeimmät nimitykset:



Määritelmiä: kohtauskulma, poikkijänne ja nollanostoviiva

Profiilin poikkijänne = suora viiva, joka muodostaa mahdollisimman pitkän etäisyyden siiven etureunasta jättöreunaan.

Poikkijänne on usein vertailuperusteena siiven kohtauskulmaa määriteltäessä.

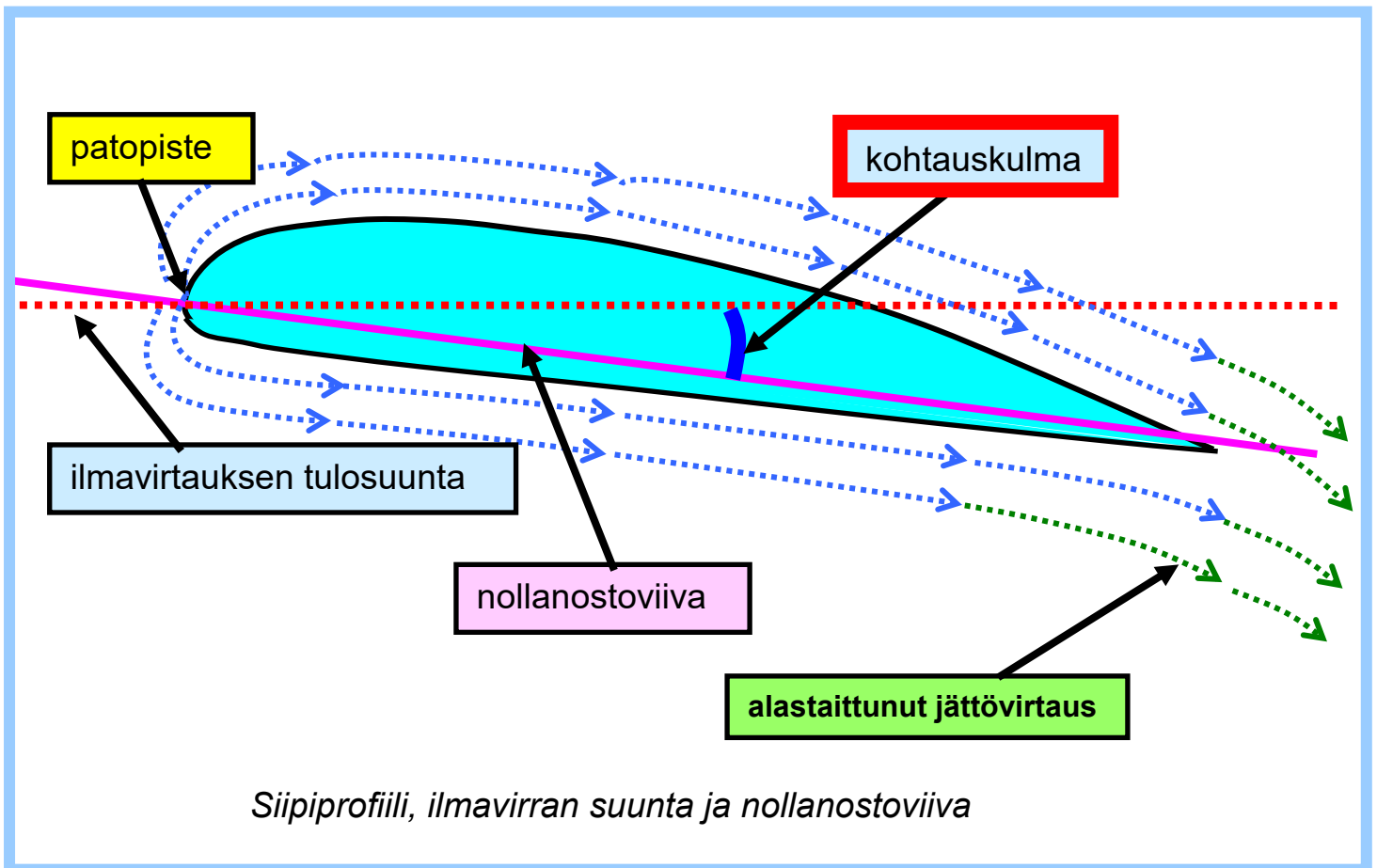
Tarkempi lähtökohta on profiilin **nollanostoviiva**, eli sellainen ajateltu suora, joka kuvaa **siiven neutraalia asentoa ilmapirrassa**, jossa se ei kehitä nostovoimaa

Kohtauskulma = tulovirtauksen ja poikkijänneen / (nollanostoviivan) välinen kulma.

Virtaus siipiprofiilin ja siiven ympärillä – nostovoima

- Nostovoiman tehtävänä on **painovoiman kumoaminen**
- Nostovoima syntyy pääasiassa lentokoneen **siipien ympärillä**
- Lisäksi voivat peräsinpinnat ja runko synnyttää hieman nostovoimaa
- Nostovoimaa syntyy jos **siiven asento muodostaa kohtauskulman**

Virtaus siipiprofiilin ympäri ja kohtauskulma



Mistä nostovoima syntyy?

Kun ilmavirtaus kohtaa siipiprofiilin, **se jakautuu kahteen suuntaan** patopisteestä.

Osa virtauksesta kulkee siiven yläpinnan kautta ja osa alapinnan kautta.

Siiven kohtauskulma aikaansaa paine-eroja siiven ylä- ja alapinnan välillä. sekä **alastaittavan jättövirtauksen.**

Paine-erot saavat **virtausnopeuden kiihtymään ja hidastumaan paikallisesti.**

Alastaittava jättövirtaus antaa siivelle sitä **työntövoimaa** joka muodostaa suurimman osan **nostovoimasta.**

Nostovoiman syntyyn vaikuttavat myös profiilin ylä- ja alapinnan väliin syntyneet **paine-erot.**

Nostovoimaan vaikuttavat päätekijät

Nostovoima riippuu mm. ilmanopeudesta + nostovoimakertoimesta (C_L)

Nostovoimakerroin riippuu kohtauskulmasta sekä profiilin muodosta

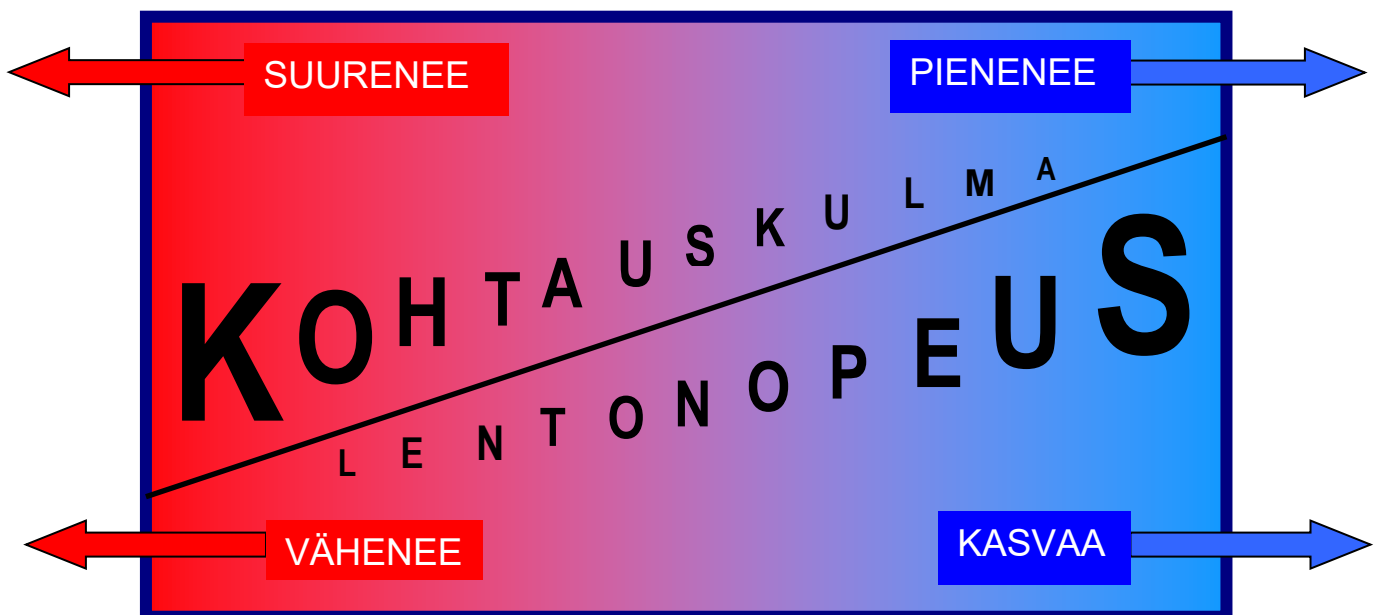
Saman suuruinen nostovoima saadaan joko 1) hidaslennossa:

= pieni ilmanopeus + suuri kohtauskulma → suuri nostovoimakerroin

tai 2) esim. matkalentonopeudella:

suuri ilmanopeus + pieni kohtauskulma → pieni nostovoimakerroin

Kohtauskulman ja lentonopeuden välinen yhteys

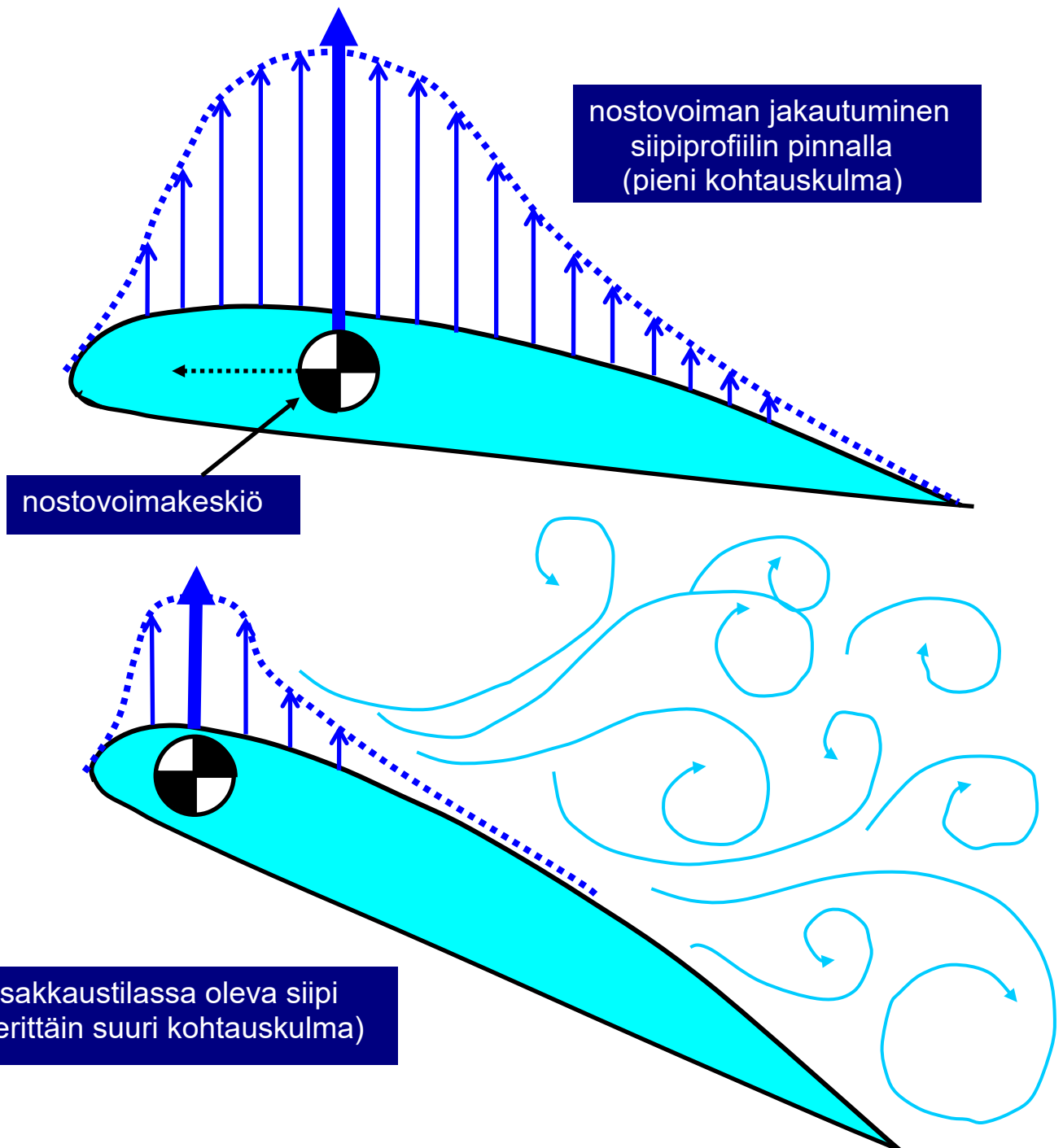


Nostovoimaan vaikuttavat muut tekijät ovat mm:

- siiven **pinta-ala**
- **sivusuhte** eli siiven jännevälin suhde profiilin poikkijänteeseen
- siiven muoto (esim. ellipsikertoimella ilmaistuna)

Sakkausilmiö

- Jos siiven **kohtauskulma kasvaa yli kriittisen rajan**, alkaa sakkaus.
- Sakkaustilassa ilmavirtaus on muuttunut **erittäin pyörteiseksi**.
- Voimakas pyörteisyys aiheuttaa **suurta aerodynaamista vastusta**.
- Pyörteisyyden ja vastuksen takia **nostovoima katoaa melkein täysin**.
- **Kohtauskulman kasvaessa siirtyy siiven nostovoimakeskiö eteenpäin.**



Aerodynaaminen vastus

- 1) profiilivastus ja
- 2) indusoitu vastus.
- 3) Lisäksi on olemassa vastustyyppi nimeltään interferenssivastus.

1 Profiilivastus muodostuu

- a) Muotovastuksesta:
profiilin etu- ja takapuolelle syntyvät **paine-erot** (painevastus).
- b) Kitkavastuksesta, joka riippuu **profiilin pinnan laadusta**.

2 Indusoitu vastus:

- on luonteeltaan **painevastusta**
- indusoitu vastus **riippuu profiilin nostovoimakertoimesta:**

Nostovoimakerroin = siipiprofiilin ominaisuudet + kohtauskulma

Kun kohtauskulma kasvaa:

- kasvavat siiven ylä- ja alapuolen väliset paine-erot
- pyörteet siivenkärkien kohdalla voimistuvat.

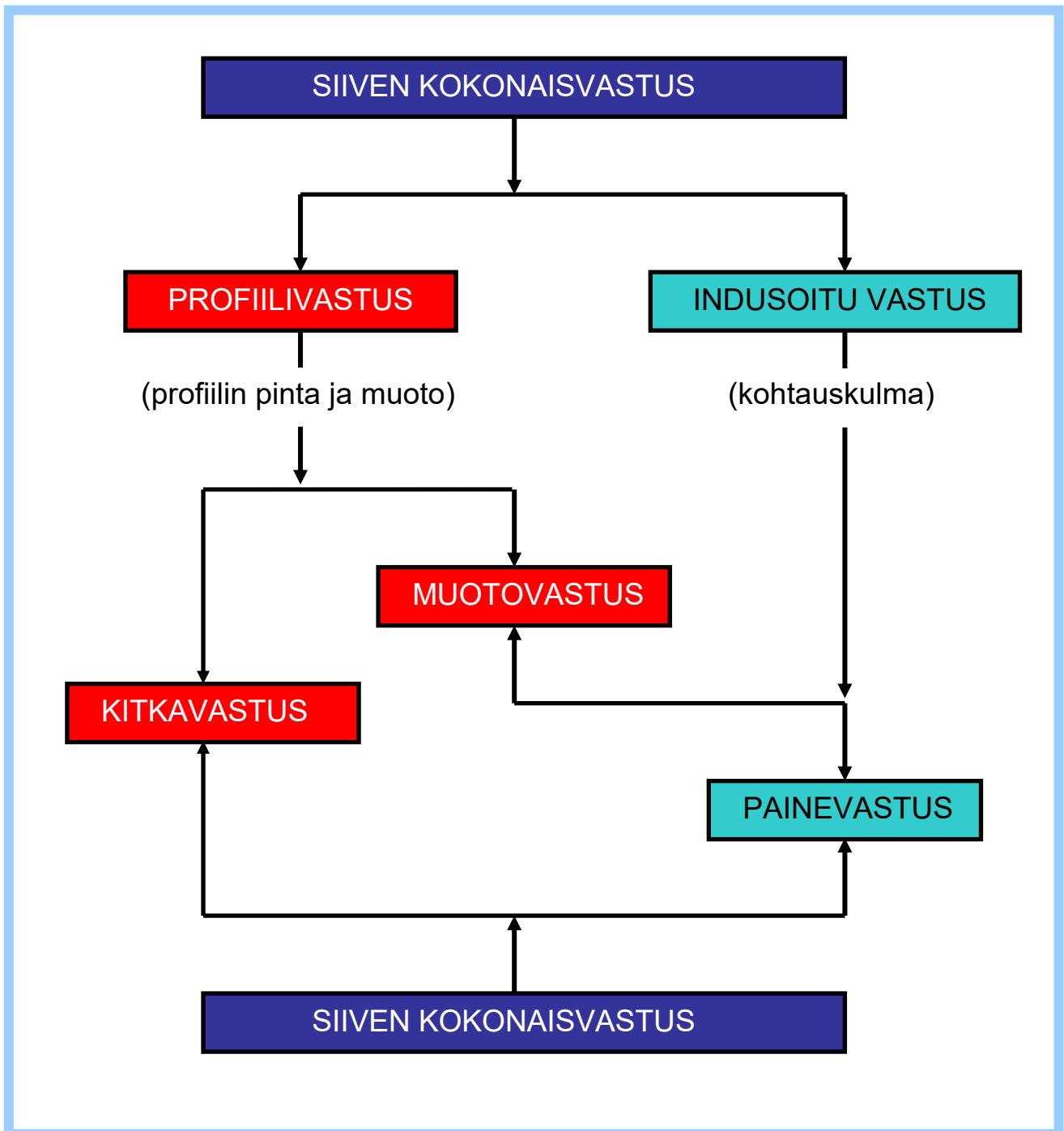
Indusoitu vastus johtuu siis näistä **kärkipyörteistä**

Indusoitu vastus on suurimmillaan lennettäessä suurella kohtauskulmalla, esim. hidaslennossa, alkunousussa, laskussa ja jyrkässä kaarrossa.







3 Interferenssivastus:

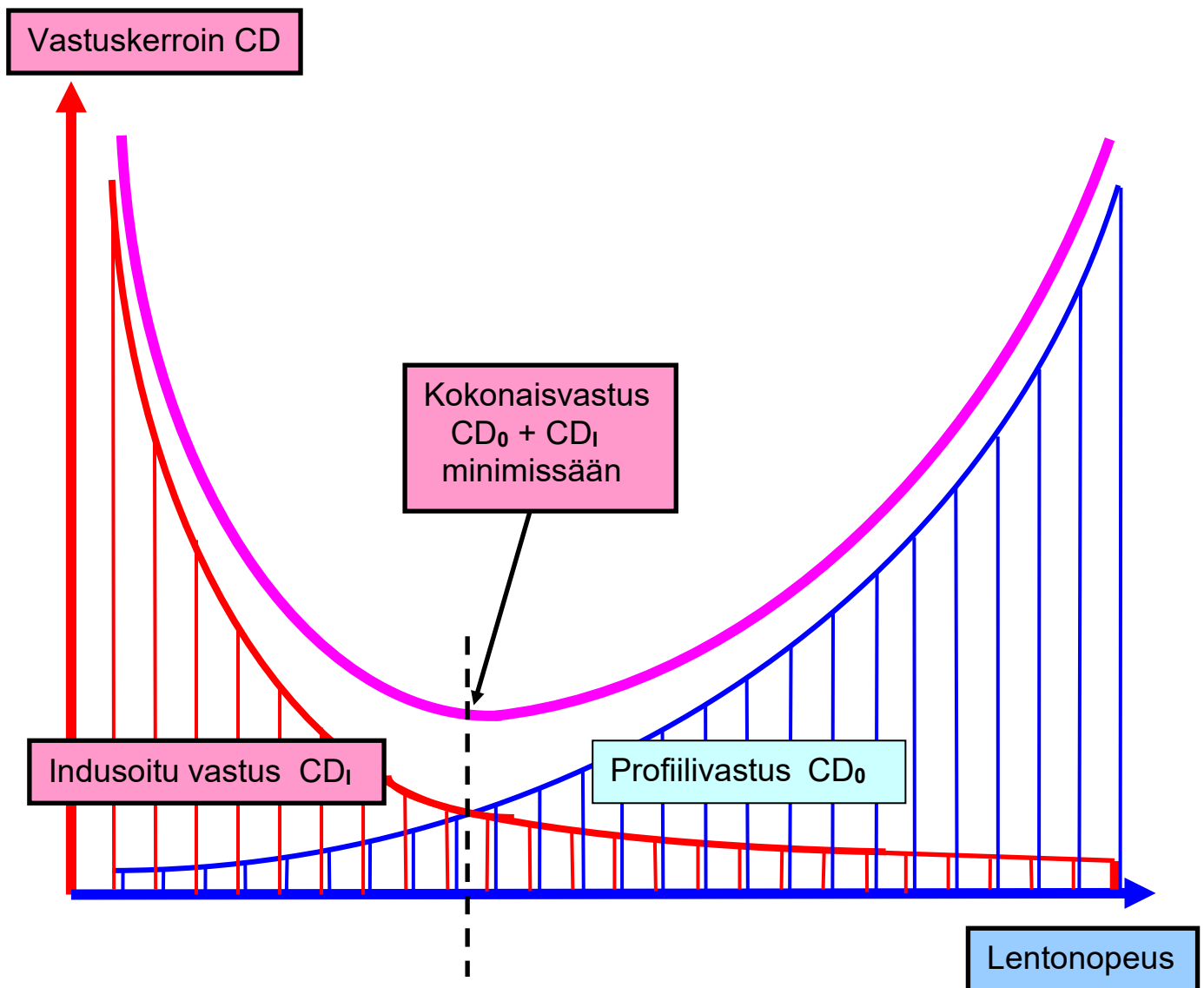
lentokoneen siipien, vakaajien ja rungon **kulmikkaat liitokset** aiheuttavat pyörteisyyttä

YHTEENVETO AERODYNAAMISESTA VASTUKSESTA



Profiilivastus vs. indusoitu vastus suorassa vaakalennossa

Lennonopeus vähenee:		= kohtauskulma kasvaa	
		= indusoitu vastus suurenee	
Lennonopeus kasvaa:		= kohtauskulma pienenee	
		= indusoitu vastus pienenee	



Profiilivastuksen ja indusoidun vastuksen käyrät sekä niiden summakäyrä

Laminaari- ja turbulenssiprofiilit

Jos siiven rajakerros olisi kauttaaltaan laminaarinen:

- sen pintakitka olisi n. 10% verrattuna moottorikoneen siipeen.
- siksi suunnittelussa pyritään ratkaisuun, jossa rajakerros pysyisi mahdollisimman suuressa määrin laminaarisena.
- laminaariprofiilien ominaisuudet vastaavat hyvin tähän vaatimukseen

Laminaariprofiilit



- yleensä vähemmän kaarevia kuin turbulenssiprofiilit,
- paksuus on yleensä melko pieni
- aerodynaamisesti edullisia etenkin suurilla nopeuksilla
- reagoivat herkästi epäpuhtauksille, huuerteelle ja vesipisaroille
- muutoskohta sijaitsee melko kaukana etureunasta
- joillakin laminaariprofiileilla sakkkaus kehittyy äkillisesti.

Turbulenssiprofiilit



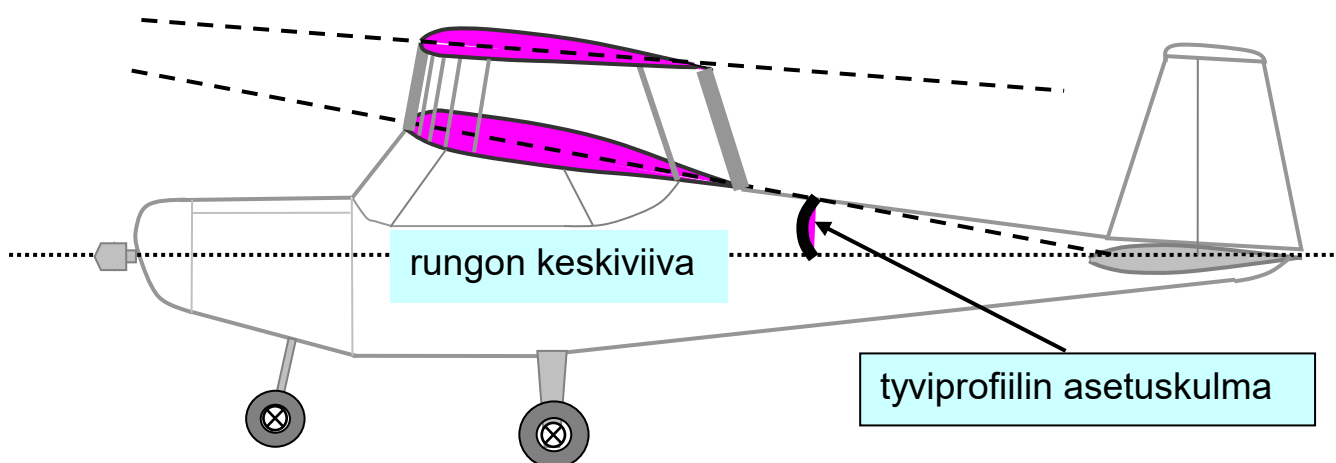
- usein melko paksuja, kaarevia
- hyvät hidaslento-ominaisuudet
- kehittävät tehokkaasti nostovoimaa ja vastusta pienillä nopeuksilla
- sakkkaus kehittyy hitaasti ja pehmeästi
- reagoivat voimakkaasti puuskiin
- kokonaisvastus on suuri paksun rajakerroksen takia
- oikaisussa sakkauksesta virtaus palautuu nopeasti takaisin siipeen

Siiven aerodynaaminen ja geometrinen kierto

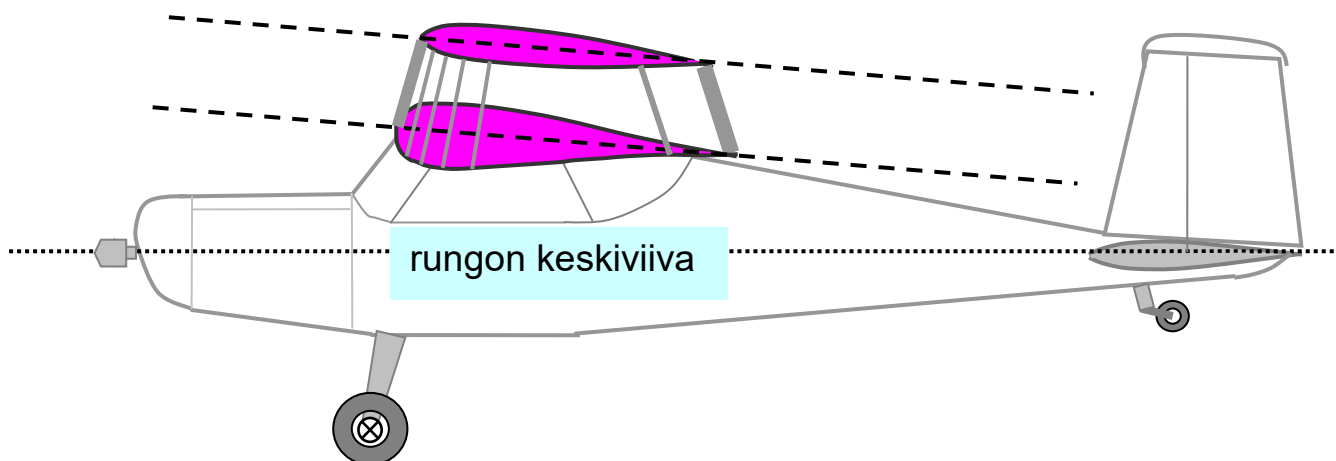
Siiven kierrolla tarkoitetaan siiven kärki- ja tyviprofiilin välistä asetuskulmaeroa.

Useiden harrasteilmailun koneiden siivet on rakennettu siten, että kärkiprofiilin asetuskulma on loivempi kuin tyviprofiilin.

Tällöin sakkaus alkaa siiven tyvestä jolloin kallistusohjaus säilyy mahdollisimman pitkään.



Geometrinen kierto = tyvessä ja kärjessä sama profiili mutta eri asetuskulmalla

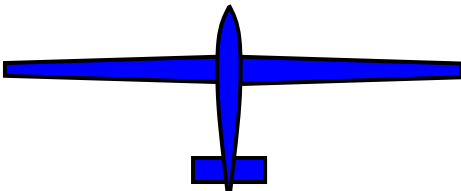
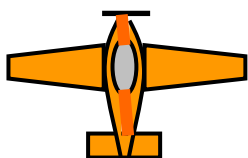


Aerodynaaminen kierto = eri profiilit mutta lähes samalla asetuskulmalla

Siiven sivusuhte (Aspect Ratio)

- sivusuhte on siiven leveyden ja pituuden välinen suhde
- tarkemmin määriteltynä: **jännevälin neliön suhde siipipinta-alaan**

Vertailu:

purjelentokone	moottorikone
	
sivusuhte 1:14	sivusuhte 1:6

Purjelentokoneen indusoitu vastus on pieni ja liitokyky hyvä myös pienillä nopeuksilla

Indusoitu vastus - vaikutukset

- indusoitu vastus riippuu kärkipyörteistä
- **lyhyen ja leveän siiven kärkipyörteet ovat huomattavan voimakkaita**
- **pitkän, kapean siiven kärkipyörteet eivät kehitä paljon vastusta**
- kärkipyörre voimistuu sitä mukaa kun siiven kohtauskulma kasvaa
- kohtauskulma on suuri mm.:
 - a) hidaslennossa ja laskeutumisen aikana
 - b) jyrkässä kaarrossa
 - c) oikaisussa jyrkästä liu'usta

Virtauksen alastaite ja maavaikutus

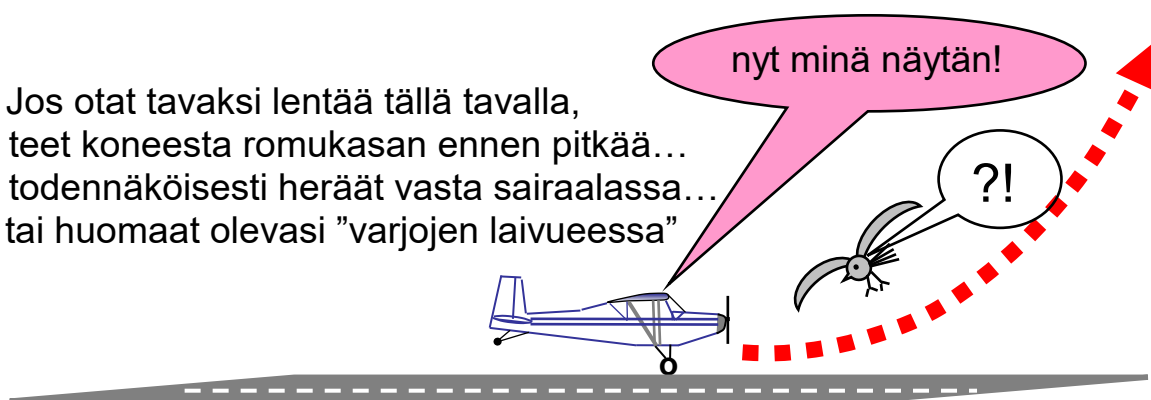
- siiven kärkipyörteet ja jättöreunavirtaukset taittavat alaspäin
- lennettäessä hyvin lähellä maanpintaa **kärkipyörteet osuvat maahan**
- osuessaan maahan ne antavat **lisää työntövoimaa** = maavaikutus
- maavaikutus tuntuu välittömästi maanpinnan yläpuolella
- maavaikutuksessa koneen sakkausnopeus ”keinotekoisesti” pienenee
- maavaikutuksesta laskukiito pitenee, etenkin alatasokoneilla

Missä maavaikutus lakkaa:

- maavaikutus lakkaa sillä korkeudella joka vastaa siiven kärkivälin mittaa
- tämä on varteenotettava tekijä lentoonlähdössä ja alkunousussa
- sen takia **jyrkkä alkunousu pienellä nopeudella on riskialtista toimintaa**

Varoittava esimerkki!

Jos otat tavaksi lentää tällä tavalla,
teet koneesta romukasan ennen pitkää...
todennäköisesti heräät vasta sairaalassa...
tai huomaat olevasi ”varjojen laivueessa”



Nostovoiman ja vastuksen suhde suorassa vaakalennossa

Kun kehitetään nostovoimaa, syntyy myös ilmanvastusta

Nostovoima ja teho

- kun vähennetään tehoa nostovoima heikkenee
- kun nostovoima heikkenee kone pyrkii vajoamaan

Kohtauskulma ja nopeus (tehoasetus vakiona)

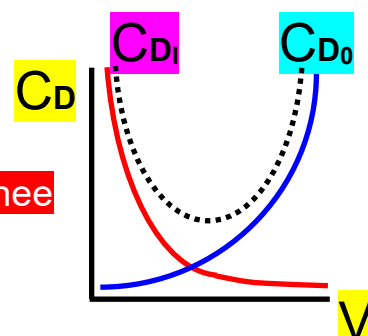
- kun kasvatetaan kohtauskulmaa hidastuu lentonopeus
- kun kasvatetaan kohtauskulmaa kasvaa myös nostovoima
- kun nostovoima kasvaa vajoaminen lakkaa

Kohtauskulma ja indusoitu vastus

- kun vajoamista estetään lisäämällä kohtauskulmaa indusoitu vastus kasvaa
- kun indusoitu vastus kasvaa vähenee profiilivastus

Kohtauskulma ja profiilivastus

- kun lisätään tehoa kone pyrkii nousemaan
- kun pienennetään kohtauskulmaa lentonopeus kasvaa
- kun koneen lentonopeus kasvaa nousupyrkimys lakkaa
- kun pienennetään kohtauskulmaa, indusoitu vastus vähenee
- kun indusoitu vastus vähenee kasvaa profiilivastus



Nostovoimakertoimen, kohtauskulman ja nopeuden välinen yhteys

Sama nostovoima saadaan aikaiseksi kahdella tavalla:

a) pieni nostovoimakerroin → pieni kohtauskulma → suuri lentonopeus

= pieni indusoitu vastus mutta suuri profiilivastus

b) suuri nostovoimakerroin → suuri kohtauskulma → pieni lentonopeus

= suuri indusoitu vastus mutta pieni profiilivastus

KONEESEEN VAIKUTTAVAT VOIMAT LENNOLLA

Suorassa vaakalennossa koneeseen vaikuttavat voimat:

Painovoima (g) suuntautuu koneen **painopisteen kautta alaspäin**

Nostovoima L = nostovoimakeskiöstä **kohtisuoraan lentorataan** vaikuttava voima

Kokonaisvastus D = koneen etenemisliikettä vastustava voima

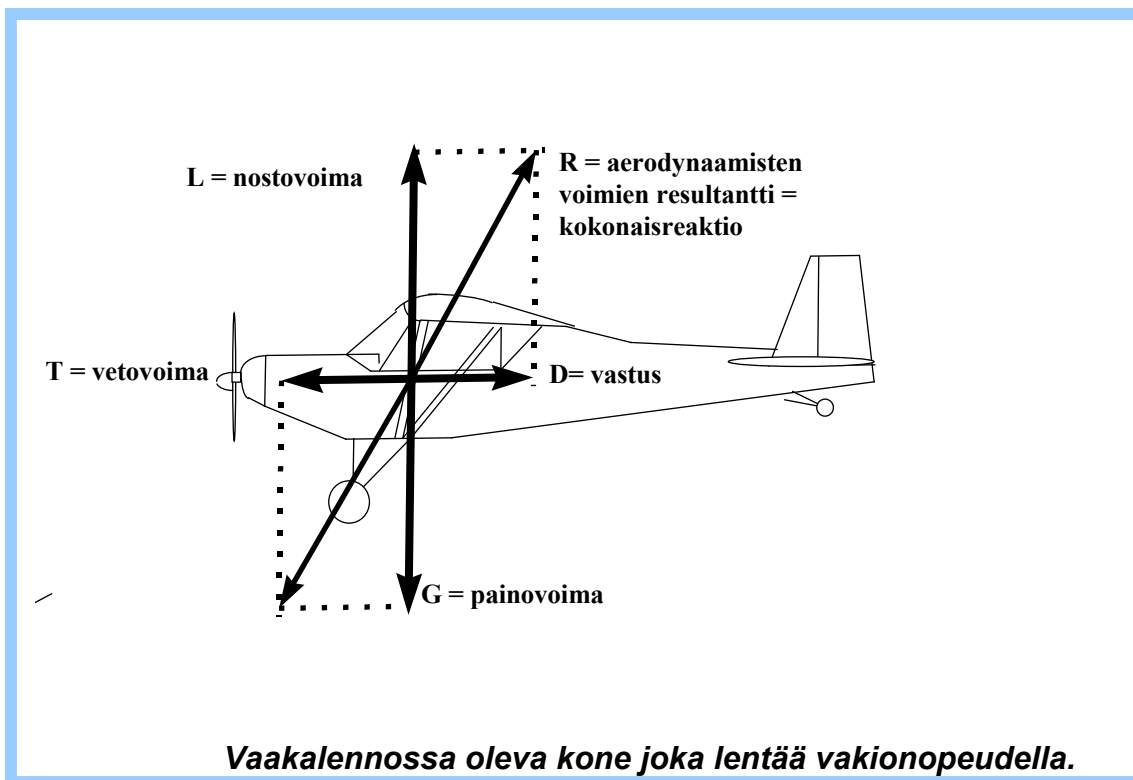
Vetovoima T = koneen lentosuuntaan suuntautuva liike

Jos kaikkien em. voimien aiheuttamien momenttien summa = 0:

kone säilyttää lentotilansa vaakalennossa ja lentää vakionopeudella.

Vetovoimaa voidaan kehittää joko moottorin + potkurin avulla, tai

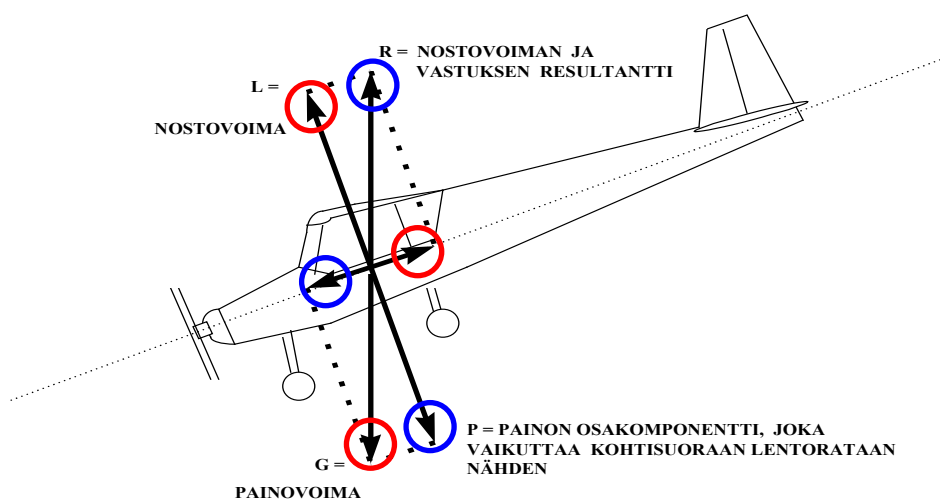
liu'ussa painovoimalla, siis korkeus muuttuu vetovoimaksi ja siten nopeudeksi



Kun lentotila muuttuu liukuun:

Jos vaakalennosta vedetään kaasu kiinni ja säilytetään lentonopeus, kone lähtee liukuun

Tällöin painovoima säilyttää koneen lentonopeuden



Liu'ussa oleva kone joka lentää vakionopeudella.

Liu'ussa vaikuttavat voimat:

- 1) Painovoima g
- 2) Vastus D
- 3) Nostovoima L
- 4) Nostovoiman ja vastuksen resultantti R = painovoiman **vastavoima**
- 5) Vetovoima T = vastuksen **vastavoima**
- 6) Painovoiman osakomponentti P = nostovoiman **vastavoima**

Nostovoima suuntautuu kohtisuoraan lentorataan (tai sen tangenttiin):

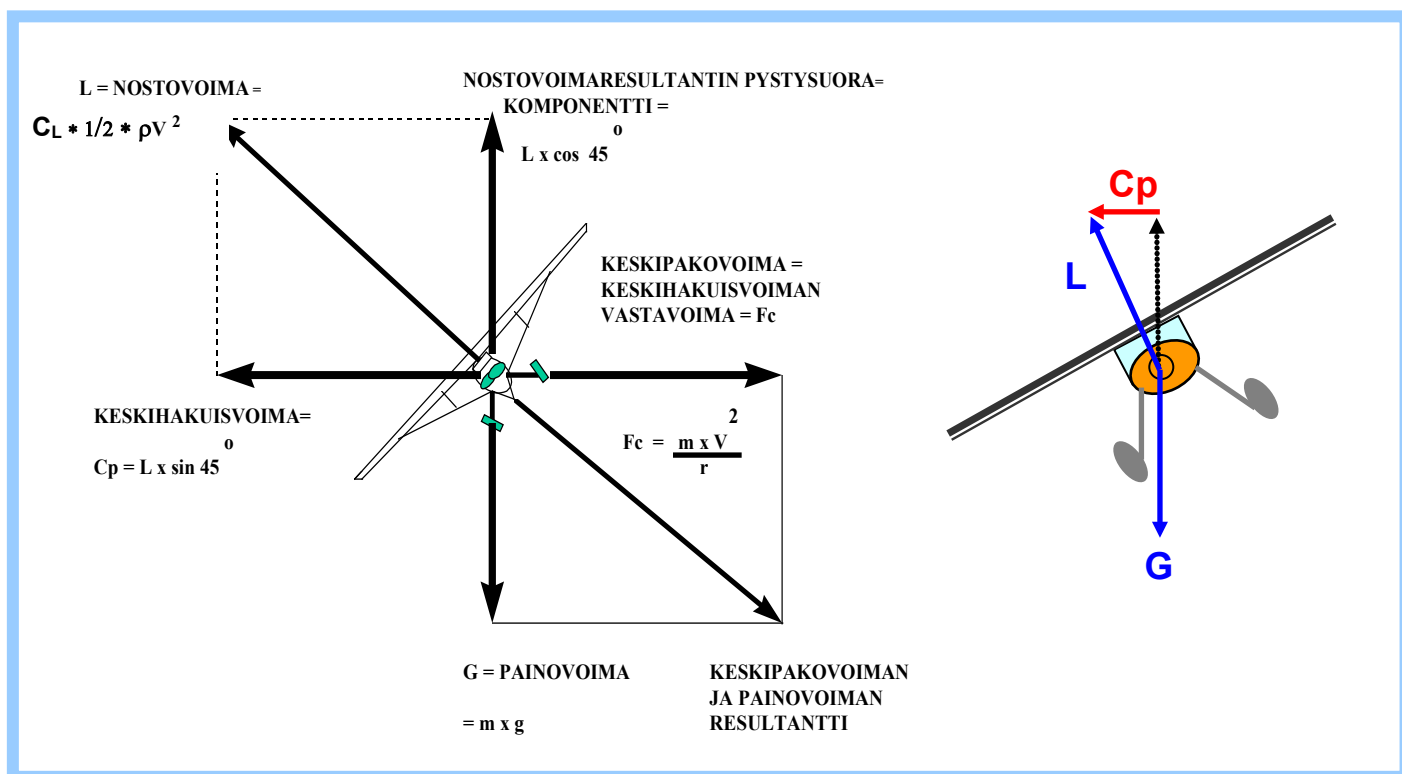
Jos kone olisi pystysyöksyssä:

- nostovoima olisi likimäärin nolla, ja
- vetovoima ja vastus lähentelisivät toisiaan, edellyttäen että kone on silloin kiihtynyt suurimpaan mahdolliseen nopeuteen

Koneeseen vaikuttavat voimat kaarrossa

Kun siirrytään suorasta vaakalennosta vaakakaartoon:

- koneen massa pyrkii **säilyttämään suuntansa ja nopeutensa**
- lentosuunnan muuttamiseksi tarvitaan **keskihakuisvoimaa**
- tämä saadaan **kallistetaan konetta** ohjaimilla
- koneen pyrkimystä luistaa kaarron suuntaan vastustavat koneen sivupinnat
- kaartoa jatkuu ohjaimet keskitettyinä kun koneen pysty akseli on kallistunut
- kun kaartoa on syntynyt, **tarvitaan lisää voimaa** jotta kone ei alkaisi vajota
- siksi **kasvatetaan nostovoimaa** lisäämällä siiven **kohtauskulmaa**
- kun otetaan enemmän nostovoimaa irti siivestä, **kuormituskerroin kasvaa**
- osakomponentiksi saadaan **kaartoon tarvittava keskihakuisvoima C_p**
- kun voimaparit kumoavat toisensa, **kone pysyy kaarrossa eikä luista**



Koneeseen vaikuttavat voimat kaarrossa:

vetovoima $\leftarrow \rightarrow$ vastus

nostovoima $\leftarrow \rightarrow$ keskipakovoiman ja painovoiman resultantti

painovoima $\leftarrow \rightarrow$ nostovoimareseptantnin pystysuora komponentti

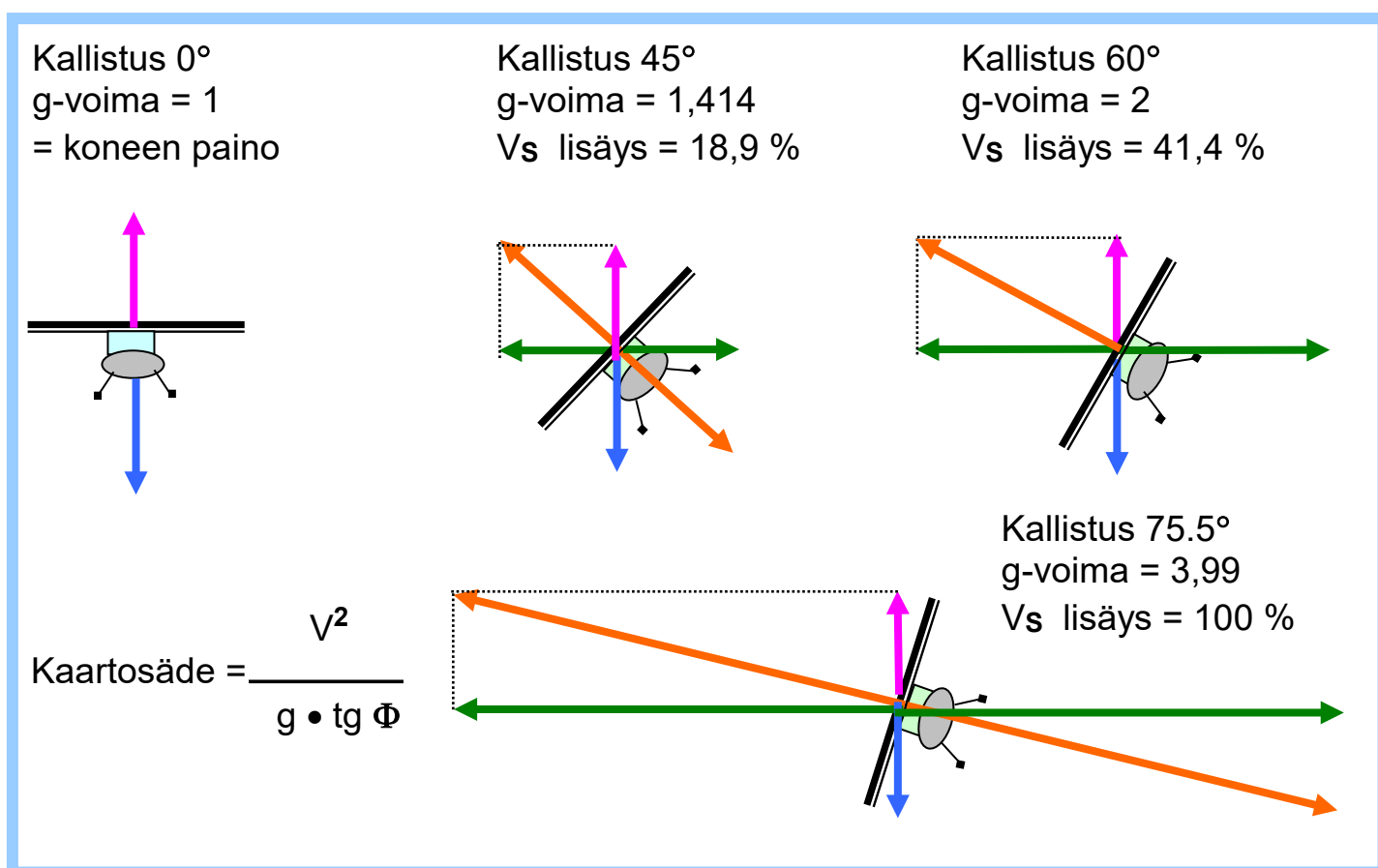
keskihakuisvoima $\leftarrow \rightarrow$ keskipakovoima

Koneen massan kasvu ilmaistaan kuormituskerroimella

Koneen massa kasvaa = lisää siipikuormitusta (kp/m^2):

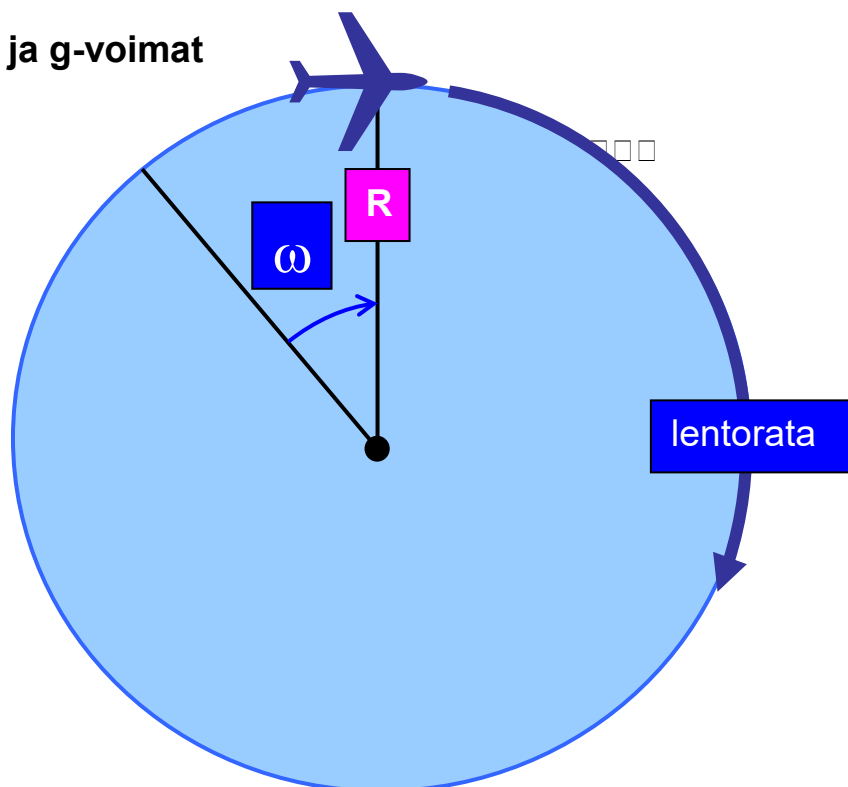
- kaarron kallistuskulman kasvaessa, tai
- oikaistaessa konetta syöksystä, tai
- voimakkaasta vedosta sauvasta (= lisää kohtauskulmaa)

G-voimat ja niiden komponentit graafisesti:

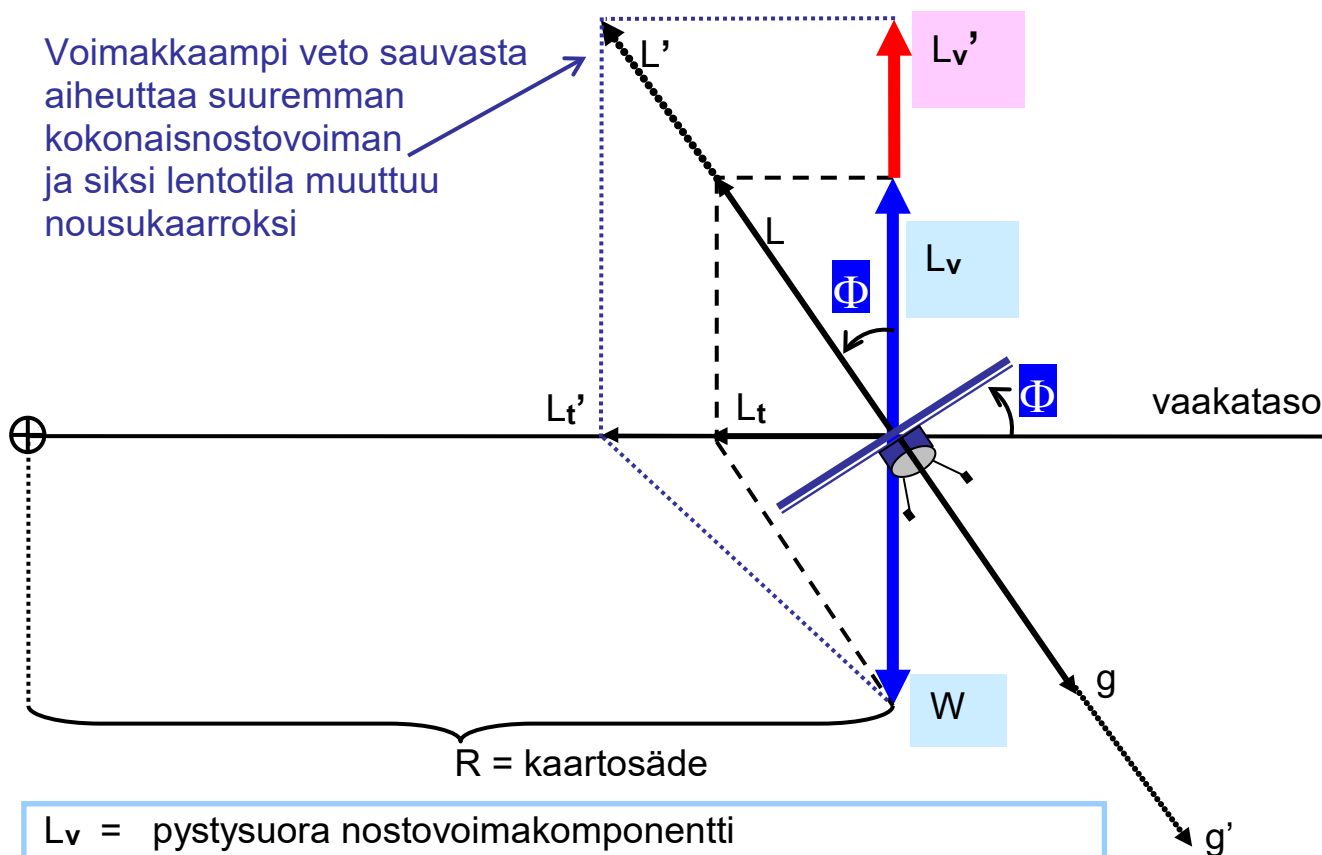


Kallistuskulmat ja g-voimat

ω (omega)
= kulmanopeus



Voimakkaampi veto sauvasta aiheuttaa suuremman kokonaisnostovoiman ja siksi lentotila muuttuu nousukaarrosksi



L_v = pystysuora nostovoimakomponentti
 L = kokonaisnostovoima
 L_t = vaakasuora nostovoimakomponentti (keskihakuisvoima)
 W = koneen paino

Kun L_v on yhtä suuri kuin W kone lentää vaakakaarrossa.

Kun L_v' on $> W$, lentokone on nousukaarrossa, (sama kaartosäde ja kallistus)

Kaartonopeuden, kallistuskulman ja lentonopeuden välinen yhteys

Tarkoituksena olisi tehdä 180 ° suunnanmuutos liu'ussa tyhjäkäynnillä:

- mahdollisimman pienellä korkeudenmenetyksellä
- tehdäänkö kaarto loivalla kallistuksella vai jyrkällä?



Hyvin loivalla kallistuksella:



kone "tekee maakuntakaarron" ja vajoaa pitkän matkan aikana =

niin sanottu "huono homma" koska näin ei pääse perille...ehtisi kiertää 10 kirkkoa reitillä jos olisi korkeutta...

Hyvin jyrkällä kaarrolla > 60°:

kone "syö" korkeuden äkkiä vaikka kaartosäde on pieni =

varo sakkausta ja syöksykierrettä, tällainen tempu vie helposti metsään

Puhdas kaarto 45° kallistuksella:



tämä on teoreettinen optimi jos se lennetään parhaan liitosuhteen nopeudella kertaa 1,2

pidä kuitenkin tämän **lisäksi riittävä nopeusreservi.**

Mikä tahansa muu kallistus kaarrossa kuluttaa enemmän korkeutta jatkuvan kaarron aikana.

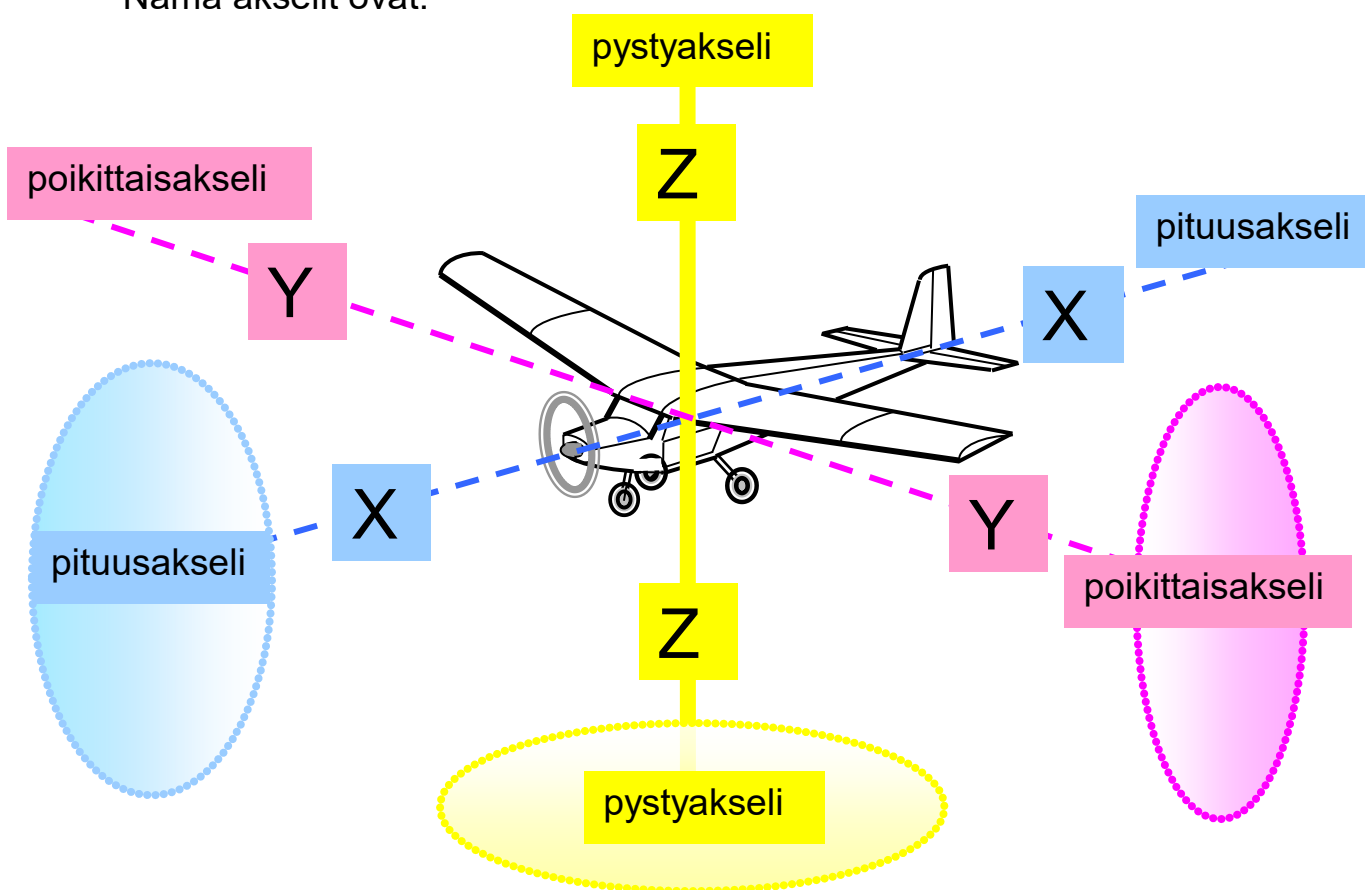
LENTOKONEEN OHJAIMET JA LIIKKEET -

Lentokoneen akselit – kolme vertailutasoa

Lentotilan muutoksia tarkastellaan vertaamalla niitä kolmeen ”akseliin”

Akselit on kuviteltuja suoria, jotka kulkevat koneen painopisteen kautta

Nämä akselit ovat:



Näiden akseleiden ympäri liikkuen kone voi muuttaa lentotilaansa

Lentotilan muuttaminen:

Pystyakselin (Z) ympäri → suuntaohjaus → sivuperäsin

Poikittaisakselin (Y) ympäri → pituuskallistusohjaus → korkeusperäsin

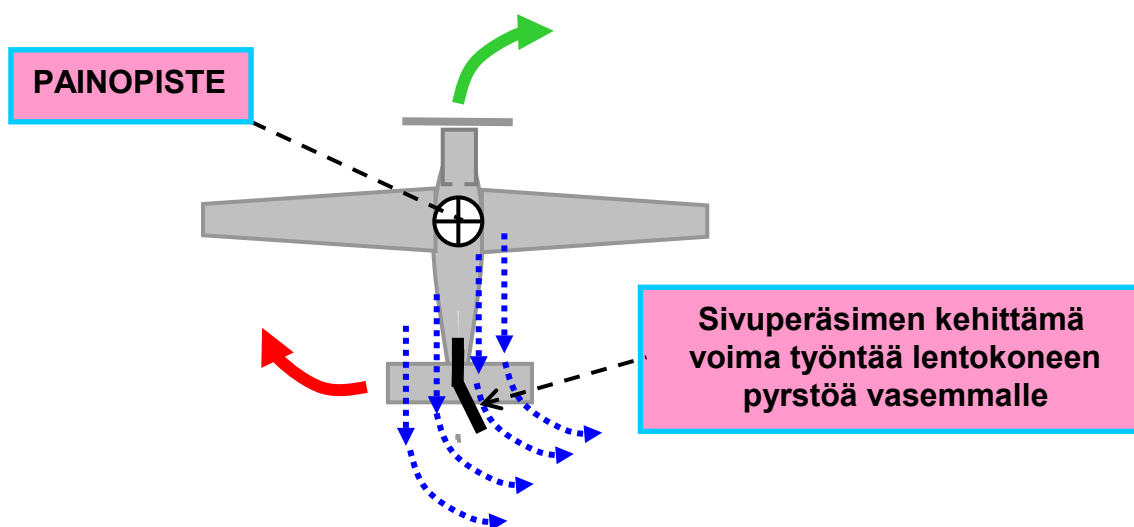
Pituusakselin (X) ympäri → kallistusohjaus → siivekkeet

OHJAINTEEN VAIKUTUS - Sivuperäsin

Sivuperäsin on saranoitu sivuvakaajan takareunaan

Kun käytetään sivuperäsinä, muuttuu sivuperäsimen ja sivuvakaajan yhdessä muodostama pinta **kaarevaksi**.

Tästä syntyy sivusuuntaan vaikuttava nostovoima.



Ohjaaja "antaa oikeata jalkaa" (paina oikeata sivuperäsinpoljinta)

Kun koneen pyrstö kääntyy vasemmalle, kääntyy nokka oikealle.

Kone kääntyy **painopisteen kautta** kulkevan **pystyakselinsa ympäri**.

Ohjaamosta havaitaan myös, että koneen nokka kääntyy horisontissa.

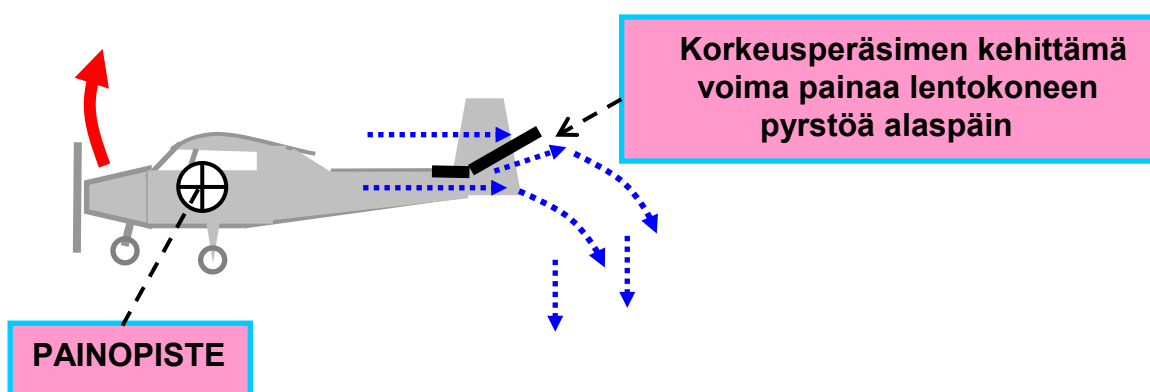
Ohjausliike aikaansaa myös aerodynaamista vastusta.

OHJAINTEEN VAIKUTUS - Korkeusperäsin

Korkeusperäsin on saranoitu korkeusvakaajan takareunaan

Kun käytetään korkeusperäsimä, muuttuu korkeusperäsimen ja korkeusvakaajan yhdessä muodostama pinta **kaarevaksi**.

Tästä syntyy koneen pyrstöön vaikuttava pystysuora voima.



Ohjaaja "vetää sauvaa". Ohjausliike muuttaa korkeusperäsimen asentoa

Kun koneen pyrstö painuu alas, nokka nousee samanaikaisesti.

Kone kääntyy **painopisteen kautta** kulkevan **poikittaisakselinsa ympäri**.

Ohjaamosta havaitaan myös, että koneen nokka nousee horisontissa.

Korkeusperäsimen tehtävä on **pituuskallistuksen säätely**.

Ohjausliike aikaansaa myös aerodynaamista vastusta.

Kun **vedetään** sauvaa, nokka nousee horisontissa ja **nopeus pienenee**, ja kääntäen: kun **työnnetään** sauvaa, nokka laskee ja **nopeus kasvaa**.

Korkeusperäsin vaikuttaa siten välittömästi **lennonopeuteen**.

OHJANTEN VAIKUTUS – Siivekkeet (kallistuksen säätely)

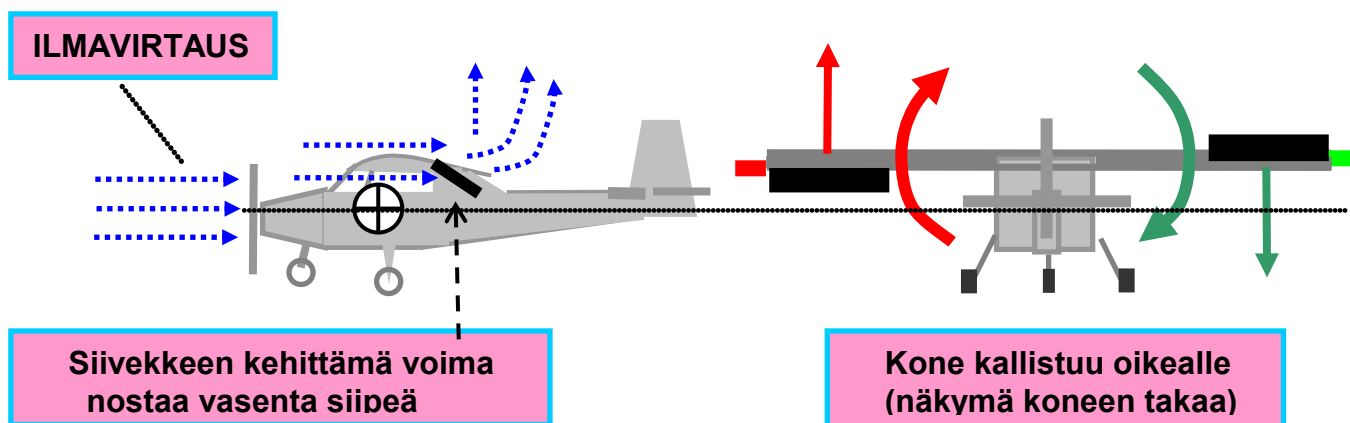
Siivekkeet sijaitsevat siipien jättöreunoissa

Kun käytetään siivekkeitä, muuttuu siiven profiilin kaarevuus siivekkeiden kohdalla.

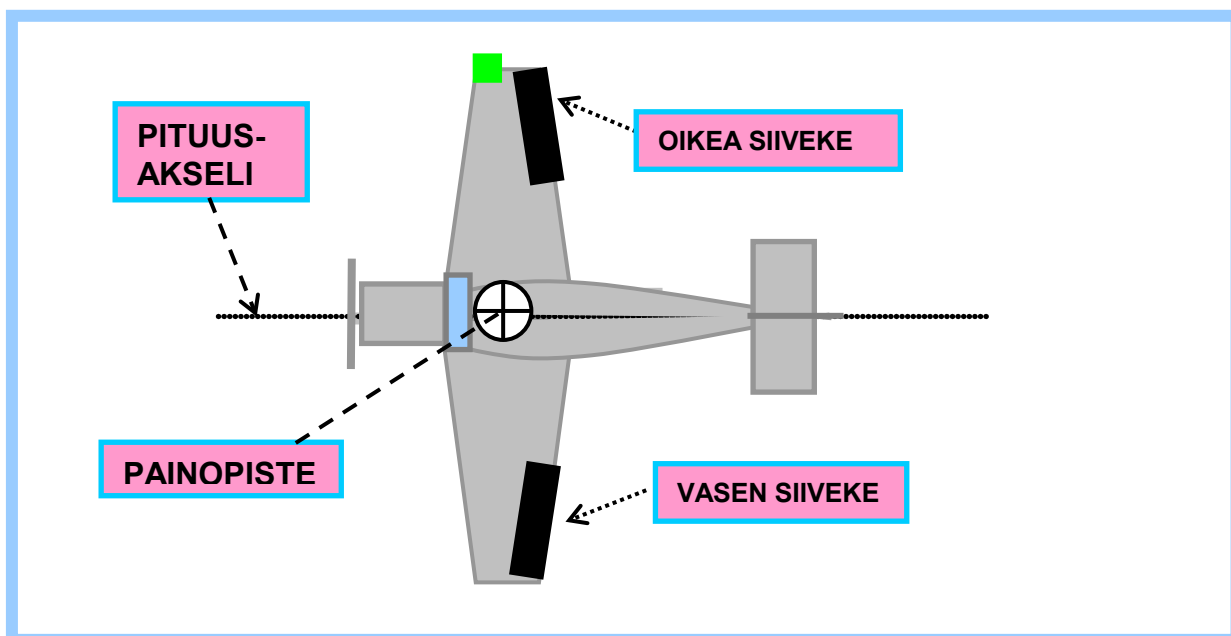
Tästä seuraa että siipien kehittämät **nostovoimat muuttuvat eri suuruisiksi.**

Nostovoimaero aikaansaa koneen rungon **pituusakselin ympäri vaikuttavan kiertävän voiman.**

Kun vasen siiveke kääntyy alaspäin, kääntyy oikea siiveke ylöspäin.



Ohjaaja "vie sauvaa oikealle". Ohjausliike muuttaa siivekkeen asentoa.



Ohjainten sekundäärisistä vaikutuksista - siivekejarrutus

Siivekejarrutus johtuu **siivekkeiden eri suuruisesta vastuksesta**.

Sitä ei pidä sekoittaa laskusiivekkeiden toimintaan, mikä on aivan eri asia.

Alas laskenut siiveke jarruttaa enemmän kuin ylöspäin liikkunut siiveke

Alas laskenut siiveke muodostaa siipiprofiilin kanssa **suuremman kohtauskulman** kuin toinen siiveke.

Lisääntynyt kaarevuus aiheuttaa suurempaa **aerodynaamista vastusta**

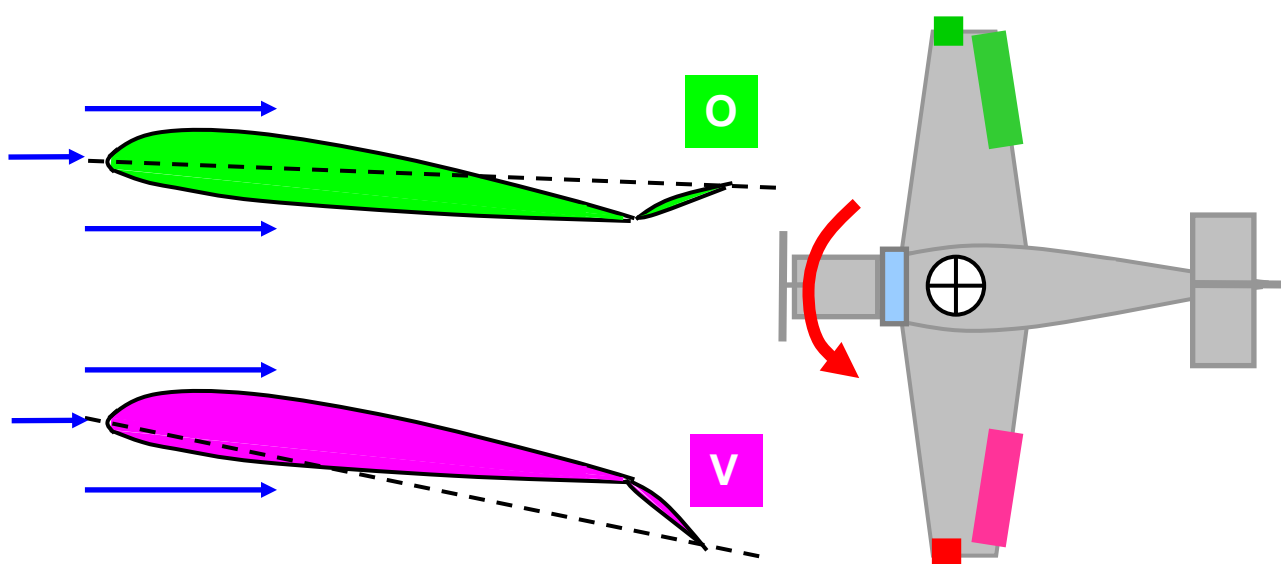
Tästä seuraa koneen taipumus kääntyä pystyakselinsa ympäri koneen kallisteluun nähden päinvastaiseen suuntaan.

Esimerkki

Kun **kallistetaan konetta esim. vasemmalle**, laskee oikea siiveke.

Alaslaskenut siiveke jarruttaa enemmän kuin toinen, seurauksena koneen **nokka pyrkii kääntymään samanaikaisesti oikealle**.

Nokan kiertopyrkimys = siivekejarrutus kumotaan antamalla jalkaa samanaikaisesti siihen suuntaan minne viedään sauvaa.



*Alas laskenut siiveke (V) jarruttaa enemmän kuin ylös noussut siiveke (O).
Kone kallistuu oikealle mutta nokka pyrkii kääntymään vasemmalle.*

Ohjainpintojen aerodynaaminen tasapainotus

Pendeliperäsin

Pendeliperäsimessä vakaaja ja peräsin muodostavat **yhtenäisen kantopinnan**.

Virtaus, joka kohtaa saranan etupuolella olevan ohjainpinnan osan auttaa kääntämään ohjainpintaa.

Peräsimen saranalinja kulkee esim. n. 1/4 kantopinnan profiilin etureunasta.

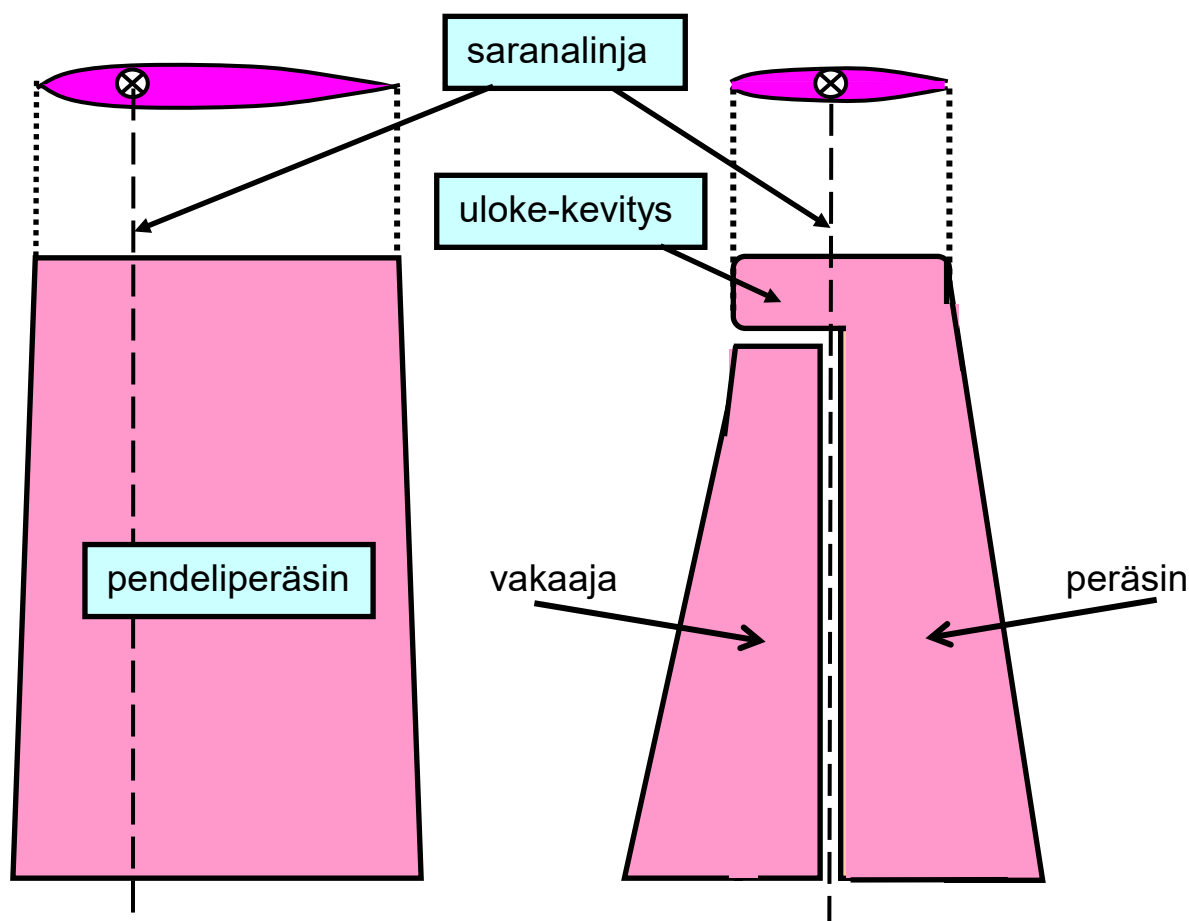
Pendeliperäsimen edut ovat pienempi paine- ja kitkavastus ja **herkempi ohjaus**.

Uloke-kevitys

Toinen tapa ohjaamisen keventämiseksi on ulokkeen rakentaminen peräsimen saranalinjan etupuolelle.

Lentäminen kävisi rasittavaksi jos joka ohjausliike vaatisi tuntuvaan käsivoimaa.

Sen takia ovat ohjainpinnat usein aerodynaamisesti tasapainotetut eli kevitetyt.



Aerodynaaminen kevyys pendeliperäsimellä ja ulokkeella

Aeroelastisen värähtelyn vaarat

Vaarallinen aeroelastinen värähtely eli ns. "flutteri" johtuu **aerodynaamisten voimien** ja rakenteen tai rakenneosan kimmovoimien yhteisvaikutuksesta.

Jokaisella rakenteella on tietty **ominaisvärähtelyluku** (resonanssi).

Kun peräsin tms on riittämättömästi vääntöjäykkä taikka väljästi asennettu, voi ns. "flutteri" syntyä, etenkin **suurilla lentonopeuksilla**.

Värähtely voi **rikkoa rakenteita** tai aiheuttaa **peräsinsakkauksen**.

Aeroelastisen värähtelyn syyt

Peräsimen saranointi ja käyttömekanismit ovat käyneet **huomattavan väljiksi**;

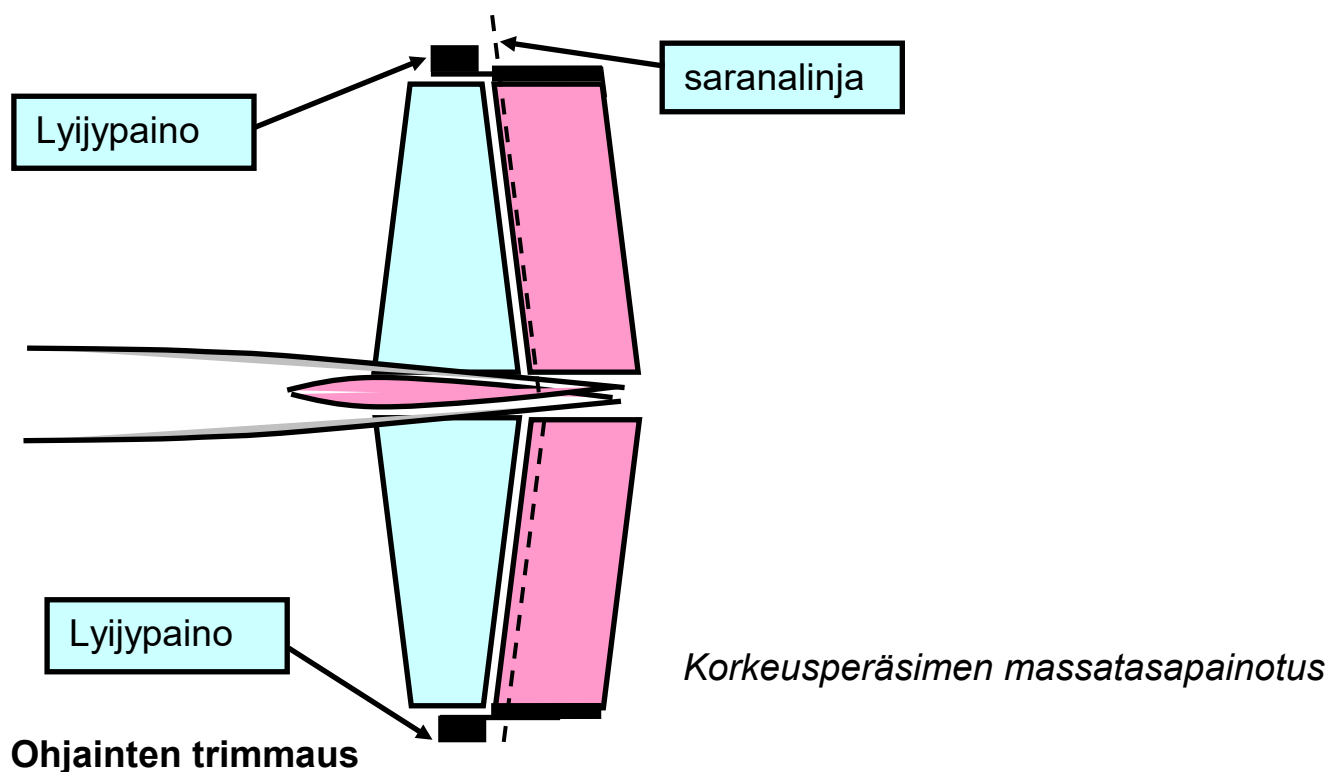
Peräsinvaijerit eivät ole riittävän kireäksi säädetty (**löysät vaijerit**)

Koneella **lennetään ylinopeutta** ja ohjainpinta ei ole massatasapainotettu

Aeroelastisen värähtelyn välttäminen

Ohjainpinta **massatasapainotetaan** esim. lyijypainoilla saranalinjan etupuolella

Poistetaan ylisuuri väljyys ja vältetään lentämistä liian suurilla nopeuksilla



Kiinteä trimmilaippa

Tavoitteena on, että suorassa vaakalennossa oleva **kone säilyttäisi ohjaussuuntansa** ja lentäisi **siivet vaakatasossa** ohjaimet keskitettyinä.

Tätä varten asennetaan pieni säätölaippa sivuperäsimen ja / tai toisen siivekkeen jättöreunaan kumoamaan potkurivirran kiertopyrkimyksiä.

Säätölaippa on yleensä pieni **käsin taivutettava metallilevy**.

Raskaammissa koneissa on ohjaamosta käsin säädettävä trimmijärjestelmä.

Ohjaamosta säädettävä korkeusperäsimen trimmi

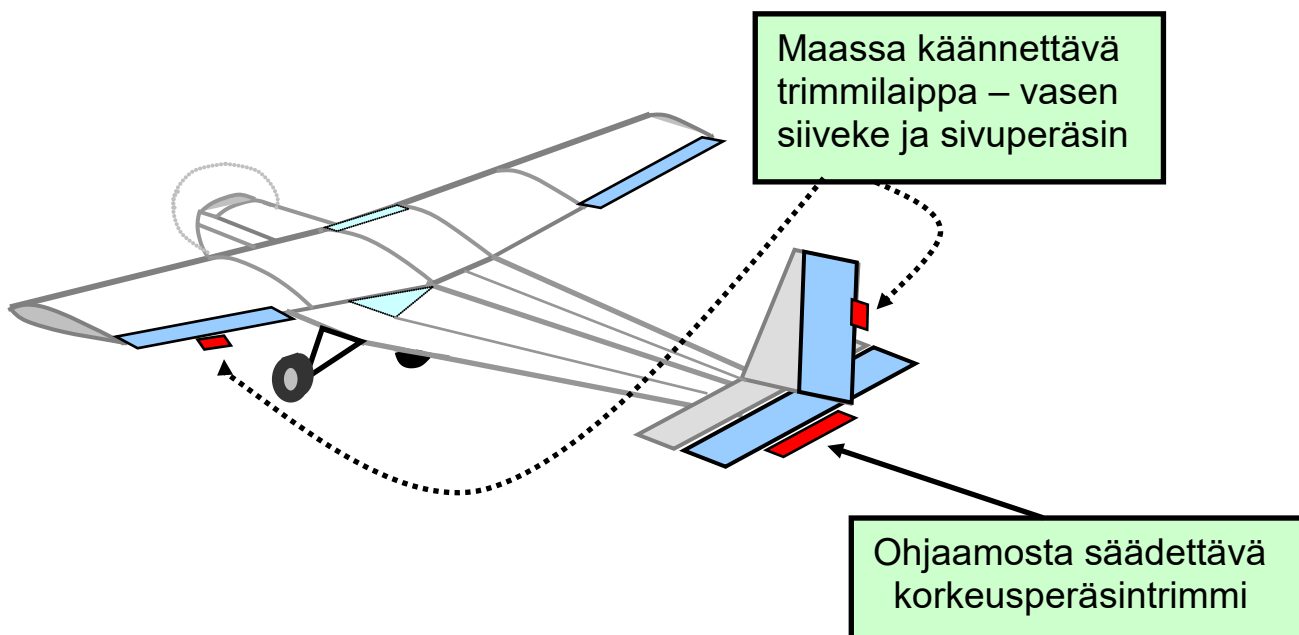
Lähes kaikilla lentokoneilla on ohjaamosta säädettävä kevytslaippa, joka on saronoitu korkeusperäsimeen, ns. korkeusperäsimen trimmi.

Trimmillä ohjaaja **säätää ohjainvoimat pois** jotta **kone säilyttäisi lentotilansa ja nopeutensa** ilman että hän joutuisi jatkuvasti vetämään tai työntämään.

Ohjauksen keventämiseksi käytetään myöskin jousitrimmiä.

Trimmi on hyvin tarpeellinen nopeissa ja painavissa koneissa.

Kun trimmi on oikein säädettynä **ohjauksen tarkkuus paranee ja koneen käsittely laskeutumisessa helpottuu.**



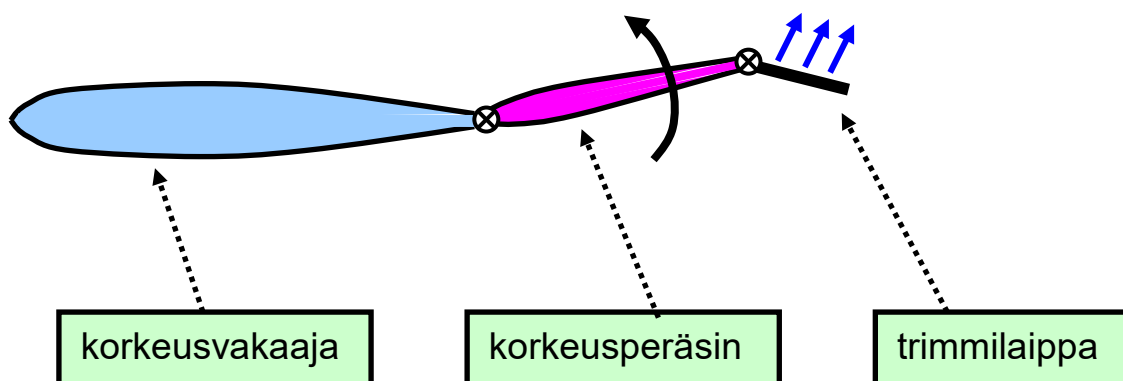
Trimmin toiminta ja käyttö

Trimmilaippa poikkeutettuna **muuttaa peräsinpinnan kaarevuutta**.

Seurauksena se pystyy poikkeuttamaan peräsintä.

Tällöin syntyy samankaltainen voima kuin ohjausliikkeestä.

Korkeusperäsintrimmiä käytetään siten, että ensin valitaan lentonopeus tai lentotila joko työntämällä tai vetämällä sauvaa, jonka jälkeen trimmataan kone.



Läpileikkaus kantopinnoista sekä trimmilaipasta.

Kuva esittää ohjainpintojen asentoa kun kone on trimmattu hidaslentoon - (trimmilaipan voima on kääntänyt korkeusperäsimen on ylös).

Trimmaaminen suoritetaan vetämällä trimmivipua taaksepäin jos halutaan keventää vetoa sauvasta.

Jos halutaan keventää työntöä sauvasta, viedään trimmivipua eteenpäin.

Vipu, joka on yleisin trimmin säätölaite, on varustettu merkinnöillä:

Nokkain (trimmivipu eteen) $\leftarrow \rightarrow$ **Pyrstöpainoinen** (trimmivipu taakse)
tai

Nokka alas (trimmivipu eteen) $\leftarrow \rightarrow$ **Nokka ylös** (trimmivipu taakse)

Vivun asemesta käytetään myös trimmipyörää, kampea tai sähkökytkimiä käyttölaitteena riippuen trimmirakenteesta.

Laskusiivekkeet, solakot ja lentojarrut

Laskusiivekkeet

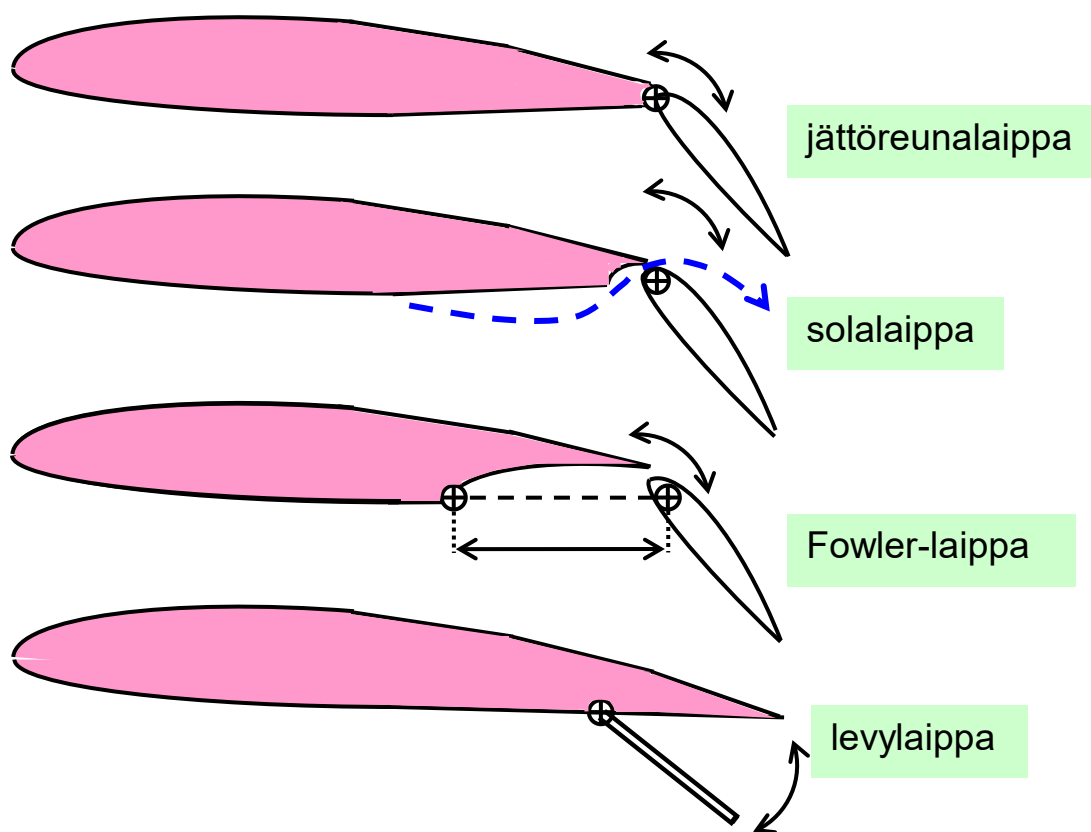
Laskusiivekkeet ovat lähellä siiven takareunaa oleva saranoitu ohjainpinta, joka avattuna (n. $10^\circ - 60^\circ$) kulmaan lisää siipiprofiilin kaarevuutta.

Tällöin siiven kohtauskulma kasvaa jolloin saadaan lisää nostovoimaa, joka parantaa koneen hidaslento-ominaisuuksia.

Samanaikaisesti siiven vastus kasvaa ja "liukkaus" vähenee huomattavasti.

Laskuasussa oleva kone sakkaa pienemmällä nopeudella kuin "sileänä" ja lentoasento on silloin enemmän vaakatasossa.

Laskusiivekkeet asetettuina liukukulma jyrkkenee ja laskukiito lyhenee myös.



Eri laskusiivekemalleja

Ettureunasolakot

Ettureunasolakot ovat pitkiä apuprofiileja jotka sijaitsevat siiven ettureunassa.

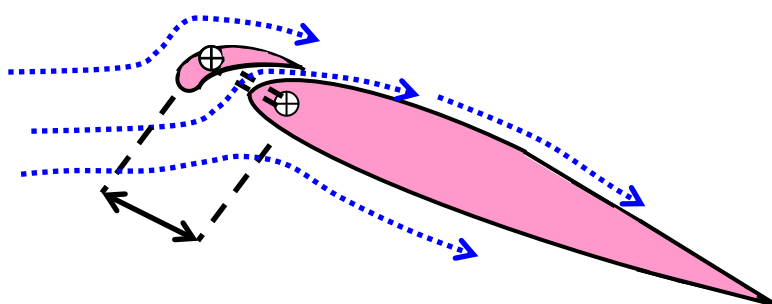
Tehtävänä on parantaa hidaslento-ominaisuuksia suurilla kohtauskulmilla.

Moottorikoneen solakot on usein automaattisesti toimivia, ilmavirta avaa ne suurella kohtauskulmalla ja sulkee ne myös kun kohtauskulma pienenee.

Solakko ohjaa ilmavirtaa ja pitää virtauksen kiinni siiven pinnassa hyvin suurilla kohtauskulmilla.

Solakkojen ollessa auki-asennossa koneen nousukyky heikkenee.

Mikäli ultrakevytkone on varustettu solakolla, se on lähinnä kiinteä rakenne.



Ettureunasolakko auki-asennossa suurella kohtauskulmalla lennettäessä

SAKKAUSTILAT – Yleistä

Sakkaus on ohjaamaton lentotila, jossa siiven **kohtauskulma on liian suuri:**

- aerodynaaminen vastus on kasvanut erittäin suureksi.
- kone menettää nostovoiman lähes täysin – menettää korkeutta nopeasti
- **sakkaus alkaa aina samalla kohtauskulmalla.**
- sitä nopeutta millä sakkaus normaalisti alkaa sanotaan **sakkausnopeudeksi.**
- kone voi sakata myös suurella nopeudella = liian ripeä oikaisuveto syöksystä (**ns. G-sakkaus**).
- laskusiivekkeet asetettuina sakkausnopeus ja -kohtauskulma muuttuu.

Lentokoneen käyttäytyminen sakkauksessa

Kun lentonopeus pienenee ja kohtauskulma suurenee, **koneen nokka nousee** korkealle horisonttiin nähden.

Lähellä sakkaustilaa **ohjainteho heikkenee.**

Kun sakkaus kehittyy kone alkaa **vaappua tai nyökkiä.**

Nopeasti kehittyvässä sakkauksessa kone voi käyttäytyä eri tavalla:

- kone **kaatuu äkkiä siivelle** ja lähtee syöksyyn
- **nokka painuu alas** ja kone lähtee jyrkkään liukuun tai syöksyyn
- kone tärisee, vaappuu nokka koholla ja **menettää korkeutta nopeasti.**

Oikaisu sakkaustilasta

Kone oikaistaan sakkauksesta pääsääntöisesti:

- pienentämällä kohtauskulmaa

- antamalla nokan painua (löysätään vetoa).
- suoritetaan **rauhallinen oikaisuveto** syöksystä, sen jälkeen kun on saatu turvallinen kohtauskulma ja nopeus)

Sakkaus kaarrossa – vaikutus sakkausnopeuteen

Sakkausnopeus kasvaa kaarrossa kallistuksen lisääntyessä,

Kaarrossa tarvitaan lisää nostovoimaa.

Nostovoimalisäys saadaan lisäämällä kohtauskulmaa.

Mitä **jyrkempi kaarto** on sitä enemmän tarvitaan **nostovoimaa lisää**.

Kallistuskulma, kuormituskerroin ja sakkausnopeus kaarrossa

Kallistus- kulma	Kuormitus- kerroin $M = 1/\cos\alpha$	Sakkaus- nopeuden kasvu kertoimena (\sqrt{M})	Sakkaus- nopeuden kasvu %
10 °	1,0154	1,0077	0,7 %
30 °	1,1547	1,0746	7,5 %
45 °	1,4142	1,1892	18,9 %
60 °	2,0000	1,4142	41,4 %

Sakkaus suorassa oikaisuvedossa syöksystä

Kun suoritetaan oikaisuveto syöksystä, nopeus on yleensä melkoinen.

Oikaisuun tarvittava voima saadaan vain siiven nostovoimasta.

Oikaisussa vedetään sauvaa jolloin kohtauskulma kasvaa ja nostovoima kasvaa

Siiven kuormitukseen voidaan verrata koneen painoon suorassa vaakalennossa

G-voimat kasvavat kun nopeus kasvaa tai kaartosäde tiukkenee .

Jos kasvatetaan kohtauskulmaa ylisuureksi, esim. **liian ripeällä oikaisuvedolla,** **kone sakkaa** nopeudesta huolimatta (ns. g-sakkaus).

G-sakkaus on erittäin vaarallinen, koska se rasittaa rajusti koneen rakenteita

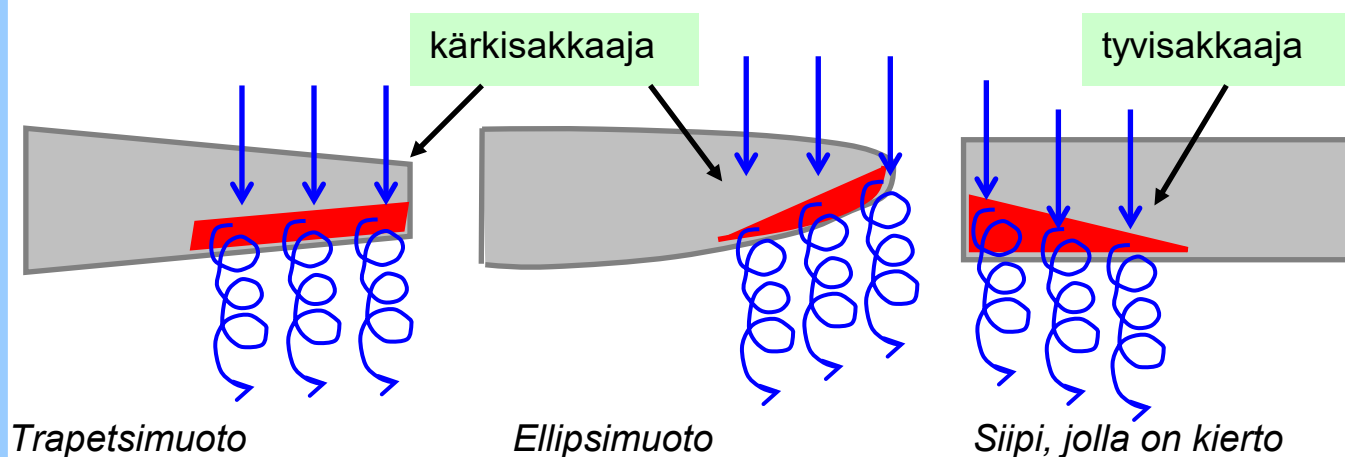
Eri sakkausominaisuuksia – siiven muodon vaikutus

Eri konetyyppien sakkausominaisuuksissa on huomattavia eroja.

Normaalisti koneen nokka painuu sakkaustilassa ja kone alkaa vajota.

Jotkut koneet jäävät nokka hieman koholla ja alkavat vajota yli n. 4 m/sek.

Kone, jolla on trapetsi- tai ellipsimuotoinen siipi saattaa tosin kallistua jyrkästi sakkaustilassa (ns. ”kärkisakkaaja”)



Sakkaus nousussa

Nousussa sakkaus kehittyy nopeasti johtuen siitä, että **kone lentää nousussa jo suurella kohtauskulmalla** – mitä jyrkempi nousu on sitä jyrkempi on kulma.

Moottorihäiriön sattuessa on työnnettävä koneen **nokkaa nopeasti alas**, muuten nopeus vähenee jolloin kohtauskulma kasvaa liikaa ja **kone sakkaa**.

Erytisen vaarallista on joutua sakkaustilaan **nousukaarrossa matalalla**.

Sakkaus liu'ussa

Liu'ussa sakkaus saattaa kehittyä salakavalasti **ilman tunnusmerkkejä**.

Lähestymisessä ohjaajan keskittyessä liikaa hän saattaa vaistomaisesti vetää sauvaa hitaasti taakse kunnes kone sakkaa.

Riski on suuri liu'ussa tyhjäkäynnillä koska potkurivirta ei voimista ohjaintehoa.

Sakkauksen tunnusmerkit

- ohjainvoimien heikkeneminen
 - lievä värinä sauvasta
 - koneen **nokan asento korkealla**
 - **veltot ohjaimet**, kone reagoi laiskasti ohjaukseen
 - varoitusvalo alkaa vilkkua tai -summeri alkaa soida
 - **nokka painuu** alaspäin, tai alkaa heilua ylös- ja alas
 - **kone vaappuu** ja kallistelee edestakaisin
- vajoaminen kasvaa**

Kriittinen kohtauskulma

Sakkaus alkaa aina **samalla kriittisellä kohtauskulmalla** nopeudesta riippumatta.

Riski joutua sakkaustilaan ohjausvirheen seurauksena kasvaa huomattavasti:

- jyrkässä kaarrossa
- oikaisussa syöksystä
- hidaslennossa, etenkin puuskaisessa säässä

Massakeskiöaseman vaikutus

Lennettäessä etummaisella massakeskiöasemalla, kone ei välttämättä sakkaa

Nokkapainoisena **korkeusperäsimen teho voi loppua** ennen kuin kone sakkaa

Lennettäessä takimmaisella massakeskiöasemalla sakkaus kehittyy helposti

Voimakkaasti pyrstöpainoisena kone voi tulla ohjauskyvyttömäksi

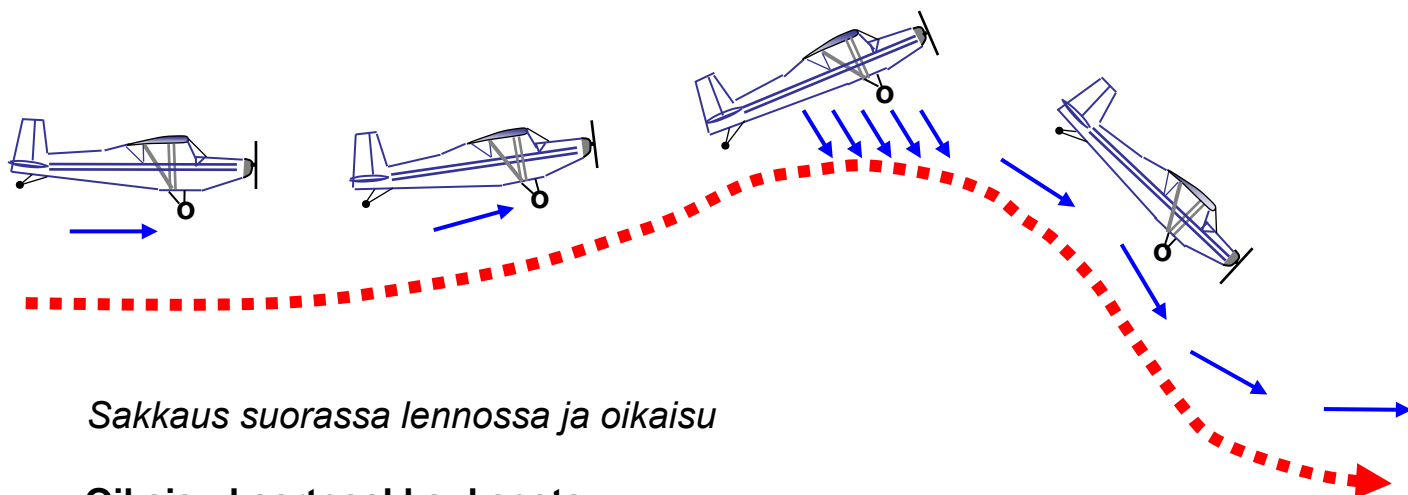
Oikaisu täyssakkauksesta

- 1) vedä kaasu kiinni (jos teho on jäänyt päälle)
- 2) työnnä nokkaa alas (palauta kohtauskulma)
- 3) oikaise kone liu'usta (kun kohtauskulma ja nopeus on OK)
- 4) lisää tehoa samanaikaisesti

Vältä ohjausvirheitä!

*Jos kone sakkaa nokka pystyssä tyhjäkäynnillä ja työnnetään kaasu auki, kone kaatuu todennäköisesti siivelle ja **lähtee kierukkasyöksyyn** – tämä johtuu lähinnä potkurin väännön vaikutuksesta.*

*Jos kone sakatessa kallistuu ja yritetään oikaista konetta viemällä sauvaa päinvastaiseen suuntaan, tilanne vain pahenee koska alaspainunut siiveke lisää vielä kallistuksen puoleisen siiven kohtauskulmaa jolloin kone on valmis **lähtemään syöksykierteeseen**.*



Sakkaus suorassa lennossa ja oikaisu

Oikaisu kaartosakkauksesta

periaatteessa samalla tavalla kuin oikaisu suorasta sakkauksesta

palautetaan kohtauskulma löysäämällä vetoa sauvasta

siivekkeet ja sivuperäsin pidetään **keskitettyinä**

Virheellinen oikaisu kaartosakkauksesta johtaa helposti syöksykierteeseen

Lentotila syöksykierteessä

Syöksykierre on itsestään **jatkuva ohjaamaton sakkaustila**

Koneen nokka osoittaa alas kohti maanpintaa n. 45 ° - 60 ° kulmassa

Kone pyörii menettäen korkeutta nopeasti

Kierteen **sisäpuolinen siipi sakkaa jatkuvasti** kun taas ulkolaidan siipi kantaa

Kone luistaa jatkuvasti kierteen ulkolaidan suuntaan (kuula ulkolaidassa)

Syöksykierre syntyy lähinnä ohjausvirheen tai -virhesarjan seurauksena

Ohjainten asento syöksykierteessä

Korkeusperäsin on käännetty ylös – sauva täysin taakse vedettynä

Sivuperäsinpoljin on painettuna pohjaan kierteen sisälaidan puolelle

Lentoharjoituksena suoritettussa syöksykierteessä siivekkeet ovat keskitettyinä

Vastasiivekkeiden käyttö syöksykierteessä vain pahentaa tilannetta

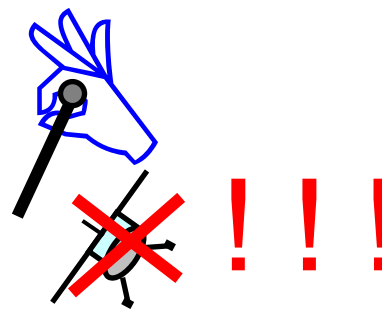
Syöksykierteen välttäminen

Lennä puhtaasti **kuula keskellä**



Käsittele ohjaimia pehmein **joustavin liikkein**

Vältä jyrkkiä kaartoja matalalla ja nousussa

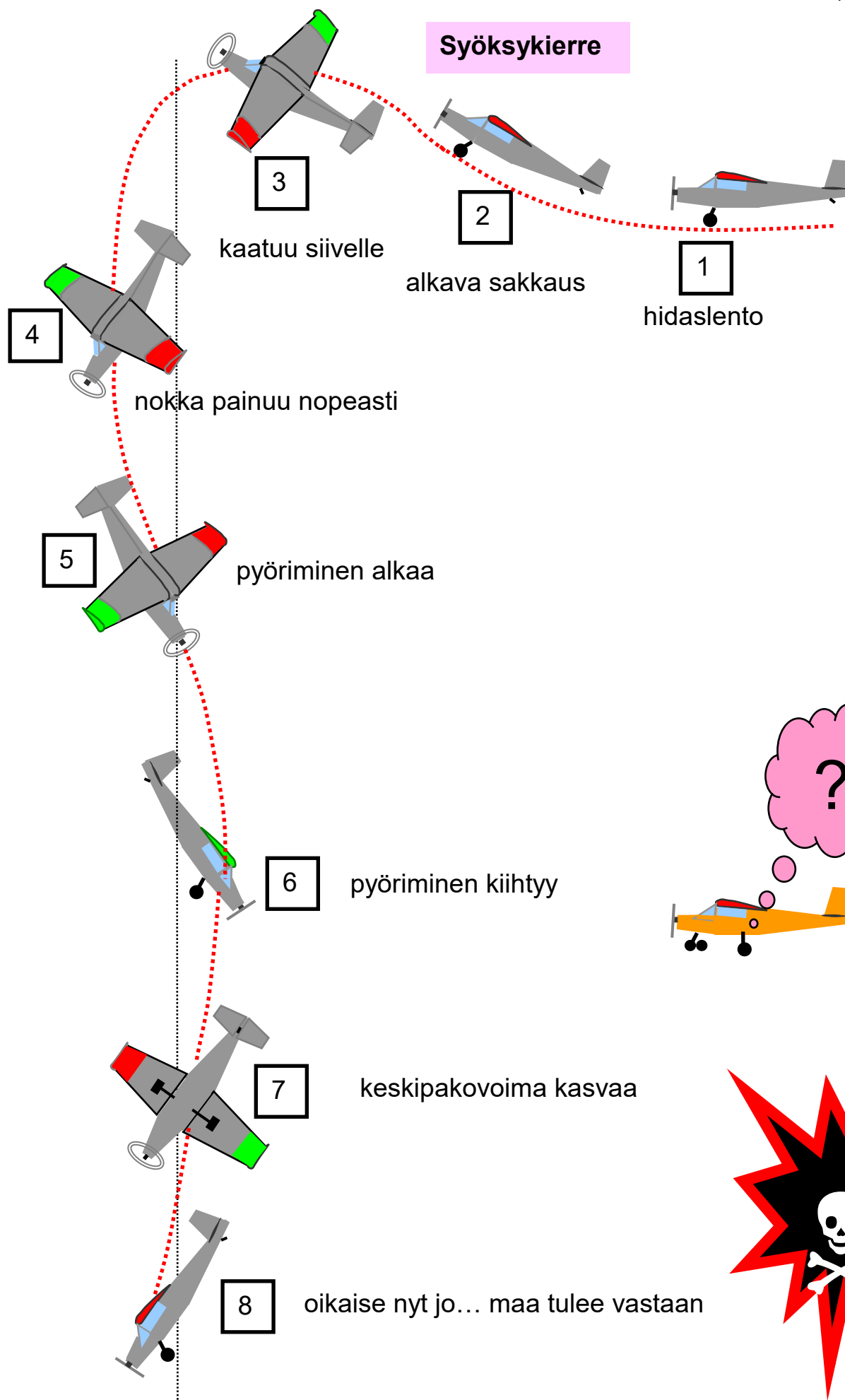


Tarkkaile jatkuvasti **lentonopeuttasi** laskukierroksessa



Lennä turvallisella **nopeusmarginaalilla**





Oikaisu syöksykierteestä

Vedä **kaasu kiinni** ja paina **vastajalka pohjaan**

Löysää vetoa sauvasta tai vie **sauva eteen** yli keskiasennon

Heti kun pyöriminen lakkaa **keskitä sivuperäsin**

Suorita **rauhallinen oikaisu veto** syöksystä

Vaarallinen syöksykierre – lattakierre

Jos syöksykierre jatkuu, se saattaa muuttua lattakierteeksi

Lattakierre on erittäin vaarallinen ja arvaamaton

Lattakierteessä keskipakovoima ja turbulenssi ovat kasvaneet suuriksi

Nokan asento suhteessa maanpintaan on loivassa kulmassa

Nokka saattaa ajoittain nyökkiä ja nousta horisontin yläpuolellekin

Lattakierteessä kaikki **ohjainpinnat ovat täydellisessä sakkaustilassa**

Koneen **virheellinen kuormaus** on usein syy lattakierteen syntyyn

Yleistä syöksykierteestä

Koulukoneet eivät mene syöksykierteeseen, jos ne on kuormattu oikein.

Joillakin saman konetyypin yksilöillä saattaa olla poikkeavia lento-ominaisuuksia

Jos aiot harjoitella oikaisua syöksykierteestä, **tarvitset suuria korkeuksia**

Älä kokemattomana harjoittele omin päin, vaan pätevän opettajan kanssa!

Lentokoneen vakavuus

Koneen vakavuus on sen **kyky palata itsestään takaisin tiettyyn lentotilaan**

Vakavuustilat ovat: **pituusvakavuus, suuntavakavuus sekä poikittaisvakavuus.**

Lentokoneen suunnittelussa pyritään tarkoituksenmukaiseen vakavuuteen.

Pituusvakavuus (Longitudinal Stability)

Pituusvakavuus tarkoittaa, että lentokone on **nyökkimisen suhteen vakaa**, se pyrkii itse palautumaan normaaliin lentotilaan ilman pitkää viivettä riippuen:

- 1 Lentokoneen **painopisteestä**, joka ei saa olla liian takana (tärkein!).
- 2 **Nostovoimakeskiön liikkeestä** siivissä. Tähän vaikuttaa myös siiven kierto ja nuolimuofo.
- 3 **Korkeusvakaajan pinta-alasta ja etäisyydestä painopisteestä**. Vakaajan asetuskulma vaikuttaa enemmän lentoasentoon kuin vakavuuteen.
- 4 Koneen runkoon kohdistuu aerodynaamisia voimia. Kun lentotila muuttuu voi **rungon paineakeskiöasema** myös siirtyä ja siten vaikuttaa lentokoneen pituusvakavuuteen.

Painopisteen sijainti

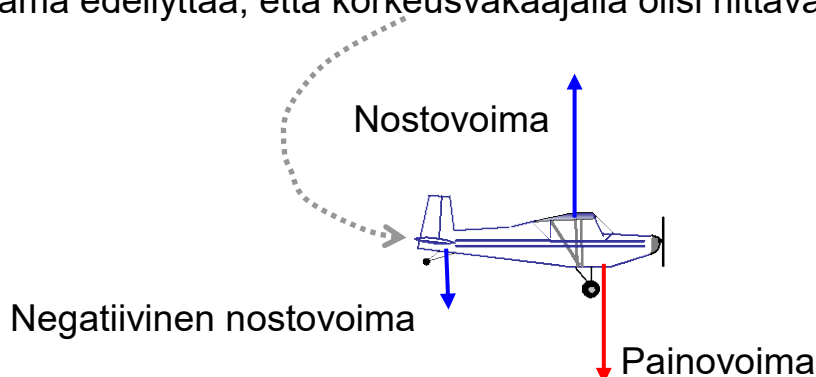
Painopisteen sijainnilla on ratkaiseva vaikutus pituusvakavuuteen.

Pituusvakavuus saadaan kun painopiste on **nostovoimakeskiön etupuolella.**

Korkeusvakaajan tehtäväksi jää tasapainottaa konetta laskemalla pyrstöä.

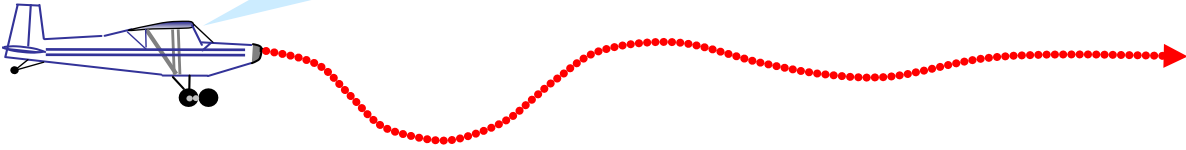
Näin kuormattuna kone pystyy hyvin palautumaan vaakalentotilaansa.

Tämä edellyttää, että korkeusvakaajalla olisi riittävä pinta-ala ja teho.



Staattisesti ja **dynaamisesti vakaa** lento-ominaisuus

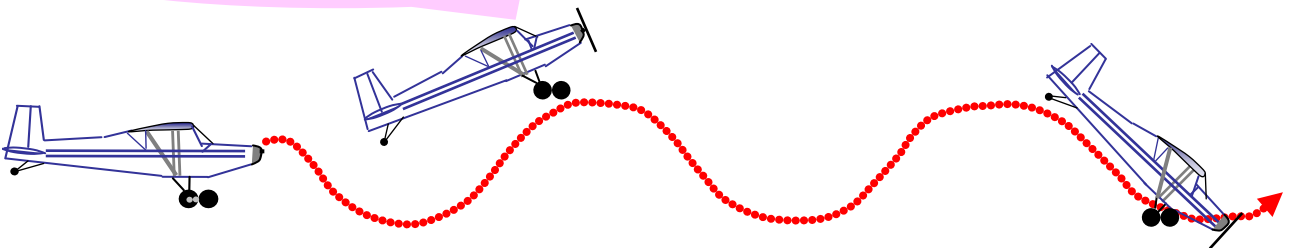
Lentäminen on helppoa ja kivaa!



Muutaman heilahduksen jälkeen kone on jälleen vaakalennossa

Staattisesti vakaa mutta **dynaamisesti epämääräinen** lento-ominaisuus

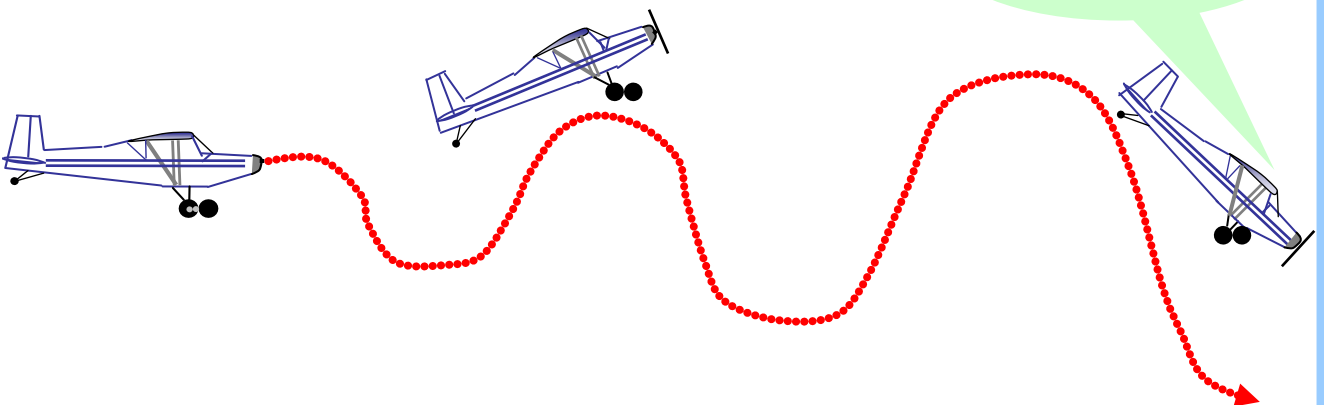
Heilu keinuni korkealle...



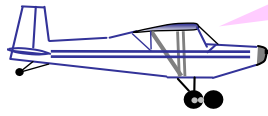
Kun koneen lentotilaa on poikkeutettu, kone toistaa samoja heilahduksia

Staattisesti vakaa mutta **dynaamisesti epävaka** lento-ominaisuus

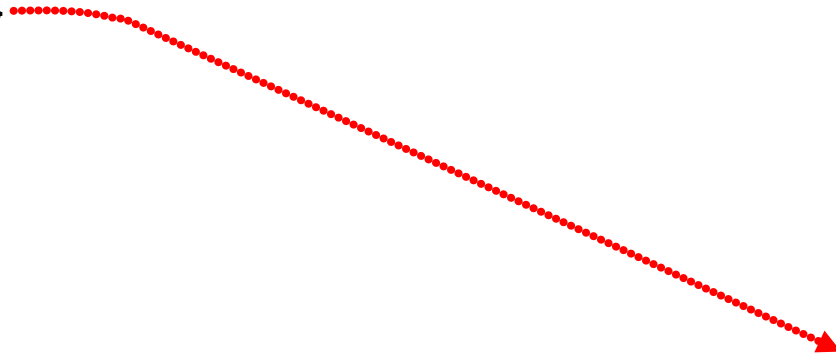
En voi oikein hyvin...ulph...



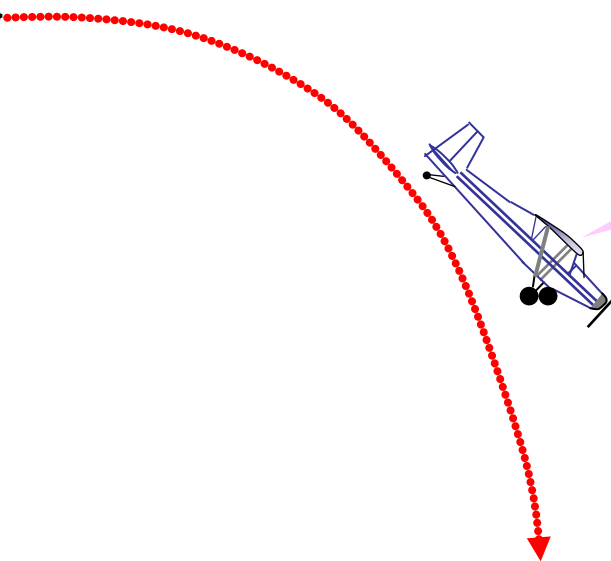
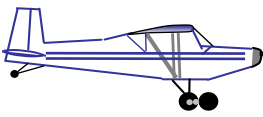
Kun koneen lentotilaa on poikkeutettu, heilahdukset suurenevät jatkuvasti kunnes kone saattaa tehdä ulkopuolisen silmukan

Staattisesti epämääräinen lento-ominaisuus

Miten tässä nyt käy?



Kun kone poikkeutetaan lentotilastaan se jatkaa pitkin muuttunutta lentorataa

Staattisesti epävaka lento-ominaisuus

Apuaaa!

Kun tämä kone poikkeutetaan lentotilastaan sen liukukulma jyrkkenee jatkuvasti

Massakeskiön sijainnin vaikutus pituusvakavuuteen ja ohjattavuuteen

Takapainoinen kone on useimmiten epästabiili pituusvakavuuteen nähden ja sen takia vaarallinen.

Liian nokkapainoisen koneen korkeusperäsin menettää tehonsa ennenkuin kone saavuttaa sakkaustilan. Tämä voi johtaa siihen, että kone pyrkii tulemaan laskuun nokkapyörälle ja alkaa pomppia.

Suuntavakavuus (Directional Stability)

Suuntavakavuus tarkoittaa, että kone pyrkii säilyttämään ohjaussuuntansa.

Tähän vaikuttavat koneen rungon sivupinnat, pinta-ala ja etäisyys painopisteestä.

Jos painopisteen takana oleva paine kääntää konetta voimakkaammin kuin sen edessä oleva paine, pyrkii kone palautumaan alkuperäiseen suuntaansa.

Sivuvakaajan päätehtävänä on huolehtia riittävästä suuntavakavuudesta.

Suuri sivuvakaaja ja sivuperäsin saattavat antaa hyvää suuntavakavuutta, mutta kone voi tulla liian sivutuuliherkäksi laskuissa.

Kallistusvakavuus (poikittaisvakavuus - Lateral Stability)

Kallistusvakavuus = kone pystyy palauttamaan siivet vaaka-asentoon.

Jos kone vaakalennosta kallistuu esim. vasemmalle, vasemman siiven tehollinen kohtauskulma suurenee hetkellisesti kallistusliikkeen aikana.

Kun kohtauskulma hetkellisesti kasvaa, siiven nostovoima kasvaa hetkellisesti.

Tämä kallistelua vastustava voima vaikuttaa vain kallisteluliikkeen aikana.

V-kulman vaikutus

Kallistusvakavuutta parannetaan positiivisella V-kulmalla jossa siipien kärjet ovat korkeammalla kuin niiden tyvet.

Kun kone kallistuu, se alkaa luisua kallistuksen suuntaan.

Ilmavirta kohtaa silloin koneen sekä edestä että sivusta vinottain alhaalta päin.

Alempi siipi jonka suhteellinen kärkiväli jää suuremmaksi, antaa enemmän nostovoimaa kuin ylempi siipi.

Heilurivakavuus

Heilurivakavuus perustuu siihen, että **siivet sijaitsevat korkealla koneen painopisteeseen verrattuna.**

Ylätasokoneen kallistelu oikenee lähinnä siten, että **painopiste pyrkii palautumaan** alkuperäiseen asemaan.

Kallistettuna kone luisuu, jolloin ilmavirta kohtaa rungon hieman sivuttain.

Se rungon osa, joka sijaitsee painopisteen yläpuolella, muodostaa suurimman sivupinta-alan.

Tämä osa rungosta kohtaa tällöin suurimman osan sivuttain tulevasta tuulipaineesta ja auttaa siten konetta oikeenemaan.

Positiivisen nuolimudon vaikutus

Jos kone kallistuu esim. vasemmalle, tapahtuu luisuminen tähän suuntaan.

Ilmavirta kohtaa vasemman siiven etureunaa jyrkemmässä kulmassa kuin oikean siiven puolella.

Tämän takia vasemman siiven **suhteellinen kohtauskulma ja kärkiväli jää suuremmaksi** ja siten se pystyy kehittämään enemmän nostovoimaa.

KALLISTUS- JA SUUNTAVAKAVUUDEN SIVUVAIKUTUKSET

Kallistus- ja suuntavakavuuden välinen suhde

Kun kallistusvakaa kallistuu, kone pyrkii luisumaan kallistuksen suuntaan ja samanaikaisesti kone muuttaa myös ohjaussuuntaansa luisun puolelle.

Ohjaussuunnan muutos aiheuttaa kiertoliikkeen pysty akselin ympäri minkä seurauksena ylempi siipi kehittää enemmän nostovoimaa.

Jos siivellä on V-kulma, on alemmalla siivellä tässä tilanteessa suurempi kohtauskulma kuin ylempällä siivellä. Tästä syntyy kaksi ristiriitaa:

- 1 Suuntavakavuus pyrkii luisun aikana **jyrkentämään käännoästä** joka muuttuu kaarroksi ja lisäksi laskemaan koneen nokkaa.
- 2 Kallistusvakavuus pyrkii sen sijaan **palauttamaan siivet vaakatasoon.**

Kallistus- ja suuntavakavuuden välinen suhde (jatk.)

Jos koneella on hyvä suuntavakavuus ja heikko kallisteluvakavuus:

- kone pyrkii lisäämään kallistusta ja laskemaan nokkaa jatkuvasti
- tästä kone voi mennä kierukkaan ilman ohjaajan myötävaikutusta
- tällöin koneella on heikko kierukkavakavuus.

Vastakohtana on ns. Dutch Roll –taipumus eli heikko suuntavakavuus:

- kone pyrkii kääntymään luisun vastakkaiselle puolelle
- kone kallistuu jatkuvasti vuorotellen puolelta toiselle
- nokka heilahtaa samanaikaisesti päinvastaiseen suuntaan

Dutch-roll –liikettä tulee aina välttää.

Nokan kääntyminen ja sen vaikutus kallisteluun

Jos konetta pakotetaan sivuperäsimellä käännökseen pystyakselinsa ympäri:

- se alkaa luistaa ulospäin
- tämä aikaansaa nostovoimalisäyksen luisun puoleiseen siipeen
- siipien nostovoimaero pyrkii oikaisemaan konetta luisusta ja kallistuksesta

Toisaalta kone kääntyy hetkellisesti myös pystyakselinsa ympäri, jolloin:

- ulompi siipi kulkee nopeammin ja saa enemmän nostovoimaa kuin toinen
- suuntavakavuudesta riippuen suunta säilyy tai kone kääntyy luisun puolelle

Suunta- ja kallistusvakavuus kaarron aloituksessa

Jos suuntavakavuus on heikko ja kallisteluvakavuus hyvä:

- pelkällä sivuperäsimellä saadaan aikaan käännös jossa kone luistaa ulospäin.
- kone kallistuu V-kulman vaikutuksesta käännöksen suuntaan
- kone aloittaa kaarron ilman siivekkeiden apua

Jos on suuntavakavuus on hyvä mutta kallisteluvakavuus on heikko:

- pelkällä siivekeliikkeellä saadaan kone kallistumaan
- koneen suuntavakavuus saa koneen sivuluisuun
- kone aloittaa kaarron ilman sivuperäsimen käyttöä

Lentokoneen suunnittelussa pyritään sekä suunta- että kallisteluvakavuuteen.

TASAPAINOTILAT MAAKÄSITTELYSSÄ

Lentokoneen vakavuus maassa

Painopisteen sijainti on otettava huomioon koneen maakäsittelyssä.

Korkea painopisteasema yhdistettynä pieneen laskutelineen raideväliin muodostaa riskin että kone voi kaatua käännoksissä rullauksen aikana.

Tämän seurauksena kone voi tehdä ns. **ground loop'in** tai tilanteen kehittyessä liian pitkälle, mennä nokan ja siivenkärjen kautta ympäri.

Kevyt kone jolla on tehokas moottori saattaa äkkiä pyrkiä kiitotieltä ulos jos startissa työnnetään kaasu nopeasti auki → **potkurivirran kiertopyrkimys** "voittaa" sivuperäsimen tehon.

Ylätasorakenne tai suuri V-kulma tekee koneesta sivutuuliherkän

Alhainen painopiste ja leveä raideväli vähentävät kaatumisriskit maassa

Kannuspyöräkoneet pyrkivät helposti kiitotieltä ulos epätarkan ohjaamisen seurauksena. Näillä koneilla **pääteline sijaitsee painopisteen etupuolella.**

Jos koneen nokka sivutuulilaskussa osoittaa hieman sivuun kiitotien suuntaan nähden, painopiste pyrkii laskussa eteenpäin **päätelineen keskipisteen ohi** riskinä tahaton käänнос tai kampeaminen ulos kiitotieltä

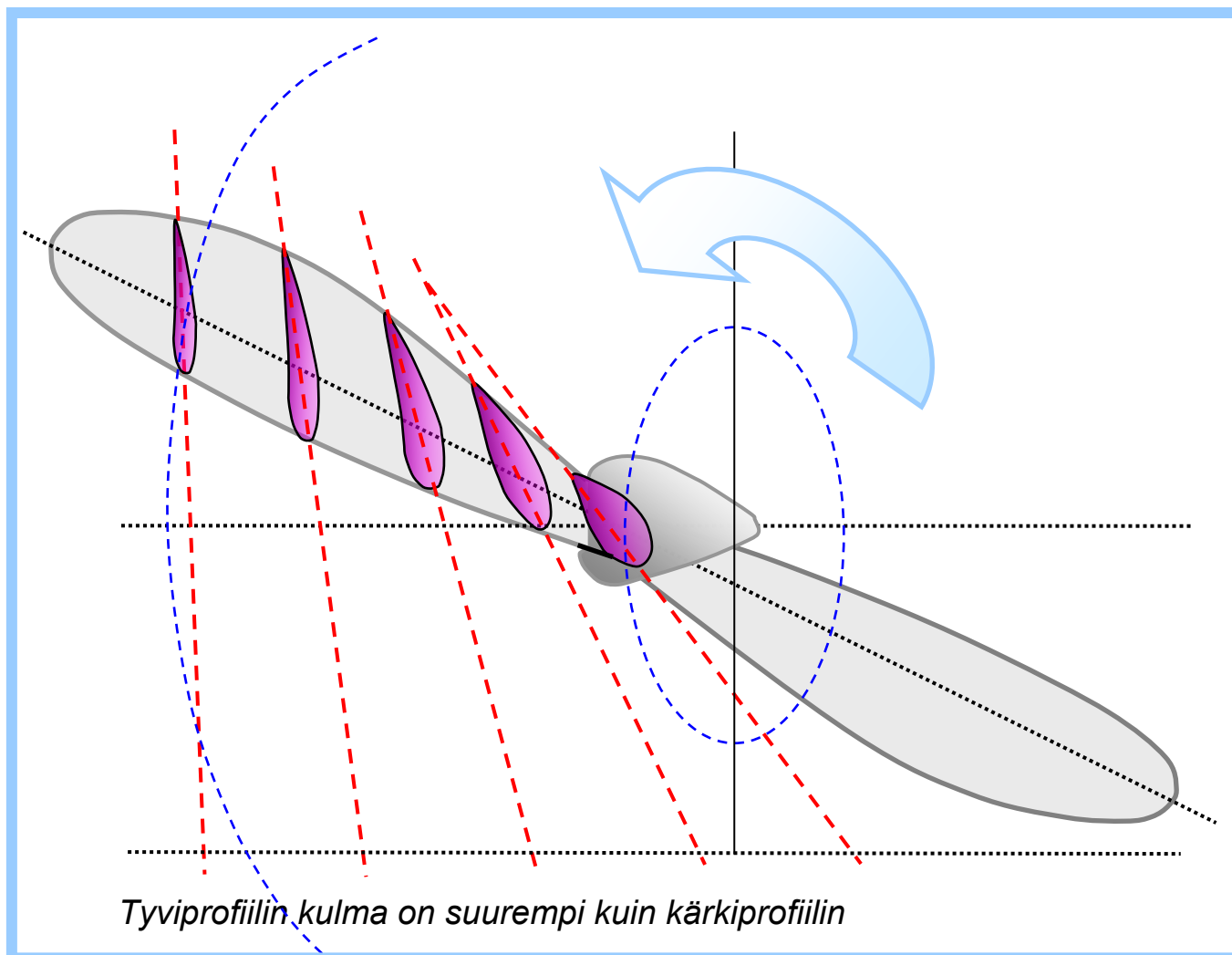
LENTOKONEEN POTKURIT

Potkurin geometria ja liikerata

Lentokoneen potkurin lapa toimii tavallaan kuin pyörivä siipi.
Potkurin lavan poikkileikkaus on siipiprofiilin muotoinen.

Potkurilla on ruuvimuotoinen liikerata suhteessa läpikulkevaan ilmavirtaan.

Kulmaa, jonka potkurin lavan profiili muodostaa potkurin pyörimistason kanssa nimitetään lapakulmaksi.



Potkurin kierto

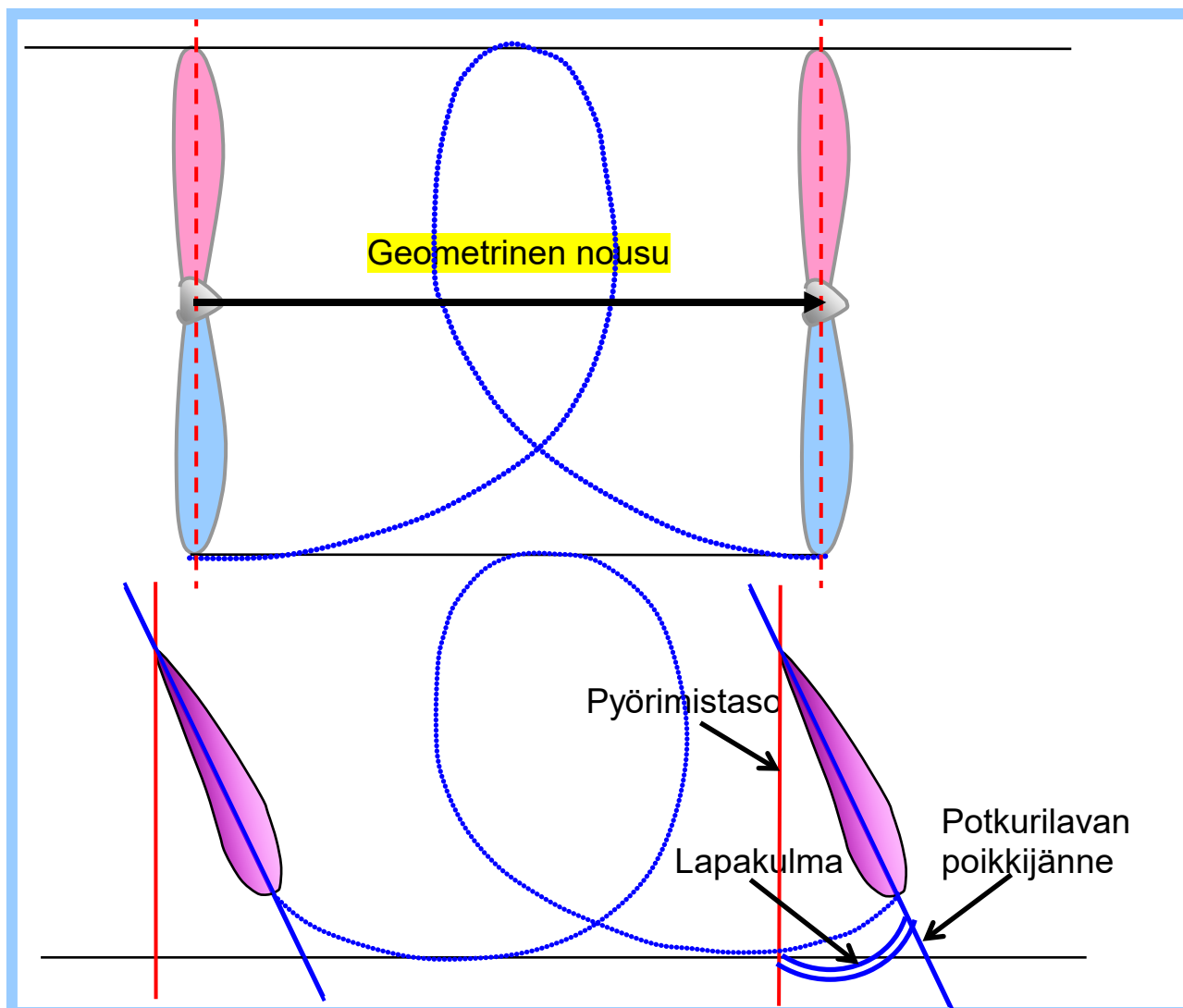
Potkurin keskiöön asennetaan usein spinneri vastuksen vähentämiseksi. Keskiön kohdalla ilmavirta osuu potkuriin suoraan edestä, eli kohtauskulma on siellä likimäärin 90° .

Mitä enemmän siirrytään kohti potkurilavan kärkeä, sitä enemmän lapakulma pienenee.

Potkurin lavassa on kierto koska näin olisi jokaisella lavan profiililla suurin piirtein sama kohtauskulma ilmavirtaan nähden.

Tällaisella kierrolla pyritään saamaan potkuri toimimaan kokonaisuutena mahdollisimman tehokkaasti.

Kun potkuri pyörii yhden kierroksen, jokainen profiili kulkee sekä poikijänteensä että potkurin pyörimistason suunnassa tietyn matkan. Tätä matkaa kutsutaan potkurin **geometriseksi nousuksi**.



Potkurin aiheuttamat voimat – yleistä

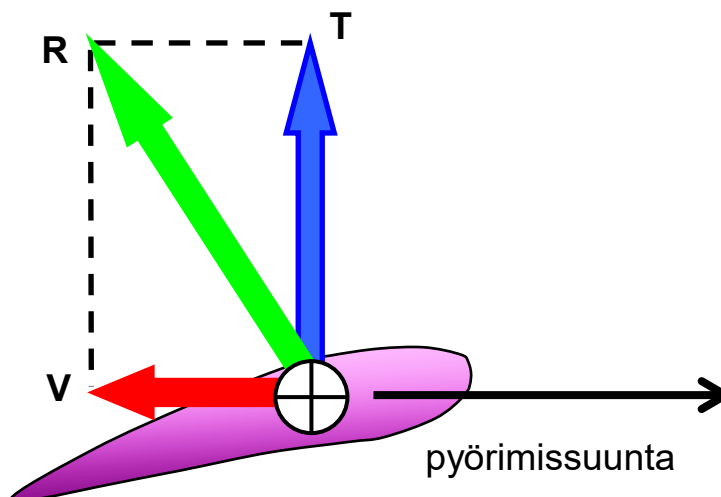
Potkurin pyöriessä kunkin potkurin lapa synnyttää sekä nostovoimaa että vastusta muodostaen aerodynaamisen kokonaisreaktion (R).

Reaktion (R) voi jakaa kahteen komponenttiin:

- 1 koneen pituusakselin suuntainen komponentti = työntövoima (T)
- 2 potkurin pyörimistason suuntainen komponentti = vääntövoima (V), jota nimitetään myös potkurin pyörimisvastukseksi

Lentoonlähdessä työntövoima on suurempi kuin koneen kokonaisvastus.

Tasaisessa suorassa vaakalennossa työntövoima on yhtä suuri kuin lentokoneen kokonaisvastus.



Potkurin nousu ja kulmat

Lapakulma = Kunkin profiilin poikkijänteen ja pyörimistason välinen kulma.

Kohtauskulma = Kunkin profiilin poikkijänteen ja ilmavirran välinen kulma (lennolla kohtauskulma on paljon pienempi kuin lapakulma).

Tehollinen nousu = potkurin todellisuudessa kulkema matka / kierros.

Kokeellinen nousu = potkurin yhden kierroksen aikana kulkema matka ilmassa sellaisessa tilanteessa että se ei vedä eikä jarruta esim. liu'ussa.

Potkurin luisto = potkurin kokeellisen nousun ja tehollisen nousun ero.

Potkurin työntövoiman vaihtelut

Kun kone on lentoalähdössä, nousussa tai vaakalennossa, potkuri kehittää työntövoimaa.

Jos vähennetään tehoa ja asetetaan kone jyrkkenevään liukuun, jossakin vaiheessa potkuri ei kehitä mitään työntövoimaa eikä myöskään jarruta.

Kun liuku tästä vielä jyrkkenee, alkaa potkuri vähitellen jarruttaa.

Eri nousuiset potkurit

Eri potkureilla on eri suuruinen nousu, riippuen käyttötarkoituksesta.

Matkapotkurilla on suuret lapakulmat ja se on tehokas suurilla nopeuksilla

Hinauspotkurilla on loivat lapakulmat ja se on tehokas pienillä nopeuksilla ja antaa hyvän työntövoiman lentoalähdössä ja nousussa.

KUORMITUSKERROIN JA LENTOLIIKKEET

Rakenteellisten vaatimusten huomioonottaminen

Rakenteiden lujuus ultrakevyitä lentokoneita varten on määritelty JAR-22 –vaatimuksissa.

Vaatimukset on laadittu normaalitoimintaa varten, minkä vuoksi taitolento ei ole sallittua näiden vähimmäisvaatimusten mukaan, jossa rakenteen on kestettävä vähintään seuraavia liikehtimis-kuormituskertoimia vastaavat rajakuormat:

positiivinen kuormituskerroin **3,8 g**, ja
negatiivinen kuormituskerroin **1,5 g**.

Lennoilla kuormituskerroin (g) on nostovoiman ja ilma-aluksen kokonaispainon välinen suhde.

Lisäksi rakenteen on kestettävä JAR-22 mukaisesti määritetyt puuskuormat. Suunnittelussa on myös käytettävä JAR-22:n mukaisia varmuuskertoimia. (Yleensä lujuudet on laskettu varmuuskertoimella 1,5).

Kuormituskertoimet on eritelty liikehtimisalueelle sekä suurimmalle sallitulle nopeudelle.

Liikehtimisen ja puuskuormituksen rajakäyrät

Rakenteen on kestettävä suurimmat käytössä odotettavissa olevat kuormitukset, ns. rajakuormat ilman että rakenne saa mitään pysyviä muodonmuutoksia.

Rajakuorma on suurin kuorma jonka voidaan odottaa syntyvän koneen käytön aikana. Mahdollinen muodonmuutos rajakuormaan asti ei saa olla haitaksi ilma-aluksen turvalliselle käytölle.

Murtokuorma on rajakuorma kerrottuna varmuuskertoimella, jonka on oltava vähintään 1,5 ellei toisin ole määrätty.

On erittäin tärkeää, että huomioidaan lentokäsikirjan tai –ohjekirjan ohjeet koskien ilma-aluksen kuormausta. Lisäksi on sopeutettava lentonopeus ja ohjaustyyli vallitseviin olosuhteisiin.

Lentäminen puuskaisessa säässä edellyttää ennen kaikkea maltillisia lentonopeuksia ja ohjausliikkeitä. On lukuisia esimerkkejä siitä että lennettäessä ylinopeudella puuskaisessa säässä kone on hajonnut ilmassa.

Ohjekirjan rajoituksista

Ohjekirjassa saattaa lisäksi olla epäsymmetristen lentotilojen rajoituksia:

- täysi siivekepoikkeutus
- luisut
- suuntaheilahtelut

Tällaiset epäsymmetriset lentotilat kuormittavat myös sivuttaisohjauspintoja.

Muista rakenteiden kuormitusta rajoittavista tekijöistä mainittakoon:

- moottorin vääntö- ja hyrrävoimat,
- ohjainjärjestelmien ja ohjainpintojen kuormat sekä
- laskutelineiden tai kellukkeiden kuormat

Rajoittavat kuormituskertoimet eri laskusiivekeasenoilla

Laskusiivekkeiden ottaminen ulos kasvattaa hetkellisesti nostovoimaa.

Laskusiivekkeiden nopeusalue on selvästi merkitty valkoisella kaarella ilma-aluksen nopeusmittariin.

Nopeuden noudattamisen lisäksi on tärkeitä että koneen lentotila myös on sopiva laskusiivekkeiden ottamiseen ulos vaikka nopeus muuten olisi OK.

Lenolla on yleensä suositeltavaa ottaa laskusiivekkeitä ulos asteittain.

Kuormituskertoimen muutokset kaarrossa ja oikaisuvedoissa

Koska termiikki- ym. puuskat saattavat joskus ylittää 2 g:tä turbulenssissa lennettäessä, on syytä sovittaa lentonopeus ja lentotila ko. tilanteeseen.

Erytisesti tulee varoa rakenteiden ylikuormittamista oikaisuvedossa jyrkästä liu'usta tai syöksystä.

Kuormituskerroin kasvaa kun lentoradan sädettä kaarrossa tai oikaisuvedossa tiukennetaan.

Lentotoiminnassa on syytä myös varautua siihen, että vanhan koneyksilön varmuuskertoimet on mahdollisesti osittain "syöty", eivätkä välttämättä enää vastaa uuden koneen vastaavia lujuuksia.

YLEISET VAROTOIMENPITEET LENNOLLA

Jotta koneen lentotila pysyisi hyvin hallinnassa, kone tulisi trimmata riittävän huolellisesti.

Ultrat ja moput on yleensä kelpuutettu operointiin vain **näkölentosääntöjen** mukaan **päivällä** (päivä-VFR), **ei-jäätävissä olosuhteissa.**

Lisäksi on otettava huomioon tosi-ilmanopeuden ja mittarinopeuden erot korkealla lennettäessä.

Kierukka eli spiraali (Spiral Dive)

Kierukka on lentotila jolla ei ole mitään tekemistä syöksykierteen kanssa.

Se saa alkunsa liian suuresta kallistuksesta jyrkästä kaarrosta.

Useimmiten tämä tapahtuu kun ohjaaja menettää asentotajunsa huonossa säässä jossa suurella kallistuksella suoritettu kaartto jyrkkenee nopeasti.

Kierukassa nopeus kiihtyy äkkiä ja kaikilla ohjaimilla on suuri välitön teho.

Ennen kuin kone karkaa käsistä on välittömästi ryhdyttävä oikaisutoimenpiteisiin alkavasta kierukasta.

Oikaisu: 1) liika kallistus pois, 2) oikaisuveto varoen, ja 3) jos koneessa on lentojarrut ne voidaan tiukalla otteella avata varoen.

Huurteen, jään tms. epäpuhtauksien vaikutus lento-ominaisuuksiin

Moni kone reagoi herkästi siipiin ja vakaajaan kertyneeseen huurteeseen.

Ohutkin huurrekerros siivellä muodostaa huomattavan riskitekijän ja se voi tehdä lentoonlähden mahdottomaksi.

Sakkausnopeus kasvaa huomattavasti ja koneen suoritusarvot heikkenevät huolestuttavassa määrin.

On myös sattunut, että korkeusvakaajaan muodostunut huurrekerros tai jäänmuodostus vakaajan etureunaan on aiheuttanut pystysyöksyn ns. vakaaja- ja peräsinsakkauksen takia.

Korkeusvakaajan tehtävä on tasapainottaa kone painamalla pyrstöä alas, koska massakeskiöasema sijaitsee nostovoimakeskien liikkuma-alueen etupuolella normaalissa lentotilassa.

Jos korkeusvakaajasta häviää teho, joutuu kone välittömästi pystysyöksyyn.

Lentäjän on erityisesti syytä muistaa, että koneen siipien, vakaajien ja peräsinpintojen tulee olla täysin puhtaita ennen lentoa, sama koskee myös potkurin lapoja ja spinneriä.

Päätteeksi: Lentäjän on aina pidettävä mielessä, että jokaisella koneyksilöllä on omat erityispiirteensä ja sillä tulee lentää sen omilla ehdoilla.

LIITE 1: Aerodynaaminen keskiö ja momenttikerroin

