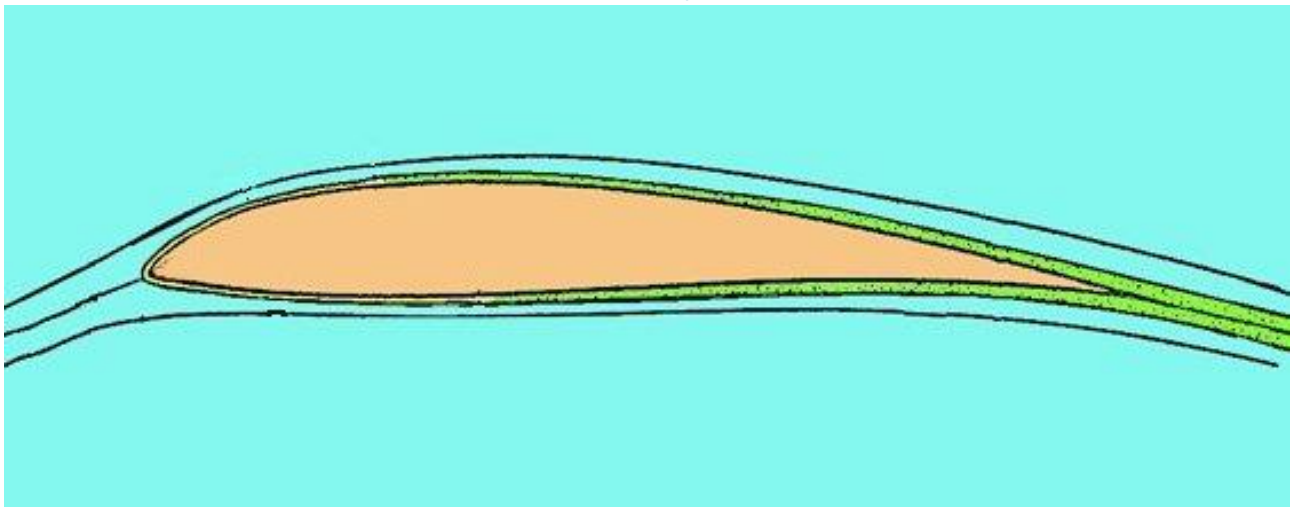
AERODYNAMIIKKAA

Lentäjille ja lentomekaanikoille

Erkki Haapanen



Teos käsittää lentäjän ja purjelentäjän lupakirjaan vaadittavan aerodynamiikan osuuden, joka on määritelty EASA:n (European Aviation Safety Agency) Lentomiehistöasetuksessa (1178/2011) Revisio 17/06/2016 V02.

Aerodynamiikka -kirjan uudistettu 3. painos pdf-versiona, Jämsä.
1. painos 1972, 2. painos 1984.

Copyright © 2016 Erkki Haapanen
All rights reserved.

Sisällysluettelo

Esipuhe 6
ILMAKEHÄN OMINAISUUDET 7
Ilmakehän rakenne 7
Ilmakehän koostumus 7
Kansainvälinen ilmakehä 7
Staattinen paine 7
Lentokorkeus 7
Isobaarit 8
Lämpötila 8
Inversio 8
Tuuligradientti (wind shear) 9
Tiheys 9
Kaasujen tilan yhtälö 10
Tiheyskorkeuden määrittely painekorkeuden ja lämpötilan avulla. 10
Viskositeetti 11
Reynoldsin luku, Re 11
Yhteenveto 12
Kysymyksiä 12
PERUSKÄSITTEITÄ JA MÄÄRITELMIÄ 13
Vektori. 13
Vektoreiden yhteenlasku: 13
Nopeusjakauma 13
Painejakauma 14
Virtaviivat 14
Staattinen paine 14
Patopaine 14
Pitot-paine 15
IAS, TAS ja GS 15
Kineettinen paine 15
Newtonin lait 15
Newtonin ensimmäinen laki, jatkuvuuslaki 15
Newtonin toinen laki, dynamiikan peruslaki 16
Newtonin kolmas laki, voiman ja vastavoiman laki 16
Bernoullin laki 16
Siipiprofiili ja siihen liittyvät nimitykset 16
Aerodynaamiset kertoimet 17
Esimerkki nostovoimakertoimesta: 17
Vastuskerroin 18
Siiven momenttikerroin C_M 18
Esimerkki momentista: 18
Sivusuhde 18

Trapetsisuus ... 19
Siiven V-kulma ... 19
Nuolikulma ... 19
Kysymyksiä ... 19
AERODYNAMIIKAN PERUSTEET ... 20
NOSTOVOIMAN SYNTYMINEN ... 20
2D virtaus ... 21
3D virtaus ... 21
Nostovoiman suuruuteen vaikuttavat tekijät: ... 22
Vastuksen suuruuteen vaikuttavat tekijät ... 23
Kysymyksiä ... 24
SIIVEN PITUUDEN VAIKUTUS VIRTAUKSEEN ... 25
Kärkipyörre ... 25
Maaefekti ... 26
Indusoitu vastus ... 26
Polaari eli napakäyrä ... 27
Haitallinen vastus eli loisvastus ... 27
Kokonaisvastus ... 28
Yhteenveto vastuksesta: ... 28
Kysymyksiä ... 29
SAKKAUSILMIO ... 30
Kysymyksiä: ... 31
RAJAKERROSTEORIAA ... 32
Keinoja parantaa sakkausominaisuuksia ... 33
Pyörregeneraattori ... 33
Turbulaattori ... 34
Rajakerrosaita ... 34
Kysymyksiä ... 35
NOSTOVOIMAA LISÄÄVÄT LAITTEET ... 35
Nostovoimaa lisäävät laitteet siiven jättöreunassa ... 36
Etureunalaippa (etureunasolakko) ... 36
Lyhyt yhteenveto eri laippatyyppien vaikutustavoista: ... 37
Laskusiivekkeiden käyttö laskussa ... 37
Laskusiivekkeiden käyttö lentoonlähdössä ... 38
Kysymyksiä ... 38
POTKURI ... 39
Potkurin nousu ja lapakulma ... 39
Potkurin jarrutus, kun moottori ei vedä ... 40
Kysymyksiä ... 41
SUORITUSARVOT ... 41
Yleistä ... 41
Mitä ominaisuuksia suoritusarvoilla tarkoitetaan: ... 41
Vaakalento ... 42

Vaakalentonopeuden ja kiihtyvyyden maaräytyminen: 42
Tehoasetuksen vaikutus vaakalentonopeuteen 42
Nousu 44
Polaarin käyttö liitosuhteen määrittelyyn 44
Liitosuhteeseen ja vajoamisnopeuteen vaikuttavat tekijät 46
Lakikorkeus 46
Toimintamatka ja toiminta-aika 47
Lentoonlähtömatka 48
Maakiito 48
Maakiidon pituuteen vaikuttavat seuraavat tekijät: 48
Lyhin lentoonlähtötapa 50
Yhteenveto lentoonlähtömatkaan vaikuttavista tekijöistä: 52
Ylösveto ja nousu 50 jalan korkeuteen 52
Laskumatka 52
Hyötykuorma 53
Kysymyksiä 53
LENTOKONEESEEN VAIKUTTAVAT VOIMAT ERI LENTOTILOISSA 54
Siipeen kohdistuvat voimat 54
Siivekejarrutus 54
Koneeseen vaikuttavien voimien yhdistäminen 56
Voimat eri lentotiloissa 56
Suora lento 56
Oikaisu syöksystä 56
Kaartolento 56
Puuskakuormitukset 58
V-n piirros eli nopeus-kuormitus-piirros 58
Kysymyksiä 59
LENTOKONEEN VAKAVUUS JA OHJATTAVUUS 59
Staattinen vakavuus 60
Dynaaminen vakavuus 60
Koneen trimmaus ja ohjattavuus 60
Vakavuusakselit 61
Pituusvakavuus 61
Sauvavoiman riippuvuus painopisteestä 63
Sauvavoiman muuttuminen kiihtyvyyden vaikutuksesta 63
Suuntavakavuus 63
Sivuluisu 64
Suuntavakavuutta lisäävät seuraavat tekijät: 64
Moottorin vaikutus koneen suuntavakavuuteen 64
Kallistusvakavuus 65
Kallistusvakavuutta lisäävät: 65
Dynaaminen kallistusvakavuus 65

Syöksykierre ja sen oikaisu 66
Oikaisu syöksykierteestä 67
Oikaisu lattakierteestä 67
Kysymyksiä 68
ERITYISKYSYMYKSIÄ 69
Suoritusarvoja parantavia ratkaisuja 69
Jäätävät olosuhteet 69
Käytetyt merkinnät 70

Uusittu ja täydennetty painos. Hallissa 14.10.2016 Erkki Haapanen

© Copyright Erkki Haapanen

Esipuhe

Tämä teos on tarkoitettu lentäjille käytettäväksi lento-opintojen ohessa. Teos soveltuu myös mekaanikkojen ja lennon opettajien koulutukseen. Oppiminen sujuu parhaiten, jos lentokoulutuksessa kerrataan ennen lentoa suunniteltuihin lentoihin liittyvä teoria, jotta lennolla voidaan saada tuntuma siihen mistä on kyse. Tämä sitoo teorian käytäntöön, jolloin siitä poistuu ”kirjan maku”. Tuntuma on erittäin tärkeä etenkin niissä asioissa, jotka liittyvät lennon kriittisiin osioihin, hidaslentoon, sakkaukseen, virheliikkeisiin jne. Oppilaan on opittava tunnistamaan koneen käyttäytymisestä, milloin ollaan lähellä ongelmaa ja ennen kaikkea, miten keskeyttää ongelmatilanteen eteneminen.

Uutisissa olemme saaneet kuulla liiankin usein epäonnistuneista laskuista tai epäonnistuneista lentoonlähdöistä. Usein niissä on ollut mukana inhimillinen tekijä, pilotin virheellinen toiminta.

Lentäminen on kiehtonut ihmistä jo muinaisista ajoista lähtien. Linnut ovat olleet ja ovat vieläkin erinomaisia opettajia lentämisen saloihin. Niidenkin on ensin harjoiteltava, jotta oppisivat tarvittavat lentotaidot. Ihmisen on mahdollista oppia sekä käytännön että teorian avulla. Teoria antaa selityksen sille, miksi ilmiöt käyttäytyvät niille ominaisella tavalla. Tulee tässä mieleen aikanaan eräälle taitolentoliikkeelle annettu nimi, joka kertoi kaiken siitä liikkeestä. Liike oli ”älytön” ja sen antoi ensimmäinen, joka selvisi siitä hengissä. Nykyisin, kun tiedetään liikkeeseen liittyvä aerodynamiikka, se kuuluu tavanomaisiin taitolentoliikkeisiin, joskin uudella nimellä ”nopea vaakakierre”.

Tässä teoksessa on alussa joukko käsitteitä, jotka liittyvät oleellisesti aerodynamiikassa käytettyihin ilmiöihin. Monille termit ja käsitteet ovat tuttuja jo ennestään, mutta elleivät ne ole, niin ne löytyvät alkuosasta. Varsinainen aerodynamiikka alkaa sivulta 20.

Tämän oppikirjan lisäksi on syytä korostaa, että lentokoneen omassa lentäjän käsikirjassa on kerrottu kyseisen lentokoneen ominaisuuksista ja menettelytavoista sekä rajoituksista. Ne on oltava hallinnassa ja varmistuttava siitä, että toimitaan niiden rajoitusten puitteissa.

Hallissa Erkki Haapanen, 27.10.2016

ILMAKEHÄN OMINAISUUDET

Ilmakehän rakenne

Lentoliikenne tapahtuu normaalisti troposfäärissä, joka ulottuu maanpinnasta stratosfääriin saakka. Tropopaussi on stratosfäärin ja troposfäärin rajana oleva inversiokerros, joka on päiväntasaajan lähellä noin 16 – 20 km ja napa-alueella noin 6 - 8 km korkeudella. Troposfäärissä ilman lämpötila laskee noin 6,5 °C/km joskin sääilmiöt aiheuttavat runsaasti vaihteluja on molemmin puolin. Sääilmiöt rajoittuvat troposfääriin. Tropopaussin lämpötila on napa-alueilla noin -45°C ja päiväntasaajalla jopa -75°C. Stratosfääri ulottuu noin 50 km korkeuteen.

Syy siihen, miksi lentoliikenne rajoittuu enimmäkseen troposfääriin, on moottoritehon heikkenemisessä, koska stratosfäärissä lämpötila ei laske, vaikka ilman tiheys edelleen pienenee. Hyötysuhteen lasku ei ole niin merkittävä, etteikö stratosfäärin alemmissa kerroksissa voisi lentää varsinkin napa-alueilla, joissa tropopaussi on suhteellisen matalalla.

Ilmakehän koostumus

Kappaleen pintaan vaikuttavat aerodynaamiset voimat syntyvät ympäröivän ilmamassan ominaisuuksista. Ilmakehän koostumus maanpinnan lähellä on likipitäen seuraava: 78 % typpeä, 21 % happea ja 1 % vesihöyryä, argonia, hiilidioksidia jne. Lähes kaikissa aerodynaamisissa tarkasteluissa ilmaa voidaan pitää tasaisena kaasuseoksena. Ilmakehän fysikaaliset ominaisuudet voidaan tavallisesti määritellä paineen P, lämpötilan T, tiheyden ρ ja viskositeetin ν tai η avulla.

Kansainvälinen ilmakehä

Kansainvälinen standardi-ilmakehä (International Standard Atmosphere, ISA) määrittelee ilman paineen, lämpötilan, tiheyden ja viskositeetin arvot merenpinnasta aina 80 km korkeudelle saakka. Lentokoneen suoritusarvot normalisoidaan vastaamaan ISA:n arvoja.

ICAO Standard Atmosphere

Korkeus, km ft	Lämpötila °C	Paine, hPa	Muutos, °C/1000 ft
0 km MSL	15.0	1013.25	−1.98 (Tropospheric)
11 km 36 000 ft	−56.5	226.00	0.00 (Stratospheric)
20 km 65 000 ft	−56.5	54.70	+0.3 (Stratospheric)
32 km 105 000 ft	−44.5	8.68	

Taulukko 1. Standardi ilmakehän arvoja. Kansainvälinen standardi-ilmakehä, (ISA) on kansainvälisen siviili-ilmailujärjestön (ICAO) määrittelemä ilmakehämalli, joka perustuu keskimääräisiin olosuhteisiin maapallon keskileveysasteilla. ISA ei ota huomioon ilman kosteutta, joka pienentää hieman tiheyttä ja vaikuttaa ilman lämpötilan muutokseen korkeuden muuttuessa.

Staattinen paine

Ilmakehän staattinen paine tietyssä korkeudessa aiheutuu yläpuolella olevan ilman painosta. (Vrt. veden hydrostaattinen paine.) ISA on sopinut, että normaali ilmakehän staattinen paine merenpinnan tasolla on 1013,25 hPa (= 29,92 inHg). Tämä paine pienenee korkeuden kasvaessa kuvan 1 osoittamalla tavalla. Staattinen paine on 5.500 m:n korkeudessa puolet meren pinnalla vallitsevasta. Joskus on mukavampaa käyttää painesuhdetta δ, kun halutaan ilmaista, monesko osa kyseinen paine on merenpinnalla vallitsevasta paineesta.

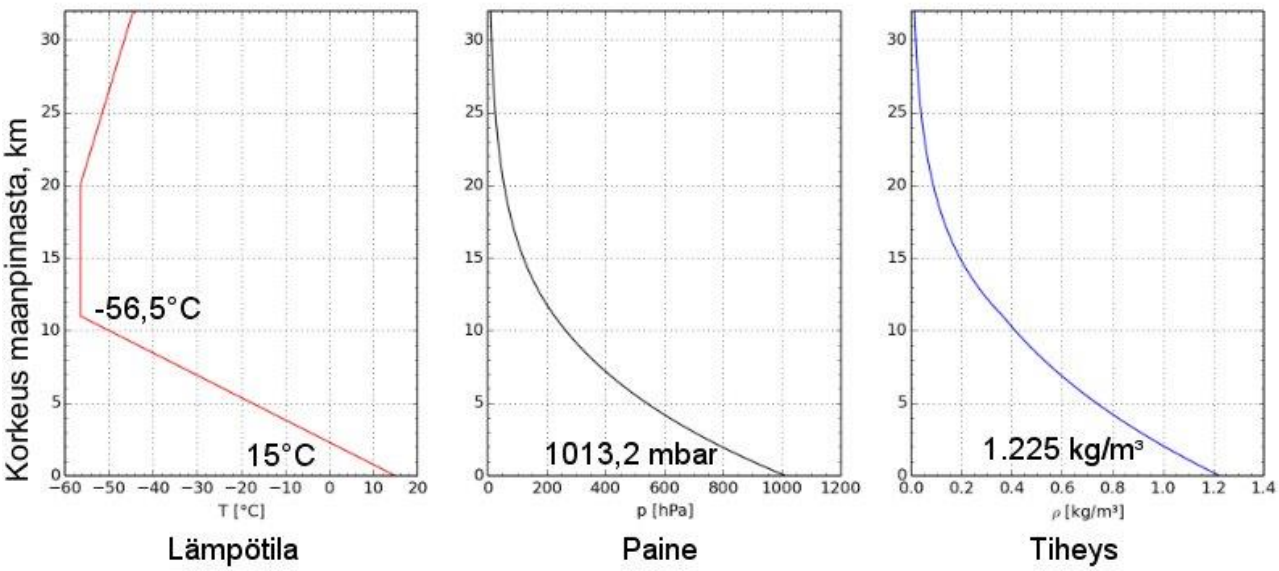
Lentokorkeus

Lentokoneen korkeusmittari mittaa staattisen paineen erotuksen perusteella lentokorkeuden. Mittarin vertailupaine on asetettavissa käyttötarkoituksen mukaan, jolloin näytetty lentokorkeus asetuksesta. Kun korkeusmittarissa on:

- QFE asetus, niin korkeusmittari näyttää nollaa, kun kone on maassa.
- QNH asetus vastaa lentopaikan korkeutta merenpinnasta. Kun lentokorkeus ylittää siirtopinnan, jonka ATS-elin kulloinkin määrittelee (Suomessa yleisin siirtopinta mittarilennossa on 1500 m), käytetään ISA:n mukaista asetusta 1013,2 hPa, jolloin lentopintojen korkeudet ovat vallitsevasta ilmanpaineesta riippumatta jokaiselle samat.

Isobaarit

Sääkartalla ilmanpaine osoitetaan isobaareilla, jotka ovat painekorkeuskäyriä.



Kuva 1. Standardi ilmakehän lämpötila, paine ja tiheys eri korkeuksilla merenpinnasta. Nämä arvot perustuvat kansainväliseen sopimukseen ja niitä käytetään esimerkiksi vertailtaessa eri laitteiden kuten moottoreiden tai lentokoneiden ominaisuuksia ja käyttäytymistä eri korkeuksilla. 1 mbar = 1hPa.

Lämpötila

Ilmakehän absoluuttinen lämpötila on toinen tärkeä ominaisuus. Normaalin Celsius-asteikon nollakohta on jään sulamislämpötilan kohdalla, mikä vastaa absoluuttisessa eli Kelvin-asteikossa 273 ^{0} K. Standardi-ilmakehän lämpötila on merenpinnan tasolla + 15^0 C eli 288 ^{0} K, jota merkitään To. Samoin kuin painesuhde määritellään lämpötilasuhde $\theta = T/To$, jossa T on tarkasteltavan korkeuden lämpötila Kelvin-asteissa ja To = 288 ^{0} K. Kuvasta 1 nähdään lämpötilan muutos korkeuden funktiona. Lämpötila laskee tasaisesti 11 km korkeuteen, jossa se on -56,5°C. Tämä on tropopaussin alaraja, jonka yläpuolella lämpötila on vakio aina 20 km korkeuteen saakka. ISA ei ota kantaa ilman kosteuteen.

Ilman lämpötilan epätasainen alueellinen sekä vertikaali jakauma aiheuttavat monia meteorologisia ilmiöitä, jotka vaikuttavat lentokoneeseen kohdistuviin virtauksiin ja ilmiöihin. Vaikka ISA ei ota huomioon ilman kosteuden vaikutuksia, niin ilman vesipitoisuus ja veden olomuodon muutoksiin liittyvät muutokset ovat avainasemassa ilmakehän ilmiöiden moottoreina. Seuraavassa esitetään lyhyesti lämpötilariippuvia ilmiöitä, joilla on vaikutusta lentokoneeseen.

Inversio

Inversio vallitsee silloin, kun lämmin ilmamassa on kylmän päällä. Koska kylmä ilma on painavampaa kuin lämmin, ei inversiokerroksen läpi tapahdu pystysuoria virtauksia. Inversiokerroksen yläpuolella virtaus on lähes kitkatonta ja tuuli voi saavuttaa melkoisia nopeuksia, vaikka maanpinnalla on aivan tyyntä. Inversiokerroksen alapuolella esiintyy turbulenssia ja yläpuolella vähemmän.

Talvella inversiotilanne syntyy selkeän ja heikkotuulisen yön jälkeen. Maanpinta säteilee ja jäähtyy yöllä ja inversiokerros syntyy yleensä vain muutamien metrien korkeuteen. Inversiokerros näkyy hyvin, jos savupiipusta nousee savua, joka jää inversion vaikutuksesta tämän lämpimämmän ilman alle.

Kesällä inversio syntyy samalla tavalla ja ilmenee aamusumuna, joka nousee ja hälvenee auringon noustua ja häviää vähitellen. Inversion aiheuttama sumu voi estää näkyvyyttä esimerkiksi lentoonlähdössä tai laskussa.

Kun lämmin rintama virtaa kylmän päälle, niin siitä seuraa inversio, jonka korkeus riippuu ilmamassojen kohtaamiskorkeudesta. Kevyempänä lämmin jää kylmän päälle, kunnes virtaukset sekoittuvat.

Tuuligradientti (wind shear)

Tuulen nopeus maanpinnassa on lähes nolla ja kasvaa korkeuden kasvaessa. Maanpinnan tuntumassa maaston rosoisuus ja pinnanmuodot aiheuttavat turbulenssia ja tuulen nopeuden muutoksia. Jos tuulen nopeus kasvaa hyvin voimakkaasti korkeuden mukana, puhutaan voimakkaasta tuuligradientista. Lentoonlähdössä tai laskussa tämä voi olla vaarallista, ellei siihen ole varautunut. Erityisen voimakkaana tuuligradientti saattaa esiintyä etenevän rintaman etureunassa, jolloin sekä tuulen nopeus että suunta voivat muuttua äkillisesti.

Tiheys

Ilman tiheydellä ρ on mitä suurin merkitys aerodynamiikassa. Tiheydellä ymmärretään massan m suhdetta sen tilavuuteen V. $\rho = m/V$

ICAO:n normaali-ilmakehän tiheys meren pinnalla on 1,225 kg/m ^{3} mikä merkitään " ρ_o ". Tiheyden pieneneminen korkeuden kasvaessa nähdään kuvasta 1.

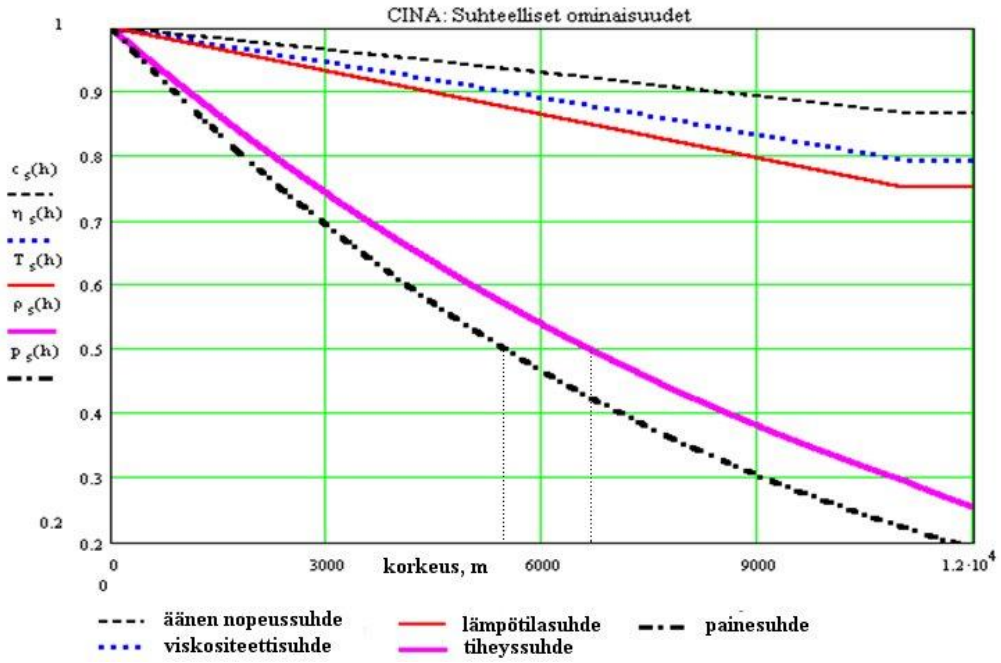
Ilman tiheys 6500 metrin korkeudessa on puolet merenpinnan tason tiheydestä. Tiheyssuhteella σ ymmärretään tarkastelukorkeudella ja merenpinnan tasolla olevan standardi ilmakehän tiheyden välistä suhdetta. Yleinen kaasulaki määrittelee kaasun paineen, lämpötilan ja tiheyden välisen yhteyden, minkä avulla saadaan myös: Tiheyssuhde = Painesuhde / Lämpötilasuhde

Tällä riippuvuudella on paljon merkitystä aerodynamiikassa ja saavutusarvoissa ja sitä käytetään korjattaessa suoritusarvot vertailukelpoisiksi eri tilanteissa tehtyjen vertailujen välillä. Tämä tarkoittaa, että todellisessa tilanteessa suoritetut mittaustulokset muutetaan vastaamaan ICAO:n kansainvälisen ilmakehän olosuhteita. Lennon valmistelun yhteydessä pilotti joutuu tekemään tämän kääntäen eli tulkitsemalla koneen suoritusarvot vastaamaan todellisen lentosään tilannetta. Tästä on esimerkkinä kuva, jonka avulla voidaan muuntaa hetkellinen korkeus vastaamaan ISA:n korkeutta.

Kaasujen tilan yhtälö

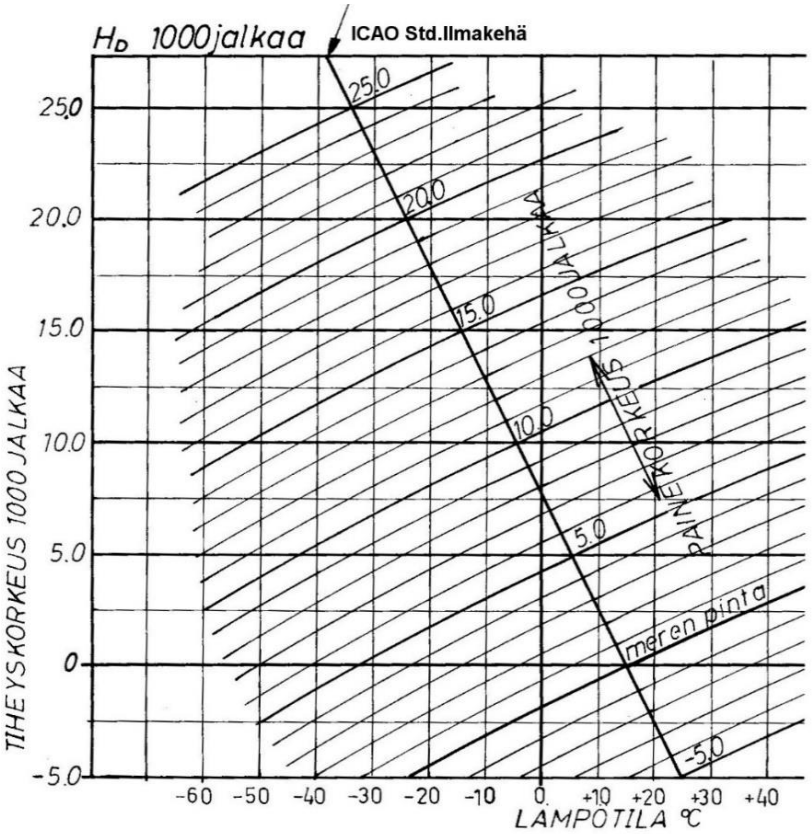
Paineen, tiheyden ja lämpötilan välillä on yhteys **p = ρ R T**, jossa R = 287 J/kg K

ja ρ = ilman tiheys kg/m^3 sekä T = ilman lämpötila Kelvin-asteissa.



Kuva 2. Kansainvälisen ilmakehän ominaisuuksien suhteelliset muutokset eri korkeuksilla.

Tiheyskorkeuden määrittely painekorkeuden ja lämpötilan avulla.



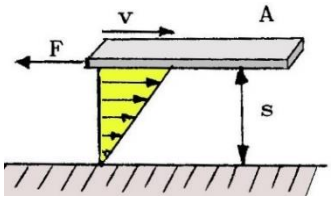
Kuva 3. Korkeuden muuntokaavio, jolla saadaan lentotehtävän tilanne vastaamaan standardi ilmakehän tiheyskorkeutta. Valitse korkeusmittarin asetukseksi 1013,2 mbar, lue mittarista lentokorkeutta vastaava painekorkeus ja ulkoilman lämpötila. Hae kuvaajasta tämä piste sekä katso vasemmasta reunasta tiheyskorkeus, joka vastaa silloin koneen suoritusarvoissa käytettyjä arvoja.

Viskositeetti

Ilman viskositeettia käytetään kuvaamaan ilman sekä nesteen sisäistä kitkaa. Se vaikuttaa merkittävästi ilmavirtauksen käyttäytymiseen varsinkin kiinteän kappaleen välittömässä läheisyydessä mutta myös vapaassa virtauksessa. Viskositeetin vaikutusta voidaan kuvata seuraavan esimerkin avulla. Oletetaan, että ilma on levossa eli välittömästi tasaisen pinnan päällä olevan virtauksen nopeus on nolla. Pinnan yläpuolella on levy, joka liikkuu alustan suhteen nopeudella **v**. Liikkuvan levyn ja alustan välillä virtausnopeus muuttuu lineaarisesti. Ilman sisäinen kitka vastustaa levyn liikettä sitä enemmän mitä suurempi viskositeetti on. Levyyn vaikuttava voima on suoraan verrannollinen levyn pinta-alaan ja nopeuteen sekä kääntäen verrannollinen levyn etäisyyteen pinnasta.

Viskositeetti kuvaa siis nesteen tai kaasun kykyä vastustaa liikettä leikkausjännitysten vaikuttaessa. Mitä suurempi viskositeetti, sitä suurempi on vastus.

Kaasujen viskositeetti riippuu lämpötilasta siten, että lämpötilan nousu lisää hieman viskositeettia.



$$F = \eta \cdot \frac{vA}{s}; \quad \eta = \frac{F}{A} \cdot \frac{v}{s}$$

η = viskositeetti
v = nopeus
s = levyn etäisyys pinnasta
A = levyn pinta-ala

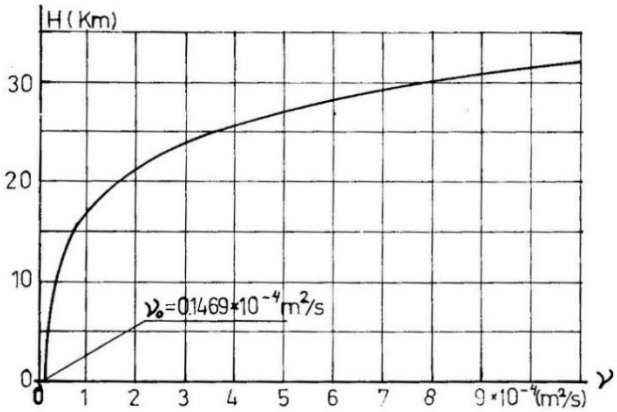
Kuva 4. Pinnan yläpuolella liikkuvaan levyyn kohdistuva kitkavoima on suoraan verrannollinen levyn pinta-alaan, nopeuteen ja väliaineen (ilman tai nesteen) viskositeettiin sekä kääntäen verrannollinen levyn etäisyyteen pinnasta. Kitkavoiman suunta on päinvastainen kuin liikesuunta. Tämä koskee lähellä pintaa olevaa levyä.

Laskutehtävissä on usein edullista käyttää kinemaattista viskositeettia ν, joka määritellään viskositeetin ja tiheyden suhteena.

$$\nu = \eta / \varrho = \frac{\text{absoluuttinen viskositeetti}}{\text{tiheys}}$$

Merenpinnan tasalla $\nu_0 = 0{,}146 \cdot 10^{-4}$ m²/s. ICAO Std.Ilmakehä

Kaava 1. Kinemaattisen viskositeetin määritelmä sekä standardi ilmakehän kinemaattinen viskositeetti merenpinnan tasolla.



Kuva 5. Standardi ilmakehän kinemaattisen viskositeetin riippuvuus korkeudesta.

Reynoldsin luku, Re

Ilman sisäinen kitka vaikuttaa sen käyttäytymiseen siten, että virtauksen luonne on riippuvainen ilman viskositeetista, virtauksessa olevan kappaleen muodosta ja dimensioista sekä virtausnopeudesta. Reynoldsin luku on dimensioton suure, joka kuvaa ilmamolekyyleihin kohdistuvien hitaus- ja kitkavoimien suhdetta.

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} \; ; \quad \sigma = \frac{\mu}{\rho} \; ; \quad Re = \sigma V L$$

ρ = Ilman tiheys kg/m³
μ = Ilman dynaaminen viskositeetti $\frac{kg}{s\,m}$
σ = Ilman kinemaattinen viskositeetti $\frac{m^2}{s}$

Kaava 2. Reynoldsin luku määrittelee hitaus- ja kitkavoimien välisen suhteen. V = vapaan virtauksen nopeus [m/s], L = karakteristinen matka [m], joka esimerkiksi on siiven leveys ja putkivirtaukselle putken sisähalkaisija. On oleellista, että tulkittaessa käytetään samaa matkaa, jolla Re-luku on laskettu. Esimerkiksi rajakerrostarkasteluissa käytetään matkaa siiven etureunasta tarkastelukohtaan.

Reynoldsin lukualue siipiprofiilille vaihtelee runsaasti. Lennokeilla alue on 10 – 500 tuhatta, purjekoneella 1 – 3 miljoonaa, pienkoneella matkalennossa 3 – 5 miljoonaa, matkustajakoneella 10 – 50 miljoonaa. Kun saman muotoisen kappaleen ympäri tapahtuva virtaus tunnetaan tietyllä Re-luvulla, niin virtaus käyttäytyy samalla tavalla eri väliaineissa kaiken kokoisilla kappaleilla. Tällöin voidaan laskea mm. kappaleeseen vaikuttavat voimat ja momentit.

Yhteenveto

Tärkein ilmakehän ominaisuus aerodynamiikan kannalta on ilman tiheys. Kansainvälinen siviili-ilmailujärjestö ICAO on määritellyt ns. ICAO:n standardi-ilmakehän, jossa esimerkiksi lentokoneen suoritusarvot ilmaistaan. Todellinen ilmakehä poikkeaa tästä sopimuksesta vallitsevasta säästä riippuen. Sen vuoksi on tunnettava erikoisesti tiheyden muutokseen vaikuttavat tekijät:

Paine nousee	- tiheys kasvaa
Lämpötila laskee	- ”
Kosteus laskee	- ”

Lentokoneen suoritusarvot ilmaistaan tiheyskorkeudesta riippuvaisena, joten on tunnettava, miten korkeusmittarin osoittamasta painekorkeudesta voidaan saada tiheyskorkeus (kts kuva3).

a. Asetetaan korkeusmittariin 1013,2 mbar.
b. Luetaan painekorkeus p.
c. Luetaan ulkoilman lämpömittarin näyttämä T.
d. Lasketaan näiden avulla joko kakkaralla tai katsotaan kuvasta 3 tiheyskorkeus.

Lämpötila ilmaistaan joko ^{O}F tai °C. Koneen käsikirjassa on mittarinäyttämän mukaiset asteikot.

Kysymyksiä

1. Mitkä neljä suuretta kuvaavat ilmakehän fysikaalisia ominaisuuksia?
   Vast.: paine, lämpötila, tiheys ja viskositeetti
2. Mikä on ICAO:n standardi-ilmakehän staattinen paine merenpinnan tasolla?
   Vast.: 1013,2 mbar
3. Staattinen paine on puolet merenpinnalla vallitsevasta a) 5000 m, b) 5500 m tai c) 6500 m korkeudella?
   Vast.: 5500 m
4. Ilman tiheys on puolet merenpinnalla vallitsevasta a) 5000 m, b) 5500 m, c) 6500 m korkeudella?
   Vast.: 6500 m
5. Viskositeetin kasvaessa vastus lisääntyy, vähenee.
   Vast.: lisääntyy
6. Kun paine nousee niin ilman tiheys a) kasvaa, b) pienenee?
   Kun ilman lämpötila nousee niin sen tiheys a) kasvaa, b) pienee, c) ei muutu?
   Kun ilman kosteus lisääntyy niin sen tiheys a) kasvaa, b) pienee, c) ei muutu?
   Vast.: tiheys kasvaa, pienenee, pienenee
7. Selosta, miten saat määriteltyä tiheyskorkeuden lennon aikana.
   Vast.: Korkeuden muuntotaulukosta painekorkeuden ja ulkoilman lämpötilan avulla.
8. Lämpötilan kasvaessa samalla painekorkeudella tiheyskorkeus. a) kasvaa, b) pienenee, c) ei muutu?
   Vast.: kasvaa

PERUSKÄSITTEITÄ JA MÄÄRITELMIÄ

Käytetyt yksiköt:

Ilmailussa käytetään periaatteessa SI-yksiköitä, mutta lentosuorituksen aikana osa suureista on sovitettu lähemmäksi käytäntöön sopiviksi. Tällaisia ovat mm.:

- lentonopeus, joka ilmoitetaan usein solmuissa, eli merimailia/tunnissa eli 1852 metriä/h. Merimaili on yksi kaariminuutti pitkin isoympyrää, mikä helpottaa lentosuunnistusta, koska kartoissa on yleensä leveys- ja pituusasteikot. Yleinen yksikkö nopeudelle on myös mph eli mailia tunnissa, jota käytetään Englannissa ja USA:ssa. Yksi maili on 1 609,344 metriä.
- Lentokorkeus ilmoitetaan yleensä jaloissa, mikä johtuu siitä, että lentopinnat on määritelty jaloissa. Tällöin korkeusporrastus perustuu 1013.2 hPa mittariasetukseen.

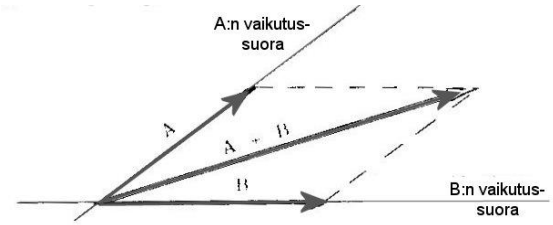
Ennen kuin voimme perehtyä pitemmälle aerodynamiikkaan, on meidän tunnettava joukko uusia käsitteitä ja asioita, joita käytetään kuvaamaan ilmiöitä ja niiden vaikutuksia.

Vektori.

Vektorisuure on suure, jolla on suunta, suuruus ja vaikutussuora. Vektorisuureita ovat esimerkiksi nopeus, kiihtyvyys, voima, momentti jne. Vektorisuuretta kuvataan nuolella, joka piirretään vaikutussuoralle siten, että sen kärki osoittaa vaikutussuuntaan ja pituus ilmaisee suuruuden. Vektoria saa siirtää pitkin vaikutussuoraansa.

Vektoreiden yhteenlasku:

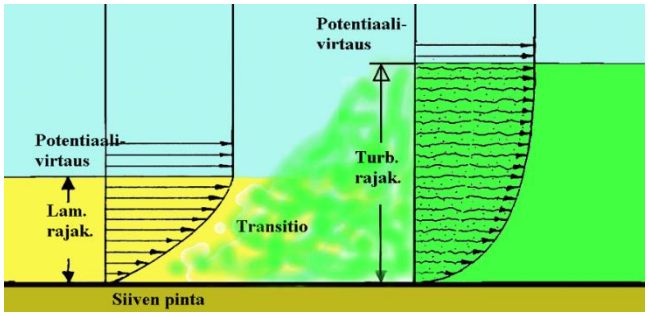
Haluttaessa laskea yhteen kaksi vektoria A ja B, ks. kuva 7, siirretään ne molemmat vaikuttamaan vaikutussuoriensa leikkauspisteeseen, jonka jälkeen piirretään kärkien kautta suorat, jotka muodostavat suunnikkaan, jonka toisena kylkenä ovat itse vektorit. Tämän suunnikkaan voimien vaikutuspisteestä piirretty lävistäjä on vektoreiden summa. (Toinen lävistäjä on erotus.)



Kuva 6. Vektorisumma A + B saadaan vinosuunnikkaan halkaisijan avulla.

Nopeusjakauma

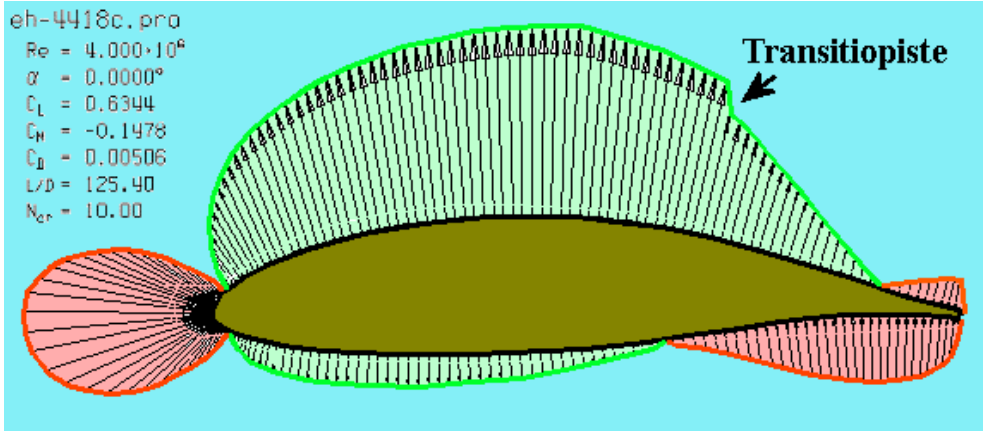
Nopeusjakauman avulla kuvataan nopeuden muutosta eri etäisyyksillä kappaleen pinnan läheisyydessä. Nopeusjakauma saadaan piirtämällä viiva pinnan läheisyydessä olevien nopeusvektoreiden päiden kautta.



Kuva 7. Nopeusjakauma siiven pinnan välittömässä läheisyydessä. Vasemmalla laminaarinen rajakerros ja oikealla turbulenttinen. Nuolien pituus ja suunta osoittavat nopeuden ja verhoviiva nopeusjakauman. Turbulenttisessa rajakerroksessa virtaviivoja on kuvattu rosoisilla viivoilla. Nopeusjakauman saadaan tietoa virtauksen käyttäytymisestä kohteen ympärillä.

Painejakauma

Painejakautuma kuvaa paineen vaihtelua pitkin kappaleen pintaa. Painejakautuma piirretään siten, että kuhunkin kappaleen pinnan kohtaan piirretään kohtisuoraan pintaa vastaan vektori, jonka suuruus riippuu paineesta. Näiden vektoreiden kärkipisteiden kautta piirretty viiva kuvaa paineen muutosta kappaleen pinnalla. Vektorit jätetään yleensä pois, kun jakauma esitetään ja tyydytään pelkästään + ja – merkkeihin osoittamaan, onko paine ympäristöä suurempi vai pienempi.

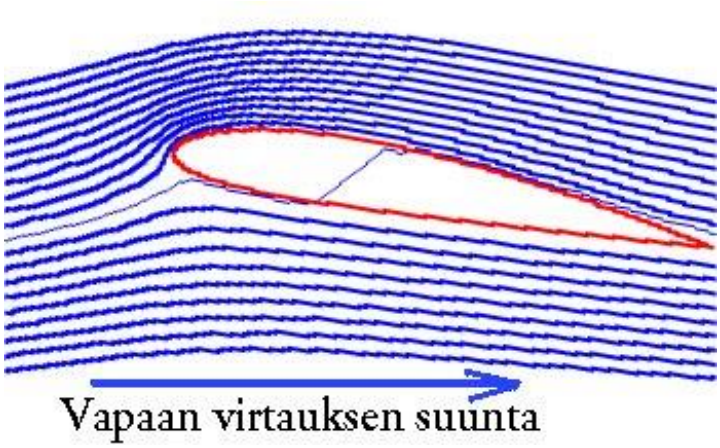


Kuva 8. Painejakauma profiilin ympärillä. Punainen alue osoittaa positivista painetta ja vihreä ympäristön painetta pienempää painetta. Profiiliin kohdistuva resultanttivoima on painejakauman ja kitkavoimien summa.

Aina nuolia ei piirretä näkyviin, vaan pelkkä jakautuma. Ylipaine merkitään joko + tai nuolen kärki osoittamaan kohti pintaa. Alipaine — tai kärki kuten kuvassa 7.

Virtaviivat

Usein ei nuolia piirretä näkyviin, vaan pelkkä jakautuma. Ylipaine merkitään joko + tai nuolen kärki osoittamaan kohti pintaa. Alipaine — tai kärki kuten kuvassa 9.



Kuva 9. Virtaviivojen avulla kuvataan ilmapartikkeleiden rataa.

Virtaviiva on kappaleen ohitse kulkevan ilmavirran mukana liikkuvan partikkelin rata. Virtaviiva yhtyy siis kussakin pisteessä virtauksen tangenttiin eli virtausta ei tapahdu virtaviivojen lävitse. Havainnollistettaessa virtausta kappaleen ohitse, valitaan virtaviivat, jotka ovat tasavälein vapaassa, häiriintymättömässä virtauksessa. Virtaviivojen väli tihenee siellä, missä virtausnopeus kasvaa ja harvenee virtauksen hidastuessa. Patopiste osoittaa kohdan, jossa virtaus jakautuu kappaleen vastakkaisille puolille. Patopisteessä virtausnopeus on nolla.

Staattinen paine

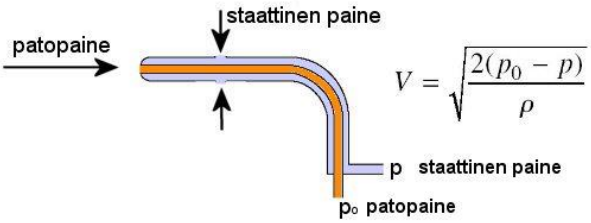
Staattinen paine on vapaan ilman paine eli paine, jonka virtauksen mukana vastusta synnyttämättä liikkuva paineanturi mittaa.

Patopaine

Patopaine on paine, joka syntyy, kun virtaus saatetaan adiabaattisesti lepoon. Se on patopisteessä vallitseva paine.

Pitot-paine

Pitot-paine on pitot-putkella mitattu virtauksen suuntainen paine. Alisoonisessa alueessa se on yhtä suuri kuin patopaine. Pitot-putki on sijoitettu paikkaan, johon virtaus osuu mahdollisimman esteettömästi.



Kuva 10. Pitot-putkella mitataan lentonopeutta. Patopaine saadaan putken kärjestä ja staattinen paine putken sivussa olevista rei'istä. Nopeusmittarissa paine-ero näytetään lentonopeutena.

IAS, TAS ja GS

IAS = indikoitu lentonopeus (Indicated Air Speed) on lentokoneen nopeusmittarin näyttämä ilmanopeus, joka riippuu mm. ilman tiheydestä ja mittausjärjestelmän konfiguraatiosta. Perinteinen mittaus tapahtuu Pitot-putken välityksellä mitatusta patopaineen ja staattisen paineen erotuksesta. Nopeusmittausjärjestelmän virheet on pyritty korjaamaan enemmän tai vähemmän onnistuneesti, jotta IAS olisi mahdollisimman tarkka. Kaikki lentokoneen liikehdintään liittyvät ilmiöt noudattavat IAS:n mukaista nopeutta. Erityisesti on painotettava, että sakkausnopeuden on kaikilla korkeuksilla sama.

Kuva 11. Nopeusmittari. IAS = vihreä asteikko. TAS = valkea asteikko, kun painekorkeus ja ilman lämpötila on asetettu nupilla mittaritaulun yläosassa kohdakkain vastaamaan reitin olosuhteita. Esimerkissä 7000 jalkaa ja 15°C. Ohjaaja säätää painekorkeuden ja nupilla ilman lämpötilan. Valkea asteikko osoittaa tosi ilmanopeuden.

TAS = Tosi lentonopeus (True Air Speed) tarkoittaa todellista ilmanopeutta, joka yleensä on suurempi kuin IAS, koska ilman tiheys laskee korkeuden mukana. TAS määritellään korjaamalla IAS:n arvoa painekorjauksen ja ilman lämpötilan avulla. Tosi ilmanopeutta käytetään mm. suunnistus-laskelmissa.

GS = Maanopeus (Ground Speed) on nimensä mukaan lentokoneen nopeus maan suhteen. Maanopeus on tuulen ja TAS:n vektorisumma. GPS-paikannukseen perustuvat nopeusmittarit näyttävät tosi maanopeuden, lentokorkeuden ja koordinaatit.

Kineettinen paine

Kineettinen paine (= ½ ρ V^2) on puolet väliaineen tiheyden ja virtausnopeuden neliön tulosta. Tämä paine on aerodynamiikassa hyvin usein esiintyvä suure.

Newtonin lait

Newtonin lait määrittelevät kappaleen sijainnin, nopeuden ja kiihtyvyyden. Ne ovat yleisiä luonnonlakeja, joita kaikki systeemit noudattavat. Aerodynamiikassa ilman ja lentokoneen keskinäiset vuorovaikutukset noudattavat näitä lakeja.

Newtonin ensimmäinen laki, jatkuvuuslaki

Kappale säilyttää liiketilansa, ellei mikään ulkoinen voima muuta sitä.

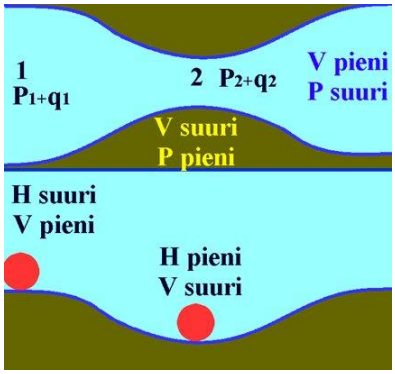
Newtonin toinen laki, dynamiikan peruslaki

Kappaleen kiihtyvyys on suoraan verrannollinen vaikuttavaan voimaan ja kääntäen verrannollinen kappaleen massaan. $F = m\,a$

Newtonin kolmas laki, voiman ja vastavoiman laki

Jos kappale A työntää kappaletta B voimalla F, työntää kappale B kappaletta A yhtä suurella, mutta vastakkaissuuntaisella voimalla -F.

Bernoullin laki



Bernoullin laki pätee kitkattomalle ja kokoon puristumattomalle virtaukselle. Pitkin virtaputkea on staattisen paineen ja kineettisen paineen summa vakio eli $P_1 + ½\,\rho\,V_1^2 = P_2 + ½\,\rho\,V_2^2$

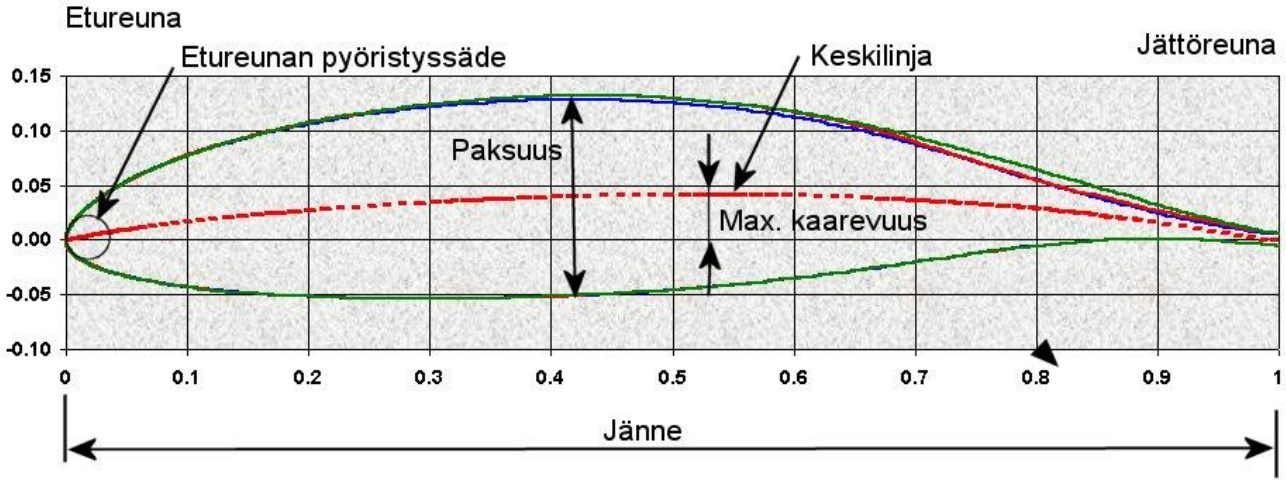
Tässä alaindeksit 1 ja 2 viittaavat peräkkäisiin kohtiin virtauksessa.

Kuva 12. Bernoullin laki. Ylempi kuva esittää virtausta venturiputkessa. Putken paksussa osassa virtausnopeus on pieni mutta paine suuri. Kurkussa virtausnopeus on suuri mutta paine pieni. Tätä ominaisuutta käytetään hyväksi esimerkiksi kaasuttimessa, jossa polttoaineen virtausta auttaa kurkun alipaine. Alemmassa kuvassa verrataan Bernoullin lakia kuulan vierimiseen. Korkeuspotentiaali muuttuu nopeudeksi ja päinvastoin.

Bernoullin laki tarkoittaa sitä, että paine ja nopeus ovat keskenään vaihtokelpoisia energiamuotoja. Kuva havainnollistaa Bernoullin lakia, jossa ylempänä on esitetty venturiputki ja siinä vallitsevat olosuhteet laajennuksessa sekä kurkussa. Koska sama ilmamäärä kulkee putken lävitse, on ohuemmassa kohdassa virtauksen oltava nopeampaa, mistä seuraa paineen aleneminen. Kuvan alaosassa on verrattu tilannetta potentiaali- ja nopeusenergian säilyvyyden kanssa. Bernoullin lakia käytetään hyväksi esimerkiksi venturiputkessa, kaasuttimen kurkussa, alipainepumpuissa, nostovoiman syntyä selitettäessä jne. Bernoullin lain avulla voidaan päätellä virtaviivojen välisestä etäisyydestä kyseisessä kohdassa vallitseva paine. Mitä kapeampi väli, sitä nopeampi virtaus ja pienempi paine.

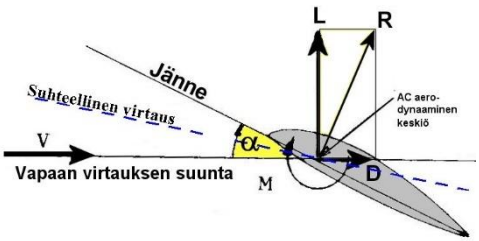
Siipiprofiili ja siihen liittyvät nimitykset

Siipiprofiililla tarkoitetaan siiven poikkileikkauksen muotoa. Siipiprofiilin geometristen suureiden nimitykset ilmenevät seuraavasta kuvasta.



Kuva 13. Profiilin päämitat ilmaistaan yleensä prosentteina jänteestä. Jänne = siiven leveys. Jänteen suunta osoittaa etureunasta keskelle jättöreunaa.

Mitä kaarevampi profiili, sitä suurempi "nokka alas taipumus" eli momentti joka painaa koneen nokkaa alaspäin. Kaarevuus lisää profiilin maksiminostovoimaa. Maksimipaksuuden paikalla on merkitystä profiilin laminaarisuuden kannalta. Laminaariprofiililla on olemassa pienen vastuksen alue tietyllä nostovoimakertoimen alueella. Profiilin asento ja siihen vaikuttavat voimat virtauksessa nähdään kuvasta 13.



Kuva 14. Profiilin asento virtauksessa sekä siihen vaikuttavat voimat ja momentit. Kohtauskulma on jänteen ja vapaan virtauksen välinen kulma. Nostovoima on kohtisuoraan vapaata virtausta vastaan ja vastus sen suuntainen. Momentti on positiivinen, kun se pyrkii kasvattamaan kohtauskulmaa eli nostamaan nokkaa.

Profiilin asento määräytyy VAPAAN eli häiriintymättömän VIRTAUKSEN ja profiilin jänteen välisestä kulmasta. Tätä kulmaa nimitetään kohtauskulmaksi α. Nostovoiman L suunnaksi valitaan kohtisuora vapaata virtausta vastaan ja vastuksen D suunnaksi virtauksen suunta. Nostovoima- ja vastusvektorit piirretään aerodynaamiseen keskiöön AC:hen, jonka sijainti on noin 25 % jänteestä siiven etureunasta mitattuna. AERODYNAAMINEN KESKIÖ määritellään siten, että se on piste, jossa profiilin momentti ei muutu kohtauskulman muuttuessa. Tämä momentti M vaikuttaa aerodynaamiseen keskiöön ja on positiivinen silloin, kun se lisää kohtauskulmaa eli nostaa koneen nokkaa. Ylöspäin kaarevan profiilin momentti on negatiivinen eli se pyrkii painamaan nokkaa alas.

Aerodynaamiset kertoimet

Aerodynaamisten kertoimien avulla muutetaan aerodynaamiset voimat dimensiottomiksi. Tällä tavalla voidaan kuvata ilmiöitä niiden koosta riippumatta ja käyttää samoja kaavoja sekä jumbojetin että hyttysen lennon kuvaamiseen. Luonnollisesti kertoimet ovat erilaisia, mutta kaavat säilyvät samoina.

$$C_L = \frac{L}{q\,S}$$

$$C_D = \frac{D}{q\,S}$$

$$C_M = \frac{M}{q\,S\,c}$$

$$q = \tfrac{1}{2}\,\rho\,V^2$$

L	= nostovoima, N
C_L	= nostovoimakerroin
D	= vastusvoima, N
C_D	= vastuskerroin
M	= momentti, Nm
C_M	= momenttikerroin
q	= kineettinen paine, Pa
c	= siiven leveys, m
S	= siipipinta-ala, m²
ρ	= ilman tiheys, kg/m²
V	= vapaan ilman nopeus m/s

Kuva 15. Aerodynaamiset kertoimet ja niiden selitykset. Kertoimet ovat dimensiottomia suureita.

Esimerkki nostovoimakertoimesta:

Cherokee 140 lentää täydellä kuormalla (970 kg) laskuasussa nopeudella 87 km/h eli 24,1 m/s. Siipipinta-ala on 14,9 m^2. Mikä on nostovoimakerroin C_L?
Nostovoima on yhtä suuri kuin koneen paino eli L = m g = 970 x 9,81 = 9516 N
Kineettinen paine on q = ½ x 1,225 kg/m^3 x 24,1^2 $(m/s)^2$ = 355 Pa
Kerrottuna siipipinta-alalla saadaan 355 x 14,9 = 5300 N
C_L = 9516/5300 = 1,79 mikä vastaa Cherokeen maksimi nostovoimakerrointa laipat ulkona.
Matkanopeudella 200 km/h eli 55,5 m/s saadaan nostovoimakertoimeksi 0,335.

Vastuskerroin

Vastuksen suuruutta voidaan kuvata paljaalla luvulla C_D, joka vastusvoima jaettuna kineettisen paineen ja siipipinta-alan tulolla.

Vastus jaetaan kahteen osaan: nostovoimasta riippuva vastus eli indusoitu vastus **Di** sekä haitallinen vastus **Do,** jota kutsutaan myös loisvastukseksi. Kokonaisvastus D on näiden summa

$$D = D_o + D_i \text{ tai vastuskertoimien avulla}$$

$$C_D = C_{Do} + C_{Di} = C_{Do} + \frac{C_L^2}{e \pi A}$$

tässä e = elliptisyys
A = sivusuhde
π = 3,14

$$e = 0{,}5 - 1{,}0$$

Kaava 3. Vastuskerroin voidaan jakaa indusoituun eli nostovoimasta riippuvaan osioon sekä haitalliseen vastukseen, joka johtuu esimerkiksi kitkasta ja jättöpyörteistä. Elliptisyys e riippuu siiven muodosta. Elliptisen siiven e = 1 ja muille muodoille tätä pienempi. Teoreettisesti elliptisen siiven liitosuhde on optimaalisin.

Siiven momenttikerroin C_M

Momenttikerroin kuvaa siiven pyrkimystä kiertää koneen nokkaa joko ylös tai alas. Positiivinen momentti lisää kohtauskulmaa ja negatiivinen vähentää sitä. Momenttikerroin C_M määritellään seuraavasti:

$$C_M = \frac{M}{q\,S\,c} = \frac{\text{Momentti}}{\text{Kineettinen paine} \times \text{Siipipinta-ala} \times \text{Jänne}}$$

Kaava 4. Momenttikerroin. Siiven aiheuttama momentti on normaalisti negatiivinen ja siksi koneen nokka pyrkii painumaan alas sitä enemmän mitä suuremmalla nopeudella lennetään. Korkeusohjain painaa pyrstöä alaspäin niin paljon, että saadaan kone vakautettua haluttuun lentoasentoon. Kaavassa jänteenä käytetään keskimääräistä siiven leveyttä.

Siiven aiheuttama momentti pyrkii painamaan nokkaa alas eli pienentämään kohtauskulmaa, joten momenttikerroin on negatiivinen. Siiven nokkaa alas painava momentti tasapainotetaan korkeusperäsimen alas suuntautuvalla voimalla.

Esimerkki momentista:

Cherokee 140:n momenttikerroin C_M = —0,06 ja siiven keskijänne c = 1,6 m. Tällöin saadaan nopeudella 200 km/t = 55,5 m/s seuraava momentti, joka painaa nokkaa alaspäin.

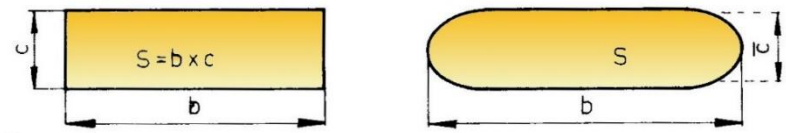
$M = q\,S\,c\,C_M = \frac{1}{2}\rho V^2 S\,c\,C_M = -\frac{1}{2} \times 1{,}225 \times 55{,}5^2 \times 14{,}9 \times 1{,}6 \times 0{,}06 = -2710$ Nm = -267 kpm

Tämä momentti on tasapainotettava korkeusperäsimen vastamomentilla. Korkeusperäsimen nostovoimakeskiö on 4,25 m etäisyydellä siiven nostovoimakeskiöstä, joten tarvittava alaspäin suuntautuva peräsinvoima $F_{peräsin}$ = 2710/4,25 = 638 N eli 65 kp.

Sivusuhde

Sivusuhde (hoikkuussuhde) tarkoittaa siiven pituuden suhdetta leveyteen. Mikäli siipi ei ote tasaleveä, käytetään siiven keskimääräistä leveyttä.

$$\text{Sivusuhde } A = \frac{b}{c} = \frac{b^2}{S} = \frac{\text{kärkiväli}^2}{\text{siipipinta-ala}}$$



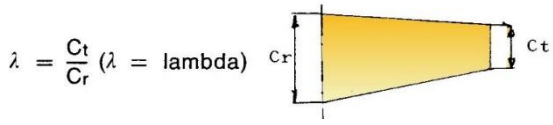
Kuva 14

$$\text{Sivusuhde } A = \frac{b^2}{S}. \qquad \text{Keskileveys } \bar{c} = \frac{S}{b}$$

Kuva 16. Sivusuhde on siiven pituuden suhde keskileveyteen.

Trapetsisuus

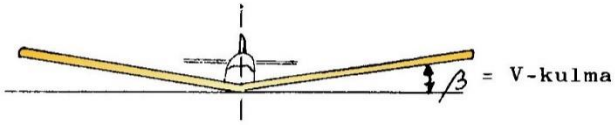
Trapetsisuus λ on siiven kärjen leveyden suhde tyven leveyteen. Se osoittaa siis, miten voimakkaasti kapenevasta siivestä on kysymys. Kaventamalla siiven kärkeä pienennetään indusoitua vastusta, mutta liiallinen kaventaminen lisää taipumusta kärkisakkaukseen.



Kuva 17. Trapetsisuus on siiven kärjen leveyden suhde tyven leveyteen. Kasvattamalla trapetsisuutta pienennetään indusoitua vastusta, mutta lisätään herkkyyttä kärkisakkaukseen. Cr Tyvijänne, Ct kärkijänne.

Siiven V-kulma

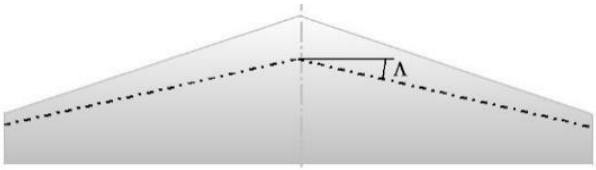
V-kulma ilmaisee siiven ja vaakatason välisen kulman. V-kulma parantaa koneen kallistusvakavuutta.



Kuva 18. V-kulma

Nuolikulma

Nuolikulma Λ ilmaisee, kuinka paljon siiven kärkiä on suunnattu taaksepäin. Nuolikulma määrätään jänteen 25 % linjasta kuvan osoittamalla tavalla. Nuolikulmaa käytetään parantamaan koneen suuntavakavuutta.



Kuva 19. Nuolikulma Λ osoittaa kuinka paljon siipi on suunnattu taaksepäin. Kulma mitataan 25% jänteen etureunasta.

Kysymyksiä

Kysymyksiä

1 . Miten saadaan kahden vektorin summa?
Vast.: leikkauspisteeseen piirretyn suunnikkaan lävistäjä on vektorien summa.

2. Onko painejakautuma positiivinen kohdassa, johon kohdistuu ympäristön painetta suurempi paine?
Vast.: Kyllä

3. Virtaviivojen lähentyessä toisiaan niiden välissä virtausnopeus kasvaa vai hidastuu?
Vast.: kasvaa

4. Vapaan ilmakehän painetta nimitetään
Vast.: staattiseksi paineeksi

5. Kineettinen paine on puolet väliaineen tiheyden ja ? tulosta.
Vast.: virtausnopeuden neliön

6. Mikä on Bernoullin laki?
Vast.: pitkin virtaputkea on staattisen ja kineettisen paineen summa vakio

7. Kun paine nousee virtaputkessa, niin nopeus _____ ?
Vast.: pienenee

8. Vallitseeko venturiputken kurkussa, esim. kaasuttimessa, alipaine vai ylipaine; lämpötilan lasku vai nousu?
Vast.: alipaine ja lämpötilan lasku

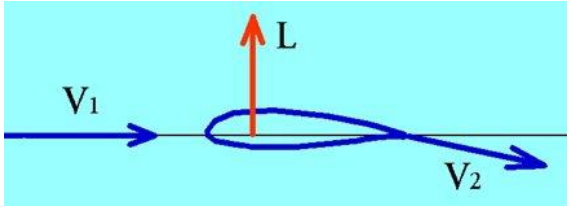
9. Lisääkö siipiprofiilin kaarevuus momenttia ja nostovoimaa?
Vast.: kaarevuuden lisääntyessä nostovoima ja momentti (nokka alas) kasvaa

1 0. Mitataanko kohtauskulma vapaan virtauksen vai suhteellisen virtauksen suunnasta.
Vast.: vapaan virtauksen suunnasta

AERODYNAMIIKAN PERUSTEET

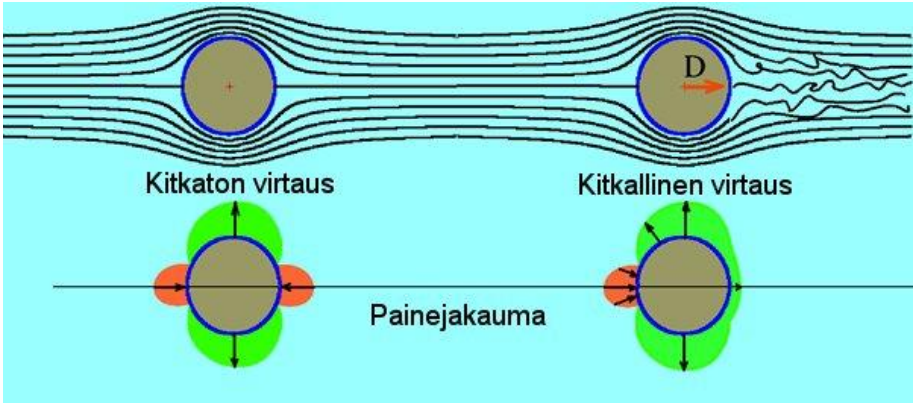
NOSTOVOIMAN SYNTYMINEN

Siiven tärkein tehtävä on synnyttää konetta ilmassa pitävä nostovoima. Nostovoima syntyy siipeen ilmavirran suunnan muuttamisen vastavaikutuksena. Suunnan muutoksen suuruus ja lentonopeus määrittelevät syntyvän voiman suuruuden.

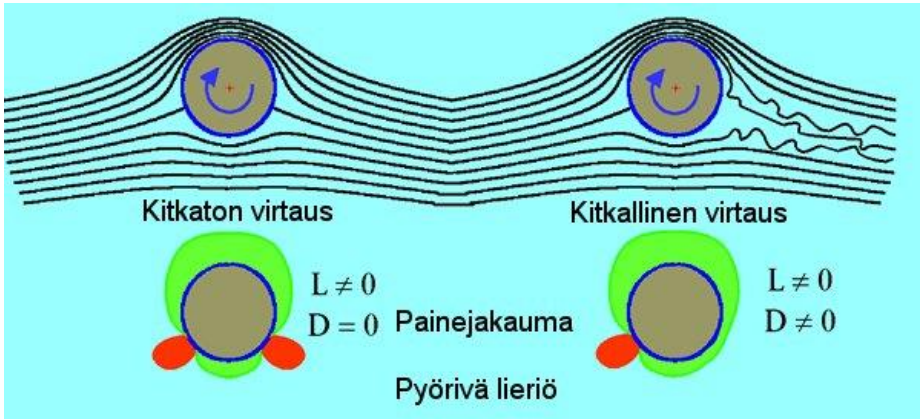


Kuva 20. Virtauksen suunnan muuttamisesta syntyy nostovoima. V1 on vapaan virtauksen suunta ja V2 on siiven vaikutuksesta taipunut suunta. Nostovoima määritellään syntyvän kohtisuoraan vapaata virtausta vastaan ja vastus vapaan virtauksen suuntaan.

Seuraavassa tarkastellaan lähemmin nostovoiman syntyä käyttämällä hyväksi aikaisemmin mainittua Bernoullin lakia ja painejakautumaa äärettömän pitkän lieriön ympärillä eli 2D-virtausta.



Kuva 21. Kitkattoman ja kitkallisen virtauksen käyttäytyminen lieriön ympärillä. Yläosassa virtaviivat ja alaosassa painejakauma. Vasemmalla kitkattomassa virtauksessa ei synny nostovoimaa eikä vastusta, koska painejakaumat lieriön ympärillä kumoavat toisensa. Kitkallisessa virtauksessa lieriön taakse muodostuu pyörteinen vanavirtaus, joka aiheuttaa alipaineen kasvun lieriön takana. Kitkatonta virtausta kutsutaan usein myös ”potentiaalivirtaukseksi”, mikä viittaa virtauslaskelmissa käytettyyn termiin.



Kuva 22. Lieriön pyöriminen aiheuttaa virtauksen kääntymisen ennen ja jälkeen lieriön. Kitkattomassa virtauksessa virtaviivat ovat symmetrisesti pystyakselin suhteen, jolloin vaakavoimat tasapainottavat toisensa mutta pystysuunnassa yläpinnan alipainealue kasvaa ja synnyttää nostovoiman. Kitkallisessa virtauksessa lieriön taakse syntyvä pyörteinen vanavirtaus aiheuttaa epäbalanssia vaakasuunnassa synnyttäen painevastusta. Kuvasta nähdään, että virtaus nousee ylös ennen lieriötä ja laskee alas lieriön jälkeen. Näille on annettu nimet ylöstaite ja alastaite (upwash ja downwash).

2D virtaus

Kun lieriö pyörii, niin sen pinta nappaa lähimmät ilmamolekyylit mukaansa ja muuttaa virtauskuviota kuvan osoittamalla tavalla. Lieriön yläpinnalle syntyy alipaineen alue, joka synnyttää nostovoiman. Koska virtaus on kitkaton, niin virtaussuunnassa painejakauma on tasapainossa, jolloin vastus on nolla. Kitkallinen virtaus eroaa siinä, että lieriön taakse muodostuu alipaineen alue eivätkä vaakavoimat tasapainotu, mikä aiheuttaa painevastusta lisäksi kitka aiheuttaa pitkin pintaa kitkavastusta.

Aloitetaan tarkastelu äärettömän pitkän sylinterin ympäri tapahtuvasta virtauksesta. Kuvan 21. mukaisesti virtaviivat tihentyvät lieriön ylä- ja alapinnoilla, mikä merkitsi suurentunutta nopeutta ja pienentynyttä painetta. Etummaisessa ja takimmaisessa patopisteessä virtausnopeus on nolla ja paine suurimmillaan. Kuvan vasemmalla puolella kysymyksessä on kitkaton virtaus. Painejakautumasta havaitaan, että vaaka- ja pystyvoimat kumoavat toisensa, jolloin ei synny nostovoimaa eikä vastusta. Kuvan oikeassa laidassa on sama tilanne mutta kitkalliselle virtaukselle. Tällöin virtaviivat lieriön takana tulevat pyörteisiksi aiheuttaen alipaineen kappaleen takana, mistä johtuen etu- ja takapuolella vaikuttavat voimat eivät kumoa toisiaan, vaan aiheuttavat painevastusta.

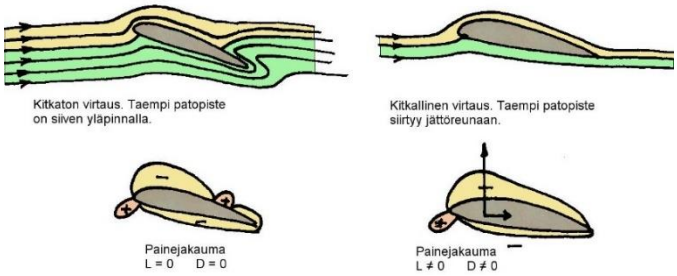
3D virtaus

Edellä olevissa virtauskuvissa virtaus on ennen ja jälkeen lieriön vaakasuorassa, mikä pitää paikkansa vain äärettömän pitkälle lieriölle. Todellisessa tilanteessa virtaus muuttaa lieriön takana suuntaansa alaspäin sitä enemmän mitä suurempi nostovoima ja mitä lyhyempi lieriö.

Kuva 23. Virtauksessa siiven takana virtaus taittuu alaspäin. Suhteellisen virtauksen suunta on tulo- ja jättö-virtauksen suunnan keskiarvo, eli noin puolivälissä alas taittuneen virtauksen ja vapaan virtauksen suunnasta.

NOSTOVOIMA **SYNTYY** KOHTISUORAAN PYÖRIMISAKSELIA[1] JA **SUHTEELLISTA** VIRTAUSTA VASTAAN.

Mutta on **sovittu**, että NOSTOVOIMA ON KOHTISUORASSA **VAPAATA VIRTAUSTA** VASTAAN ja vastus vapaan virtauksen suuntainen. Näin on sovittu koska suhteellisen virtauksen suunta on vaikea määritellä mutta vapaan virtauksen suunta on aina saatavilla.



Kuva 24. Virtaus ja painejakauma siiven ympärillä. Jos virtaus olisi kitkaton, niin taempi patopiste olisi siiven yläpinnalla mutta kitkallisessa virtauksessa se siirtyy jättöreunaan. Tämä vastaa lieriöesimerkissä sitä, että lieriö pyörii, mutta nyt kitka siirtää taemman patopisteen jättöreunaan, mikä aiheuttaa sirkulaation. Virtauksen taipumista ennen siipeä ylös kutsutaan ylöstaitteeksi ja siiven jälkeen alastaitteeksi.

Lentokoneen siiven nostovoiman syntyminen vastaa pyörivän lieriön tapausta. Kun siiven kohtauskulma kasvaa niin etummainen patopiste siirtyy hieman alaspäin ja takimmainen patopiste pyrkii siiven yläpinnalle. Tällöin virtaus joutuisi kuitenkin kiertämään takaa siiven yläpinnalle. Ilman sisäinen kitka estää tällaisen nopean kiepsahduksen vastakkaiseen suuntaan ja taempi patopiste pysyy jättöreunassa. Sakkausilmiössä tämä virtauksen kiepsahdus siiven yläpuolelle toteutuu. Kuvassa 24 esitetään siiven ympäri tapahtuva virtaus kitkattomassa ja kitkallisessa virtauksessa.

[1] Pyörimisakseli on edellisessä esimerkissä lieriön akseli ja siivessä sen pituusakseli.

Nostovoiman suuruuteen vaikuttavat tekijät:

Tärkeimmät suureet, jotka vaikuttavat nostovoiman suuruuteen, voidaan eritellä seuraavasti:

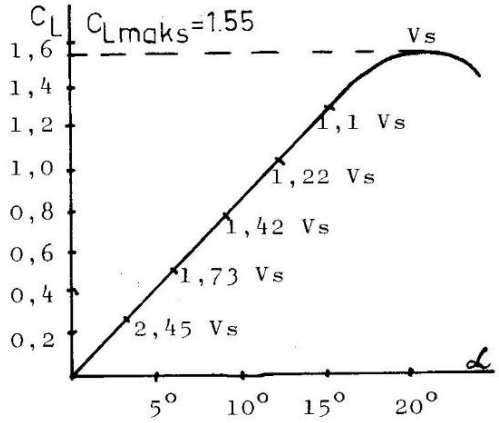
1. Virtausnopeus V
2. Ilman tiheys ρ
3. Profiilin muoto ja pinnan laatu. (Käyryys lisää nostovoimaa ja nokka-alas momenttia.)
4. Kohtauskulma α
5. Siiven pinta-ala S
6. Viskositeetti ν tai η
7. Ilman kokoonpuristuvuus, joka vaikuttaa lähi- ja ylisoonisilla alueilla.

Viskositeetin ja kokoonpuristuvuuden vaikutukset nostovoimaan ovat niin vähäisiä alisoonisella alueella, että voimme tyytyä tarkastelemaan pelkästään muiden tekijöiden vaikutusta.

Koska nostovoima johtuu painejakautumasta kappaleen ympärillä, on siipipinta-alalla ensiarvoisen suuri merkitys. Painejakautuman suuruus on taas verrannollinen kineettiseen paineeseen, jolloin virtausnopeuden ja ilman tiheyden kasvu lisäävät nostovoimaa. Painejakautuman muotoon vaikuttavat profiilin muoto, pinnan laatu ja kohtauskulma. Näiden tekijöiden vaikutus voidaan esittää kaavan

$L = q\ S\ C_L$ avulla,

jossa q = kineettinen paine = $\frac{1}{2}\ \rho\ V^2$, S = siiven pinta-ala ja C_L = nostovoimakerroin.



Kuva 25. Nostovoimakertoimen riippuvuus kohtauskulmasta. Vs = sakkausnopeus. Kuvasta näkyy myös, miten lentonopeus vaikuttaa nostovoimakertoimeen. Mitä suurempi lentonopeus sitä alhaisempi C_L riittää vaakalentoon.

Nostovoiman yhtälössä käytetty nostovoimakerroin on nostavan paineen L/S ja kineettisen paineen q suhde ja se riippuu ensisijaisesti siiven muodosta ja kohtauskulmasta. Jos tavanomaisen symmetrisen siiven nostovoimakerroin kuvataan kohtauskulman avulla, on tulos kuvan 25 mukainen. Koska nostovoiman esittäminen kertoimen avulla tekee mahdolliseksi tarkastella siiven ominaisuuksia nostovoiman muodostamiskyvyn kannalta, niin sitä voidaan käyttää verrattaessa esimerkiksi erilaisten siipien hyvyyttä. Nostovoimakerroin kasvaa kohtauskulman kasvaessa, kunnes saavutetaan maksimiarvo C_{Lmax}. Jos tämän jälkeen vielä lisätään kohtauskulmaa, ei taempi patopiste enää pysy jättöreunassa, vaan siirtyy eteenpäin aiheuttaen nostovoiman vähenemisen ja vastuksen kasvun. Tätä ilmiötä kutsutaan sakkaukseksi, ja se aiheutuu virtauksen irtoamisesta siiven yläpinnalta.

Lentokoneen lentäessä vaakalentoa sen täytyy lentää sellaisella kohtauskulmalla ja lentonopeudella, joka riittää synnyttämään koneen painon suuruisen nostovoiman. Tämä tarkoittaa sitä, että kineettisen paineen ja nostovoimakertoimen tulon on oltava vakio. Nopeuden pienentyessä nostovoimakerroin ja kohtauskulma kasvavat, kunnes saavutetaan CL_{max}, jota ei voida ylittää, vaan kohtauskulman vielä kasvaessa nostovoima pienenee ja kone sakkaa.

HUOM! **SAKKAUS RIIPPUU VAIN KOHTAUSKULMASTA**. KAIKKI TEKIJÄT, JOTKA VAIKUTTAVAT KOHTAUSKULMAA LISÄÄVÄSTI VAIKUTTAVAT VÄLILLISESTI SAKKAUKSEEN.

Koska tiettyä nopeutta vastaa aina tietty nostovoimakertoimen arvo, on voitu merkitä kuvaan 23 tiettyä lentomassaa vastaavat lentonopeudet vaakalennossa, sillä:

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\varrho V^2 \cdot S}$$ josta saadaan

$$V^2 = \frac{L}{\frac{1}{2}\varrho S C_L}$$ toisaalta sakkauksessa

$$V_s^2 = \frac{L}{\frac{1}{2}\varrho S C_{Lmax}}$$ jos nämä jaetaan puolittain keskenään, saadaan

$$\left(\frac{V}{V_s}\right)^2 = \frac{C_{Lmax}}{C_L}$$ eli

$$\frac{V}{V_s} = \sqrt{\frac{C_{Lmax}}{C_L}}$$

Kaava 5. Nostovoimakertoimeen liittyvät kaavat. Alinna on lentonopeuden ja sakkausnopeuden suhteen riippuvuus nostovoimakertoimesta.

Jos C_{Lmax} = 1,55 kuten kuvassa 25, voidaan laskea erilaisia nopeuden suhteita kuten taulukossa 2 ja kuvassa 23.

V/V_s	C_L	$\frac{C_{Lmax}}{C_L}$
1	1,5	1
1,1	1,25	1,2
1,22	1,00	1,5
1,42	0,75	2,0
1,73	0,5	3,0
2,45	0,25	6,0

Taulukko 2. Suhteellisen V/Vs lentonopeuden riippuvuus nostovoimakertoimesta.

Taulukosta havaitaan, että nopeuden lähestyessä sakkausnopeutta nostovoimakerroin kasvaa hyvin nopeasti. Tämä merkitsee lennolla sitä, että mitä lähempänä ollaan sakkausnopeutta, sitä tarkemmin on seurattava nopeuden muutoksia.

Vastuksen suuruuteen vaikuttavat tekijät

Vastus on lentokoneen liikettä vastustava voima, joka on suuntautunut taaksepäin. Vastus aiheutuu painejakautumasta sekä kappaleen pintaan vaikuttavista kitkavoimista. Nostovoiman syntyä virtaviivojen avulla tarkastellessamme havaitsimme, että kitkattomassa virtauksessa vastus oli nolla, mikäli virtaukset olivat etu- ja jättöreunassa identtiset. Tällöin eri puolille syntyneet paineet kumosivat toistensa vaikutukset. Näin ollen sulavalinjaisilla kappaleilla, joiden virtauksen voi olettaa pysyvän sileänä aivan jättöreunaan asti, on hyvin pieni painevastus, mikäli ne ovat virtauksen suuntaisia. Paksujen ja tylppien kappaleiden peräosassa virtaus on pyörteinen, jolloin niillä on suuri painevastus.

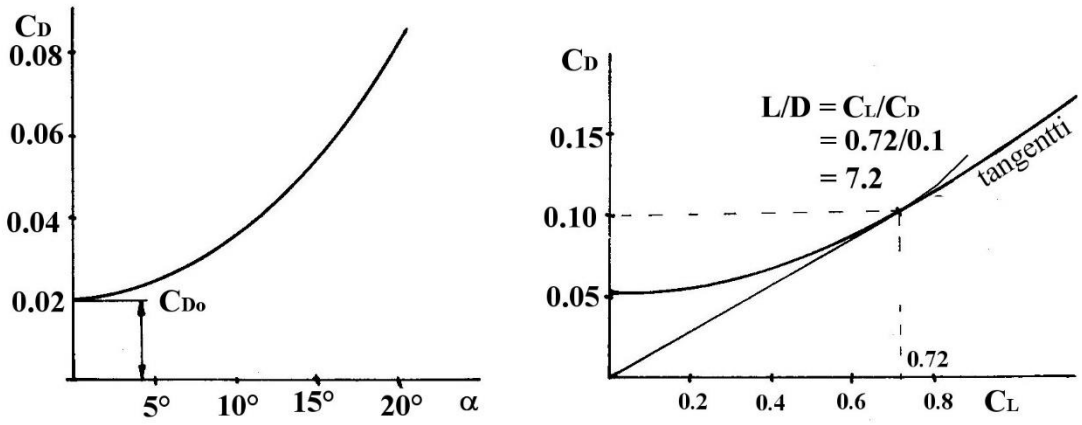
Vastuskerroin määritellään kineettisen paineen ja pinta-alan avulla seuraavasti:

$$C_D = \frac{D/S}{q} = \frac{\text{Vastuspaine}}{\text{Kineettinen paine}}$$

D/S = vastuspaine
q = kineettinen paine

Kaava 6. Vastuskertoimen C_D määrittely pinta-alan ja kineettisen paineen avulla. Laskennassa käytetty pinta-ala on useimmin vapaata virtausta vastaan kohtisuoraan projisioitu pinta-ala, mutta se voi olla myös joku muu kuten siiven pinta-ala. Oleellista on tietää, mitä pinta-alaa kulloinkin on käytetty, jotta laskettaessa käytetään samoja oletuksia, kuin merkinnöistä sovittaessa.

Vastuskertoimen riippuvuus kohtauskulmasta nähdään vasemmalla kuvassa 25. Useammin käytetään kuitenkin kuvassa oikealla esitettyä vastuskertoimen riippuvuutta nostovoimakertoimesta. Tämä on siitäkin syystä kätevä ja konkreettinen esitystapa, että tästä kuvaajasta saadaan myös optimi liitosuhde piirtämällä origosta alkava tangentti tälle kuvaajalle. Kun optimi C_L on saatu, niin sen avulla saadaan optimi kohtauskulma ja lentonopeus. Optimi liitosuhteella pääsee pisimmälle ja on siksi hyvä tietää konekohtaisesti. Tieto, jonka hallinta saattaa pelastaa pakkolaskulta.



Kuva 26. Vasemmalla vastuskertoimen riippuvuus kohtauskulmasta. C_{D0} on pienin vastus. Oikealla vastuskertoimen riippuvuus nostovoimakertoimesta. Kun tälle käyrälle piirretään origon kautta tangentti, saadaan paras liitosuhde L/D, joka tässä tapauksessa on 0,72.

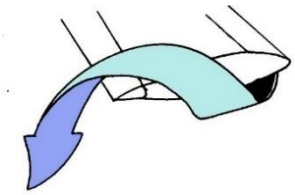
Kysymyksiä

1. Nostovoima **on** kohtisuorassa a) vapaata virtausta? b) suhteellista virtausta vastaan?
   Vast.: vapaata virtausta
2. Nostovoima **syntyy** kohtisuoraan a) vapaata b) suhteellista virtausta vastaan?
   Vast.: suhteellista
3. Lieriön pyöriessä virtauksessa myötäpäivään molemmat patopisteet siirtyvät alaspäin. Piirrä vastaava painejakautuma a) kitkattomalle, b) kitkalliselle virtaukselle.
   Vast.: kts. kuva 21
4. Minkä vaikutuksesta siiven taempi patopiste on jättöreunassa?
   Vast.: ilman sisäisen kitkan vuoksi
5. Mitkä seuraavista tekijöistä lisäävät kasvaessaan nostovoimaa?
   a) ilman tiheys, b) virtausnopeus, c) profiilin kaarevuus, d) kohtauskulma, e) siiven pinta-ala?
   Vast.: kaikki
6. Esitä kuvan avulla nostovoimakertoimen riippuvuus kohtauskulmasta.
   Vast.: ks. kuva 24
7. Miten määritellään nostovoimakerroin?
   Vast.: nostovoimakerroin on nostovoima jaettuna kineettisen paineen ja siipipinta-alan tulolla, katso myös kaava 5.
8. Sakkaus riippuu ensisijaisesti a) lentopainosta, b) ilman tiheydestä, c) kohtauskulmasta, d) lentonopeudesta?
   Vast.: kohtauskulmasta. Muut mainitut tekijät vaikuttavat kohtauskulmaan ja sitä kautta sakkaukseen.
9. Miten määritellään vastuskerroin?
   Vast.: vastuskerroin on vastus jaettuna kineettisen paineen ja referenssipinta-alan tulolla. Katso myös kaava 6.

SIIVEN PITUUDEN VAIKUTUS VIRTAUKSEEN

Kärkipyörre

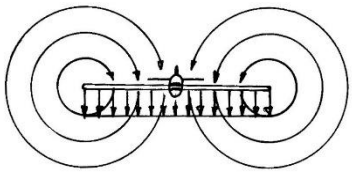
Aikaisemmissa kohdissa on jätetty huomiotta siiven pituuden ja muodon vaikutukset olettamalla, että virtaus on sama koko siiven pituudelta. Todellisuudessa näin ei ole, sillä rungon ja siipeen liitettyjen ulkonevien osien ja erikoisesti siiven kärkien vaikutuksesta virtauskuvio muuttuu. Aiemmin totesimme siiven ylä- ja alapinnan välisistä virtausnopeuseroista aiheutuvan paine-eron. Tuntuisi luonnolliselta, että tämä paine-ero pyrkisi tasoittumaan esimerkiksi siiven kärkien ympäri. Näin tapahtuukin ja se havaitaan siiven alapuolelta kärjen kautta yläpuolelle tapahtuvana kärkipyörteenä, jollainen on esitetty kuvassa 27.



Kuva 27. Siiven alapuolelta kärjen ympäri karkaava ilma muodostaa kärkipyörteen, joka on sitä voimakkaampi mitä painavampi lentokone ja mitä lyhyempi siipi.

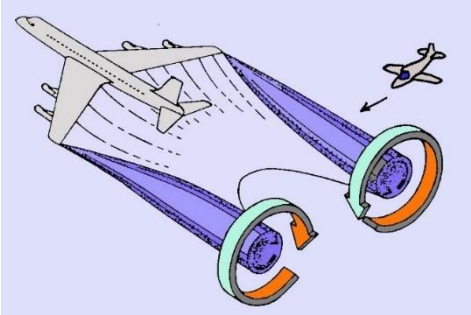
Mikäli katsotaan tällaista kärkipyörrettä takaapäin, voidaan havaita se kuvan 28 kaltaiseksi. Tällaisen pyörteen voi havaita esimerkiksi lentokoneen laskeutuessa lumisateessa tai kiitoradalle, jossa on juuri satanutta, irtonaista lunta. Pyörteen voimakkuus on verrannollinen koneen massaan ja kääntäen verrannollinen koneen kärkiväliin. Tämä selittää sen, että suurien matkustajakoneiden taakseen jättämä pyörre on jopa niin voimakas, että pikkukoneen joutuessa siihen jopa muutamia minuutteja jälkeenpäin pyörre voi paiskata pienkoneen vaakakierteeseen tai jopa syöksykierteeseen. Koska on vaikea tietää, tällaisen pyörteen olemassa oloa erityisesti lähellä isojen koneiden käyttämiä lentokenttiä, on varauduttava tällaistenkin yllätysten varalta. Lennonjohto porrastaa mm. tästä syystä lähtevät ja saapuvat koneet riittävästi, jottei jättöpyörre aiheuttaisi ongelmia. Vaarallisinta on stabiililla säällä kevyt, takaviistosta puhaltava tuuli, jolloin jättöpyörre voi ajautua kiitoradan yläpuolelle perässä tulevan koneen kiusaksi. Turvallisin tapa varautua jättöpyörteeseen on pitää riittävän suurta ilmanopeutta, jotta kone pysyisi ohjaajan hallinnassa myös tällaisessa tilanteessa tai yllättävässä puuskassa. Laskukierroksen myötätuuliosalla voisi käyttää nopeutta 1,3 – 1,4 x V_S , ja pienentää sitä vähitellen 1,25 x V_S ja kynnystä lähestyttäessä haluttuun kynnysnopeuteen asti. Nopeuden pieneneminen matalalla on luvallista sen vuoksi, että maanpinta on vaimentanut kärkipyörteen voiman eikä vaara ole yhtä suuri kuin ylempänä. Kuvassa 26 havaitaan myös alas taittuneen nopeuden suuruutta kuvaavat vektorit. Koska lyhyellä siivellä on saatava aikaan sama nostovoima kuin pitemmällä siivellä, niin lyhyellä siivellä alas taittuneen nopeuden on oltava suurempi.

Kärkipyörre yllättää helpoiten stabiililla säällä, koska sen aiheuttajaa, yleensä isoa matkustajakonetta ei enää ole näkyvissä ja pyörre saattaa pysyä pitkään paikallaan. On eräs tapaus, jossa lähes heti hävittäjän jälkeen laskeutunut kone on joutunut jättöpyörteeseen ja menettänyt hetkeksi hallinnan. Vaarallisin kärkipyörre on heikolla takamyötäisellä tuulella painavan koneen lentoonlähdön jälkeen, jos tuuli painaa kärkipyörteen kiitoradan päälle ja pienkone lähtee välittömästi ison koneen jälkeen.



Kuva 28. Kärkipyörre takaa tai edestä katsottuna. Nuolet osoittavat ilmavirran alaspäin suuntautuneen komponentin ja ympyrät kärkipyörteen, joka jatkuu koneen takana ns. hevosenkenkäpyörteenä.

Päältä päin katsottuna kärkipyörteen vaikutuksesta virtaus kääntyy siiven yläpinnalla kohti runkoa ja alapinnalla kärkeen päin. Aiemmin äärettömän pitkän siiven nostovoimasta puhuttaessa käytimme niin ikään pyörrettä hyväksemme. Todellisen siiven pyörimisakseli suuntautuu siivenkärjistä taaksepäin siten, että puhutaan "hevosenkenkäpyörteestä". Pyörteen etuosan muodostaa siiven ympäri kiertävä pyörre ja jatkuu kärkipyörteenä kärjestä taakse päin. Tämä on kuvattuna kuvassa 28. Tässä kuvassa näkyy selvästi, miten kärkipyörteeseen lentäminen saattaa aiheuttaa vaaran. On huomattava, että myös helikopteri jättää jälkeensä vastaavan pyörteen.



Kuva 29. Hevosenkenkäpyörre. Painavan koneen kärkipyörre on niin voimakas, että pienkone on vaikeuksissa, jos se lentää siihen liian pian. Normaalisti kärkipyörre heikkenee 1 – 2 minuutissa vaarattomaksi. Stabiilissa säässä vaikutus viipyy pisimpään.

Maaefekti

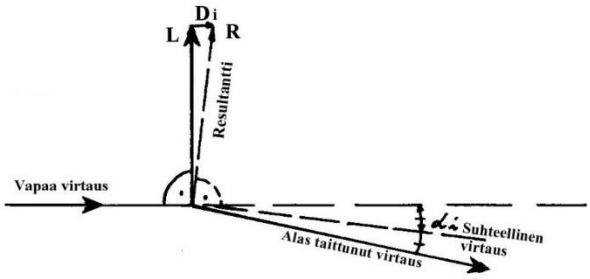
Lennettäessä alle koneen kärkivälin etäisyydellä maanpinnasta kärkipyörre ja alastaite pakkautuvat siiven ja maan väliin, jolloin paine siiven alapintaan kohdistuva kasvaa ja siipi kantaa paremmin ja indusoitu vastus pienenee. Tämä ilmiö on sitä voimakkaampi mitä matalammalla ja mitä suuremmalla kohtauskulmalla lennetään. Maaefektiä voi hyödyntää etenkin, jos lähdetään lentoon pehmeältä kiitoradalta siten, että kevennetään konetta käyttämällä laskusiivekkeitä ja sopivaa kohtauskulmaa kunnes kone irtoaa pinnasta. Tämän jälkeen jatketaan kiihdytystä pyörät juuri ja juuri irti pinnasta, kunnes nopeus on kasvanut riittävästi turvallista nousua varten.

Indusoitu vastus

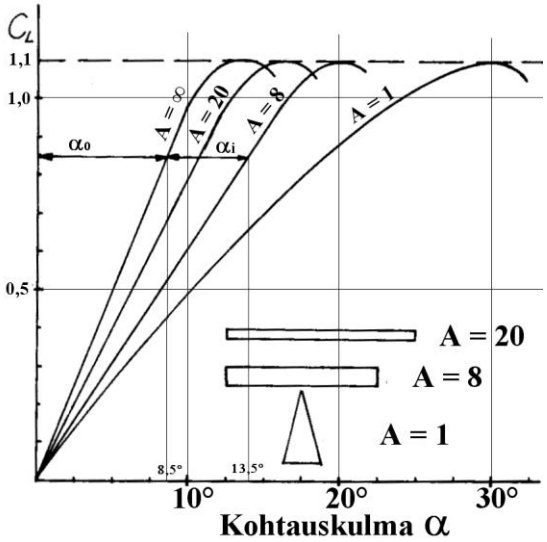
Edellä totesimme, että siiven kärjen ympäri tapahtui "vuotoa' alhaalta ylös. Miten tämä vuoto vaikuttaa nostovoimaan ja vastukseen? Luultavaa on, että nostovoima pienenee ja vastus kasvaa, mutta miten? Palautamme mieleen seuraavat aikaisemmin esitetyt asiat:

1. Nostovoima syntyy kohtisuoraan suhteellista virtausta vastaan.
2. Nostovoiman suunta määritellään siten, että se on kohtisuorassa vapaata virtausta vastaan.
3. Kärkipyörteestä aiheutuu siiven jättöreunan takana alastaite eli suhteellinen virtaus onkin taittunut alaspäin. Alastaite on sitä suurempi, mitä lyhyempi on kärkiväli.

Tuloksena on eräänlainen ristiriitatilanne siinä mielessä, että syntyvän nostovoiman vektori on kallistunut taaksepäin, mutta määritelmän mukainen nostovoima on kohtisuorassa vapaata virtausta vastaan. Tämä "ristiriita" poistuu, kun lisätään määritelmän mukaiseen nostovoimaan indusoitu vastus D_i. Tätä voidaan havainnollistaa kuvan 30 avulla.



Kuva 30. Nostovoima R syntyy kohtisuoraan suhteellista virtausta vastaan. Kuvassa resultantti R osoittaa syntyvän nostovoiman. Nostovoima on kuitenkin määritelty kohtisuorassa vapaata virtausta vastaan. Resultantin ja nostovoiman erotus on indusoitu vastus D_i eli nostovoimasta riippuva vastus.

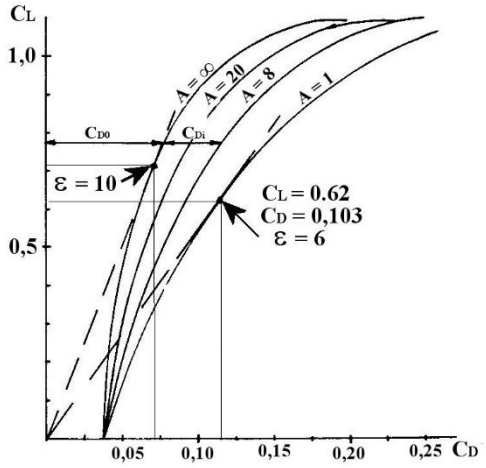


Kuva 31 Nostovoimakertoimen riippuvuus kohtauskulmasta ja siiven sivusuhteesta. Äärettömän pitkän siiven $C_L(\alpha)$ kuvaajaa vastaava kohtauskulma on α_0, johon tarvitaan lisää kohtauskulmaa α_i:n verran, jotta äärellinen siipi tuottaisi saman nostovoimakertoimen kuin äärettömän pitkä siipi. Esimerkiksi sivusuhteella 8 tarvitaan 5° lisää kohtauskulmaa, jotta nostovoimakerroin olisi 0,85.

Kuvasta havaitaan, että saatiin todella lisävastusta, mutta nostovoima ei vähentynyt. Tosin tarvitaan indusoidun kohtauskulman, α_i:n verran suurempi kohtauskulma verrattuna äärettömän pitkän siiven nostovoimaan. Tämä vaikutus ilmenee esimerkiksi $C_L(\alpha)$- tai $C_L(C_D)$-kuvaajista siten, että ne loivenevat sitä enemmän mitä pienempi sivusuhde on. Toisin sanoen mitä pienempi on koneen kärkiväli, sitä suurempi kohtauskulma tarvitaan saman nostovoiman saavuttamiseksi. Esimerkiksi deltasiipiset koneet, joiden sivusuhde on noin 1—2, tarvitsevat liki 30° kohtauskulman laskussa, kun tavallisille pienkoneille, joiden sivusuhde A ~ 8 riittää noin 17° ja purjekoneille (A ~20) noin 13°. Tämä käy ilmi myös kuvasta 31.

Polaari eli napakäyrä

Polaarin vaaka-asteikkona on kokonaisvastus ja pystyasteikkona nostovoimakerroin. Liitosuhde L/D = C_L/C_D saadaan tästä kuvaajasta mille hyvänsä vastus- tai nostovoimakertoimen arvolle. Optimi liitosuhde saadaan piirtämällä origosta kuvaajalle tangentti. Tangenttipisteessä C_L/C_D on paras liitosuhde ε_{optimi}. Kuvasta 30 nähdään syy, miksi moottorikoneiden liitosuhde on huomattavasti pienempi kuin purjekoneiden. Liitosuhde on nostovoima- ja vastuskertoimen suhde, joka saadaan esimerkiksi piirtämällä origosta viiva nostovoimakertoimen kuvaajalle. Mitä jyrkempi tangentti, sitä parempi liitosuhde. Jotta siipi, jonka sivusuhde on 8 tuottaisi saman nostovoimakertoimen kuin äärettömän pitkä siipi, jonka kohtauskulma = α_∞ niin äärellisen siiven tarvitsema kohtauskulma on indusoidun kohtauskulman α_i verran suurempi.



Kuva 32. Vastuskertoimen kasvu sivusuhteen vaikutuksesta. C_{DO} on haitallinen vastus eli profiilivastus. C_{Di} on indusoitu vastus ja ε = liitosuhde L/D.

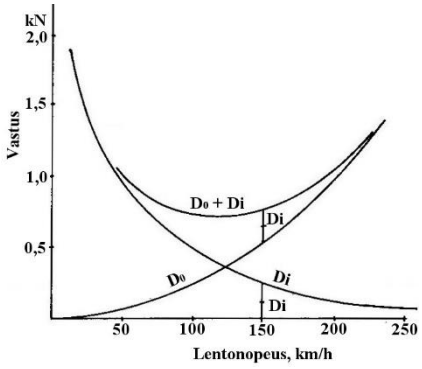
Haitallinen vastus eli loisvastus

Haitallisella vastuksella eli loisvastuksella tarkoitetaan yhdessä kaikkien muiden kuin nostovoimaa synnyttävien vastuksien summaa. Loisvastus = kitkavastus + painevastus. Kitkavastus on kappaleen pintaan muodostuvan rajakerroksen aiheuttama vastus, joka johtuu siitä, että rajakerroksessa ympäröivää ilmaa siepataan koneen lentonopeuteen ja tähän tarvittava voima vastustaa liikettä. Kitkavastusta pienentää pinnan sileys ja siistit muodot. Painevastus aiheutuu siitä, että virtaus irtoaa pinnasta ja aiheuttaa paine-eron, joka vastustaa liikettä (vertaa kuvan 20 kitkallisen virtauksen tapausta, kun sirkulaatio puuttuu). Kappaleet muotoillaan virtaviivaisiksi, jotta painevastus pienenisi. Pienillä Reynoldsin luvuilla kappaleen pintaa saatetaan karheuttaa tarkoituksellisesti, vaikka se lisää kitkavastusta, mutta painevastuksen pieneminen on suurempi kuin kitkavastuksen kasvu. Tästä hyvinä esimerkkeinä ovat golf- ja tennispallot. Käytännössä näiden vastusmuotojen välille on vaikea tehdä eroa ilman perusteellista analyysiä. Interferenssivastus on siiven ja rungon, peräsinten ja rungon liitosten

aiheuttama lisävastus. Tätä vastusta pienennetään juoheilla liittymillä, jotka eivät aiheuta liitoskohtiin ylimääräistä turbulenssia. Lentokoneen runko aiheuttaa runsaasti vastusta mutta osallistuu myös jossain määrin nostovoiman tuottamiseen ja siksi yleensä siiven pinta-alaa laskettaessa siipi jatketaan koneen keskilinjalle asti, kun määritellään siiven pinta-alaa. Lisävastukset, joita aiheuttavat kaikki siivestä tai rungosta esiin pistävät komponentit lasketaan mukaan haitalliseen vastukseen. Suurimpia lisävastuksen aiheuttajia ovat laskutelineet etenkin, jos niissä ei ole pyöräsuojuksia.

Kokonaisvastus

Ohjaajan kannalta on hyödyllistä tietää, miten lentokoneen kokonaisvastus muuttuu lentonopeuden muuttuessa. Vastus saadaan vastuskertoimesta ja kineettisestä paineesta laskemalla, mutta kukapa niitä ehtisi laskea lennon aikana. Sen vuoksi tarkastellaan jo etukäteen mistä vastus muodostuu ja miten se muuttuu eri lentotilanteissa. Kuvasta 33 käy ilmi, että vastuksessa on kaksi osaa, joista toinen, C_{DO} riippuu vain kohtauskulmasta ja toinen C_{Di} riippuu kohtauskulmasta sekä sivusuhteesta.



Kuva 33. Vastuksen riippuvuus lentonopeudesta. D_i on nostovoimasta johtuva vastus, D_0 on nopeudesta johtuva vastus, joka sisältää myös maassa rullaavan koneen rullausvastuksen. Kokonaisvastus on pienimmillään silloin, kun $D_0 = D_i$

$$C_{Di} = \frac{C_L^2}{e \pi A}$$ jossa e on siiven elliptisyyskerroin ja A sivusuhde

$$C_D = C_{Do} + C_{Di} = C_{Do} + \frac{C_L^2}{e \pi A}$$

$$D = q S C_D = q S (C_{Do} + \frac{C_L^2}{e \pi A})$$

Toisaalta määriteltiin

$$C_L = \frac{L}{q S}$$ joka sijoitettuna vastuksen kaavaan antaa

$$D = q S (C_{Do} + \frac{L^2}{e \pi A q^2 S^2})$$ ja sievennettynä

$$D = q S C_{Do} + \frac{L^2}{e \pi A q S}$$

$$q = \tfrac{1}{2} \varrho V^2$$ sijoitetaan edellisiin

$$D = \tfrac{1}{2} \varrho S C_{Do} V^2 + \frac{2L^2}{e \pi A S \varrho V^2}$$

eli lyhennettynä

$$D = a V^2 + \frac{b}{V^2}$$, jossa a ja b ovat vakioita.

Näistä nouseva paraabeli D_o kuvaa haitallista vastusta, joka on nolla, kun nopeus on nolla ja kasvaa nopeuden neliöön verrannollisena. Laskeva hyperbeli D_i on lentonopeudesta riippuva vastus eli indusoitu vastus, joka pienenee lentonopeuden kasvaessa. Tämä riippuvuus voidaan parhaiten esittää kuvan 32 avulla. Siinä on erotettu molemmat vastuksen osat toisistaan sekä esitetty kokonaisvastus. Erityisen huomattavaa on juuri indusoidun vastuksen kasvu pienellä nopeudella, sillä tämä tilanne esiintyy laskussa ja lentoonlähdössä.

Kaava 7. Kokonaisvastuksen laskentakaavat. Kokonaisvastus on nousevan paraabelin ja laskevan hyperbelin summa.

Vastuksen yhtälöstä voimme todeta niin ikään, että koneen nostovoiman lisäys aiheuttaa indusoidun vastuksen kasvun. Nostovoima L = koneen paino silloin, kun lennetään suoraa vaakalentoa. Tilanne ei muutu kaarron tai lentoliikkeiden aikana, mikäli huomioidaan keskipakovoimista johtuvat kiihtyvyydet eli g-voimat. Samoin indusoitu vastus kasvaa lentokorkeuden kasvaessa, sillä ilman tiheys pienenee mutta haitallinen vastus sen sijaan pienenee.

Yhteenveto vastuksesta:

Seuraavassa taulukossa on esitetty yhteenveto haitallisen ja indusoidun vastuksen muutoksen suunnasta ja voimakkuudesta, kun olosuhteet muuttuvat. Nämä on hyvä olla osana ”perstuntumaa”, jotta osaisi reagoida oikein muutoksiin.

~ lue "on verrannollinen"	Haitallinen vastus	Indusoitu vastus
Lentonopeus kasvaa	kasvaa $\sim V^2$	pienenee $\sim \frac{1}{V^2}$
Lentokorkeus kasvaa	pienenee $\sim \varrho$	kasvaa $\sim \frac{1}{\varrho}$
Sivusuhde kasvaa	–	pienenee $\sim \frac{1}{A}$
Koneen paino kasvaa	–	kasvaa $\sim W^2$
Kiihtyvyysmonikerta kasvaa	–	kasvaa $\sim n^2$

Taulukko 3. Muutoksen vaikutus vastukseen.

Kysymyksiä

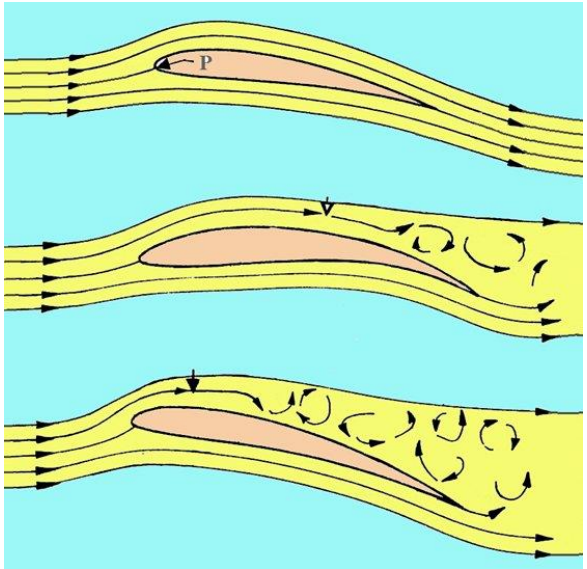
1. Kärkipyörre johtuu siiven ylä- ja alapuolen välisestä _____? erosta.
   Vast.: paine-erosta
2. Mikä aiheuttaa alastaitteen?
   Vast.: kärkipyörre
3. Miksi suhteellinen virtaus on taittunut siiven jälkeen alaspäin?
   Vast.: kärkipyörteen johdosta
4. Miten koneen lentopaino ja kärkiväli vaikuttavat kärkipyörteen ja alastaitteen voimakkuuteen?
   Vast.: painon kasvu lisää ja kärkivälin kasvu vähentää kärkipyörrettä ja alastaitetta
5. Miten varaudut estämään etukäteen hallinnan menetyksen jouduttuasi toisen koneen kärkipyörteen vaikutukseen.
   Vast.: pidän riittävän lentonopeuden alueella, jossa lentää myös isoja koneita.
6. Miten korjataan ristiriita: nostovoima **syntyy** kohtisuoraan suhteellista virtausta vastaan, mutta nostovoima **määritellään** syntyväksi kohtisuoraan vapaata virtausta vastaan.
   Vast.: Lisäämällä indusoidun vastuksen käsite.
7. Syntyvän nostovoiman suunta poikkeaa määritelmän mukaisesta suunnasta, koska _____? virtaus on taittunut alaspäin.
   Vast.: suhteellinen
8. Miksi moottorikoneen vastus on aina suurempi kuin purjekoneen?
   Vast.: moottorikoneen sivusuhde on pienempi, joten indusoitu vastus on suurempi.
9. Miten kärkivälin lyheneminen vaikuttaa samalla kohtauskulmalla saavutettavaan nostovoimaan?
   Vast.: nostovoima pienenee
10. Lentokoneen kokonaisvastus muodostuu kahdesta osasta, jotka ovat
    Vast.: haitallinen vastus ja indusoitu vastus
11. Lentonopeuden pienetessä _____? vastus kasvaa.
    Vast.: indusoitu
12. Lentonopeuden kasvu pienentää _____? vastusta ja lisää _____? vastusta.
    Vast.: indusoitua . . haitallista
13. Lentokorkeuden kasvaessa _____? vastus pienenee ja _____? vastus kasvaa.
    Vast.: haitallinen . . . indusoitu
14. Sivusuhteen kasvu pienentää _____? vastusta.
    Vast.: indusoitua
15. Koneen painon kasvu a) lisää b) pienentää indusoitua vastusta.
    Vast.: lisää
16. Indusoidun vastuksen lisääntyminen on verrannollinen a) kiihtyvyysmonikertaan b) kiihtyvyysmonikerran neliöön.
    Vast.; neliöön.

SAKKAUSILMIO

Sakkauksesta on edellä jo sanottu melkein kaikki paitsi kuvattu, miten virtaus käyttäytyy siiven sakatessa eli tilanne, jossa taempi patopiste siirtyy takareunasta siiven yläpinnalle.

Nostovoiman synnyn yhteydessä kuvassa 24 todettiin, että virtauksen luonnollinen taempi patopiste olisi siiven yläpuolella, mutta kitkallinen virtaus pyyhkäisee patopisteen jättöreunaan asti. Mikäli kohtauskulmaa kasvatetaan riittävästi, niin virtaus ei enää jaksa viedä taempaa patopistettä jättöreunaan saakka vaan se siirtyy jättöreunasta siiven yläpuolelle kohti etureunaa. Patopisteen takana ilma virtaa takareunasta vastavirtaan aiheuttaen voimakkaita pyörteitä ja lisää vastusta sekä vähentää nostovoimaa.

Mitä äkillisemmin virtaus irtoaa, sitä terävämpi on $C_L(\alpha)$ kuvaajan huippu.

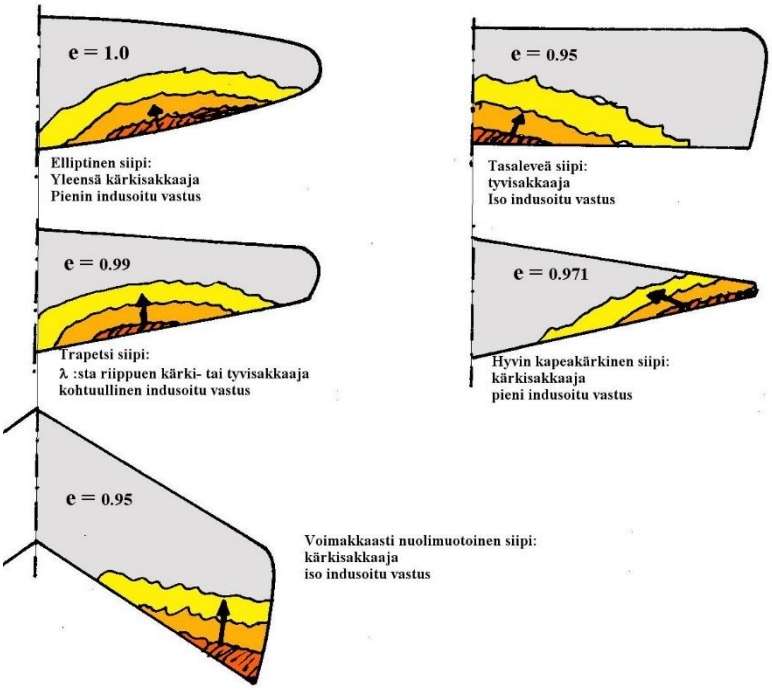


Kuva 34. Sakkauksen eteneminen. Ylinnä virtaus on kiinni siivessä. Keskellä on osasakkaus, jossa taempi patopiste on siirtynyt noin 25% takareunasta eteenpäin. Alinna on täysin sakannut siipi, jossa virtaus on irronnut lähes kokonaan siiven yläpinnalta. Jos ohjaaja voi säätää korkeusperäsimellä sakkaustilaa haluamallaan tavalla, koneella on hyvät sakkausominaisuudet. Konekohtaiset erot sakkauskäyttäytymisessä ovat suuria ja siksi on tärkeää oppia ja harjoitella sakkaustilan hallintaa koneella, jolla lentää.

Kuvassa 34 esitetään virtauskuvion kehittyminen sakkauksen edetessä. Sakkauksen luonne riippuu siiven ja ennen kaikkea profiilin muodosta. Lentäjän on syytä oppia tuntemaan koneensa käyttäytyminen sakkaustilassa kunnolla, jotta hän kykenee toimimaan yllättävissä tilanteissa oikein. Koneiden sakkausominaisuudet ovat yksilöllisiä. Joissakin koneissa voi lentää osasakkaustilassa täysin hallitusti mutta on koneita, joissa sakkaus saattaa olla hyvin yllättävä. Koneen käyttäytyminen sakkauksessa riippuu siitä, mistä kohden siipeä sakkaus alkaa, sekä siitä, miten sakkaus etenee. Sakkaus voi alkaa virtauksen irtoamisella siiven etureunasta, jolloin se on yleensä terävä ja vaikeasti hallittavissa. Jos sakkaus alkaa siiven kärjestä, koneen sanotaan olevan kärkisakkaaja. Kärkisakkaus on vaarallista, koska kone kallistuu sakanneen kärjen puolelle ja joutuu helposti syöksykierteeseen. Kuormatessaan konetta, pilotti voi kuitenkin vaikuttaa siihen, miten kone käyttäytyy sakatessa, koska koneen painopiste vaikuttaa voimakkaasti sakkausominaisuuksiin. Jos painopiste on paljon sallittua taempana, kone voi joutua jopa lattakierteeseen.

Koneen suunnittelussa voidaan ottaa huomioon sakkausominaisuudet ja valita sakkausominaisuudet. Leveä siiven kärki eli tasaleveä siipi ei ole herkkä kärkisakkaukselle. Kapeakärkisen siiven kärkisakkausherkkyyttä voidaan vähentää pienentämällä kärjen kohtauskulmaa kiertämällä kärkeä alas muutaman asteen. Samaan tulokseen voi päästä valitsemalla sopiva kärkiprofiili. Mitä leveämpi kärkiprofiili on, sitä pienempi on vaara joutua kärkisakkaukseen. Mainittakoon, että aikaisemmin monet lentokoneet olivat kärkisakkaajia, joten ohjaajilta vaadittiin jatkuvaa valppautta, sillä koneet joutuivat sangen helposti virheliikkeisiin. Tämä oli omiaan nostamaan myös ohjaajan itsetuntoa silloin, kun hän oli kyllin taitava siirtymään vaikeampaan koneeseen. Nykyisten määräysten mukaan rakennetut koneet ovat helposti käsiteltäviä sakkauksessa. Sakkaustilaan joutumisen kynnyksellä korkeusohjain toimii laiskasti eli tarvitaan isoja liikkeitä, jotta jotain tapahtuisi. Virtauksen irtoaminen tuntuu ohjaimissa tärinänä, sakkauksen varoitusvalo palaa ja summeri soi, joten ohjaajan ainakin pitäisi tietää, milloin kone sakkaa. Jos sakkaus alkaa kärjestä, kone kaatuu sakanneen kärjen puolelle.

Kuvasta 35 ilmenee sakkauksen eteneminen erilaisilla siipimuodoilla.



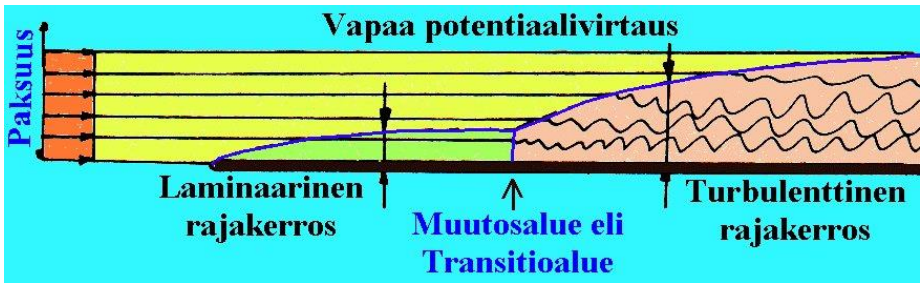
Kuva 35. Siipimuodon vaikutus sakkauksen alkamiskohtaan. Jos sakkaus alkaa tyvestä, niin vaara joutua hallitsemattomaan lentotilaan on hyvin pieni. Siiven kärjestä alkava sakkaus vaatii erityistä valppautta ja oikeaa ohjaustekniikkaa, jottei lento jäisi viimeiseksi. Kuvissa on siipien elliptisyyskerroin e.

Kysymyksiä:

1. Piirrä virtaus sakanneen siiven ympärillä.
   Vast.: ks. kuva 33
2. Mikä osuus ilman sisäisellä kitkalla on nostovoiman synnyssä?
   Vast.: kitka siirtää taemman patopisteen jättöreunaan.
3. Miksi siipi sakkaa?
   Vast.: kohtauskulman kasvaessa ilman sisäinen kitka ei riitä pitämään taempaa patopistettä jättöreunassa, vaan se siirtyy siiven yläpinnalla kohti etureunaa, jolloin virtaus kääntyy jättöreunassa eteenpäin ja tulee pyörteiseksi.
4. Mitkä seikat vaikuttavat kohtauskulmaa lisäävästi?
   Vast.: koneen painon lisäys, kiihtyvyysmonikerran lisäys, lentonopeuden pieneneminen, ilman tiheyden pieneneminen ja siipipinta-alan pienentäminen esimerkiksi laippojen sisäänotolla.
5. Jos kone on kärkisakkaaja, niin sakkauksessa se _____?
   Vast.: kaatuu siivelleen ja voi joutua syöksykierteeseen tai virheliikkeeseen.
6. Kapea siiven kärki a) lisää b) vähentää koneen taipumusta kärkisakkaukseen.
   Vast.: lisää
7. Nuolimuotoinen siipi on ___?_sakkaaja.
   Vast.: kärki-
8. Tasaleveä siipi on ____?_sakkaaja.
   Vast.: tyvi-
9. Piirrä sakkauksen eteneminen erilaisille siiville: elliptiselle, suorakaidesiivelle, trapetsisiivelle ja nuolimuotoiselle siivelle.
   Vast.: katso kuva 34.
10. Mitä keinoja käytetään kärkisakkauksen estämiseksi?
    Vast.: kärkiprofiilin kohtauskulma tehdään pienemmäksi kuin tyviprofiilin joko kiertämällä kärkeä alaspäin tai valitsemalla kärkeen sopiva profiili.

RAJAKERROSTEORIAA

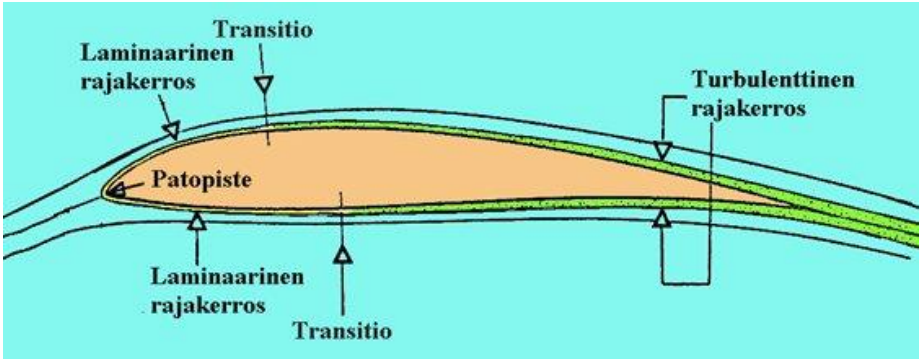
Rajakerros on kappaleen pinnan välittömässä läheisyydessä oleva kerros, jossa ilman nopeus on 99% tai vähemmän pintaa kauempana ympäröivän ns. vapaan virtauksen nopeudesta. Rajakerroksessa muodostuu kitkavastus. Lisäksi se vaikuttaa muodollaan profiilin muotovastukseen, joten sillä on tärkeä osa aerodynamiikassa. Yksinkertaisin esimerkki rajakerroksesta saadaan tarkastelemalla virtausta sileän levyn pinnassa.



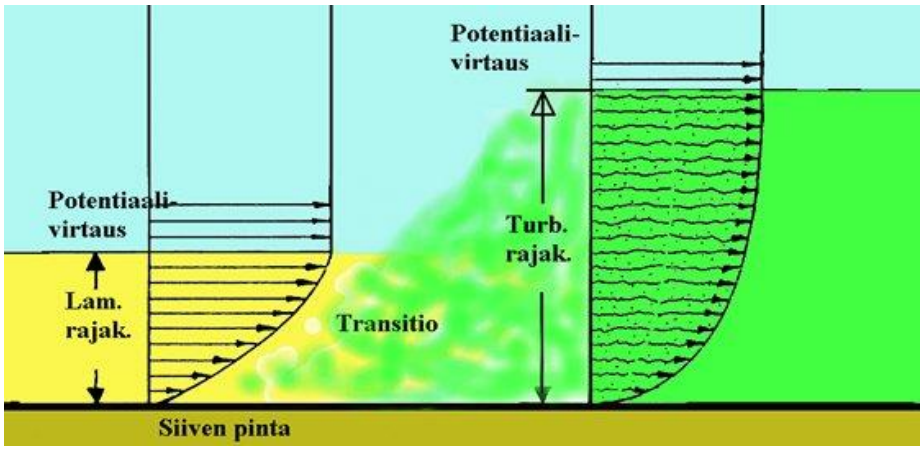
Kuva 36. Virtaus tasaisen levy pinnassa. Alue, jossa virtausnopeus on vähintään prosentin pienempi kuin vapaan virtauksen nopeus kutsutaan rajakerrokseksi. Rajakerros on laminaarinen, jos virtaviivat eivät leikkaa toisiaan ja turbulenttinen, jos virtaus on sekoittunut ja virtaviivoja on vaikea erottaa. Väliin jää muutosalue, jossa virtaus muuttuu turbulenttiseksi.

Laminaariselle rajakerrokselle on ominaista se, että virtaviivat kulkevat sileästi pinnan suuntaisena ja virtaviivat ovat selvästi erottuvia eivätkä leikkaa toisiaan. Laminaarinen rajakerros on erittäin ohut, noin 0,01—2 mm. Turbulenttiselle rajakerrokselle on kuvaavaa kiemuraiset virtaviivat rajakerroksessa. Siinä tapahtuu virtauksen sekoittumista rajakerroksen ylemmän ja alemman kerroksen välillä, joten välittömästi pinnan lähellä olevilla hiukkasilla on suurempi nopeus kuin mitä oli laminaarisessa rajakerroksessa. Koska turbulenttinen rajakerros on laminaarista paksumpi, sen aiheuttama kitkavastus on suurempi kuin laminaarisen. Kohtaa, jossa laminaarinen virtaus muuttuu turbulenttiseksi, sanotaan transitiopisteeksi. Yleensä transitiopiste on viimeistään profiilin paksuimmassa kohdassa.

Vastuksen pienentämiseksi profiili pyritään muotoilemaan siten, että transitiopiste saataisiin mahdollisimman kauaksi etureunasta. Tällöin profiilille on ominaista kauaksi taakse, noin 40-60%: iin siirtynyt maksimipaksuuden kohta.



Kuva 37. Esimerkki virtauksen käyttäytymisestä profiilin ympärillä. Patopisteessä virtaus jakautuu profiilin ylä- ja alapuolelle. Patopisteen paikka riippuu kohtauskulmasta. Siiven alapinnalla laminaarialueen leveys on yleensä suurempi kuin yläpinnalla. Yläpinnalla laminaarialue muuttuu helposti turbulenttiseksi, jos pinnassa on vähäisiäkin epätasaisuuksia. Rajakerros paksunee profiilin jättöreunaa kohti.

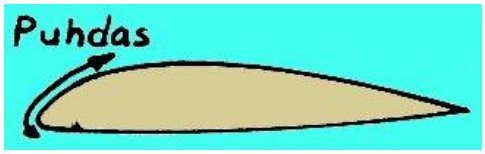


Kuva 38. Transitionalueella rajakerros paksunee ja aivan pinnan lähellä olevassa kerroksessa virtausnopeus on suurempi kuin laminaarikerroksessa. Tämä lisää vastusta mutta saattaa estää virtauksen irtoamisen siivestä ja vähentää sakkaustaipumusta.

Koska muuttumiskohtaan vaikuttaa myös profiilin pinnan puhtaus siten, että mikäli epätasaisuudet tunkeutuvat rajakerroksen läpi, niin ne aiheuttavat välittömästi turbulenttisen rajakerroksen. Koska laminaarisen rajakerroksen paksuus on etureunassa vain millin sadas- tai kymmenesosia, on selvää, että profiilin etureunan on oltava sileä ja jopa kiillotettu, jotta voitaisiin puhua laminaarivirtauksesta. Mikäli laminaariprofiili ei ole puhdas, niin sen vastus on suurempi kuin mitä vastaavalla normaaliprofiililla, joten

MIKÄLI KONEESSA ON LAMINAARIPROFIILI, NIIN SIIVEN ETUREUNA ON PIDETTÄVÄ SILEÄNÄ JA PUHTAANA.

Minulta on usein kysytty, miksi meidän pitää välittää rajakerroksesta, joka on vain muutaman millin tai sentin paksuinen. Vastaus on yksinkertainen: Rajakerroksessa syntyy suurin osa vastuksesta, jota varten tarvitaan moottori ja paljon polttoainetta. Pienikin epäpuhtaus väärässä paikassa kaksinkertaistaa helposti rajakerroksen ja vastuksen. Alla on tärkein asia, jonka voin kertoa purjelentäjille ja mekaanikoille. **Pitäkää etureuna puhtaana!!!!! (satavarma tenttikysymys)**



Kuva 39. Siiven etureunasta paksuimpaan kohtaan on profiilin muodon ja puhtauden suhteen tärkein alue, koska kaikki epätasaisuudet ja muotovirheet muuttavat virtauksen turbulenttiseksi ja lisäävät kitkavastusta.

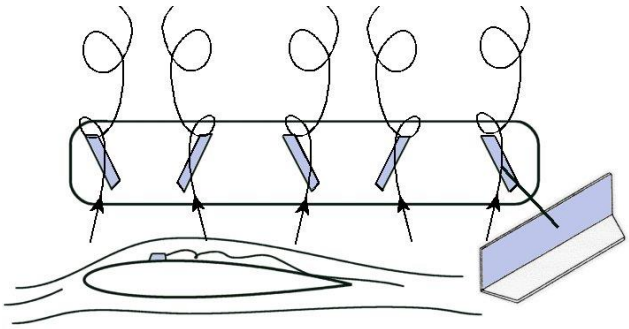
Keinoja parantaa sakkausominaisuuksia

Koneen käyttäytyminen sakkauksessa on turvallisuustekijä. Siksi suunnittelija tekee kaikkensa, jotta koneella olisi turvalliset sakkausominaisuudet. Profiilin muoto on perustekijä, joka määrää niin sakkauksen kuin muutkin ominaisuudet. Kun profiili on valittu eikä sakkaus tyydytä, käytettävissä on kolme peruskeinoa: pyörregeneraattorit, turbulaattorit ja rajakerrosaidat. Lentäjän tulee pitää huolta siitä, että koneen painopiste on sallittujen rajojen sisällä.

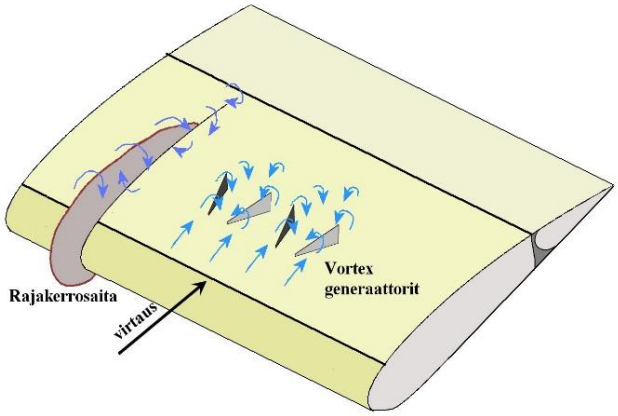
Pyörregeneraattori

Virtauksen irtoaminen siiven yläpinnasta aiheuttaa pinnassa olevan virtauksen kääntymisen vastakkaiseen suuntaan. Tätä voidaan siirtää suuremmille kohtauskulmille, jos kiihdytetään rajakerroksen alimman kerroksen virtausnopeutta. Tähän tarkoitukseen on kehitetty pyörregeneraattori, joka on siiven pintaan kiinnitetty pieni lipare, joka on noin 15° kulmassa virtaussuuntaan. Pyörregeneraattorin taakse syntyy noin parin-kolme senttiä korkea pyörre, joka tuo lisänopeutta rajakerroksen alaosaan, mikä parantaa virtauksen pysymistä siivessä kiinni. Kun lipareet kiinnitetään

vuoroin vasemmalle ja vuoroin oikealle vinoiksi, pyörteiden suunnat ovat vastakkaiset ja ne vaikuttavat vain lyhyellä matkalla juuri siinä kohdassa, missä virtauksen irtoaminen muuten tapahtuisi. Jättöreunassa pyörteet ovat jo kumonneet toisensa. Seuraavassa kuvassa on kuvattu pyörregeneraattorin toiminta.



Kuva 40. Pyörregeneraattorit asennetaan +/- suuntiin siiven yläpinnalle, jossa ne kiihdyttävät virtausta siten, että se pysyy suuremmilla kohtauskulmilla kuin ilman. Kun pyörregeneraattorin aiheuttamat pyörteet kiertävät vastakkaisiin suuntiin, ne kumoavat toisensa ennen jättöreunaa. Pyörregeneraattori lisää hieman vastusta, mutta parantaa nostovoimaa ja siirtää sakkauksen alkamista.



Kuva 41. Pyörregeneraattorit liimataan siipeen useimmiten hieman V-muotoon. Tällöin vierekkäiset pyörteet syntyvät vastakkaisin kiertein, jonka ideana on se, että jättöreunaan edettyään kierteet ovat kumonneet toisensa. Tällöin niiden rajakerrosta nopeuttava vaikutus kohdistuu vain välittömästi niiden takana olevaan virtaukseen ja virtaus pysyy kiinni siivessä. Tämä parantaa nostovoimaa ja saattaa jopa vähentää vastusta. Kuvassa on esitetty myös rajakerrosaita, joka vähentää kärjen ympäri tapahtuvaa vuotoa. Samalla se kiihdyttää siiven yläpinnan virtausta parantaen mm. siivekkeiden tehoa.

Pyörregeneraattoreita käytetään räätälöitäessä nostovoimakäyrää. Sillä voidaan rauhoittaa sakkausominaisuudet, parantaa laskusiivekkeiden ja siivekkeiden tehoa. Niitä käytetään suihkumoottoreiden ilmanottoaukoissa parantamaan sisäänvirtauksen ominaisuuksia.

Turbulaattori

Turbulaattori on profiilin etureunaan kiinnitetty kolmiolista, mitoiltaan yleensä alle sentin. Sen tehtävänä on varmistaa, että virtaus on turbulenttinen heti alusta alkaen. Vaikka tämä lisää kitkavastusta, niin sillä parannetaan virtauksen kiinni pysymistä yleensä hyvin rajatulla alueella kuten laskusiivekkeen tai siivekkeen tyven lähellä. Jos koneella on erittäin terävät sakkausominaisuudet turbulaattorilla niistä voi saada siedettävät. Turbulaattori on viimeisiä kikkoja, joita käytetään, ellei muu auta.

Rajakerrosaita

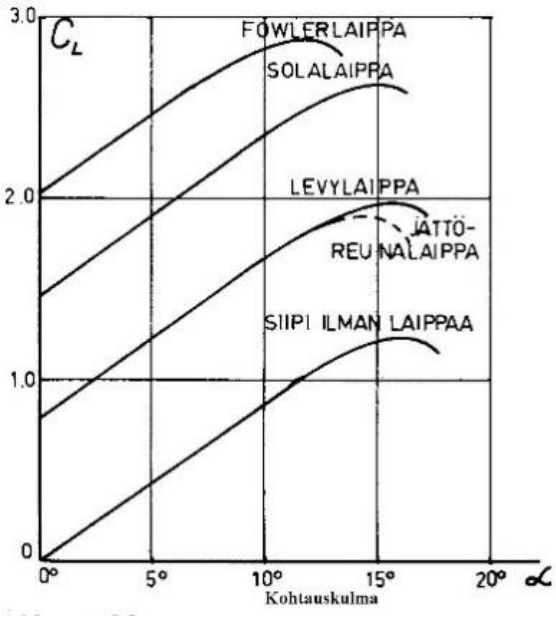
Rajakerrosaidan avulla pyritään vähentämään kärkipyörteestä johtuvaa virtauksen ryömimistä kohti runkoa siiven yläpinnalla. Se sijoitetaan yleensä sellaiseen paikkaan, että aita synnyttää pyörteen, joka parantaa siivekkeen ja/tai laskusiivekkeen tehoa. Rajakerrosaidat ovat erittäin paljon käytettyjä yliäänikoneissa, joissa on voimakas nuolimuoto.

Kysymyksiä

1. Mikä on rajakerros?
   Vast.: rajakerros on kappaleen pinnan läheisyydessä oleva kerros, jossa ilmavirran nopeus on pienentynyt kitkan vaikutuksesta.
2. Mikä ero on laminaarisella ja turbulenttisella virtauksella?
   Vast.: laminaarisessa virtauksessa virtaviivat ovat sileitä, mutta turbulenttisessa pyörteisiä.
3. Miksi laminaariprofiilin vastus on pienempi kuin ei-laminaarisen profiilin vastus?
   Vast.: laminaariprofiilin rajakerros on ohut, joten sen kitkavastus on pieni.
4. Miten lika ja epätasaisuudet vaikuttavat laminaariprofiiliin?
   Vast.: ne muuttavat virtauksen turbulenttiseksi, jolloin vastus kasvaa ja nostovoima vähenee.
5. Miksi pyörregeneraattoreita käytetään?
   Vast.: pitää virtauksen kiinni siivessä ja sallii suuremman kohtauskulman ennen kuin kone sakkaa. Parantaa sakkauskäyttäytymistä.

NOSTOVOIMAA LISÄÄVÄT LAITTEET

Pyrkimys kohti suurempia lentonopeuksia ja hyötykuormia on lisännyt koneiden siipikuormitusta ja sakkausnopeutta. Koska koneiden on laskeuduttava ja noustava samoilta kentiltä kuin aikaisemmin, vaaditaan joko tavatonta moottoritehoa, jolla saadaan aikaan suuri kiihtyvyys lähdössä, tai nostovoimaa lisääviä laitteita, joilla saadaan sakkausnopeus pienenemään. Lyhyen lentoonlähtö- ja nousumatkan ehdoton edellytys on pieni sakkausnopeus, mikä saavutetaan kasvattamalla nostovoimakerrointa. Jos oletetaan esimerkiksi, että lentoonlähtömatka **s** on kääntäen verrannollinen nostovoimakertoimeen C_L, saadaan nostovoimakertoimen lisäyksen ΔC_L vaikutukseksi $\Delta \mathbf{s} = (\Delta C_L / C_L)\ \mathbf{s}$
Esimerkiksi: Alkuperäinen $C_L = 1{,}2$ ja lentoonlähtömatka = 300 m. Jos $\Delta C_L = 0{,}4$ niin lentoonlähtömatka on sen jälkeen 200 m eli lentoonlähtömatka lyheni noin sata metriä, mikä on kolmannes alkuperäisestä matkasta.



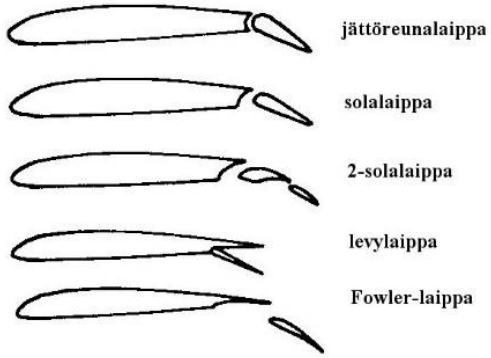
Kuva 42. Yleisimpien laippatyyppien $C_L(a)$ kuvaajia. Alin kuvaaja on symmetriselle profiilille, koska se menee nolla kohtauskulman kautta. Mitä kaarevampi profiili sitä korkeammalle kuvaaja nousee.

Nostovoimaa lisäävien laitteiden vaikutus perustuu useimmiten seuraaviin keinoihin:

1. Lisätään profiilin kaarevuutta, jolloin nostovoimakerroin kasvaa, mutta haittavaikutuksena esiintyy momentin kasvu, joka lisää nokka alas -taipumusta. Tämä havaitaan trimmin muutoksena laippoja ulos otettaessa.
2. Estetään sakkaus kiihdyttämällä virtausta rajakerroksessa tai imemällä rajakerros kokonaan pois.
3. Lisätään siipipinta-alaa.
4. Käytetään pyörregeneraattoreita siiven yläpinnalla kiihdyttämässä rajakerrosta, jolloin virtaus pysyy kiinni siivessä.

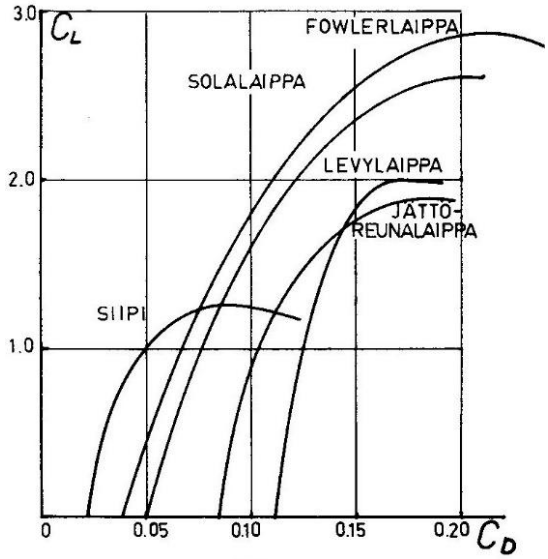
Nostovoimaa lisäävät laitteet siiven jättöreunassa

Ylivoimaisesti tavallisin keino lisätä nostovoimaa on käyttää laskusiivekkeitä, joita niitäkin on useita eri malleja. Seuraavassa esitetään tavallisimmat mallit ja niiden vaikutukset nostovoimakertoimeen sekä koneen polaariin eli C_L (C_D) kuvaajaan.



Kuva 43. Yleisiä laippatyyppejä Näistä solalaippa on esimerkiksi Piper Cherokeessa, levylaippa PIK-15:ssä ja Fowler-laippa Rallye-koneissa ja Cessnoissa.

Kuvassa 45 on edelleen esitetty näiden eri laippatyyppien vaikutus C_L :n arvoihin. Mitä ylempänä C_L -käyrä leikkaa pystyakselin, sitä suurempi on haitallinen momenttivaikutus.



Kuva 444. Eri laippatyyppien $C_L(C_D)$-kuvaajat. Kuvasta nähdään, että laipat lisäävät vastuskerrointa mutta niiden etuna on suuri nostovoimakerroin, joka on tarpeen lentoonlähtö- ja laskumatkan lyhentämisessä.

Kuvassa 42 on esitetty C_L muutokset C_D:n muuttuessa. Tässä paras profiili olisi sellainen, jonka kuvaaja on mahdollisimman ylhäällä vasemmalla. Todetaan, että Fowler-laippa on siinä mielessä edullisin. Ero rakenteellisesti yksinkertaisempaan solasiivekkeeseen ei ole kovinkaan suuri. Tämän vuoksi pikkukoneissa käytetään paljon yksinkertaista solasiivekettä, jossa siivekkeen liikutusmekanismi käsittää vain nivelen ja liikutusvivun, sen sijaan että Fowler-laippa tarvitsee painavat ja kalliit liikutuskiskot.

Levysiiveke puoltaa paikkaansa, mikäli ei tarvitse huomioida kasvanutta vastusta tai varsinkin, jos tämä lisävastus on haluttu keino nopeuttamaan korkeuden poisottoa. Näinhän on juuri purjelentokoneiden hinauksessa käytetyssä Hinussa, jonka tulee päästä hinauksen jälkeen nopeasti alas uutta hinausta varten.

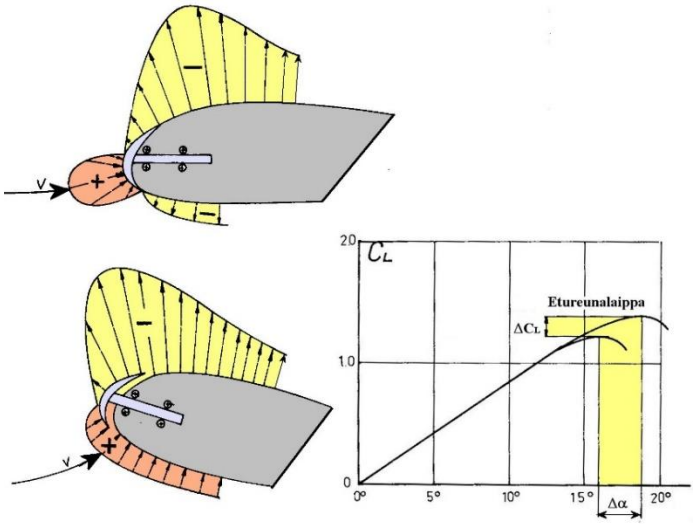
Etureunalaippa (etureunasolakko)

Joissakin tapauksissa halutaan vielä enemmän nostovoimaa lisäämällä siiven etureunaan etureunalaippa, joka voi olla joko kiinteä tai automaattinen. Kiinteä etureunasolakko oli esimerkiksi Fieseler Storchissa, joka sakkausnopeus oli vain 50 km/h. Kiinteän etureunalaipan etuna on rakenteen yksinkertaisuus ja keveys verrattuna automaattisolakkoon, joka on painunut etureunaa vasten ja tulee automaattisesti esiin, kun kohtauskulma kasvaa riittävän korkeaksi. Jotta laipat eivät avautuisi eri aikaan, ne on kytketty mekaanisesti toimimaan samanaikaisesti. Vaimennin hidastaa laipan liikettä ja jousivoima varmistaa laipan sisäänvedon. Etureunalaipan toiminta on kuvattuna kuvassa 41.

Pienellä kohtauskulmalla paine pitää laipan sisällä, mutta kohtauskulman kasvaessa alipaine vetää laipan ulos.

Etureunalaipan vaikutus nostovoimakertoimeen poikkeaa jättöreunalaipasta siinä mielessä, että vaikutus alkaa vasta lähellä maksiminostovoimaa eli suurilla kohtauskulman arvoilla (kuva 41). Tästä on haittana koneen nokan pystyasento hidaslennossa, minkä vuoksi kannuspyöräkoneen pääteline on rakennettava korkeaksi, mikä rajoittaa näkyvyyttä eteenpäin. Nokkapyöräkoneeseen on puolestaan varattava riittävä vetovara, minkä vuoksi on tehtävä joko korkea laskuteline tai nostettava pyrstö riittävän ylös ettei se

osuisi kiitorataan laskun loppuvedon aikana. Automaattiselle etureunalaipalle on ominaista se, että se tulee ulos vakiokohtauskulmalla eli puuskaisella säällä laippa käy ulkona silloin tällöin. Samoin kaarroissa tai vedoissa laippa tulee ulos paljon Vs:ää suuremmilla nopeuksilla. Mm. Rallye-koneissa käytetään etureunasolakkoa.



Kuva 45. Etureunasolakko. Vaakalennossa solakko on painautunut etureunaa vasten. Kohtauskulman kasvaessa solakko tulee alipaineen imemänä esiin ja kiihdyttää virtausta etureunan yläpinnalla parantaen sakkauskestävyyttä. $C_L(\alpha)$-kuvaajasta näkyy etureunasolakon aiheuttama nostovoimakertoimen lisäys ja sitä vastaava kohtauskulman lisäys.

Lyhyt yhteenveto eri laippatyyppien vaikutustavoista:

Jättöreunalaippa lisää kaarevuutta, joten C_{Lmax} kasvaa ja momentti kasvaa.

Solalaippa lisää kaarevuutta, sola kiihdyttää virtausta laipan yläpinnalla, joten virtaus ei irtoa laipasta suurillakaan kohtauskulmilla. Solalaippa lisää nostovoimaa lähes yhtä hyvin kuin Fowler mutta aiheuttaa hieman enemmän vastusta.

Levylaippa lisää kaarevuutta, jättöreunan tehollinen paksuus kasvaa, jolloin virtaus pysyy kiinni kohtalaisen hyvin. Nostovoiman lisäys on kohtalainen ja vastuksen lisäys huomattava.

Fowler-laippa lisää kaarevuutta ja siipipinta-alaa. Laipan yläpinnassa on samanlainen puhallus kuin solalaipassa. Trimmin muutokset ovat huomattavia. On tehokkain tässä esitetyistä laipoista.

Etureunalaippa kiihdyttää virtausta etureunassa sallien (vaatien) suuremman kohtauskulman.

Laskusiivekkeiden käyttö laskussa

Laskusiivekkeiden tehtävänä on lisätä nostovoimaa lähestyttäessä pienellä nopeudella kenttää. Pienentämällä sakkausnopeutta saadaan kynnys- ja istumisnopeus alenemaan, mikä suoranaisesti vaikuttaa lyhentävästi laskumatkaan. Liiallisen lentokorkeuden vähentämisessä käytetään laskusiivekkeitä myös jarruina.

Laskusiivekkeitä käytettäessä lennon aikana on huomioitava ulos- ja sisäänoton yhteydessä tapahtuvat trimmin muutokset. Muutokset ovat konekohtaisia, joten niihin tutustuu parhaiten lentojen yhteydessä. Välttämällä äkillisiä liikkeitä laskusiivekkeitä käytettäessä eivät trimmin muutokset pääse yllättämään. Ulkona ollessaan laskusiivekkeisiin kohdistuu huomattavan suuret voimat, jotka kasvavat nopeuden toiseen potenssiin verrannollisina. Tämän vuoksi nopeusmittarissa olevaa "Valkeaa kaarta" on noudatettava laippoja ulos otettaessa.

Laskeuduttaessa suhteellisen tuntemattomalle kentälle, jonka toisessa päässä saattaa vielä olla esteitä, olisi vältettävä suurinta laippa-asetusta etenkin koneissa, joissa on hyvin tehokkaat laipat, sillä mikäli kiitoradan kunto tai muut seikat vaativat ylivetoa, ei moottori ehkä jaksakaan vetää konetta ylös, jos laipat aiheuttavat liian suuren vastuksen lisäyksen.

Laskusiivekkeiden käyttö lentoonlähdössä

Laskusiivekkeiden käyttö lentoonlähdössä on edullista silloin, kun se parantaa nostovoimaa ilman, että vastus kasvaa liikaa. Fowler- ja solalaipat ovat hyvin käyttökelpoisia tähän tarkoitukseen. Tällöin on yleensä käytettävä vain noin 10° - 15° laippa-asetusta, jottei vastus kasvaisi liikaa ja vaikuttaisi lentoonlähtömatkaa pidentävästi. Kun kone on irronnut maasta, annetaan nopeuden kiihtyä maavaikutuksen avulla haluttuun nousunopeuteen ja vedetään vähitellen laipat varovasti sisään, kun ollaan turvallisessa korkeudessa. Äkillinen sisäänveto aiheuttaa hetkellisen korkeuden menetyksen, joka voi vaarantaa matalalla lennettäessä lennon turvallisuutta.

Yleensä tyyppilennon yhteydessä on syytä kokeilla riittävän korkealla koneen käyttäytymistä laippoja ulos/sisään otettaessa. Tällöin tulisi huomion kiinnittyä seuraaviin seikkoihin:

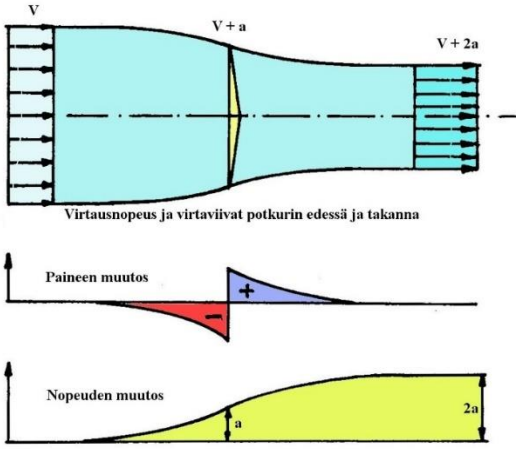
- trimmin muutokset laippa-asetusta muutettaessa. Ne nähdään nokan asennosta.
- korkeuden lisäys laippoja ulos vedettäessä ja korkeuden menetys sisään otettaessa. Muutos nähdään korkeusmittarista tai variometristä tai matalalla vertaamalla maastoon.
- koneen käyttäytyminen ja ohjattavuus etenkin pienillä nopeuksilla
- koneen sakkausnopeus ja käyttäytyminen suorassa ja kaartosakkauksessa teho päällä ja ilman tehoa
- laipat täysin ulkona, nopeus vähän yli sakkausnopeuden, työnnetään täysi moottoriteho päälle ja katsotaan variometristä, miten moottoriteho riittäisi täysillä laipoilla suoritetussa ylivedossa.
- on huomattava, että lennonvalvontamittareissa, joissa käytetään hyväksi staattista painetta, saattaa esiintyä näyttövirheitä laipat ulkona. Jos näitä virheitä on, niistä pitäisi olla maininta lentokäsikirjasta. Yleensä virheet ovat pieniä.

Kysymyksiä

1. Lyhyen lentoonlähtömatkan edellytys on _____?
   Vast.: pieni sakkausnopeus ja hyvä kiihtyvyys
2. Miten laskusiivekkeet vaikuttavat laskumatkaa lyhentävästi?
   Vast.: ne lisäävät maksiminostovoimaa ja siten pienentävät sakkausnopeutta, joka on lyhyen laskumatkan edellytys. Lisäksi ne lisäävät vastusta, joten kone hidastuu nopeammin.
3. Mihin perustuu laskusiivekkeiden aiheuttama nostovoiman lisäys?
   Vast.: profiilin kaarevuuden lisäykseen, rajakerroksen poisimuun tai rajakerroksen kiihdytykseen ja siipipinta-alan lisäykseen.
4. Vertaa toisiinsa Fowler-laipan ja solalaipan etuja ja haittoja.
   Vast.: Fowler antaa suuremman nostovoiman ja pienemmän vastuksen kuin solalaippa. Solalaippa on rakenteeltaan yksinkertaisempi eikä aiheuta niin suurta haitallista trimmin muutosta kuin Fowler.
5. Mikä aukaisee automaattisen etureunalaipan?
   Vast.: kohtauskulman kasvaessa etummainen patopiste siirtyy alaspäin ja siiven yläpuolella oleva alipaine etureunalaipan kohdalle imien laipan ulos. Vrt. kuva 45.
6. Mikä nostovoimaa lisäävistä laitteista sallii suurimman kohtauskulman?
   Vast.: etureunalaippa
7. Mikä osoittaa nopeusmittarissa laippojen käyttöalueen?
   Vast.: valkea kaari
8. Miksi lentoonlähdössä ei suositella käytettäväksi yli 10—15° laippa-asetusta?
   Vast.: suuremmilla asetuksilla vastus kasvaa enemmän kuin laipoista saatu hyöty.

POTKURI

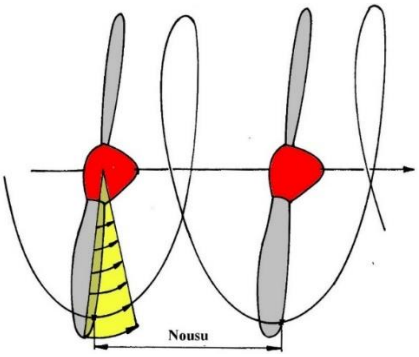
Potkurin tehtävänä on saada aikaan lentokonetta eteenpäin vetävä voima. Tällöin se toimii siiven tavoin. Ilmavirran liike potkurin kehän läpi on kuvan 47 kaltainen. Bernoullin lain mukaan nopeuden kasvaessa virtaviivat lähenevät toisiaan. Näin käy myös potkurissa.



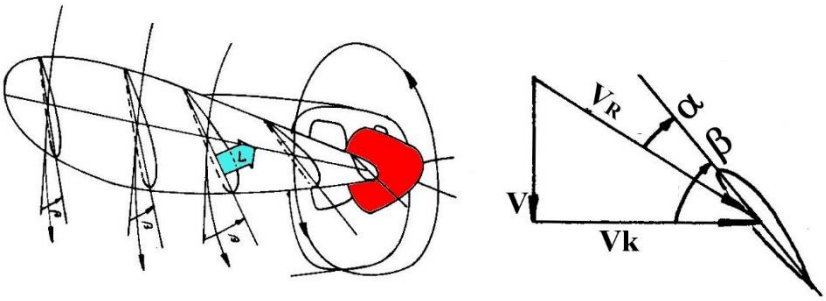
Kuva 45. Ilman virtaus potkurin läpi. Koska nopeus kasvaa, poikkipinta-ala pienenee. Potkurin kohdalla paine kasvaa hyppäyksellä mutta virtaus kiihtyy tasaisesti ennen ja jälkeen potkurin.

Potkurin nousu ja lapakulma

Koska potkurin kohtauskulma pyritään pitämään lähes vakiona koko lavan pituudella, muuttuu lapakulma β siten, että yhdellä kierroksella jokainen profiilin leikkaus liikkuu eteenpäin yhtä paljon. (Vrt. kierreportaat.) Säätöpotkurin lapakulmaa voidaan säätää siten, että se sopii parhaiten moottorin tuottamaan vääntömomenttiin, mikä parantaa kokonaishyötysuhdetta ja vähentää polttoaineen kulutusta. Säätöpotkurin voi lepuuttaa moottorihäiriön sattuessa, mikä tarkoittaa, että potkuri käännetään ilmavirran suuntaiseksi, jolloin se jarruttaa mahdollisimman vähän.

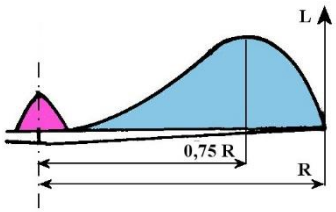


Kuva 46. Potkurin nousu on lähes sama koko lavan pituudella.



Kuva 47. Potkurin nousukulma β vastaa etenemää yhden kierroksen matkalla. V = lentonopeus, Vk = kehänopeus, V_R on resultanttinopeus, α on lavan kohtauskulma ja β lapakulma. Kärjessä lapakulma pienenee, jotta kohtauskulma olisi joka kohdassa yhtä suuri.

Nostovoiman jakautuminen potkurissa nähdään kuvasta 50, josta havaitaan myös, että nostovoima on suurimmillaan 0,75 x R etäisyydellä akselista. Tämän kohdan läheiset alueet olisi siten pidettävä sileinä ja puhtaina hyvän potkurin hyötysuhteen säilyttämiseksi.



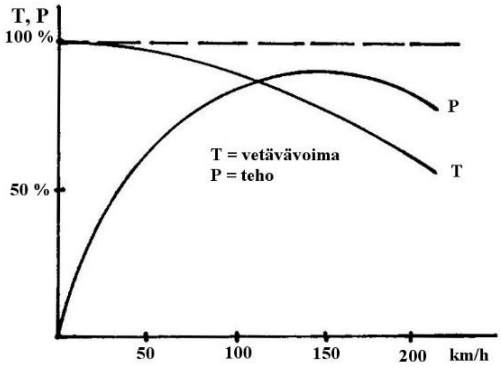
Kuva 48. Nostovoiman jakautuminen potkurissa.

Potkurin hyötysuhde määritellään seuraavasti: hyötysuhde $\eta = P_{potkuri} / P_{akseli}$, jossa

$P_{potkuri} = T_{potkuri} \cdot V$ = Potkurin tuottama teho
$T_{potkuri}$ = Potkurin tuottama vetävä (työntävä) voima
P_{akseli} = Lentomoottorin antama akseliteho
V = Lentonopeus

Potkurin hyötysuhde on parhaimmillaan 85 – 88 % ja muuttuu tilanteen ja nopeuden mukaan.

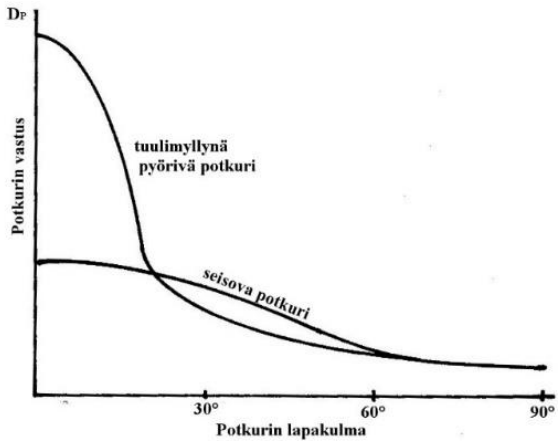
Lentokonetta eteenpäin vievä teho ja vetävä voima riippuvat lentonopeudesta seuraavasti.



Kuva 49. Lentokoneen tehon ja vetävän (työntö) voiman riippuvuus lentonopeudesta.

Potkurin jarrutus, kun moottori ei vedä

Moottorin sammuttua potkuri toimii jarruna, ellei sitä lepuuteta eli muuteta lapakulmia virtauksen suuntaiseksi siten, että moottori lakkaa pyörimästä. Seuraavassa kuvassa osoitetaan miten paljon seisova tai tuulimyllynä pyörivä potkuri jarruttaa. Mielenkiintoista on huomata, että pienillä lapakulman arvoilla vapaasti tai paremminkin tuulimyllynä pyörivä potkuri jarruttaa huomattavasti enemmän kuin seisova potkuri.



Kuva 50. Potkurin vastus, kun moottori ei vedä. Esimerkiksi pakkolaskutilanteessa säätöpotkurin avulla voi valita, antaako potkurin pyöriä vai onko parempi pysäyttää laskun ajaksi. Lapakulma on 75 % R kohdasta.

Kysymyksiä

1. Ilman virratessa potkurin kehän lävitse, sen nopeus kasvaa, jolloin virtaviivat
   a) lähenevät, b) eroavat toisistaan.
   Vast.: lähenevät
2. Mitä tarkoittaa potkurin nousu?
   Vast.: potkurin nousu on matka, jonka potkuri kulkee eteenpäin yhden kierroksen aikana edellyttäen, että kohtauskulma on 0 eli ettei jättämää esiinny.
3. Miten potkurin työntövoima muuttuu lentonopeuden vaihdellessa?
   Vast.: vrt. kuva 51

SUORITUSARVOT

Yleistä

Lentokoneet suunnitellaan yleensä tiettyjä käyttötarkoituksia varten. Kukin käyttötarkoitus asettaa omat vaatimuksensa lentokoneelle. Koska suuri osa näistä vaatimuksista on toistensa kanssa ristiriitaisia, joutuu koneen suunnittelija tekemään koko joukon kompromisseja. Hän voi esimerkiksi valita koneelle pääkäyttötarkoituksen ja lisäksi joukon sivutarkoituksia, joihin kone ehkä ei ole paras mahdollinen, mutta kuitenkin soveltuva. Koneen ostaja ja käyttäjäkunta viime kädessä ratkaisevat, mille ominaisuuksille he antavat arvoa. Koska meidän tehtävämme ei ole suunnitella vaan käyttää valmiiksi suunniteltuja koneita, tyydymme tarkastelemaan saavutusarvoja erillisinä ilmiöinä. Tarkoituksena on pikemminkin esitellä niitä siten, että koneen käyttäjä osaisi kiinnittää tarpeellista huomiota niihin sekä opetella käyttämää konetta mahdollisimman hyvin. Yleisesti lentokoneiden spesifikaatiossa kuvatut saavutusarvot perustuvat maksimi lentomassalla, uudella, sileällä ja puhtaalla koneella koelennoilla saatuihin mittaustuloksiin, jotka on muutettu vastaamaan standardi ilmakehän olosuhteita. Jotta suoritusarvoihin päästäisiin, on käytettävä samoja asetuksia kuin koneen ohjekirjassa on annettu. Esimerkiksi polttoaineen kulutusarvot edellyttävät oikein suoritettua laihennusta jne.

Mitä ominaisuuksia suoritusarvoilla tarkoitetaan:

Lentokoneen suoritusarvoilla ilmaistaan yleensä seuraavia ominaisuuksia:

Vaakalento: maksiminopeus, sakkausnopeus, maksimi puuskanopeus, laippojen käyttönopeusalue, laskutelineiden käyttönopeusalue, kriittinen nopeus.

Nousulento: jyrkin nousu (asteissa tai prosenteissa), suurin nousunopeus.

Lakikorkeus: käytännön lakikorkeus eli suurin toimintakorkeus, absoluuttinen lakikorkeus eli korkeus, joka on saavutettavissa eli korkeus, jossa nousunopeus täydellä teholla on nolla.

Liukulento: liitosuhde, pienin vajoamisnopeus.

Toimintamatka: täydellä tankilla ja mahdollisilla lisätankeilla, täydellä kuormalla

Toiminta-aika: täydellä tankilla ja mahdollisilla lisätankeilla

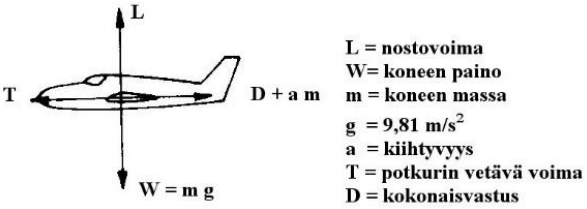
Lentoonlähtömatka: maakiito, nousu yli 15 m esteen, keskeytetty lentoonlähtö

Laskumatka: laskukiito, lasku yli 15 metrin esteen, keskeytetty lasku

Hyötykuorma: Maksimi henkilöluku, polttoainemäärä, lasti

Vaakalento

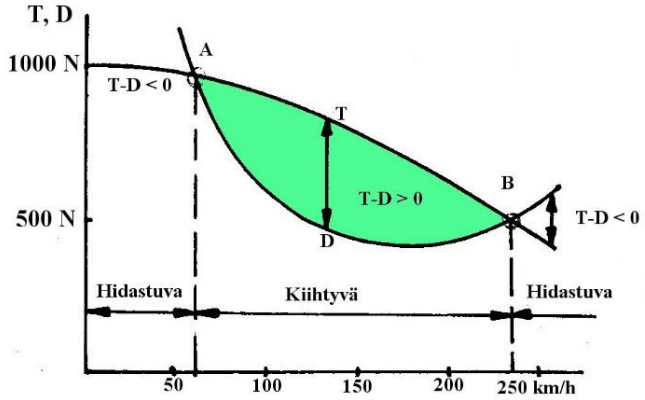
Vaakalennossa moottorin vetävä voima tai työntövoima on yhtä suuri kuin koneen vastuksesta ja kiihtyvyydestä johtuva vastakkainen voima. Lennettäessä vakionopeudella kiihtyvyyden vaikutus on nolla. Kuvasta 51 nähdään tasapainoehdot vaakalennossa.



Kuva 51. Vaakalennon tasapainoehdot. Kiihtyvyys riippuu potkurin vetävän voiman ja vastuksen erotuksesta. Nostovoima on vaakalennossa sama kuin koneen paino. T = eteenpäin vetävä voima (käytetään myös sanaa työntövoima, joka on totta suihkukoneille)

Vaakalentonopeuden ja kiihtyvyyden maaräytyminen:

Aikaisemmin olemme kohdassa "Kokonaisvastus" selvittäneet, miten vastus muuttuu eri lento-nopeuksilla, ks. kuva 33. Kuvassa 52 on esitetty moottorin vetävän voiman riippuvuus lentonopeudesta.



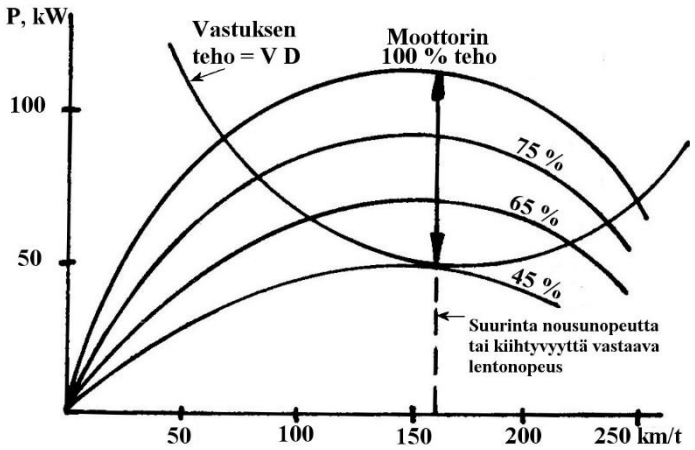
Kuva 52. Nopeuden ja kiihtyvyyden määräytyminen moottoritehon ja vastuksen aiheuttaman tehon erotuksena. Vastuksen aiheuttama tehon tarve

P = D V, jossa V = ilmanopeus ja D vastusvoima. Kone kiihtyy, kun se on ylittänyt kriittisen nopeuden eli pisteen A, jossa D = T eli vastustava teho on yhtä suuri kuin eteenpäin vievä teho. Kriittisen nopeuden alapuolella kone hidastuu.

Piirtämällä nämä molemmat käyrät samaan kuvaan, kuten kuvassa 52 on tehty, saadaan kiihtyvyys ja vakiovaakalentonopeus esiin seuraavasti: yhtälön $T = D + a \cdot m$ mukaan saadaan asettamalla $a = 0$ eli vakiovaakalentonopeus saavutetaan kohdassa, jossa T:n ja D:n kuvaajat leikkaavat toisensa. Tämä tapahtuu pisteissä A ja B. Jos ajattelemme koneen lentävän hieman A:ta pienemmällä nopeudella, niin mitä tapahtuu. Kiihtyvyys saadaan ratkaistua yllä olevasta yhtälöstä. Tällöin tulee kiihtyvyydeksi $a = (T - D)/m$. Mikäli T on suurempi kuin D, nopeus lisääntyy, mutta jos T on pienempi kuin D, nopeus hidastuu ja erotus kasvaa entisestään ja tuloksena on vääjäämättömästi koneen sakkaus tai lento-korkeuden menetys. Nopeutta A kutsutaan sen vuoksi **kriittiseksi nopeudeksi**. Käytännössä tämä koskee erityisesti lentoonlähdön alkukiihdytystä. Mikäli suhteellisen heikkotehoinen kone vedetään väkisin ilmaan, saattaa kriittinen nopeus olla suurempi kuin sakkausnopeus tai kuta kuinkin yhtä suuri. Kone ei jaksa tällöin kiihdyttää nopeuttaan riittävästi, vaan vajoaa takaisin kenttään. Tämän vuoksi olisikin ensin odotettava nopeuden kasvamista, kunnes päästään paremman kiihtyvyyden nopeudelle. Pisteessä B sen sijaan vallitsee tasapaino. Jos nopeus on pienempi kuin B, niin kone kiihtyy, kunnes B saavutetaan. Mikäli T:n kuvaaja edustaa suurinta tehoa vastaavaa työntövoimaa, osoittaa B myös maksimivaakalentonopeuden. On selvää, että työntövoiman T ylijäämän ollessa suurimmillaan, saadaan aikaan suurin kiihtyvyys, koska kiihtyvyys $a = (T – D)/m$.

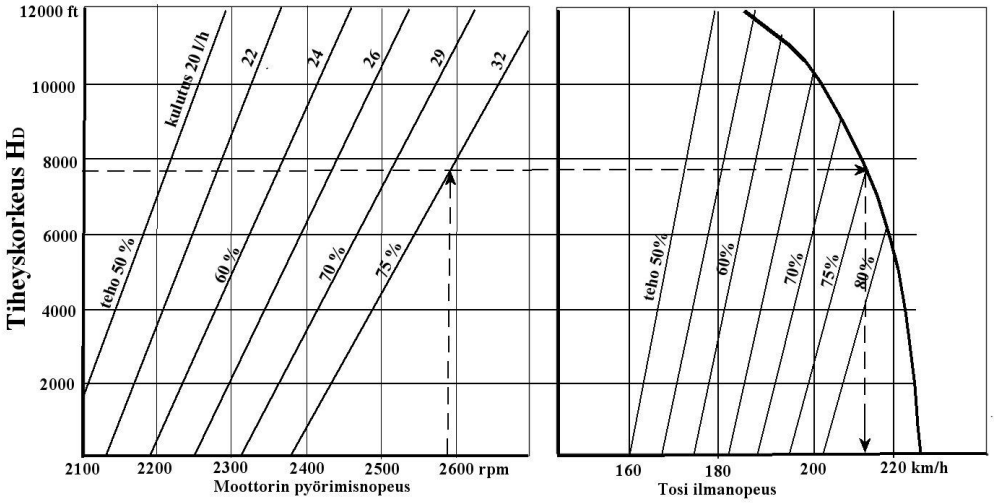
Tehoasetuksen vaikutus vaakalentonopeuteen

Tärkein seikka, jolla ohjaaja säätää vaakalentonopeutta, on tehonsäätö, joka tapahtuu yhdessä potkurin pyörimisnopeuden ja potkurin nousun avulla. Seuraavassa kuvassa 53 on esitetty erilaisten tehoasetusten vaikutus eri nopeuksilla. Teho ilmaistaan yleensä prosentteina nimellistehosta. Esimerkiksi nimellisteho on 200 hv, tehoasetus 50 %, jolloin todellinen teho on 100 hv.



Kuva 53. Tehon muuttuminen tehoasetusta muutettaessa. Vaakalentonopeus määräytyy kutakin tehoasetusta vastaavan käyrän ja vaakalentoon vaaditun tehon leikkauskohdan mukaan. Suurin nousunopeus saavutetaan nopeudella, jolla tehoylijäämä on mahdollisimman suuri.

Kuvassa 54 kiinnittyy huomio siihen, että vakiotehoprosentilla saadaan aikaan erilaisia todellisia tehoja riippuen lentonopeudesta. Tämä johtuu mm. potkurin hyötysuhteen muuttumisesta eri nopeuksilla. Mikäli lentokorkeus muuttuu, se vaikuttaa sekä vastukseen että moottoritehoon. Tällöin jouduttaisiin piirtämään kuvan 52 mukaiset käyrästöt eri korkeuksilla, jotta saataisiin kullakin korkeudella vallitseva tilanne. Ei luonnollisestikaan voida edellyttää, että kukaan ohjaaja ryhtyisi kaivelemaan sellaisia taulukkoja lennon aikana. Sen tähden koneen käsikirjasta käy yksinkertaisesti selville moottorin tehoasetus ja tosi ilmanopeus tiheyskorkeuden muuttuessa. Seuraavassa kuvassa 53 esitetään esimerkki näiden grafiikoiden lukemisesta.



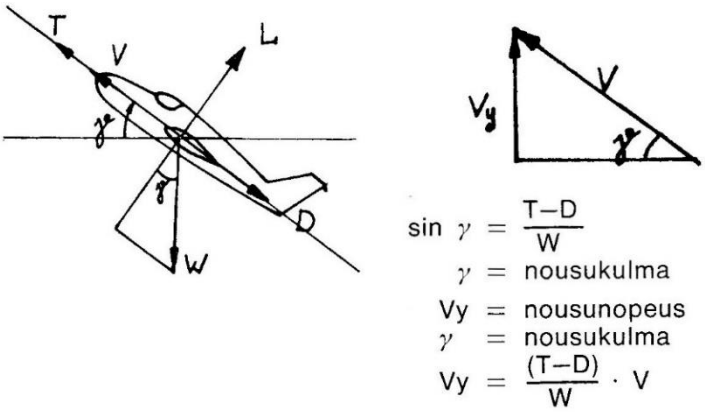
Kuva 54. Moottorin tehoasetuksen, kulutuksen ja tosi ilmanopeuden määrittäminen. 1. Määrittele korkeuden muuntokaavion (kuva 3) tai kakkaran avulla tiheyskorkeus H_D. 2. Moottorin pyörimisnopeuden ja tiheyskorkeuden perusteella valitaan tehoasetus, jolloin samalta suoralta saadaan myös polttoaineen kulutus. 3. tehoasetuksen ja tiheyskorkeuden saadaan tosi-ilmanopeus.

Tiheyskorkeuden määrittäminen, esimerkki.

Lennät 7.700 jalan korkeudessa pyörimisnopeudella 2.590 r/min. Mikä on tehoasetuksesi, kulutuksesi ja tosi-ilmanopeutesi? Ratkaisu: Katso vasemmalta tiheyskorkeutesi (nuoli), seuraa vaakasuoraan, kunnes tulet 2.590 r/min kohdalle. Lue tästä tehoasetuksesi ja kulutuksesi. Saat 75% tehon 32 1/h kulutuksen. Saadaksesi selville tosi ilmanopeuden katso oikeanpuoleisesta kuvaajasta samalta korkeudelta 75% tehon kohdalta vastaava ilmanopeus 214 km/t.

Nousu

Nousunopeus määräytyy samoin kuin vaakalentonopeus kuvan 51 mukaisesti. Tällöin nousuun on käytettävissä työntövoiman ylijäämä T-D, joka vaakalennossa käytettiin kiihdytykseen. Mikäli nousu suoritetaan vakionopeudella, saadaan nousuun tarvittava työntövoiman ylijäämä kuvan 55 mukaisesti erotuksesta T – D, joka on käytettävissä joko kiihdytykseen tai nousuun.



Kuva 55. Koneen nousukulma riippuu työntövoiman ja vastuksen erotuksesta.

Todetaan, että nousukulma on jyrkimmillään silloin, kun T —D on suurimmillaan, koska sin γ ei riipu nopeudesta. Sen sijaan nousunopeus Vy on suurimmillaan, kun tulo (T—D) V on suurimmillaan. Koska työntövoiman ylijäämä muuttuu nopeuden muuttuessa, on vaikea suoralta kädeltä sanoa, miten saavutetaan paras nousunopeus. Sen vuoksi olemmekin esittäneet kuvan 53, jossa teho on pystyasteikoilla. Teho voidaan esittää myös muodossa voima kertaa nopeus. Tästä kuvasta saadaan suurinta nousunopeutta vastaava lentonopeus kullakin tehoasetuksella siten, että katsotaan, milloin moottorin antaman tehon ja vaaditun tehon erotus on suurimmillaan. Tämä nopeus on merkitty kuvioon. Jyrkin nousu saadaan aina hieman pienemmällä lentonopeudella kuin suurin nousunopeus.

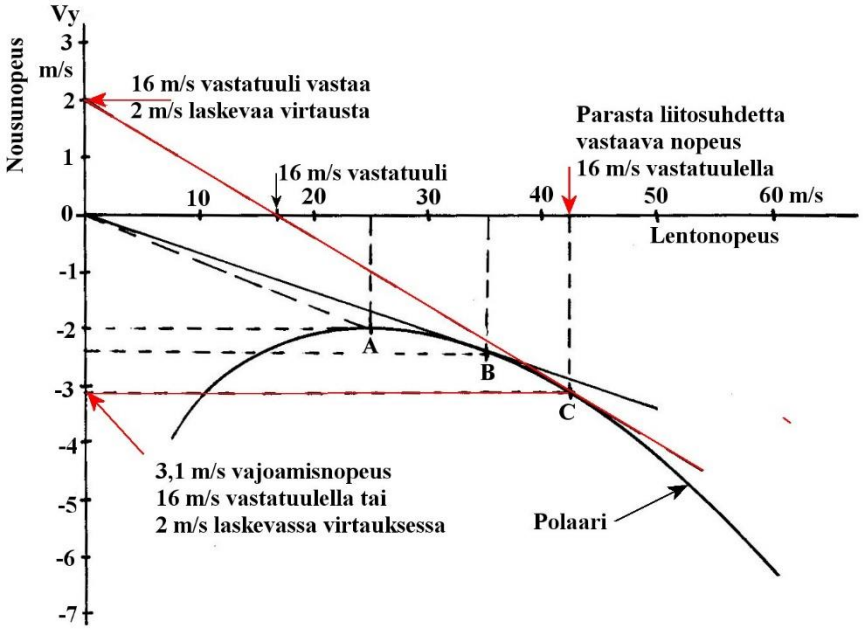
Polaarin käyttö liitosuhteen määrittelyyn

Liitosuhde ja vajoamisnopeus kiinnostavat varsinkin purjelentäjiä. Moottorilentäjillä ne tulevat kysymykseen lennettäessä moottori tyhjäkäynnillä tai moottorin seistessä. Koska purjelentäjälle tuttu koneen polaari piirretään vajoamisnopeuden perusteella "ylösalaisin", teemme sen saman myös kuvassa 56. Vaadittu teho ilmenee koneen vajoamisnopeudesta, joten kuvaajat ovat yhdenmukaiset. Tehon kaava on: **Teho = voima x nopeus**. Koska tässä tarkoitettu voima on koneen massa x kiihtyvyys eli koneen paino, ja nopeus on vajoamisnopeus, saadaan P = m g Vy, jossa (g = 9,81 m/s^2). Esimerkkinä purjekoneen ja moottorikoneen vertailu:

Tyyppi	Vy m/s	Massa kg	Tehontarve,	kW
Purjekone	1,0	300	300 x 9,8 x 1,0	3,0
Moottorikone	3,0	1000	1000 x 9,8 x 3,0	29,4

Taulukko 4. Purje- ja moottorikoneen tehontarve lennettäessä vaakalentoa pienimmällä vajoamisnopeudella. Vy on nousunopeus.

Nämä luvut osoittavat pienimmän vaaditun tehon, jotta kone pysyisi vaakalennossa edellyttäen, että Vy oli minimivajoamisnopeus.



Kuva 56. Polaarin pystyakselina on nousunopeus ja vaaka-akselina lentonopeus. Polaariin on piirretty koneen vajoamisnopeuden riippuvuus lentonopeudesta, kun moottori ei käy. Liitosuhde missä hyvänsä polaarin pisteessä on nousunopeuden ja lentonopeuden suhde. Pienin vajoamisnopeus on polaarikäyrän maksimi (A). Paras liitosuhde saadaan, kun origosta piirretään tangentti polaarikäyrälle (B). Jos halutaan tietää paras liitosuhde vastatuuleen, niin tangentin alkupiste on siirrettävä lentonopeusakselilla vastatuulen verran oikealle (C).

Tapaus	Lentonopeus V m/s	Vajoamisnopeus Vy m/s	Liitosuhde	Huom.
A	25	2	12,5	Pienin vajoamisnopeus
B	35	2,3	15,2	Paras liitosuhde tyynellä
C	42	3,1	13,5	Paras liitosuhde 16 m/s vastatuulella tai 2 m/s laskevassa virtauksessa

Taulukko 5. Polaarista poimitut nopeusarvot ja niistä lasketut liitosuhteet eri olosuhteissa.

Kuvassa 56 on piirretty polaari, jota käytetään parhaan liitosuhteen sekä minimi vajoamisnopeuden löytämiseen. Moottorilentäjälle polaarissa minimi vajoamisnopeus vastaa pienintä tehoa, jolla kone lentää vaakalentoa ja paras liitosuhde vastaa nopeutta, jolla päästään pisimmälle. Polaarista saamme minimivajoamisnopeuden ja sitä vastaavan lentonopeuden, kuva 56, piste A. Tällöin halutessamme lentää minimivajoamisnopeudella 2,0 m/s meidän tulee valita lentonopeudeksi 25 m/s. Liitosuhde määrätään polaarilla olevan pisteen lentonopeuden ja vajoamisnopeuden suhteena.

Liitosuhde paranee pisteen A liikkuessa kohti B:tä, jossa saavutetaan paras liitosuhde 15,2. Lentääksemme siis tyynellä säällä mahdollisimman hyvällä liitosuhteella, on valittava lentonopeudeksi 35 m/s. Mikäli joudumme lentämään 16 m/s vastatuuleen, piirrämme tangentin alkamaan 16 m/s lentonopeudesta polaarille, jolloin saamme samasta polaarista pisteen C parhaaksi liitosuhteeksi 13,5. Lennettäessä vastatuuleen tai laskevassa virtauksessa on nopeutta lisättävä liitosuhteen parantamiseksi. Tässä tapauksessa optiminopeus 42 m/s on 7 m/s suurempi kuin tyynellä säällä. Laskevassa ilmavirtauksessa tangentti aloitetaan laskevan virtauksen nopeuden verran Vy-akselilta vaaka-akselin yläpuolelta (C). Havaitaan, että vastatuuli ja laskeva vaikuttavat periaatteessa samalla tavoin. Tässä tapauksessa 2,0 m/s laskevan vaikutus vastaa 16 m/s vastatuulta.

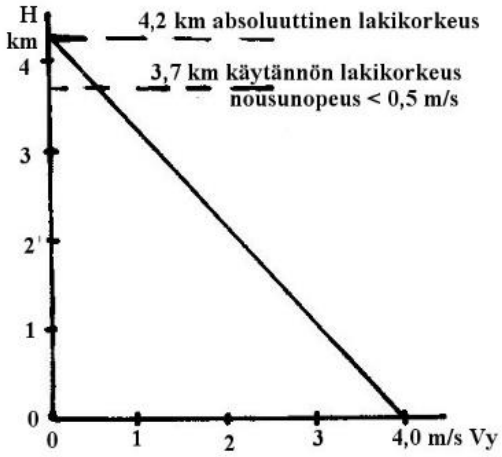
Liitosuhteeseen ja vajoamisnopeuteen vaikuttavat tekijät

- Koneen painon kasvaessa polaari siirtyy alas ja oikealle. Tuloksena on lentonopeuden kasvu sekä vajoamisnopeuden kasvu. Liitosuhde muuttuu vain hiukan. Tämän vuoksi käytetään purjelentokoneissa painolastina vettä silloin, kun on erittäin hyvät termiikit. Termiikkien heiketessä vesilasti pudotetaan pois, jolloin vajoamisnopeus pienenee.
- Vastuksen kasvu epäpuhtauksien tms. takia siirtää polaaria alaspäin, jolloin sekä liitosuhde et!ä vajoamisnopeus heikkenevät. Koneen puhdistus lisää muutamista solmuista jopa kymmeneen solmuun koneen nopeutta.
- Vastatuuli siirtää polaaria tuulen nopeuden verran vasemmalle. Tällöin optimiliitosuhdetta vastaava lentonopeus kasvaa. Tämä on pidettävä mielessä pakkolaskuissa vastatuuleen. Myötätuulessa tilanne on luonnollisesti päinvastainen. Esimerkiksi 16 m/s vastatuulen vaikutus voidaan esittää kuvassa 56 16 m/s lentonopeuden kohdalta alkavalla tangentilla. Tangentin ja polaarin sivuamispiste C osuu nopeudelle 42 m/s, jossa vajoamisnopeus on 3,1 m/s ja liitosuhde 13,5. Tällä 42 m/s ilmanopeudella meidän on siis lennettävä kohti laskupaikkaa.
- Laskevan ilmavirran vaikutuksesta polaari siirtyisi alaspäin. Jottei sitä tarvitsisi piirtää uudelleen, piirretään tangentti alkamaan Vy akselin yläpuolelta vajoamisnopeutta vastaavan nopeuden kohdalta. Havaitaan, että äskeisen esimerkin 16 m/s vastatuuli vastaa laskevaa ilmavirtaa, jonka nopeus on 2,0 m/s.
- Nousevan ilmavirran vaikutus saadaan tietysti edellisessä esitetylle vastakkaisesti. Tällöin on otettava huomioon, että mikäli nousevan ilmavirran nopeus on yhtä suuri tai suurempi kuin koneen vajoamisnopeus, niin koneen liitosuhde on joko ääretön tai kone jopa nousee.

Mainittakoon, että purjelennossa voidaan käyttää hyväksi laskevien ja nousevien ilmavirtojen ominaisuuksia siten, että nousevissa virtauksissa lennetään minimivajoamisnopeudella ja laskevissa optimiliitosuhteella. Tällöin hyvällä säällä voidaan lentää jopa kymmeniä kilometrejä tätä ”delfiinilentoa” ilman, että keskimääräinen korkeus vähenisi.

Lakikorkeus

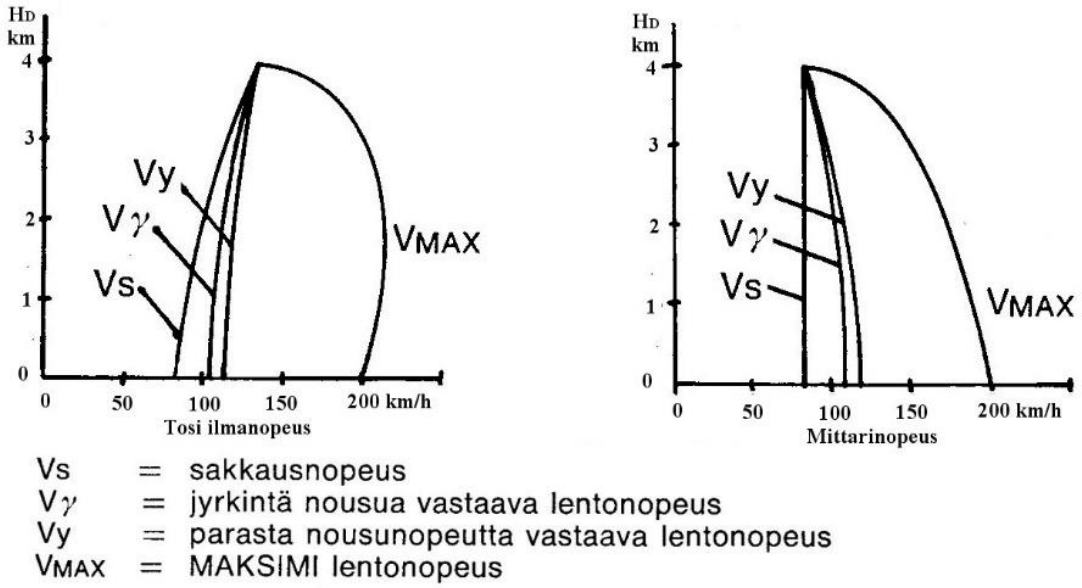
Lakikorkeus ilmaisee suurimman korkeuden, johon kone voi omin voimin nousta. Koneen nousunopeus pienenee lentokorkeuden kasvaessa. Lakikorkeuden katsotaan olevan siellä, missä nousunopeus on nolla. Käytännössä on kuitenkin määritelty lakikorkeudeksi korkeus, jossa nousunopeus on alle sovitun rajan. Tämä raja on erilainen eri lentokoneluokissa vaihdellen noin 0,3—1,5 m/s rajoissa. Kuvassa 54 nähdään nousunopeuden pieneneminen tiheyskorkeuden kasvaessa. Kohta, jossa nousunopeus on nolla, on absoluuttinen lakikorkeus.



Kuva 57. Lakikorkeus. Vaaka-akselilla on nousunopeus ja pystyakselilla lentokorkeus. Ilman tiheyden laskiessa moottorin teho laskee ja nousunopeus pienenee, kunnes teho ei enää riitä. Käytännössä lakikorkeus määritellään esimerkiksi korkeudeksi, jossa nousunopeus on alle 0,5 – 1,5 m/s kone tyypistä riippuen.

Kuvassa 57 esitetään maanpinnasta lakikorkeuteen asti rinnakkain tosi ilmanopeudet sekä mittarin näyttämät indikoidut nopeudet: a) sakkausnopeus, b) jyrkintä nousua vastaava nopeus c) parasta nousunopeutta vastaava lentonopeus ja d) maksimi vaakalentonopeus. Huomio kiinnittyy siihen, että nopeusmittarin näyttämä

sakkausnopeus säilyy samana koko nousun ajan. Toinen huomio on, että nopeusmittarin näyttämä maksimi lentonopeus pienenee, vaikka tosi ilmanopeuden kuvassa nopeus kasvaa liki 2 km korkeuteen saakka. Tämä johtuu ohentuneen ilman heikentämästä moottoritehosta sekä lisääntyneestä indusoidusta vastuksesta. Nopeusmittarin näyttö perustuu kinemaattiseen paineeseen, johon myös koneen nostovoima ja vastus perustuvat. Kinemaattinen paine laskee ilman tiheyden laskiessa ja aiheuttaa sen, että nopeusmittari näyttää todellista ilmanopeutta vähemmän mutta koneen sakkausnopeus ja muut siitä riippuvat nopeudet näytetään täsmälleen samalla lailla kuin maanpinnalla. Ainoat asiat, jotka nousulennon aikana todella muuttuvat, ovat moottoritehon sekä nousunopeuden pieneneminen ja tosi ilmanopeuden kasvu.



Kuva 58. Vasemmalla tosi ilmanopeus ja oikealla vastaava nopeusmittarin indikoima nopeus, jonka mukaan sakkausnopeus on lakikorkeuteen saakka vakio. Moottoriteho vähenee ilman tiheyden laskiessa, mikä rajoittaa maksimi nopeutta.

Toimintamatka ja toiminta-aika

Toimintamatka ja -aika riippuvat kumpikin polttoaineen määrästä ja polttoaineen kulutuksesta sekä toimintamatka lisäksi lentonopeudesta. Koska polttoaineen riittävyys on ensiarvoisen tärkeä tekijä, on syytä perehtyä tarkoin koneensa kulutukseen. On pidettävä mielessä, että lukuisat tekijät vaikuttavat kulutukseen. Jotta tarkoin voitaisiin arvioida kokonaiskulutus, on eriteltävä myös nousuun ja lentoonlähtöön kuluva polttoaine. Yleisesti todettakoon muutamia kulutusta lisääviä tekijöitä:

- tehon lisäys lisää kulutusta
- seoksen lämmitys (imuilman lämmitys)
- seoksen rikastaminen
- kylmä ilma (bensiinin tiheys kasvaa) toisaalta moottorin teho paranee
- ruiskutusmoottorin polttoainesuuttimen ilmanottoaukko on tukkeutunut
- vedenpoistohana on jäänyt vuotamaan
- vakiopyörimisnopeudella korkeutta vähennettäessä

Moottoritehon ja kulutuksen riippuvuus esitetään koneen käsikirjassa, josta esimerkki kuvassa 54. Seuraavan laskentakaavan avulla voi laskea koneen toiminta-ajan sekä toimintamatkan.

Toiminta-aika = polttoainemäärä lähdettäessä / polttoaineen kulutusnopeus

Toimintamatka = lentonopeus x toiminta-aika

Näitä yksinkertaisia laskentasääntöjä noudatettaessa on pidettävä mielessä, etteivät muuttujat ole vakioita ja siksi niitä on käytettävä riittävällä varovaisuudella. Usein ei voida etukäteen lähtiessä arvioida kaikkia kulutukseen vaikuttavia tekijöitä, joten on turvauduttava polttoaineen määrämittariin sekä lennettyyn matkaan. Merkitään muistiin polttoainemäärä lähdössä ja tietyn lentoajan jälkeen katsotaan, paljonko polttoainetta on kulunut ja kartan avulla mitataan lennetty matka. Mikäli loppumatka suoritetaan samalla tehoasetuksella. saadaan toimintamatka seuraavasta yhtälöstä:

Lennettävissä oleva matka = lennetty matka / käytetty polttoaine x jäljellä oleva polttoaine

Esimerkiksi: lennetään ensin 200 km, jolloin on kulunut 10 litraa ja jäljellä on 30 litraa, jolloin jäljellä oleva toimintamatka on 200 km / 10 x 30 = 600 km.

Toimintamatkaa laskettaessa on varauduttava yllätyksiin ja seurattava polttoaineen kulutusta ja matkan etenemistä. On huomattava lisäksi, että jotkin polttoainemittarit eivät näytä väliasentoja aivan oikein, joten on syytä tarkkailla mittarinsa näyttämiä ja suorittaa vertailuja todellisen kulutuksen välillä. Normaali käytäntö on varata noin 45 minuuttia ylimääräistä lentoaikaa mahdollisten yllätysten varalta.

Lentoonlähtömatka

Lentoonlähtömatka muodostuu kolmesta osasta: maakiito, ylösveto ja nousu 50 jalan korkeuteen.

Maakiito

Maakiidon aikana lentokoneen nopeus kasvaa nollasta riittävän suureksi ylösvetoa varten. Sitä parempi mitä lyhyemmällä matkalla kone saavuttaa riittävän ylösvetonopeuden, jona pidetään 1,25 Vs. On selvää, että kone, jolla on pieni sakkausnopeus, saavuttaa aikaisemmin tarvittavan irtoamisnopeuden verrattuna toiseen samanpainoiseen ja -tehoiseen koneeseen.

Maakiidon pituuteen vaikuttavat seuraavat tekijät:

- Ilman tiheyden kasvu lyhentää maakiitoa.
- Kiitoradan kaltevuus joko lyhentää tai pidentää matkaa riippuen siitä startataanko ylä- vai alamäkeen.
- Työntövoima T on tärkein vaikuttava tekijä.
- Kokonaisvastus D, joka muodostuu pyörien kitkasta maata vasten sekä koneen aerodynaamisesta vastuksesta
- Koneen lentomassa hidastaa kiihtyvyyttä sekä indusoitua ja kitkavastusta.
- Koneen sakkausnopeus määrittelee, milloin kone on valmis irtoamaan.
- Vastatuulikomponentti lyhentää maakiitoa mutta toisaalta tuulen puuskaisuus vaatii riittävästi reserviä.

Edelliset seikat vaikuttavat ensinnäkin koneen kiihtyvyyteen. Kiihtyvyys on työntövoiman ylijäämä T – D jaettuna massalla.

$$a = \frac{T-D}{m}$$

Sakkausnopeuden ja kiihtyvyyden vaikutus maakiitoon:

Vertailemalla kahta eri konetta, joista toisen sakkausnopeus on V_1 ja toisen V_2 ja vastaavat kiihtyvyydet a_1 ja a_2, saadaan likimääräiseksi lentoonlähtömatkojen suhteeksi

$$\frac{S_2}{S_1} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2 \times \left(\frac{a_1}{a_2}\right)$$

Koska sakkausnopeus esiintyy toisessa potenssissa, voidaan todeta sen ensiarvoisen tärkeä merkitys. Tästä voidaan vetää johtopäätös:

KONE, JOKA PYSTYY LENTÄMÄÄN HITAASTI, NOUSEE LYHYELTÄ MATKALTA.

Koneen **massan** vaikutus lentoonlähtömatkaan on niin ikään toiseen potenssiin verrannollinen, koska massan lisäys kasvattaa sakkausnopeutta ja vähentää kiihtyvyyttä.

$$\frac{S_2}{S_1} = \left(\frac{m_2}{m_1}\right)^2$$ Tässä on yksi syy välttää koneen ylikuormausta.

Yhteenveto:

KONEEN PAINON LISÄYS KASVATTAA VOIMAKKAASTI LENTOONLÄHTÖMATKAA.

Tuulen vaikutus voidaan ottaa huomioon lentoonlähdössä, mutta mikäli on kysymyksessä lyhyt kiitorata, on oltava varovainen, ettei arvioi väärin tuulen vaikutusta. ICAO:n mukaan mitatusta vastatuulikomponentista saadaan käyttää lentoonlähtölaskelmissa hyväksi vain puolet. Myötätuulikomponentti, joka pyrkii jatkamaan lentoonlähtömatkaa, sen sijaan on kerrottava 1,5:llä. Nämä kertoimet on otettu käyttöön tuulen oikullisuuden vuoksi. Maakiitomatka S_2 tuulella saadaan seuraavasti:

$$S_2 = \left(1 - \frac{V_w}{V_1}\right)^2 \times S_1, \text{ jossa}$$

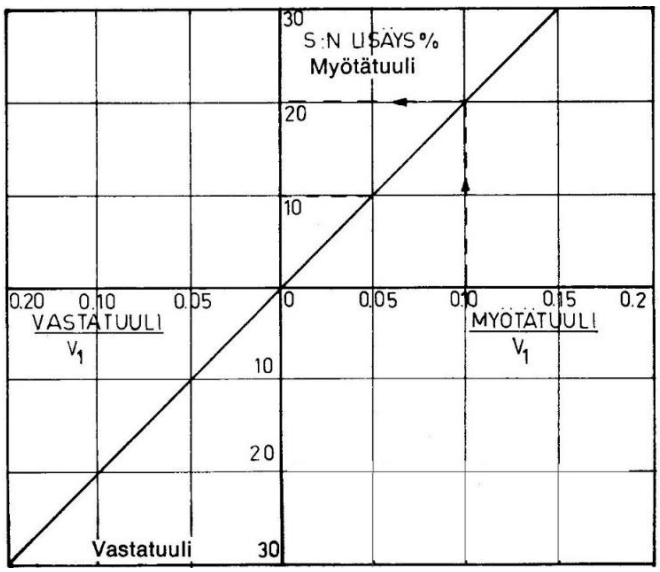
S_1 = lähtömatka tyynessä
V_w = vastatuulikomponentti
V_1 = lentoonlähdön ilmanopeus

Tämä riippuvuus nähdään havainnollisesti kuvasta 58, jossa on esitetty tuulen nopeuden vaikutus maakiidon pituuteen, jonka kaava on:

$$\frac{S_2}{S_1} = 1 - 2 \times \frac{V_w}{V_1}$$

joka on edellisen kaavan likiarvo, kun vastatuulikomponentti on kohtuullisen pieni.

Esimerkki: Vastatuuli Vw = 10 kt, V_1 = 100 kt, lentoonlähtömatka tyynellä on 250 m, mikä on lentoonlähtömatka tuulella? Ratkaisu: Vw : V_1 = 10:100 = 0,1. Katsotaan kuvaajasta 0,10 kohdalta vastaava lentoonlähtömatkan lyheneminen, jolloin saadaan tulokseksi 20% lyhyempi lentoonlähtömatka eli 200 m.



Kuva 59. Vasta- tai myötätuulen vaikutus maakiidon pituuteen. Vaaka-asteikolla on tuulen nopeuden suhde ylösvetonopeuteen. Pystyasteikko näyttää montako prosenttia maakiito pitenee tai lyhentyy tuulen vaikutuksesta. Huom! Vastatuulikomponentista käytetään vain puolet ja myötätuulikomponentti on kerrottava 1,5:llä.

Esimerkki maakiidon pituuden arvioinnista. Vastatuuli vaihtelee välillä 5 – 9 m/s ja on keskimäärin 7 m/s ja normaali ylösvetonopeus on 30 m/s. Paljonko lentoonlähtömatka lyhenee tuulen vaikutuksesta?

Ensiksi on pohdittava, mitä nopeutta tulee käyttää laskennassa. Käytetään varovaisuus syistä 5 m/s, jolloin vastatuulen ja ylösveto-nopeuden suhde on 5:30 = 17% Kuvasta saadaan lentoonlähtömatkan lyhenemiseksi noin 28 %. Jos lentoonlähtö pitäisi suorittaa tällä tuulella vasta-tuuleen, niin se olisi syytä jättää tekemättä, ellei kiitorata ole erityisen pitkä.

Ilman tiheyden vaikutus maakiidon pituuteen

S_1 = lentoonlähtömatka korkeudella, jossa ilman tiheys on ρ_1
S_0 = lentoonlähtömatka merenpinnan tasalla, jossa tiheys on ρ_0, saadaan

$$\frac{S_1}{S_0} = \left(\frac{\varrho_1}{\varrho_0}\right)^2$$

Tämä tuntuu erityisesti lennettäessä kentiltä, jotka ovat korkealla merenpinnasta. Suoritettaessa lentoonlähtöjä tällaisilta kentiltä on syytä tutustua lentoonlähtömatkaan, ettei kävisi huonosti. Ilman tiheys muuttuu myös korkea- ja matalapaineiden sekä lämpötilan vaikutuksesta hieman.

Kiitoradan kaltevuuden vaikutus maakiidon pituuteen

Koska kiitorata saattaa olla kalteva, on sen vaikutus huomioitava. Alaspäin viettävä rinne antaa koneelle lisäkiihtyvyyttä, jonka suuruus riippuu kaltevuuden prosentuaalisesta suuruudesta siten, että 1 % vietto antaa 0,01 g kiihtyvyyden lisän, joka voidaan suoraan lisätä a:han, joka on kiihtyvyys tasaisella kentällä. Tällöin saadaan kaava starttimatkojen suhteelle:

$$\frac{S_2}{S_1} = \frac{a}{a + 0{,}01\ g \cdot p}$$

, jossa p = rinteen kaltevuus prosenteissa, p on positiivinen alamäelle ja negatiivinen ylämäelle.

Esimerkki: Lentokoneen lähtökiihtyvyydeksi on mitattu 0,2 g (= 2 m/s^2) tasaisella kiitoradalla. Startti suoritetaan alamäkeen kiitoradalta, jonka kaltevuus on 3%. Montako prosenttia muuttuu nousukiidon pituus?

$$\frac{S_2}{S_1} \cdot 100 = \frac{a \cdot 100}{a + 0{,}01\ g \cdot p} \qquad a = 0{,}2\ g \quad p = 3$$

$$\frac{S_2}{S_1} \cdot 100 = \frac{0{,}2 \cdot 100}{0{,}2 + 0{,}01 \cdot 3} = \frac{20}{0{,}23} = \underline{87\ \%}$$

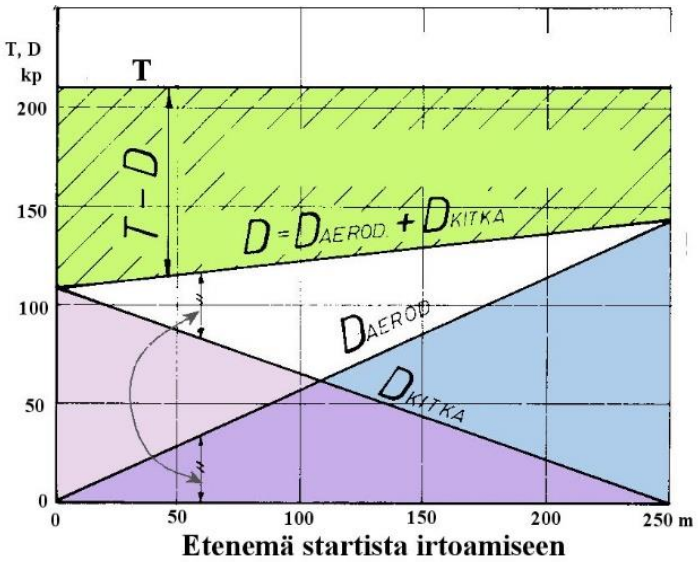
Tulokseksi saatiin nousukiidon pituudeksi 87 % eli 13 % lyhempi kuin tasaiselta kentältä startattaessa.

Kokonaisvastuksen muuttuminen maakiidon aikana

Maakiidon aikana vastus muuttuu jatkuvasti. Alussa kitkavastus pyörien ja maan välillä on suurin, mutta nopeuden kasvaessa lisääntyy haitallinen ilmanvastus ja nokkaa nostettaessa eli kohtauskulmaa lisättäessä indusoitu vastus kasvaa ollen irrotusvaiheessa kaikista suurimmillaan. Seuraavassa kuvassa on esitetty periaatteellisesti kunkin vastuksen osan sekä kokonaisvastuksen muutos lähtökiidon edistyessä. Ylinnä on vielä esitetty käytettävissä oleva työntövoima.

Lyhin lentoonlähtötapa

Miten lentoonlähtö olisi suoritettava, jotta saavutettaisiin lyhin mahdollinen kiitomatka? Onko syytä käyttää laippoja, ja jos on, niin kuinka paljon? Milloin on paras aloittaa ylösveto ja nokan keventäminen? Nämä ovat yleisiä kysymyksiä, joihin ei ole tarkoitus yksiselitteisesti vastata, sillä jokaisen tulisi katsoa koneensa käsikirjasta laippa-asetukset ja suositellut nopeudet. On kuitenkin eräs seikka, johon ei käsikirjoista yleensä löydy tarkkaa vastausta eli *minkä verran on vedettävä sauvasta missäkin kohtaa lähtökiidon aikana?* Tähän on tarkka vastaus, mutta sitä ennen tarkastellaan kuvan 61 avulla lentoonlähdössä vaikuttavia voimia, jotka muuttuvat maakiidon aikana. Maakiidon pituus voi vaihdella melkoisesti ohjaustekniikasta riippuen. Kyse on siitä, missä vaiheessa kannattaa kevittää konetta korkeusohjaimella ja minkä verran ja missä vaiheessa laippoja tulisi käyttää.



T = moottorin vetävä voima
D = kokonaisvastus
Daerod = aerodynaaminen vastus
Dkitka = kitkavastus pyörien ja maanpinnan välillä

Kuva 60. Startin aikana pyörien kitkavastus on aluksi suurimmillaan mutta pienenee sitä mukaa kuin nostovoima keventää konetta. Aerodynaaminen vastus kasvaa nopeuden ja nostovoiman kasvun lisääntyessä. Moottorin eteenpäin vetävä voima on lähes vakio koko lähtökiidon aikana. Kiihdytykseen on käytettävissä vihreällä rajattu alue T – D.

Tähän on tarkka vastaus. Ideaali nostovoimakertoimen arvo maakiidon aikana on:

$$C_L = \frac{\mu}{2} \pi e A, \text{ jossa}$$

μ = kitkakerroin
π = 3,14
e = elliptisyyskerroin n. 0,6 – 0,8
A = sivusuhde

Pinnan laatu	μ = kitkakerroin
Kuiva kestopäällyste	0,03 – 0,04
Kuiva, kova ruohokenttä	0,07 – 0,10
Kostea kestopäällyste	0,05
Kostea ruohokenttä	0,10 – 0,12
Lumi tai jääpeite (kova)	0,10 – 0,12
Savikenttä	0,15 – 0,30

Kaava 8. Nostovoimakertoimen arvo, jota tulisi käyttää maakiidon aikana. Oleellisin sanoma liittyy kiitoradan kitkakertoimeen. Kestopäällysteisellä kiitoradalla kone rullaa kevyesti ja annetaan rullata, kunnes nopeus riittää irtoamiseen. Pehmeällä kiitoradalla, jonka vastus on suuri, kannattaa käyttää siiven nostovoimaa hyväksi, jos se vähentää rullausvastusta. Tavoitteena on löytää kokonaisvastuksen minimi, jotta kiihtyvyys olisi mahdollisimman suuri. Tähän liittyy myös oikea aikainen ja tilanteeseen sopiva laskusiivekkeiden käyttö.

Esimerkki C_L:n arvosta

$$C_L = 0{,}1 \cdot 0{,}6 \cdot 3{,}14 \cdot 7 \cdot 1/2 = \underline{0{,}76}$$

μ = 0,1
e = 0,6
A = 7
π = 3,14

Kone saavuttaa tämän C_L :n arvon kevyellä vedolla. Mikäli lentoonlähtö tapahtuisi pehmeältä savikentältä, jonka kitkakerroin on 0,3 tarvittava nostovoimakerroin olisi 2,28, mihin kone ei kykene. Tällöin on avattava laippoja ja käytettävä niitä sekä korkeusperäsintä koneen keventämiseen niin paljon kuin mahdollista. Laskusiivekkeitä käytettäessä on valittava sellainen asetus, joka keventää konetta mutta ei aiheuta suurta vastuksen kasvua. Oikean tekniikan oppii harjoittelemalla ja kokeilemalla erilaisia vaihtoehtoja, jotta tosipaikan tullen osaisi toimia oikein.

Yhteenveto lentoonlähtömatkaan vaikuttavista tekijöistä:

PEHMEÄLTÄ KIITORADALTA LÄHDETTÄESSÄ ON KORKEUSPERÄSIMEN JA LASKU-SIIVEKKEIDEN AVULLA KEVENNETTÄVÄ KONETTA NIIN PALJON KUIN MAHDOLLISTA.

Kiitomatkaa muuttavat seuraavat tekijät: Lisäys matkaa muuttavassa tekijässä		Lähtömatkan muutosprosentti	
Irrotusnopeus kasvaa	1 %	kasvaa	2 %
Koneen kiihtyvyys kasvaa	1 %	lyhenee	1 %
Koneen lentomassa kasvaa	1 %	kasvaa	2 %
Tuulen nopeus (vastatuuli) koneen nopeudesta	1 %	lyhenee	2 %
Ilman tiheys pienenee	1 %	kasvaa	2 %
Kiitoratakaltevuus	1 %	kasvaa	0,5 – 10 %
Kitkakerroin kasvaa ylämäki	1 %	3 – ääretön (ei saavuteta V_s :ää)	

Taulukko 6. Maakiidon pituuteen lentoon lähdettäessä vaikuttavat tekijät.

Kitkakertoimen vaikutus maakiidon pituuteen vähän tarkemmin

$$Sr = k \frac{T}{T - D}$$

k = olosuhteista riippuva vakio
Sr = k, kun D = 0

Kitkakertoimen ja kokonaisvastuksen vaikutus käy ilmi viereisestä kaavasta, jossa esitetään lentoonlähtömatka riippuvaisena työntövoimasta ja kokonaisvastuksesta. Havaitaan heti, että jos työntövoima on yhtä suuri kuin vastus, niin saavutetaan äärettömän pitkä lähtömatka eli kone ei nouse. Samalla havaitaan, että vastuksen muuttuessa vain hieman, muutoksen vaikutus on sitä suurempi mitä pienempi on työntövoiman ja vastuksen erotus.

Taulukosta 6 havaitaan selvästi, kuinka työntövoimaylijäämän pienentyessä maakiitomatka pitenee sitä enemmän mitä huonommalta kiitoradalta startataan. Tämä on syytä pitää mielessä ennen lentoonlähtöä, jottei asia palautuisi mieleen koneen vaurioita katsellessa.

Ylösveto ja nousu 50 jalan korkeuteen

Ylösvedon ja nousun osuus lentoonlähdössä ei kaipaa maakiitoon nähden kovinkaan paljon selvitystä, koska jokainen oppii melko nopeasti oikean menetelmän ja kaiken lisäksi tässä vaiheessa ei pystytä enää tekemään kovin paljon asiaan vaikuttavaa. Tärkeintä on kuitenkin pitää mielessä, että ylösveto suoritetaan tasaisesti ja riittävän ajoissa sekä nousussa valitaan jyrkintä nousua vastaava nopeus, mikäli se on tarpeellista. Muutoin voidaan matalalla lentäen antaa ensin nopeuden kasvaa turvalliseksi ja vasta sitten nostaa nokkaa ja lisätä korkeutta. Moottorihäiriön sattuessa tässä vaiheessa ei ole muuta mahdollisuutta kuin jatkaa suoraan eteenpäin ja pyrkiä suorittamaan pakkolasku hallitusti.

Laskumatka

Laskumatkan pituus ilmaistaan joko maakiidon pituutena tai matkana, joka kuluu, kun 15 metrin korkeudesta liu'utaan laskuun ja kone pysähtyy. Laskukiidon pituuteen vaikuttavat samat tekijät kuin lentoonlähtömatkaan. Moottoriteho pidetään yleensä tyhjäkäynnillä, mutta sen sijaan pyritään lisäämään vastusta. Lyhyen laskumatkan saamiseksi on ensiarvoisen tärkeätä osata suorittaa liuku oikealla nopeudella, sillä alinopeus tietää koneen ohjattavuuden menetystä ja ylinopeus pitkää laskumatkaa. Loivennusvaiheessa on pyrittävä välttämään äkillistä vetoa, jottei kone g-vaikutuksesta sakkaisi pintaan.

Moottorilasku

Laskeuduttaessa esimerkiksi talvella lumiselle kiitoradalle tai kesällä vesikoneella tyyneen veteen, on vaikea arvioida omaa korkeutta. Tällöin on turvallista tehdä moottorilasku. Moottorin veto sovitetaan

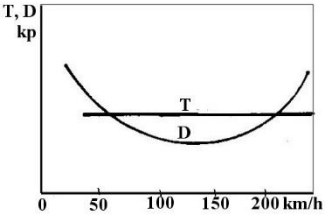
sellaiseksi, että lentonopeus on 1,25 – 1,3 Vs ja kone vajoaa tasaisesti noin 1 – 2 m/s. Tässä asennossa kone voi istua pintaan turvallisesti milloin hyvänsä. Moottorilasku ei helposti onnistu tosi tilanteessa, ellei sitä ole harjoitellut hyvissä olosuhteissa.

Hyötykuorma

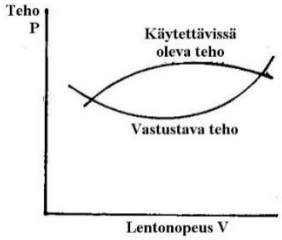
Lentokoneen kuormauksessa on noudatettava koneelle sallittuja arvoja niin henkilöluvun, polttoaine-määrän kuin lastin kanssa. Esimerkiksi Utility-luokan koneen kokonaispainolle ja painopistealueelle saattaa olla rajoituksia, jotka liittyvät siihen lennetäänkö matkalentoa vai taitolentoa (utility viittaa juuri taitolentoon). Etenkin painopisteen kanssa on oltava tarkkana, koska se vaikuttaa merkittävästi koneen stabiliteettiin.

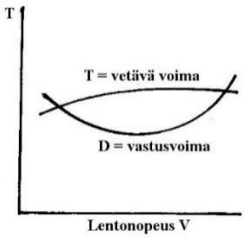
Kysymyksiä

1. Vaakalennossa vakiolentonopeudella nostovoima = ____? ja työntövoima = ____?
   Vast.: koneen paino, vastus
2. Määrää viereisestä kuvasta kriittinen nopeus ja selitä. mitä se tarkoittaa.
   Vast.: Kriittinen nopeus on 60 km/t. Lennettäessä alle 60 km/t vastus on suurempi kuin työntövoima, joten kone hidastuu ja, jos se on jo ilmassa, menettää korkeuttaan tai sakkaa.



3. Miten koneen kiihtyvyys riippuu työntövoimasta ja vastuksesta?
   Vast.: kiihtyvyys on suoraan verrannollinen työntövoiman ja vastuksen erotukseen.
4. Miten koneen kiihtyvyys riippuu koneen massasta?
   Vast.: kiihtyvyys on kääntäen verrannollinen massaan. Kevyt kone kiihtyy paremmin.
5. Piirrä voimavektorit nousulennossa.
   Vast.: ks. kuva 55
6. Mikä suhde määrää nousulennossa nousukulman?
   Vast.: työntövoiman ylijäämän suhde painoon
7. Määrää seuraavista kuvaajista a) suurinta nousunopeutta vastaava lentonopeus, b) jyrkintä nousua vastaava lentonopeus.





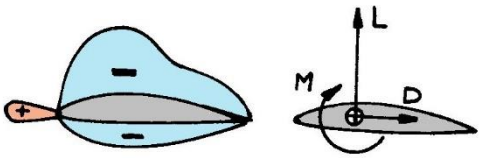
   Vast.: suurinta nousunopeutta vastaava lentonopeus saadaan vasemmasta kuvaajasta kohdasta, jossa tehoerotus on suurin. Suurinta nousukulmaa vastaava lentonopeus saadaan oikeanpuoleisesta kuvaajasta, kun työntövoiman ylijäämä on suurin.
8. Tiedetään, että eräällä koneella suurinta nousunopeutta vastaa lentonopeus 125 km/t. Minkä nopeuden valitset silloin, kun sinun on noustava mahdollisimman jyrkästi?
   Vast.: nopeuden, joka on hieman pienempi kuin 125 km/t, esim. 120 km/t.
9. Pakkolaskutilanteessa lähestyt vastatuuleen laskupaikkaa, joka on juuri ja juuri saavutettavissa. Koneen paras liitosuhde on 1:10 nopeudella 125 km/t. Millä nopeudella lähestyt laskupaikkaa? a) 120 km/t, b)125 km/t, c) 135 km/t.
   Vast.: nopeuden, joka on yli 125 km/t, esimerkiksi 135 km/t.
10. Koneen sakkausnopeus merenpinnan tasalla on 100 km/t. Mitä nopeusmittari näyttää koneen sakatessa lakikorkeudessa vaakalennossa, kun lakikorkeudessa tiheyssuhde on 0,400.
    Vast.: 100 km/t. Tiheyskorkeus ei vaikuta nopeusmittarin näyttämään.

11. Olet lentänyt yhden tunnin, jonka aikana polttoainetta on kulunut 10 gallonaa ja matkaa taittunut 200 km. Lähtiessäsi polttoainetta oli 30 gallonaa. Miten pitkälle pääset nykyisestä olinpaikastasi edellyttäen, että nopeus ja kulutus eivät muutu.
    Vast.: 400 km
12. Kone, joka pystyy lentämään _____? nousee lyhyeltä matkalta.
    Vast.: hitaasti
13. Miten vastus muuttuu maakiidon aikana?
    Vast.: Alussa pyörien kitkavastus on suurin. Nopeuden kasvaessa siivet nostavat konetta, jolloin indusoitu vastus ja haitallinen vastus kasvavat mutta pyörien vastus vähenee. Irrotushetkellä kitkavastus on nolla ja vastus on kokonaan aerodynaamista.
14. Miten laippoja ja korkeusohjainta tulisi käyttää, kun lähdetään lentoon pehmeältä kiitoradalta?
    Vast.: laipat noin 15° - 20^0 auki ja vetoa niin paljon kuin mahdollista. Kone pitää saada ilmaan mahdollisimman aikaisin. Nopeutta kasvatetaan matalalla lentäen, kunnes saavutetaan parhainta nousunopeutta vastaava lentonopeus, jonka jälkeen voidaan varovasti vetää laipat sisään ja jatkaa nousua tällä nopeudella.
15. Mikä seuraavista tekijöistä vaikuttaa voimakkaimmin lentoonlähtömatkaan? A) koneen kiihtyvyys, b) tuuli, c) lentomassa, d) kiitoradan kitkakerroin.
    Vast.: kiitoradan kitkakerroin.

LENTOKONEESEEN VAIKUTTAVAT VOIMAT ERI LENTOTILOISSA

Siipeen kohdistuvat voimat

Lentokoneeseen kohdistuu ilmassa ohi liikkuvan ilmamassan aiheuttamia painevoimia. Ne kohdistuvat erilaisina koneen eri osiin. Olemme esittäneet nostovoiman synnyn yhteydessä siipiprofiiliin kohdistuvia painejakautumia. Painejakautuman aiheuttama kokonaisvoima voidaan esittää "punnitsemalla" ja ilmoittamalla punnitustulos. Tällöin joudutaan tulos ilmoittamaan yleensä voima- ja momenttivektorin avulla. Kunkin osan vaikutus koko siipeen ja koneeseen voidaan laskea yhteen ja tulos on ilmaistavissa voiman ja momentin avulla. Voima ja momentti vaikuttavat nostovoimakeskiöön. Esimerkkinä tästä voidaan esittää kuvan 61 mukainen tapaus.



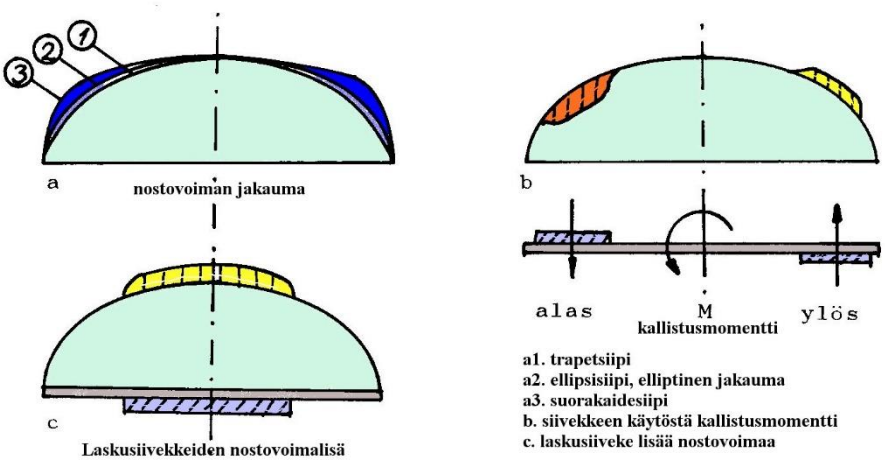
Kuva 61. Siipeen kohdistuvien voimien ja momenttien summa kohdistetaan vaikuttamaan aerodynaamiseen keskiöön.

Painevaikutuksen summa vastaa yksinkertaistettuna voimia ja momenttia, jotka vaikuttavat paine-keskiöön. Kunkin siiven osan on otettava vastaan siihen kohdistuvat voimat. Tällöin tyveä lähimpänä olevat osat rasittuvat kaikista eniten. Jännevälin kasvaessa siiven tyviosaan kohdistuvat voimat moninkertaistuvat. Nostovoiman jakaantuminen jännevälin suunnassa saadaan laskemalla kunkin leikkauksen nostovoima ja esittämällä tulos kuvan 62 tapaan. Tässä kuvassa kuvaajan korkeus ilmaisee, kuinka paljon mikin siiven osa kantaa. Todetaan, että siiven keskiosassa on suurin nostovoima, sillä siinä jakautuman arvo on korkein. Samassa kuvassa on esitetty useamman erimuotoisen siiven nostovoimajakautuma, (a-kohta). Viereisessä kuvassa, (b-kohdassa), on esitetty siivekepoikkeutuksen aiheuttama muutos nostovoimajakautumaan sekä c-kohdassa laskusiivekkeiden vaikutus.

Siivekejarrutus

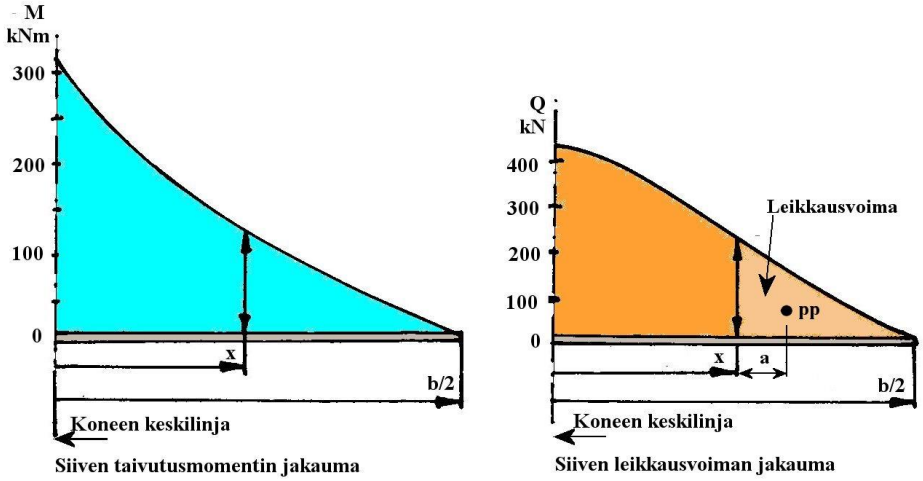
Siivekettä käytettäessä nokka kääntyy vastakkaiseen suuntaan kuin kallistus. Tämä johtuu siitä, että ylös nouseva siiveke vähentää kohtauskulmaa mutta lisää nostovoimaa ja alas laskeva siiveke lisää nostovoimaa mutta vähentää vastusta, mitkä kääntävät koneen nokkaa alas laskevan siivekkeen puolelle.

Ohjauksessa tämä tarkoittaa sitä, että kallistettaessa vasemmalle on saman aikaisesti painettava vasenta jalkaa, jottei nokka kääntyisi oikealle. Jalan käytön voimakkuus on konekohtaista.



Kuva 62. Siiven nostovoimajakauma. Kuvassa a on kolmen erilaisen siipimuodon jakauma. Pienimmän vastuksen antaa elliptinen siipi, jonka jakauma on elliptinen. Kuvassa b siivekkeen käyttö muuttaa jakaumaa ja aiheuttaa kallistusmomentin. Kuvassa c laskusiiveke lisää jakaumaa oman mittansa pituudella.

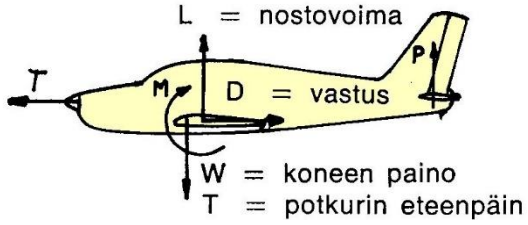
Nostovoima aiheuttaa siipeen taivutusmomentin, joka siiven on kestettävä. Momentti on voima kertaa varsi. Jos useampia voimia vaikuttaa eri etäisyyksillä, saadaan kokonaisvoima laskemalla yhteen kunkin voiman aiheuttama momentti. Jos lasketaan siiven eri kohdissa momentit, saadaan kutakuinkin kuvan 63 mukainen momenttijakautuma. Havaitaan selvästi, että keskellä on momentti kaikista suurin. Näinhän pitääkin olla, sillä keskeltähän on myös suurin etäisyys kuhunkin kantavaan siiven poikkileikkaukseen. Kuvassa esitetään, kuinka suuri osa siiven kantovoimasta on sen kärkiosan puolella. Kärjessä tämä kuvaaja on tietysti nolla, mutta tyveen tultaessa se kasvaa suurimmaksi, sillä keskellä on tietysti kummankin kärjen puolella puolet koneen nostovoimasta. Tätä kuviota kutsutaan leikkausvoimajakautumaksi. Ohjaajan kannalta ei ole välttämätöntä ottaa kantaa näihin jakautumiin sellaisenaan. Voidaan kuitenkin todeta, että koneessa, jonka nostovoimasta suuri osa on kärkiosassa, kuten suorakaidesiivessä, saadaan tyven momenttijakautumalle suuria arvoja.



Kuva 63. Siipeen kohdistuva leikkausvoima (oikealla) ja taivutusmomentti (vasemmalla). Leikkausvoima kohdassa x on yhtä suuri kuin kärjen ja x:n välinen nostovoima. a = kärkiosan leikkausvoiman painopisteen etäisyys x:stä. Momentti kohdassa x on yhtä suuri kuin kärkiosan leikkausvoima kertaa a.

Koneeseen vaikuttavien voimien yhdistäminen

Siiven voimat ja momentti piirretään vaikuttamaan aerodynaamiseen keskiöön. Koneen massan aiheuttama voima, eli koneen paino, piirretään painopisteeseen. Painovoimavektorin kärki osoittaa suoraan alas (maan keskipisteeseen). Kiihtyvyysvoimat piirretään kiihtyvyyden suuntaan. Potkurin aiheuttama vetävä voima piirretään potkuriakselin suuntaiseksi kärki osoittamaan vedon suuntaan. Peräsimen aiheuttamasta voimasta huomioidaan yleensä vain peräsimen nostovoima, jonka suunta tosin on yleensä alaspäin. Peräsinvoima piirretään peräsimen nostovoimakeskiöön, eli noin 30% etureunasta taaksepäin, Esimerkki näiden voimien vaikutuksen esittämisestä nähdään seuraavassa kuvassa.



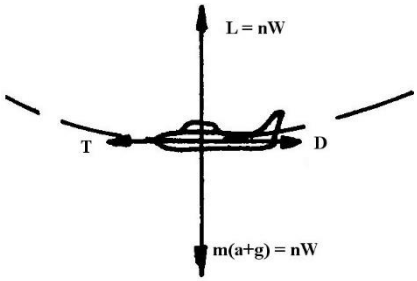
Kuva 64. Lentokoneeseen kohdistuvat voimat. Koneen paino vaikuttaa painopisteeseen, potkurin veto potkurin akselin suuntaan, Aerodynaamiseen keskiöön vaikuttavat nostovoima, vastus ja momentti. Nostovoima on kohtisuorassa lentonopeutta vastaan ja vastus lentonopeuden suuntainen. Momentti on positiivinen, jos se pyrkii nostamaan nokkaa. Peräsinvoima P tasapainottaa momentin. Peräsinvoima suuntautuu alaspäin ja kompensoi ”nokka alas” momentin vaikutuksen.

Voimat eri lentotiloissa

Suora lento

Voimat ovat kuten kuvassa 64 on esitetty. Tasapainotila eli vaakalento vakionopeudella tapahtuu silloin, kun T = D ja L + P = W sekä momentti painopisteen ympäri on nolla. Aikaisemmin on jo kuvattu T:n ja D:n muutoksia eri nopeuksilla, joten tässä yhteydessä voidaan jättää niiden tarkempi analyysi väliin. Nostovoiman saaminen yhtä suureksi painon kanssa säädetään peräsimen avulla siten, että momentti tulee nollaksi eli nokka ei nouse eikä laske.

Oikaisu syöksystä

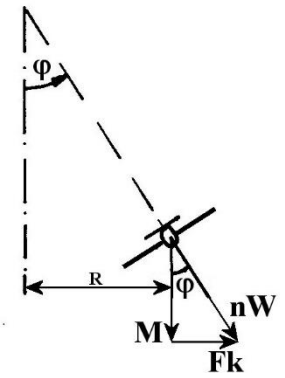


Syöksystä oikaistaessa on koneen lentorata kaareva, mistä johtuen keskipakovoima pyrkii painamaan konetta poispäin kaarevuuskeskipisteestä. Koneen nokkaa vedetään jatkuvasti, joten koneella on kulmanopeutta, mikä on aikaansaatu peräsintä käyttämällä. Tasapainoehdot syöksystä oikaisussa on helpointa esittää radan alimmassa kohdassa, sillä siinä yhtyvät keskipako- ja painovoimat ja saadaan yksinkertaisin voimakuvio.

Kuva 65. Syöksystä oikaistaessa nostovoima kasvaa keskipakovoiman vaikutuksesta. Tämä kasvattaa sakkausnopeutta ja mitä suurempi kiihtyvyys sitä äkäisempi sakkaus.

Kaartolento

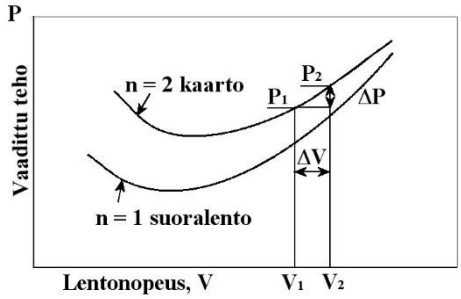
Kaarron aikana koneeseen vaikuttaa keskipakovoima, joka ajaa konetta pois kaarron keskipisteestä. Jotta kaarto tapahtuisi puhtaana ”kuula keskellä”, on konetta kallistettava juuri sen verran, että kallistus kumoaa painovoiman ja keskipakovoiman. Kallistuksen voimakkuus puolestaan määrää vedon voimakkuuden eli kaartosäteen. Kuva 65 kaartolennossa vaikuttavista voimista esittää, miten keskipakovoima ja painovoima yhdessä vaikuttavat samalla tavoin kuin syöksystä oikaistaessa.



Kaartolennossa vaikuttavat voimat
Fk = keskipakovoima
φ = kallistuskulma
n = koneeseen vaikuttava kiihtyvyysmonikerta
$n = \frac{1}{\cos\varphi}$
R = kaartosäde
Työntövoima ja vastus, jotka ovat kohtisuorassa kuvion tasoa vastaan, ovat vaakakaarrossa yhtä suuret ja vastakkaissuuntaiset.

Kuva 66. Kaartolennon tasapaino saavutetaan silloin, kun kallistus vastaa keskipakovoimaa.

Tarvittava tehonlisäys, jotta kaartolennossa säilytettäisiin vakiokorkeus:



Kuva 67. Kaartolennon vaatima tehon ja nopeuden lisäystarve riippuu kuormitusmonikerrasta. ΔV on nopeuden muutos ja ΔP tehon muutos.

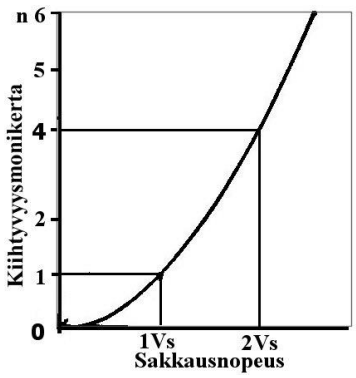
Vastuksen yhteydessä todettiin, että kiihtyvyysmonikerran kasvaessa indusoitu vastus kasvoi. Tämä vaikuttaa tietysti koneen kokonaisvastusta kasvattavasti, joten tehontarve kasvaa. Tämä on esitetty kuvassa 66, jossa on pystyakselilla esitetty vaakalennon (n=1) ja kaartolennon (n=2) vaatiman tehon riippuvuus lentonopeudesta. Moottorin antaman tehon ja vaaditun tehon käyrien leikkauspistettä vastaava nopeus on tasapainonopeus. Havaitaan, että sama tehokäyrä leikkaa eri nopeuksilla vaaditun tehon käyrät, joten kaartolennon ja suoran lennon tasapainonopeudet poikkeavat toisistaan. Mikäli nopeus halutaan säilyttää vakiona eikä lentokorkeus saa muuttua, on tehoa lisättävä käyrien välistä etäisyyttä vastaavasti.

Sakkausnopeus kaartolennossa ja syöksystä oikaistaessa.

φ	n	Vs
0	1	Vso
15°	1,036	1,02 Vso
30°	1,154	1,07 Vso
45°	1,414	1,19 Vso
60°	2,000	1,41 Vso
75°	3,960	1,99 Vso

Aikaisemmin sakkauksen yhteydessä todettiin, että kiihtyvyysmonikerta vaikuttaa sakkausnopeuteen. Tässä yhteydessä tyydymme esittämään taulukon, josta käy ilmi sakkausnopeuden muuttuminen kiihtyvyysmonikerran n muuttuessa.

Taulukko 7. Kaartolennon kiihtyvyysmonikerran ja sakkausnopeuden riippuvuus kallistuskulmasta

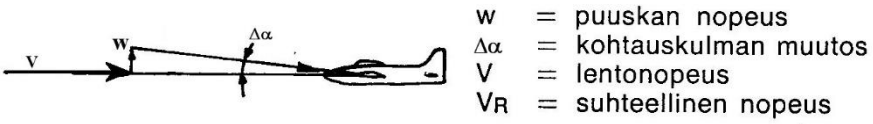


Sakkausnopeus kasvaa, kun kiihtyvyysmonikerta kasvaa. Jos kone sakkaa voimakkaan vedon aikana, niin sakkaus tapahtuu hyvin nopeasti ja saattaa yllättää, ellei tähän osaa varautua eikä oikein hallitse sakkauksen oikaisua. Sakkausnopeus kasvaa kuormitusmonikerran neliöjuuren suhteessa kuten viereisessä kuvassa on esitetty.

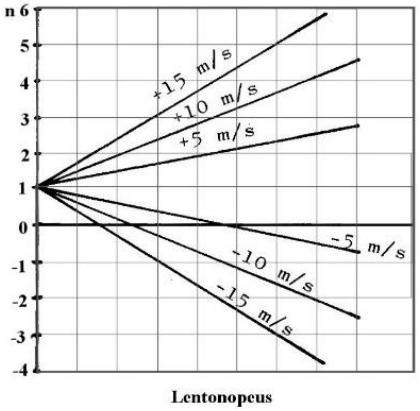
Kuva 68. Kiihtyvyysmonikerran ja sakkausnopeuden riippuvuus. 4g vedolla sakkausnopeus on 1,4 x vaakalennon sakkausnopeus.

Puuskakuormitukset

Puuskaisella säällä koneen lento on heittelehtivää, kone nousee ja laskee satunnaisesti ja ohjaussuunta heiluu puolelta toisella. Seuraavassa tarkastelemme puuskan vaikutusta koneeseen. Koska nostovoiman suuruus määräytyy ensisijaisesti kohtauskulman suuruudesta, niin pääsemme hyvään alkuun tarkastelemalla puuskan vaikutusta kohtauskulmaan. Voimme nimittäin vetää sen johtopäätöksen, että ensisijaisesti nousevat tai laskevat virtaukset häiritsevät korkeusohjaustamme. Kuvassa 69 näytetään, miten puuskan nopeus muuttaa kohtauskulmaa. Puuskan nopeusvektori lasketaan yhteen ilman nopeus-vektorin kanssa, jolloin saadaan kolmio, jonka terävä kulma ilmaisee kohtauskulman muutoksen.



Kuva 69. Ainoastaan lentorataa vastaan kohtisuora puuskakomponentti vaikuttaa kohtauskulmaan ja muuttaa sitä kautta nostovoimaa, mikä aiheuttaa koneen heittelehtimistä puuskien vaikutuksesta. Kuvassa on pystypuuskan aiheuttama kohtauskulman lisäys.

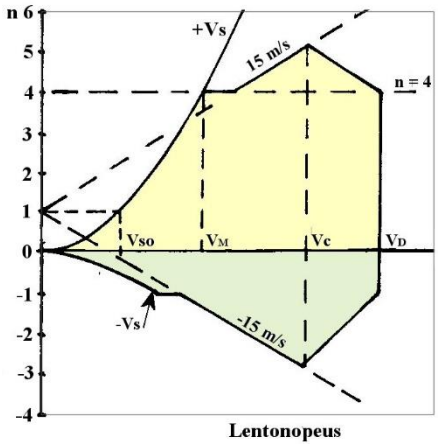


Kuva 70. Nostavan ja laskevan puuskan aiheuttama kiihtyvyysmonikerran riippuvuus lentonopeudesta. Vaakalennossa kiihtyvyys = 1 eli maan vetovoiman kiihtyvyys.

Kohtauskulman kasvu saa aikaan kiihtyvyyden kasvun, joka on sitä suurempi, mitä nopeammin lennetään. Kuvassa 70 on esitetty erilaisten puuskien aiheuttamat kiihtyvyydet. Puuskat ylöspäin aiheuttavat positiivista kiihtyvyyttä ja alaspäin olevat negatiivista. Koska lentonopeuden kasvaessa puuskan aiheuttama kiihtyvyys-monikerta kasvaa, on katsottu aiheelliseksi rajoittaa koneen lentonopeutta puuskaisella säällä. Erittäin nopeiden koneiden ohjaajien yleiset selkäviat (välilevyn pullistumat) johtuvat puuskan aiheuttamista iskuista, jotka ovat niin voimakkaita, etteivät selän välilevyt kestä niitä.

V-n piirros eli nopeus-kuormitus-piirros

Lentokoneen suunnitteluvaiheessa määritellään koneen toimintarajat ns. V-n piirroksessa, jollainen on esitetty kuvassa 71. V-n piirrokseen on kerätty lennon kuormituskertoimiin liittyvät rajoitukset:



Kuva 71. Utility-luokan lentokoneen V-n kuvaaja. Kuva esittää koneen lentotoiminnan mahdolliset ja sallitut raja-arvot.

- Positiivinen ja negatiivinen sakkausnopeus +Vs ja -Vs. Kone sakkaa näillä rajoilla eikä siksi voi kuormittua enempää.
- Positiivinen ja negatiivinen 15 m/s puuskaraja. Koneen nopeutta on rajoitettava, jos pystysuorat puuskat ovat 15 m/s tai enemmän.
- Maksimi sallittu taitolennon kuormituskerroin 4g.
- Maksimi sallittu taitolentonopeus V_M. Tätä ei saa ylittää, koska muuten maksimi kuormituskerroin saattaisi ylittyä.
- Sakkausnopeus vaakalennossa Vso.
- Maksimi matkalentonopeus Vc.
- Suurin sallittu syöksynopeus V_D, jolloin puuskanopeus sekä kiihtyvyysmonikerta on pidettävä sallitulla alueella.

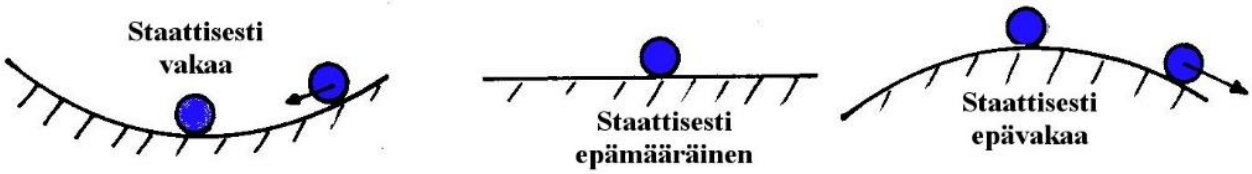
Nämä rajoitukset ovat voimassa, jottei kone rasittuisi lennon aikana enempää kuin mihin se on suunniteltu.

Kysymyksiä

1. Piirrä painejakautuma siipiprofiilin ympärillä. Merkitse yli- ja alipaine.
   Vast.: ks. kuva 58.
2. Miten nostovoiman jakautuma muuttuu, kun siiven kärki kapenee?
   Vast.: kärjen osuus nostovoimasta vähenee.
3. Esitä piirroksen avulla, miten siivekkeet vaikuttavat nostovoiman jakaantumaan.
   Vast.: ks. kuva 59.b.
4. Miten selität siivekejarrutuksen?
   Vast.: alas laskevan siivekkeen puolella nostovoima kasvaa, jolloin indusoitu vastus myös kasvaa ja siipi jarruuntuu. Nousevan siivekkeen puolella asia on päinvastoin.
5. Siiven aikaansaama momentti pyrkii a) painamaan nokkaa, b) nostamaan nokkaa.
   Vast.: painamaan nokkaa.
6. Siiven momentin tasapainottava peräsinvoima on ylös-/alaspäin?
   Vast.: alaspäin.
7. Miksi joissakin koneissa korkeusperäsimen profiili on ylösalaisin?
   Vast.: koska korkeusperäsinvoima on alaspäin.
8. Mitkä ovat koneen tasapainoehdot syöksystä oikaistaessa?
   Vast.: nostovoima on yhtä suuri kuin koneen paino kertaa kiihtyvyysmonikerta ja työntövoima yhtä suuri kuin vastus.
9. Mikä on koneen sakkausnopeus 60° :n kaarrossa, kun se vaakalennossa on 100 km/t?
   Vast.: 141 km/t.
10. Mikä on koneen sakkausnopeus kahden g:n vedossa, kun se suorassa lennossa on 100 km/t.
    Vast.: 141 km/t.
11. Miten pystysuoran puuskan nopeus vaikuttaa koneen kiihtyvyysmonikertaan eri lentonopeuksilla?
    Vast.: puuskan vaikutus kasvaa samassa suhteessa kuin lentonopeus. Mitä kovempi puuska, sitä suurempi vaikutus. Mitä suurempi lentonopeus, sitä suurempi vaikutus.
12. Miksi lentoradan suuntainen puuska ei sanottavasti vaikuta koneeseen?
    Vast.: se ei aiheuta kohtauskulman muutosta eikä siten merkittävää nostovoiman muutosta.

LENTOKONEEN VAKAVUUS JA OHJATTAVUUS

Lentokoneen on oltava riittävän vakava, jottei ohjaajan tarvitse keskittyä koko ajan sen ohjaamiseen, mutta sen on toteltava kohtuullisilla ohjainvoimilla ohjaajan haluamia liikeratoja. Puuskan tai muun häiriön jälkeen koneen tulisi palata vakaaseen lentoon ilman sanottavia heilahteluja tasapainotilan ympärillä. Tällöin on koneen siis pyrittävä itsestään takaisin alkuperäiselle liikeradalleen, mutta kun tämä liikerata on saavutettu, ei heilahdus saisi jatkua kovin paljon ohi, vaan sen olisi vaimennuttava kohti alkuperäistä asemaa. Vakavuuskäsitteiden selventämiseksi esitetään seuraavassa havainnollisesti sekä staattisen että dynaamisen vakavuuden käsitteet.



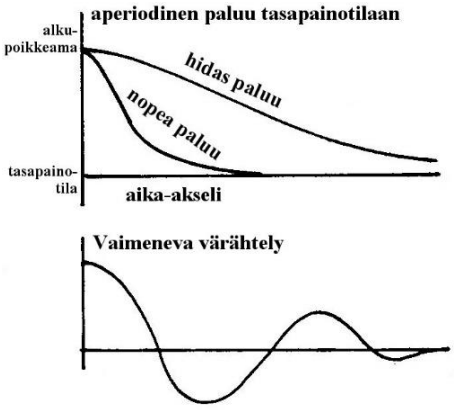
Kuva 72. Systeemin tasapainotila on vakaa, kun se pyrkii palaamaan takaisin kohti tasapainotilaa. Mitä voimakkaampi pyrkimys on sitä vakaampi systeemi. Kuva osoittaa miten pallo käyttäytyisi eri vakavuustilanteissa. Staattiseen vakauteen liittyy pyrkimys, mutta saavutetaanko vakaa tila, riippuu esimerkiksi kitkasta tai vaimennuksesta. Epämääräisessä tai epävakaassa tilassa ei ole edes pyrkimystä vakaaseen tilaan.

Staattinen vakavuus

Määritelmä: Lentokone on staattisesti vakava, kun kaikkien koneeseen vaikuttavien ulkoisten voimien ja momenttien summa on nolla ja mikäli kone poikkeutettuna tasapainotilasta pyrkii palaamaan takaisin tasapainotilaan.

Dynaaminen vakavuus

Jotta kone olisi dynaamisesti vakaa, on sen ehdottomasti oltava myös staattisesti vakaa. Staattisessa vakavuudessa puhuttiin siis pyrkimyksestä, mutta dynaamisessa vakavuudessa katsotaan, tuottaako pyrkimys myös tuloksen eli jääkö kone tasapainotilaan. Eli kone ei voi olla dynaamisesti vakaa, ellei se ole staattisesti vakaa. Häiriön jälkeinen paluu tasapainoasemaan saattaa tapahtua joko vähitellen tai vaimennettuna värähtelynä edellyttäen, että kone on staattisesti vakaa eli sillä on pyrkimys kohti tasapainoa. Tätä havainnollistavat seuraavat liikeradat:



Kuva 73. Staattisesti vakaan järjestelmän paluu tasapainoon poikkeutuksen jälkeen. Yläkuva: Aperiodinen eli rauhallinen paluu voi olla nopea tai hidas. Alakuva: tasapainotilaan päästään vaimenevan värähtelyn jälkeen.

Vaimenevan värähtelyn vaimennus ilmaistaan puoliintumis-aikana, mikä tarkoittaa heilahduksen laajuuden (amplitudin) vähenemistä puoleen alkuperäisestä. Dynaamisessa paluussa kohti tasapainoasemaa on tärkeä merkitys myös yhteen heilahdukseen kuluvalla ajalla. Mikäli heilahdusjakson kestoaika on sekunnin murto-osia, ei ohjaaja ehdi vaikuttamaan vastaliikkeillään heilahteluun. Jos jakson pituus sen sijaan on useita minuutteja, ei ohjaaja välttämättä edes huomaa tällaisen heilahteluliikkeen olemassaoloa. Vaarallisimmillaan on heilahduksen kestoaika silloin, kun se on lähes sama kuin ohjaajan reaktionopeus. Tällöin ohjaaja suorittama vastaliike on valmiiksi myöhässä ja vahvistaa heilahtelua ja vastaliikkeeksi tarkoitettu korjaus vain pahentaa tilannetta. Tätä saattaa esiintyä varsinkin korkeus-ohjauksessa. Jos kone on korkeuden suhteen yliherkkä, on paras keskittää hetkeksi ohjaimet eikä tehdä mitään vaan rauhassa seurata tilanteen kehitystä ja suorittaa ohjainliikkeet keskimääräisen ohjaus-suunnan vaatimalla tavalla. Periaate on tuttu lennettäessä magneettisen kompassin mukaan, jolloin kompassiruusu heiluu keskiarvon molemmin puolin ja on vain maltettava odottaa kompassiruusun heilahdusjakson ajan ennen kuin voi sanoa, mikä on todellinen lentosuunta. Joissakin koneissa esiintyy varsinkin lentoonlähtö- ja laskutilanteissa tällaista heilahtelutaipumusta. Jos sivullisena seuraa konetta, joka tekee pomppulaskun, voi välittömästi havaita ohjaajan mahdollisen virhereaktion, sillä pompun vaimennuksessa on helppo tehdä korjaus väärässä paikassa ja tuloksena on vielä pahempi pomppu. Liian takana oleva painopiste aiheuttaa helposti epävakautta.

Koneen trimmaus ja ohjattavuus

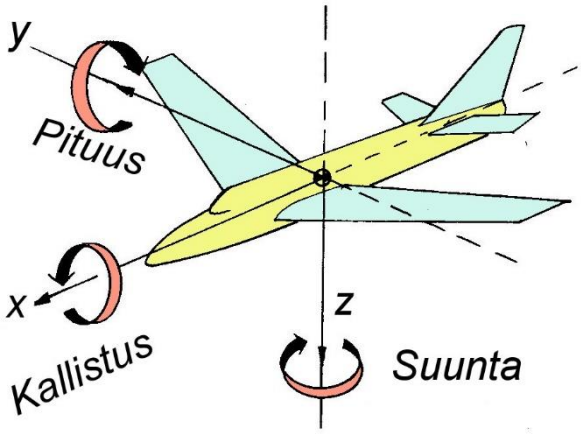
Jotta kone voitaisiin trimmata vakaaseen lentoon, sen on oltava sekä staattisesti että dynaamisesti vakaa. Kone on trimmattu silloin, kun kaikkien momenttien summa on nolla, eli nokka ei laske tai nouse taikka kone ei kallistele tai muuta suuntaansa. Lyhyesti asian voisi ilmaista siten, että kone on trimmissä, kun se lentää itsekseen vakaasti.

Ohjattavuudella tarkoitetaan lentokoneen kykyä vastata ohjainpintojen liikkeisiin ja saavuttaa haluttu lentotila. Koneella on oltava riittävä ohjattavuus lentoonlähdössä, laskussa ja liikehdinnässä. Koneen hyvä ohjattavuus ei välttämättä riitä hyvään stabiilisuuteen. Itse asiassa vakavuuden lisääminen heikentää yleensä ohjattavuutta. Tätä havainnollistaa seuraava kuva.

Kuva 74. Vasemmalla; Heikosti vakaan systeemin poikkeutus tapahtuu pienellä ohjainvoimalla, jolloin ohjattavuus koetaan hyväksi. Erittäin vakaan systeemin ohjauksessa tarvitaan paljon ohjausvoimaa, jolloin ohjattavuus on huonompi.

Vakavuusakselit

Lentokone voi heilahdella hyvin moneen eri suuntaan. Koska esitys on helpompaa, mikäli tutkitaan kutakin osatekijää erikseen, on tullut tavaksi jakaa lentokoneen liike eri komponentteihin. Suuntia, joihin liike jaetaan, kutsutaan vakavuusakseleiksi. Kuvassa no. 75 on esitetty koneen vakavuusakselit merkinnöin, jotka ovat yleisesti käytössä kirjallisuudessa. Positiivinen liike tapahtuu akselin positiiviseen suuntaan ja negatiivinen päin vastoin. Kallistus on esimerkiksi positiivinen oikealle. Vakavuusakselien origo on koneen massakeskipisteessä. Akselisuunnat yhtyvät koneen akselisuuntiin liikkuen siis koneen mukana. Ilmavirta kohtaa akseliston suorassa lennossa yleensä melko lähellä x-akselin suuntaa, mutta ei välttämättä yhdy siihen. Virheliikkeissä ilmavirran suunta voi olla hyvinkin paljon sivusta.



Kuva 75. Lentokoneen vakavuusakselit.

Pituusvakavuus

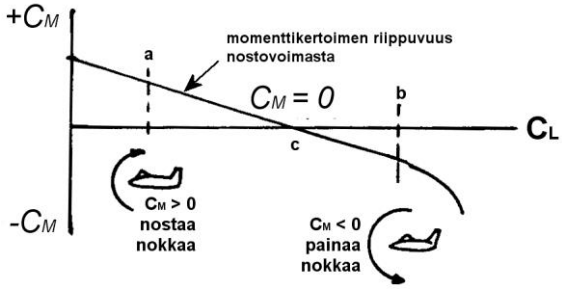
Pituusvakavuudella tarkoitetaan koneen vakavuutta korkeusperäsimen vaikutustasossa eli x, z-tasossa. Koneen käyttäytyminen sen jälkeen, kun puuska on nostanut nokan ylös, osoittaa koneen pituusvakavuuden. Mikäli kone palaa nopeasti tasaiseen lentoon, niin se on vakaa, mutta mikäli se jää koukkimaan pitkäksi ajaksi, se ei ole vakaa. Erikoisesti mittarilento-olosuhteissa on tärkeää, että kone on vakaa, sillä ohjaajan huomio on kiinnittynyt ennen kaikkea oikean reitin ja korkeuden säilyttämiseen eikä häneltä välttämättä liikene tarkkaavaisuutta koneen heikon vakavuuden korjaamiseen, Epävakaista koneista ohjaajat usein sanovat "On kuin istuisi munan päällä". On selvää, että jatkuva liika valppaus rasittaa ja aiheuttaa vaaraa lentoturvallisuudelle. Äärimmäisenä tapauksena on tietysti se, että kone on suorastaan epävakaa, jolloin lentäminen on ehdottomasti vaarallista sekä määräysten vastaista. Huolimaton kuormaus eli taka-painoisuus on yleisin syy epävakauteen. Seuraavassa tarkastelemme lähemmin koneen pituus-vakavuuteen vaikuttavia tekijöitä. Palautetaan ensin mieleen koneen momenttikerroin

C_M = q S c, jossa q = kineettinen paine, S = siiven pinta-ala ja c = siiven keskileveys.

M = koneen massakeskipisteeseen vaikuttavien momenttien summa eli siipi, runko ja peräsin yhdessä.

C_M = momenttikerroin y-akselin suhteen

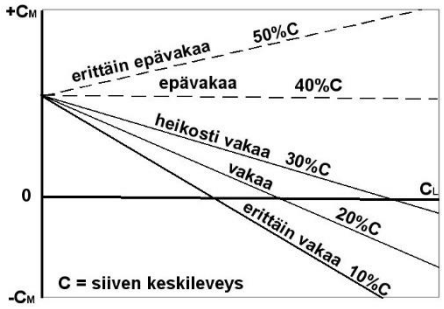
Jos C_M tai M on positiivinen, niin nokka nousee ja päinvastoin. Momenttikerroin on 0 silloin, kun kone on tasapainotilassa (lentää suoraan). Lentonopeus tai nostovoimakerroin muuttavat momenttikerrointa. Seuraavassa kuvassa 73 on pystyakselilla momenttikerroin ja vaaka-akselilla nostovoimakerroin.



Kuva 76. Momenttikertoimen riippuvuus nostovoimakertoimesta. Tasapainotila on kohdassa c, jossa $C_M = 0$. Pienemmällä C_L:n arvolla nokka nousee ja suuremmalla laskee eli tilanne palaa kohti tasapainoa.

Mikäli kone lentää nostovoimakertoimella $C_M = 0$, sillä ei ole pyrkimystä muuttaa nostovoimakerrointa, mutta pisteessä a, jossa $C_M > 0$ eli positiivinen, momentti aiheuttaa nokan nousun ja samalla C_L :n kasvun, kunnes saavutetaan tasapainotila, jossa $C_M = 0$. Koska kone palaa aina samaan nostovoimakertoimen arvoon, se on stabiili.

Vakavuuden luonne näkyy momenttikertoimen kuvaajan kaltevuudesta siten, että mitä jyrkemmin momenttikerroin pienenee C_L :n kasvaessa, sitä vakaampi kone on.



Kuva 77. Massakeskipisteen vaikutus koneen pituusvakavuuteen. Siirtämällä painopistettä eteenpäin lisätään vakavuutta. Sallittu painopisteen vaihteluraja on ilmoitettu koneen käsikirjassa ja sitä on noudatettava. Liian takana oleva painopiste aiheuttaa epävakautta, jolloin koneesta tulee hyvin vaikeasti lennettävä.

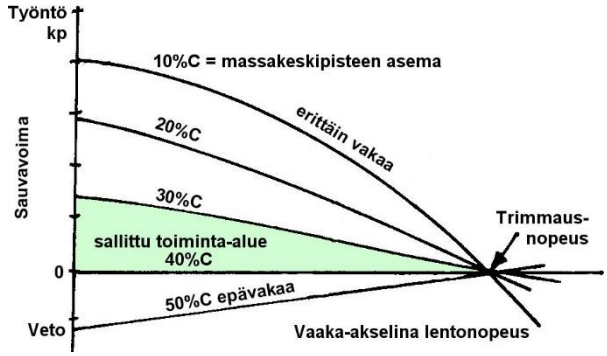
Massakeskipiste on määräävin tekijä, joka vaikuttaa koneen pituusvakavuuteen. Koska ohjaaja valvoo massakeskipisteen säilymistä koneen lentokäsikirjan ilmoittamalta alueella, on hän samalla avainasemassa määrättäessä koneen lennonaikaista vakavuutta. Yleisesti voidaan sanoa, että liian takana oleva massakeskipiste tekee koneen epävakaaksi. Liian edessä oleva massakeskipiste tekee koneen liian vakaaksi, mikä saattaa aiheuttaa sen, ettei korkeusperäsinteho riitä laskun loppuvetoon vaan istumisnopeus on liian suuri, mikä voi ylikuormittaa nokkatelinettä tai aiheuttaa kannuspyöräkoneen nokilleen menon. Kuvassa 77 on esitetty massakeskipisteen vaikutus koneen vakavuuteen. Kuvaajan ja C_L-akselin leikkauspiste osoittaa C_L :n arvon, jolla tasapainotila saavutetaan. On muistettava, että C_L :n arvo ei koskaan voi olla suurempi kuin $C_{L\text{maks}}$, joten leikkauspisteen on oltava tätä arvoa pienemmällä alueella. Toisaalta ei vakavuus saa olla liian suuri (kuvaaja jyrkkä), joten jäljelle jää varsin rajoitettu alue, missä massakeskipiste saa olla. Kuvan tapauksessa oikea paikka olisi noin 20% - 30% siiven etureunasta.

Havaitaan, että massakeskipisteen siirtyminen taaksepäin aiheuttaa epästabiilisuutta. Koska massakeskipistealueen sallittu vaihteluraja riippuu siiven keskimääräisestä leveydestä c, niin on kiinnitettävä erikoista huomiota kuormaukseen lennettäessä kapeasiipisellä koneella.

<u>Korkeusperäsinkulma ei muuta vakavuutta, koska $C_M(C_L)$-kuvaajan kaltevuuskulma ei muutu, mutta korkeusperäsimellä voidaan muuttaa tasapainotilaa vastaavan nostovoimakertoimen arvoa eli saadaan kone suoraan lentoon viritettynä lentämään nopeammin tai hitaammin.</u> Tämän väittämän paikkansa pitävyyden voi tarkistaa vaikka paperilennokilla.

Sauvavoiman riippuvuus painopisteestä

Aikaisemmin mainittiin painopisteen eli massakeskipisteaseman vaikuttavan vakavuuteen. Tarkasteltaessa massakeskipisteaseman vaikutusta sauvavoimaan todetaan, että vaikutukset ovat samantapaisia. Mitä vakaampi kone, sitä raskaammat ohjainvoimat. Kun kone käy erittäin epävakaaksi niin esimerkiksi työnnettäessä nokka painuu ja sauva pyrkii eteen päin lisäten nokan painumista entisestään. Tätä voidaan havainnollistaa seuraavalla kuvalla:



Kuva 78. Massakeskipisteen aseman vaikutus sauvavoimaan, kun lennetään trimminopeudesta poikkeavalla nopeudella. C = siiven keskileveys. Sallittu toiminta-alue vastaa koneen ohjekirjan mukaista painopisteen vaihtelualuetta.

Kuvasta 78 nähdään miten sauvavoima kasvaa, kun massakeskipiste siirtyy eteenpäin. Vastaavasti massakeskipisteen siirtyessä taaksepäin sauvavoima kevenee. Tämä onkin eräs tapa mitata lennon aikana koneen pituusvakavuus. Jos sauvavoimat ovat normaalia huomattavasti keveämpiä, voidaan varmuudella sanoa, että kone on kuormattu takapainoiseksi.

Sauvavoiman muuttuminen kiihtyvyyden vaikutuksesta

Ohjaintuntoa on totuttu pitämään tärkeänä osana koneen ohjattavuutta. Ilman ohjaintuntoa ohjaus käy epätarkaksi ja vaatii ennen kaikkea jatkuvaa näköhavaintoa ohjausliikkeen vaikutuksesta. Hyvän ohjaintunnon merkkinä on tarvittavan ohjainvoiman lisääntyminen samassa suhteessa kuin vaikutus. Sauvavoima kasvaa nopeuden ja kiihtyvyysmonikerran kasvaessa. Käytetään yleisesti sanontaa "sauvavoima per g" osoittamaan yhden g:n lisäykseen tarvittavaa sauvavoiman lisäystä. Normaali alue on esimerkiksi purjelentokoneella 0.5—3.0 kp/g ja moottorikoneella 1.0—5.0 kp/g. Nämä arvot saattavat vaihdella hyvinkin paljon riippuen muun muassa seuraavista tekijöistä:

Sauvavoimaa lisäävät tekijät:

- Koneen massakeskipisteen siirtyminen eteenpäin
- Koneen kärkivälin ja massan kasvu
- Peräsimen pinta-alan suureneminen
- Peräsimen leveyden lisäys
- Lentonopeuden kasvu
- Koneen rungon lyheneminen

Koneen koon ja painon kasvu johtavat väistämättä tarvittavan sauvavoiman kasvuun jopa yli ihmisen voimavarojen. Tällöin on pakko tinkiä ohjaintunnosta ja käyttää servolaitteita apuna. Servolaitteisiin on helppoa kytkeä täydellinen automaattiohjaus eli autopilot, joka vapauttaa ohjaajan kokonaan ohjaustyöstä. Tällaisia autopilotteja. on nykyisin mahdollista saada jopa pieniin yksimoottorikoneisiin.

Suuntavakavuus

Talojen katoilla olevat tuuliviirit ovat hyviä esimerkkejä erittäin suuntavakaista laitteista. Nehän kääntyvät hyvin nopeasti vallitsevan tuulen suuntaiseksi. Jos viirin poikkeuttaa sivuun, se palaa heti takaisin osoittamaan tuulen suuntaa. Lentokoneen tulisi myös palata mahdollisen häiriön jälkeen lentotilaan, Jossa ilmavirta puhaltaa suoraan edestä. Häiriöinä tulevat kysymykseen sivulta tulevat puuskat, äkillinen sivuperäsimen asennon muutos, siivekkeen käyttö jne. Häiriöille on ominaista se, että ilmavirtaus siirtyy sivuttaiseksi. Suuntavakavan koneen tulee palata takaisin puhtaaseen lentoon. Suuntavakavuudella on merkitystä oikean lentosuunnan säilyttämisen, sekä sivuluisun ja virheliikkeiden

oikaisemisen kannalta. On hyvin tavallista, että koneen nokka heilahtelee puuskaisella säällä edes-takaisin lentosuunnan molemmin puolin. Tätä heilahtelua voidaan hieman vaimentaa, mikäli sivuperäsin pidetään täysin paikallaan. Koska heilahtelun jaksoluku on kuitenkin verrattain suuri, ei ohjaaja ehdi kumota heilahtelua vastaliikkeillään. Erikoisen voimakkaana tällainen heilahtelu esiintyy lyhyt-runkoisilla kaksimoottorikoneilla. Edellä kuvatun nopean heilahteluliikkeen lisäksi on olemassa myös erittäin hidas heilahtelu, jonka jakso kestää useita minuutteja. Tämä liike on usein epävakaa ja yhdistyy koneen kallistumisen kanssa spiraaliliikkeeksi, josta tulee enemmän puhetta kallistusvakavuuden jälkeen.

Sivuluisu

Sivuluisussa kone lentää kallistettuna yläjalka painettuna suoraa tai kaarevaa lentorataa. Mikäli kone on suuntavakaa, se kääntyy jalan keskityksen jälkeen puhtaaseen kaartoon. Jalkavoima riippuu sivuluisukulman suuruudesta samalla lailla kuin sauvavoima kiihtyvyysmonikerrasta. Mitä suurempi on luisukulma, sitä suurempi on jalkavoiman tarve. Mikäli kuitenkin osoittautuu, että jalkavoiman tarve pienenee sivuluisukulman kasvaessa ja varsinkin, jos kone jää sivuluisuun, vaikka jalat vapautetaan polkimilta, on varmaa, että koneella ei ole riittävän turvallista sivuluisukäyttäytymistä vaan suunta-vakavuutta on lisättävä. Riittämätön suuntavakavuus saattaa johtaa voimakkaassa sivuluisussa tilanteen hallinnan menetykseen. Tästä syystä olisikin vältettävä hyvin voimakkaita sivuluisuja varsinkin laskukierroksessa ja ennen kaikkea laskusiivekkeet ulkona.

Suuntavakavuutta lisäävät seuraavat tekijät:

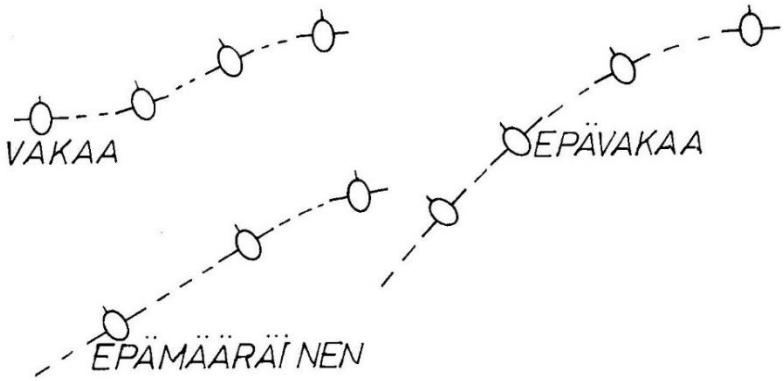
- Sivuvakaajan pinta-alan lisääminen
- Sivuvakaajan siirtäminen taaksepäin
- Sivuvakaajan rakentaminen alueelle, jossa ei esiinny haitallisia pyörteitä suurillakaan kohtauskulmilla.
- Rungon sekä siipien suuret massakeskitykset (ennen kaikkea moottorit ja polttoainetankit) olisi saatava lähelle koneen massakeskipistettä.
- Rungon sivupinta-alan pienentäminen massakeskipisteen etupuolella sekä lisääminen sen takapuolella.
- Selkäevän (Dorsal Fin) käyttäminen sivuvakaajan edessä parantaa merkittävästi vakavuutta ennen kaikkea niin voimakkaassa sivuluisussa, että sivuvakaaja sakkaa.

Moottorin vaikutus koneen suuntavakavuuteen

Moottorin vaikutus koneen suuntavakavuuteen aiheutuu ensi sijaisesti potkurin jättövirtauksesta, joka kohdistuu vinosti sivuperäsimeen ja saa aikaan kaartopyrkimyksen. Lisäksi potkurin hyrrävoimat, jotka esiintyvät korkeusohjainta käytettäessä, saavat aikaan nokan sivuttaista siirtymistä. Kaksi ja useampi-moottorisilla koneilla on tietysti aivan omaa luokkaansa olevat kaartopyrkimykset, mikäli joku moottori seisoo. Tällöin on koneen sivuperäsin kyettävä virittämään siten, että konetta voidaan ohjata suoraan. Tästä vaatimuksesta suurelta osalta johtuukin monimoottorikoneiden suhteettoman suuret sivuperäsimet verrattuna yksimoottorisiin. Pelkän potkurivirran aiheuttaman kaartopyrkimyksen kumoamiseen käytetään yleisesti moottorin vetoakselin suuntaamista noin 2°- 5° sivuun sekä käyttämällä sivuperäsimessä kiinteästi viritettyä trimmilaippaa.

Hyrrävoimista johtuvat kaartopyrkimykset on korjattava jalalla, jotta liikehtiminen olisi puhdasta. Kaartopyrkimyksen suunta määräytyy sekä potkurin pyörimissuunnasta, että siitä nouseeko nokka vai laskeeko.

Kallistusvakavuus



Kuva 79. Kone on kallistusvakaa, jos se oikenee kallistuttuaan itsestään vaakalentoon. Epämääräinen, jos kallistus jatkuu eikä muutu tai muuttuu satunnaisesti. Epävakaa, jos kallistus aiheuttaa lisäkallistusta.

Kallistusvakavuus ilmaisee koneen kyvyn palautua sivuluisusta vaakaasentoon. Kone on vakava, mikäli se palaa sivuluisusta vaakalentoon. Suuntavakavuudesta puhuttaessa todettiin, että sivuluisusta oikaistaessa koneen lentosuunta muuttuu. Kallistusvakavuutta tarkasteltaessa ei oteta huomioon suunnan muutosta, vaan pelkästään kallistuksen korjaantuminen. Ajateltakoon vaikka suunnan muutos eliminoiduksi jalan käytöllä. Kuvassa 79 esitetään kolme eri tapausta, joista ilmenee erilaiset vaihtoehdot.

Kallistusvakavuutta lisäävät:

- Koneen siiven V-kulman lisäys (Tärkein tekijä).
- Ylätaso on vakaampi kuin alataso. Vastaavan vakavuuden saavuttamiseksi olisi alatasokoneessa käytettävä noin 5° - 7° suurempaa V-kulmaa.
- Siiven nuolimuoto, mikäli siivellä on nostovoimaa.

Koneen kallistusvakavuuden vaatimus on yleensä pieni. Liiallinen staattinen kallistusvakavuus johtaa raskaaseen ja hitaaseen kaarto-ominaisuuteen sekä huonoihin dynaamisiin ominaisuuksiin varsinkin kallistus ja suunnanmuutosten yhteisvaikutuksen aikana. Liiallisen kallistusvakavuuden vähentämiseksi voimakkaasti nuolimuotoisissa koneissa käytetään alatasoa jopa negatiivisella V-kulmalla.

Dynaaminen kallistusvakavuus

Edellisessä kohdassa jätettiin huomiotta suunnanmuutokset, jotka aiheutuvat sivuluisun johdosta. Koska todellisessa sivuluisussa ei voida välttyä samanaikaiselta suunnanmuutospyrkimykseltä, on tarkasteltava lähemmin kallistuksen ja suunnan yhteisvaikutusta. Tärkeimmät koneen dynaamiseen kallistusvakavuuteen vaikuttavat seikat ovat seuraavat:

- Sivuluisun aiheuttama kallistusmomentti, jonka tulisi pyrkiä oikaisemaan luisua.
- Sivuluisun aiheuttama suunnanmuutospyrkimys.
- Kallistusnopeudesta johtuva suunnanmuutospyrkimys (Siivekevaikutus).
- Suunnan muutoksesta johtuva kallistuspyrkimys. Oikeata jalkaa painettaessa seuraa myös kallistuminen oikealle, joka johtuu vasemman siiven suuremmasta nopeudesta ja siten suuremmasta nostovoimasta.
- Aerodynaaminen sivuttaisvoima, joka aiheutuu sivuluisusta. Kallistusmomentti, joka johtuu suunnan muutosnopeudesta tai vaimennuksesta.
- Koneen massahitausmomentista pituus- ja pystyakseleiden suhteen.

Kuten luettelosta voidaan nähdä, ovat kallistus ja suunta hyvin voimakkaassa vuorovaikutuksessa toisiinsa. Eräissä koneissa onkin vuorovaikutusta lisätty kytkemällä sivuperäsin ja siivekkeet joustavasti toisiinsa, joten normaali tilanteessa vain toisen käyttäminen riittää puhtaan lennon suorittamiseen.

Edellä lueteltujen tekijöiden yhteisvaikutuksesta aiheutuu pääasiallisesti kolmenlaista dynaamista käyttäytymistä:

a) suuntaepävakavuutta

b) spiraaliepävakavuutta

c) ”Duch Roll”, joka on heilahtelua, missä kone sekä kallistelee jaksollisesti, että heiluu sivuttain tasapainoaseman molemmin puolin. Kallistus on aina vaiheen edellä suunnanmuutosta. Laivoilla tätä kutsutaan ”kiertokeinunnaksi”, mikä kuvaa erittäin hyvin tätä ilmiötä.

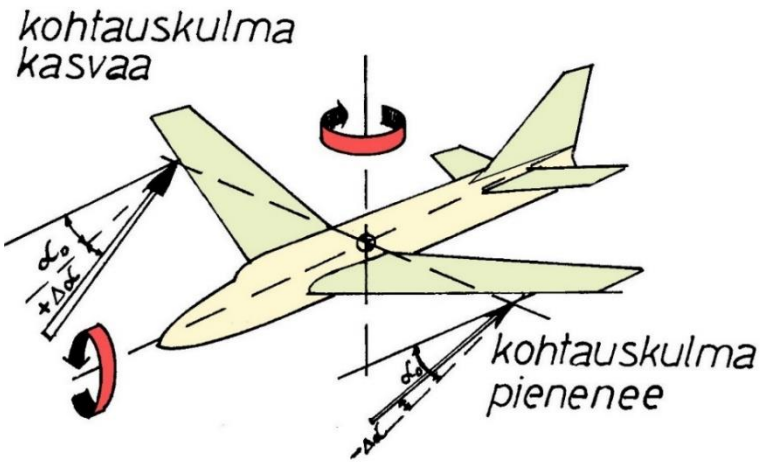
Suuntaepävakavuutta ei voida sallia, sillä silloin pieni sivuluisun alku kehittyisi suuremmaksi ja suuremmaksi kunnes kone kääntyisi kylki edellä tuuleen tai jopa särkyisi. Staattisen suuntavakavuuden lisääminen pienentää myös taipumusta dynaamiseen epävakavuuteen.

Spiraaliepävakavuutta esiintyy, mikäli staattinen suuntavakavuus on hyvin suuri verrattuna kallistusvakavuuteen. Kone on spiraaliepävakaa, jos ohjaimet pidetään paikallaan suoraa vaakalentoa vastaavassa asennossa ja kone alkaa hitaasti kallistua, nokka painuu vähitellen ja liike jatkuu yhä jyrkempänä, ellei sitä pysäytetä ohjaimin. Tämä osoittaa, että sivuvakaaja on ylimitoitettu V-kulmaan verrattuna. Spiraaliliike on luonteeltaan hyvin rauhallinen ja tapahtuu yleensä niin hitaasti, ettei sitä välttämättä edes huomaa. Kone aloittaa häiriön jälkeen hitaan spiraalin, joka vähitellen kehittyisi kierukaksi, ellei ohjaaja estäisi sitä. Spiraalin kehittyminen voi alkaa pienestä sivuluisusta.

Dutch Roll, joka on yleensä dynaamisesti vakaata heilahtelua, on siitä ikävä, että se saattaa häiritä hyvinkin pahasti ohjauksen tarkkuutta etenkin laskussa, jolloin koneen tulisi osua kapealle kiitoradalle. Heilahtelu tapahtuu sivusuunnassa, joten koneen sovittaminen radalle saattaa joskus tuntua ylivoimaiselta. Eräät matkustajakoneet ovat hyvin pahoja tässä suhteessa ja vaativat huolellista ohjausta laskussa. Dutch Roll on voimakkainta, jos koneessa on suuri V-kulma verrattuna suuntavakavuuteen. Lentokoneen suunnittelija on tilanteessa, jossa on valittava kahden pahan väliltä pienempi paha. Koneesta tulee joko spiraaliepävakaa ja lievä Dutch Rollaaja tai päin vastoin.

Syöksykierre ja sen oikaisu

”Ensin sauvaa ja sitten jalkaa, siitä se syöksykierre alkaa.”



Kuva 80. Syöksykierre alkaa, kun kaarron sisäpuolinen siipi menettää sakatessa nostovoimansa, jolloin sen vastus kasvaa, koneen nokka putoaa ja kone joutuu autorotaatioon. Syöksykierteessä nokka on yleensä yli 45° jyrkemmässä syöksyssä. Syöksykierteessä vajoamisnopeus pysyy samana useammankin kierteen aikana.

Vaikka syöksykierre ei enää nykyisillä koneilla muodosta samanlaista vaaraa kuin aikaisemmin, on ohjaajan tunnettava ja osattava tämän virheliikkeen luonne ja sen oikaisu.

Syöksykierre eroaa normaalista kierukasta tai kierresyöksystä siinä, että siihen liittyy aina suuri kohtauskulma ja tasaantuva vajoamisnopeus. Kierukassa ja kierresyöksyssä siipi ei ole sakkaustilassa ja nopeus voi kasvaa syöksyn aikana jopa yli sallitun syöksynopeuden mutta kone on ohjattavissa eli ylinopeuden voi estää ohjaimilla.

Koneen sakkausominaisuudet ja stabiliteetti hidaslennossa vaikuttavat sakkauksen alkamistapaan ja sen luonteeseen. Kuten on mainittu aikaisemmin, on edullista, että kone sakkaa siiven tyvestä alkaen mieluummin kuin siiven kärjestä. Tällöin sakkauksessa ei esiinny voimakasta kaatumispyrkimystä, josta

syöksykierre helposti alkaisi. Nykyisin voimassa olevien määräysten mukaan rakennetun koneen on oltava hallittavissa myös hidaslennossa sekä sakkauksesta oikaistaessa. Havainnollistettaessa sakkaavan koneen käyttäytymistä, voidaan olettaa koneen kallistuvan ja kaartuvan kuvan 80 mukaisesti.

Syöksykierre alkaa kohtauskulman kasvusta ja toisen siiven sakkauksesta. Sakanneen siiven nostovoima putoaa, jolloin kone kaatuu sakanneen siiven puolelle, nokka painuu alas yleensä yli 45° ja samalla kone joutuu autorotaatioon eli alkaa pyöriä voimakkaasti pystyakselin ympäri. Ohjainteho heikkenee useimmiten merkittävästi, mikä vaikeuttaa oikaisua. Jos syöksykierre alkaa uudestaan syöksystä oikaistaessa eli suurella g-voimalla, uusi sakkaus on erittäin äkäinen ja johtaa helposti uuteen, vastakkaissuuntaiseen syöksykierteeseen. Tämä on syytä pitää mielessä, kun oikaisee syöksykierteestä. Sakkaus- ja syöksykierrekäyttäytyminen on konekohtaista ja siksi on opeteltava tyyppikohtaisesti sakkauskäyttäytymisen luonne sekä miten sakkaus tunnistetaan ja syöksykierre oikaistaan.

Syöksykierteessä on tyypillistä, että koneen nokka on noin 45°-70° vaakatason alapuolella ja kone on 10° - 30° kallistuneena pyörimissuuntaan. Koneen nokka saattaa myös heilahdella syöksykulman molemmin puolin. Tätä heilahtelua voi käyttää hyväksi, mikäli oikaisussa tulee vaikeuksia. Ensin kasvatetaan heilahduksen laajuutta esimerkiksi korkeusperäsintä käyttäen ja sitten poistutaan kierteestä, kun nokka on alimmassa asennossaan. Monilla koneilla syöksykierre muuttuu jatkettaessa kierukaksi muutaman kierroksen kuluttua. Ellei tässä vaiheessa suoriteta oikaisua, kone saavuttaa hyvin nopeasti liian suuria nopeuksia ja saattaa jopa vaurioitua. Syöksykierteessä koneen nopeus ei sen sijaan kasva kovin suureksi, sillä sakkaus aiheuttaa suuren vastuksen ja kone jatkaa kierrettä vakionopeudella.

Oikaisu syöksykierteestä

Syöksykierre on koneen sakkaustilasta johtuva autorotaatio, joten kone on saatava pois sakkaustilasta ennen oikaisua.

Ensimmäisenä tehtävänä on sivuluisun keskittäminen antamalla vastajalkaa, kunnes kallistusmittarin kuula on keskellä. Toiseksi työnnetään nokkaa alas kohtauskulman pienentämiseksi ja koneen saamiseksi pois sakkaustilasta. Heti kun sakkaus loppuu, niin pyöriminen hidastuu ja loppuu. Kone jää syöksyyn, josta se on varovaisella vedolla oikaistava, ettei se sakkaisi uudelleen.

VASTAJALKAA - KUULA KESKELLE - TYÖNTÖ, pyöriminen loppuu - RAUHALLINEN VETO ja OIKAISU.

Oikaisu lattakierteestä

Syöksykierre saattaa kehittyä eräillä konetyypeillä vaaralliseksi lattakierteeksi, jonka oikaiseminen on kokeneellekin ohjaajalle vaikeaa. Lattakierre poikkeaa syöksykierteestä siinä, että kone vajoaa alle 45° kulmassa tai jopa lähes vaakasuorassa asennossa pyörien samalla tavalla kuin syöksykierteessä. Kone sakkaa täydellisesti aina ohjainpintoja myöten, joten ohjaimia saa heilutella aivan vapaasti ilman että tapahtuu mitään. Kuvaavaa lattakierteen oikaisun vaikeudelle ovat ohjeet, joita on annettu useissa lento-oppaissa. Ne neuvovat jättämään koneen, mikäli lattakierre ei parin ensimmäisen kierroksen jälkeen osoita oikenemisen oireita. Suomessa on tutkittu lattakierteestä oikaisua mm. PIK-15 koneella, ja saatu tähän mennessä ne kaikki oikenemaan, joskin kerran on jo ohjaajan vierestä hypätty laskuvarjolla kierteen kestäessä varsin matalalle. Lattakierre on koitunut kuitenkin monen koneen ja ohjaajan lopuksi. Siksi onkin sanottava, että oikaisun olisi tapahduttava jo ennen kuin kone on mennyt lattakierteeseen, koska lattakierre on elämän ja kuoleman kysymys.

Koska maassamme on kuitenkin käytössä eräitä koneita, joilla on taipumusta mennä pitkän syöksykierteen jälkeen lattakierteeseen, niin kerrottakoon tässä muutamia asioita, jotka vaikuttavat oikaisuun.

- Painopistettä olisi saatava siirtymään eteen päin esimerkiksi löysäämällä vöitä ja nojaamalla eteenpäin. Ei välttämättä paljon auta.
- Olisi pyrittävä löytämään sellainen ohjainten keskinäinen asento, että nokka alkaisi painua tai edes heilua ylös-alas, jotta pääsisi ensin syöksykierteeseen, jonka oikaisu on mahdollista. Ei ole paljon aikaa etsiä toimivaa ratkaisua.
- Mikäli moottori käy, niin hyrrävoimat pyrkivät joko nostamaan nokkaa tai laskemaan sitä riippuen pyörimisen suunnasta. Tämä on tehokkain tapa vaikuttaa oikaisuun ja on siksi koetettava tarkkailla moottorin peräyttämisen vaikutusta. Mikäli kaasun avaaminen painaa nokkaa alaspäin on siitä apua oikaisussa. Valitettavan usein kuitenkin moottori pysähtyy lattakierteen aikana, johtuen keskipakovoiman vaikutuksesta polttoainejärjestelmään, joten tämäkin keino voi olla kyseenalainen. Elleivät nämä keinot tuota minkäänlaista tulosta, on todella jätettävä kone, jos se on mahdollista ja laskuvarjo on mukana.

Kysymyksiä

1. a) Staattisen, b) dynaamisen vakavuuden ehtona on, että kone pyrkii palaamaan kohti tasapainotilaa, jos se on siitä poikkeutettu.
   Vast.: molemmat väittämät pitävät paikkansa.
2. Kone on sitä vakavampi a) staattisesti, b) dynaamisesti, mitä voimakkaammin se pyrkii palaamaan kohti tasapainoasemaa.
   Vast.: staattisesti.
3. Voiko kone olla dynaamisesti vakava, ellei se ole staattisesti vakava?
   Vast.: ei.
4. Voiko kone olla staattisesti vakaa, ellei se ole dynaamisesti vakaa?
   Vast.: voi. Tällöin on tuloksena vaimenematon värähtely tasapainoaseman kahden puolen. Vrt. heiluri.
5. Mitkä ovat koneen trimmattavuuden edellytykset?
   Vast.: koneen on oltava staattisesti ja dynaamisesti vakaa.
6. Koneen ohjattavuudella tarkoitetaan lentokoneen _____? vastata ohjainliikkeisiin ja _____? haluttu lentotila.
   Vast.: kykyä saavuttaa.
7. Miten koneen ohjattavuuden parantaminen vaikuttaa stabiilisuuteen?
   Vast.: se yleensä heikentää stabiilisuutta.
8. Miten korkeusperäsinkulma vaikuttaa koneen stabiilisuuteen?
   Vast.: korkeusperäsimellä voidaan muuttaa nostovoimakertoimen arvoa, mutta ei koneen vakavuutta.

1 0. Miten sauvavoima muuttuu, kun painopiste siirtyy eteenpäin ja kone trimmataan uudestaan?
   Vast.: sauvavoima kasvaa.

ERITYISKYSYMYKSIÄ

Tämä jakso ei sisälly lentäjän tai mekaanikon lupakirjan vaatimuksiin, mutta koskee monia aerodynamiikkaan liittyviä kysymyksiä, joita tulee esiin käytännössä.

Jakso käsittää keinoja, joilla parannetaan koneen tai sen osan aerodynaamisia ominaisuuksia.

Suoritusarvoja parantavia ratkaisuja

Siiven muotoilu

Siiven kärjen muotoilu

Vortex-generaattorit

Rajakerrosaidat

Turbulaattori

Muotosuojukset (pyörät)

Wingletit

Lentojarrut

Siiveketyypit

Jäätävät olosuhteet

- Jäätyminen maassa
- Ilmassa siivet, kaasutin, korkeusvakaaja.

Taitolentoliikkeitä

Koneen trimmaus ja trimmit

Purjelentäjille

Profiilin ominaisuudet. Syventävää tekstiä.

Käytetyt merkinnät

Aerodynamiikan oppikirjassa käytetyt merkinnät:

A	=	pinta-ala, sivusuhde
a	=	kiihtyvyys
A.C	=	aerodynaaminen keskiö
b	=	siiven kärkiväli
c	=	siiven jänne
$\bar{c}$	=	siiven keskimääräinen jänne
C_D	=	vastuskerroin
C_L	=	nostovoimakerroin
C_M	=	momenttikerroin
C_L/C_D	=	liitosuhde
D	=	vastus
D_i	=	indusoitu vastus
D_o	=	haitallinen vastus
F	=	voima
g	=	maan vetovoiman kiihtyvyys = 9,81 m/s^2
H	=	korkeus
H_D	=	tiheyskorkeus
L	=	nostovoima
L/D	=	liitosuhde
M	=	momentti
m	=	massa
n	=	kiihtyvyysmonikerta
P	=	paine, teho
p	=	paine
P_o	=	1013,2 mb
q	=	kineettinen paine
R	=	toimintamatka, säde
S	=	siipipinta-ala
s	=	matka, etäisyys
T	=	työntövoima, lämpötila
t	=	aika, profiilin paksuus
T_o	=	15°C
V	=	lentonopeus
v	=	paikallinen nopeus
V_s	=	sakkausnopeus
V_{so}	=	vaakalennon sakkausnopeus
W	=	koneen paino
x, y, z	=	koordinaatit
α	=	kohtauskulma
β	=	lapakulma, V-kulma
γ	=	nousukulma
δ	=	P/Po = painesuhde
η	=	viskositeetti, hyötysuhde
Θ	=	T/To = lämpötilasuhde
Λ	=	nuolikulma
λ	=	trapetsisuus
ν	=	kinemaattinen viskositeetti
π	=	3,14
ϱ	=	ilman tiheys
ϱ_o	=	1,225 kg/m^3
σ	=	ϱ/ϱ_o tiheyssuhde