



FLYGETEORI

Principles of Flight (PoF)

FAGKODE: 5

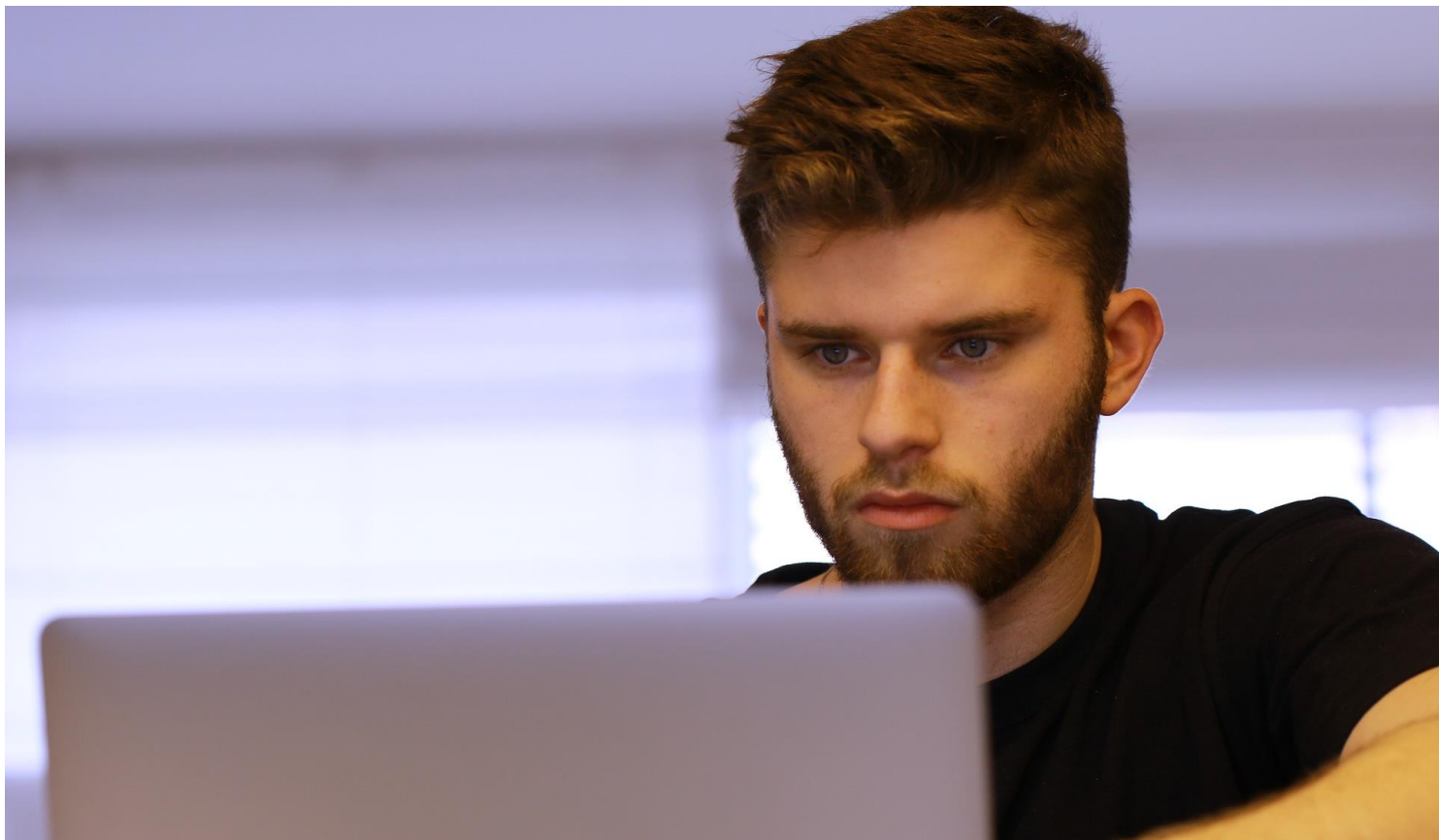




Del 0 Innledning

Mål for undervisningen i Flygeteori

- Å gi kunnskap om
 - aerodynamikk og de fysiske prosesser som skaper løft og motstand
 - flyets stabilitet og kontroll
 - flyets manøvrering
- Spesielt med tanke på flysikkerhet og for å unngå hendelser, skader og ulykker



Forutsetninger

- Motiverte og forberedte elever!
- Som har lest eller leser gjennom pensum-litteraturen parallelt med klasseroms-undervisningen
- Flyskolen følger pensum som beskrevet i Sportsfly-seksjonens nettside under skoledokumenter



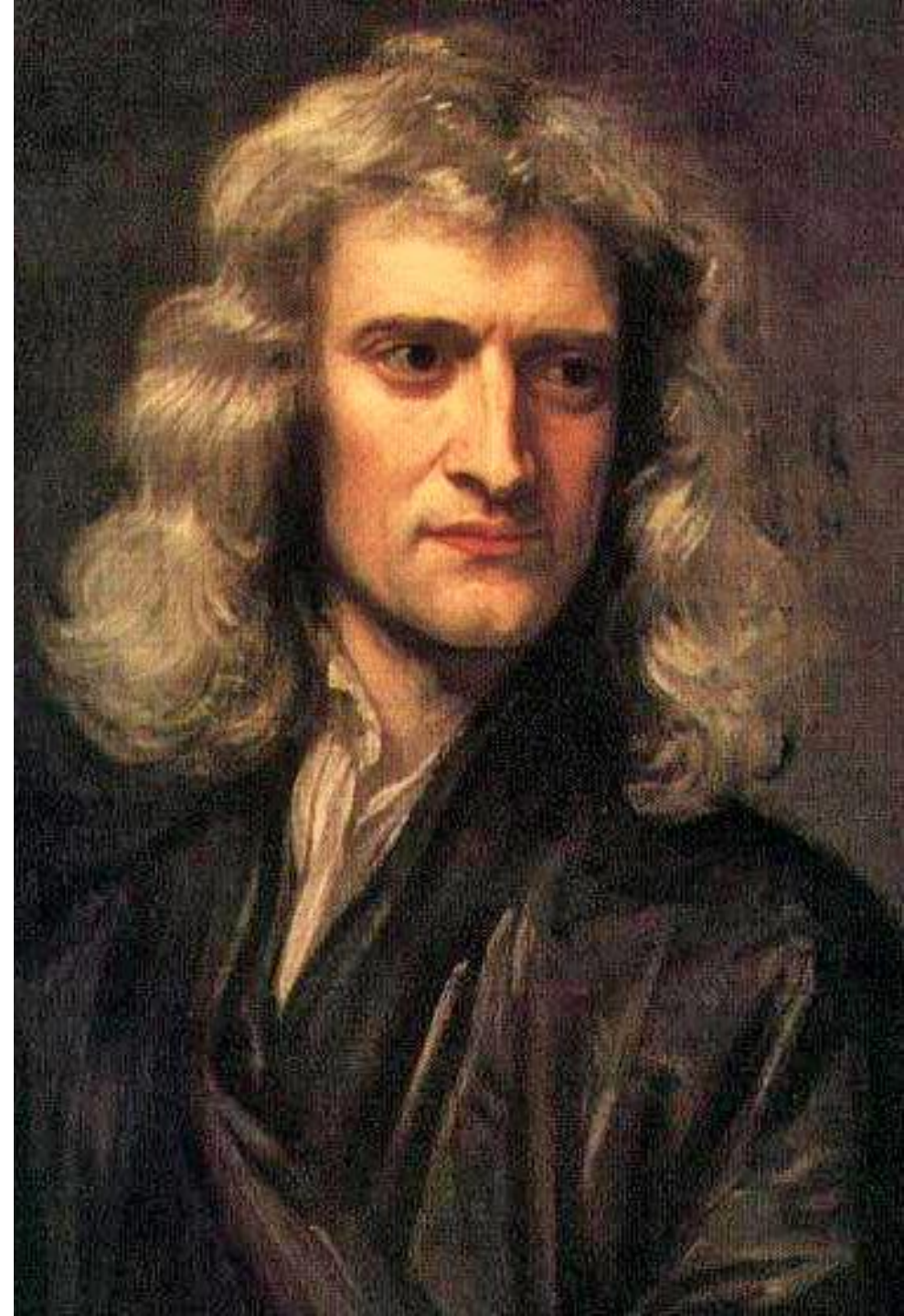
Del 1 Subsonisk aerodynamikk



Grunnleggende prinsipper, lover og definisjoner

Newtons lover

1. En gjenstand blir i ro eller beveger seg med konstant fart hvis ingen kraft påvirker gjenstanden eller hvis summen av kreftene er null
2. Summen av kreftene som virker på et legeme er lik produktet av legemets masse og dets akselerasjon og akselerasjonen har samme retning som summen av kreftene
3. For hver reaksjon er det en motreaksjon

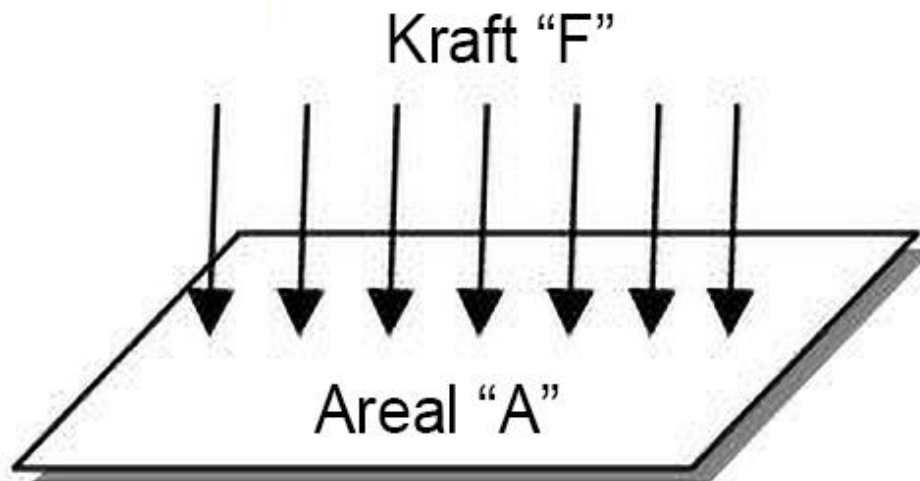


Treghet (inertia)

- I fysikken er treget eller inertie en egenskap som all materie har
- Treghet betyr at alle legemer vil motsette seg endringer i bevegelsestilstanden

Statisk trykk

- Statisk trykk er atmosfæretrykket det vil si vekten av atmosfæren
- Det virker likt i alle retninger
- Er forholdet mellom kraften (F) og arealet av flaten som det virker vinkelrett på (A). Forkortelsene som brukes for statisk trykk er P, p og Ps.
- Det tas ikke hensyn til noe bevegelse i luften



$$\text{Trykk "p"} = \frac{F}{A}$$

Dynamisk trykk

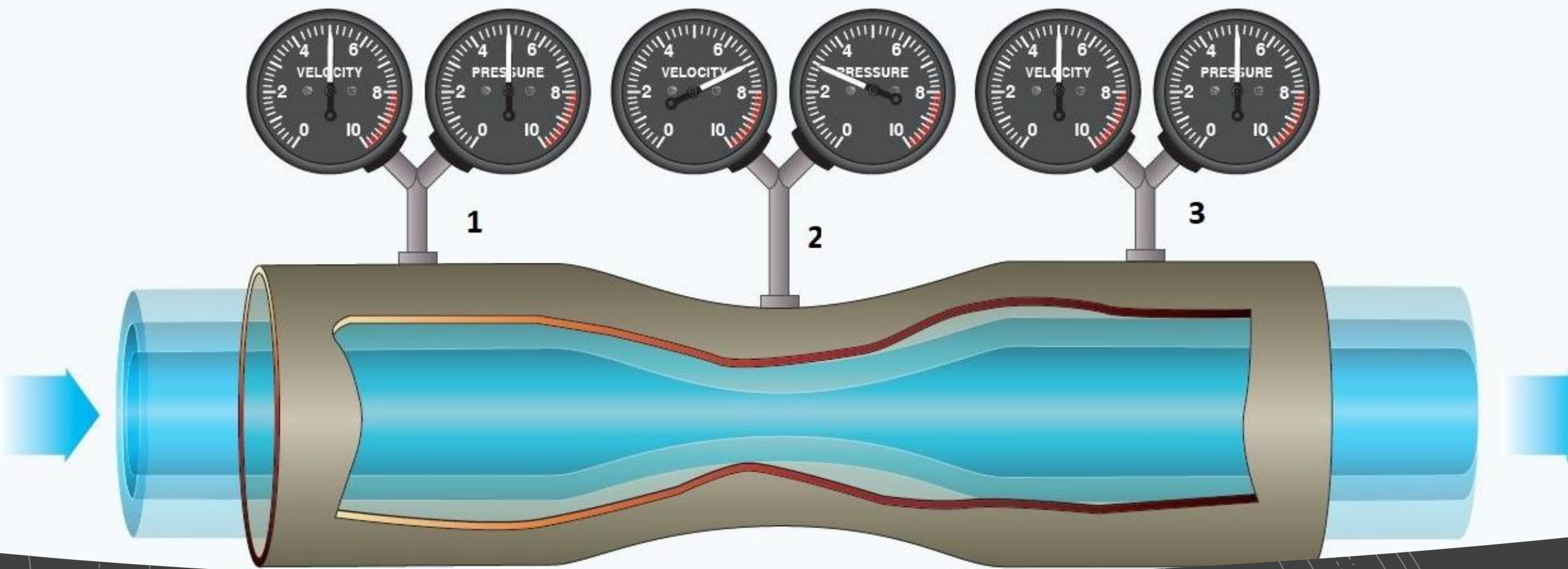
Dynamisk trykk er når luft i bevegelse treffer en flate og utøver et trykk. Forkortelsen som brukes for dynamisk trykk er q og P_d

Totaltrykk

Totaltrykket («total pressure») er summen av P_s og P_d og forkortes P_t eller P_{tot}

Bernoullis lov

- Bernoullis lov gjelder under forutsetning av at luften ikke presses sammen (den er inkompressibel), ikke har friksjon (ikke er viskøs) ei heller er turbulent (er strømlinjet) og forklarer hvordan trykk i en luftstrøm varierer med hastigheten
- Summen av statisk og dynamisk trykk er konstant i en og samme luftstrøm



Bernoulli og venturierøret

1. En viss hastighet og statisk trykk
2. Innsnevringen gjør at hastigheten øker og da må statisk trykk gå ned for at summen skal være konstant
3. Røret utvider seg og hastigheten går ned, da må statisk trykk øke for at summen skal være konstant

Løft kan forklares

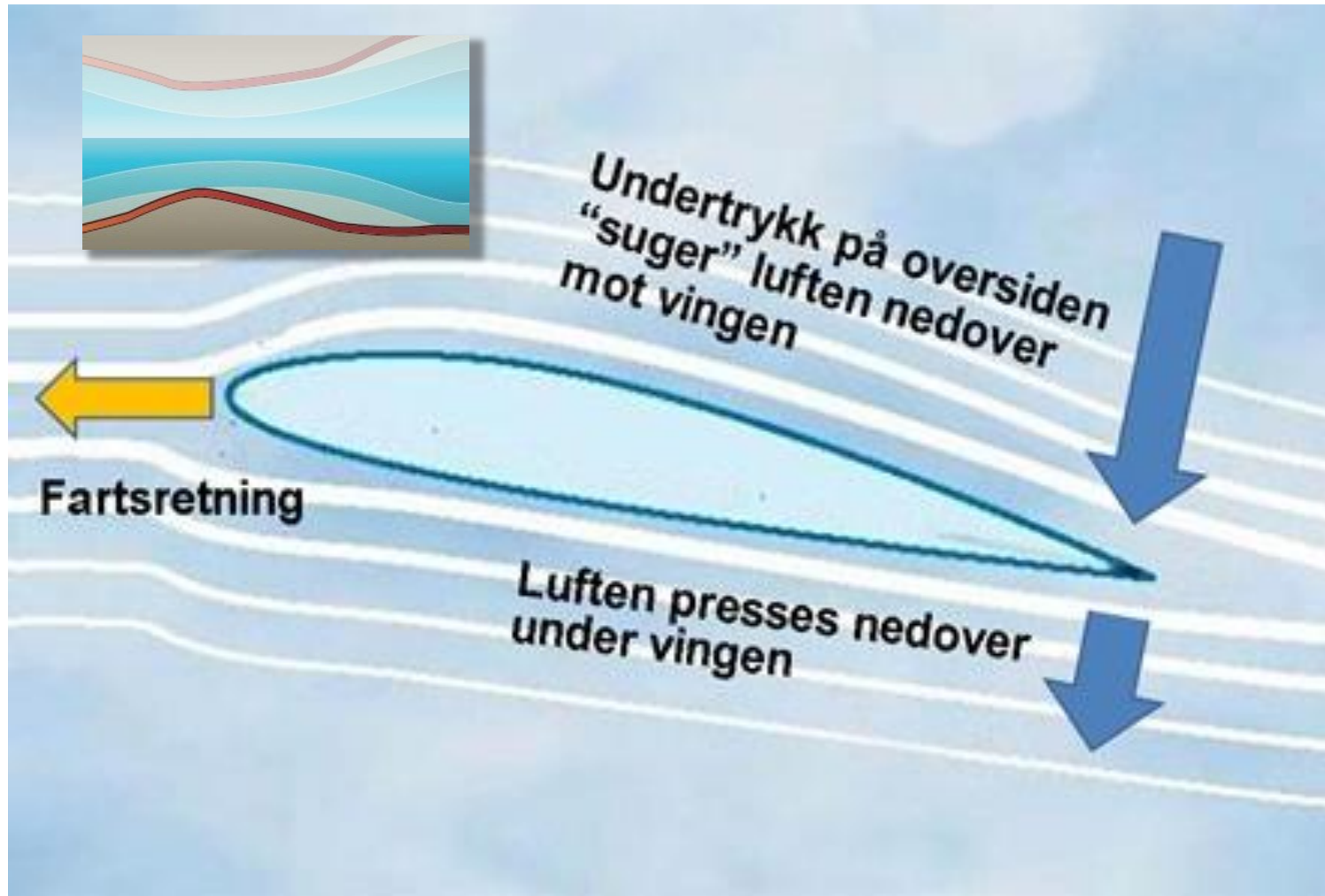
1. Delvis ved hjelp av Bernoullis lov hvor vi ser på vingeprofilets overside som den ene delen av røret og den luften som ikke blir påvirket av vingeprofilet, som den andre siden, og
2. Ved hjelp av Newtons annen og tredje lov siden luften, når den beveger seg rundt vingeprofilet og over baksiden, tvinges nedover og derfor skyver profilet oppover

Bernoullis lov

Vingens overside vises her som den nedre delen av et venturirør

Framkanten og oversiden av vingen er den "innsnevringen" som skaper et statisk undertrykk

Dette undertrykket på oversiden suger en stor luftmasse nedover mot bakkanten når vingen passerer



Newtons 2. lov

«Kraft er lik masse ganger aksellerasjon»

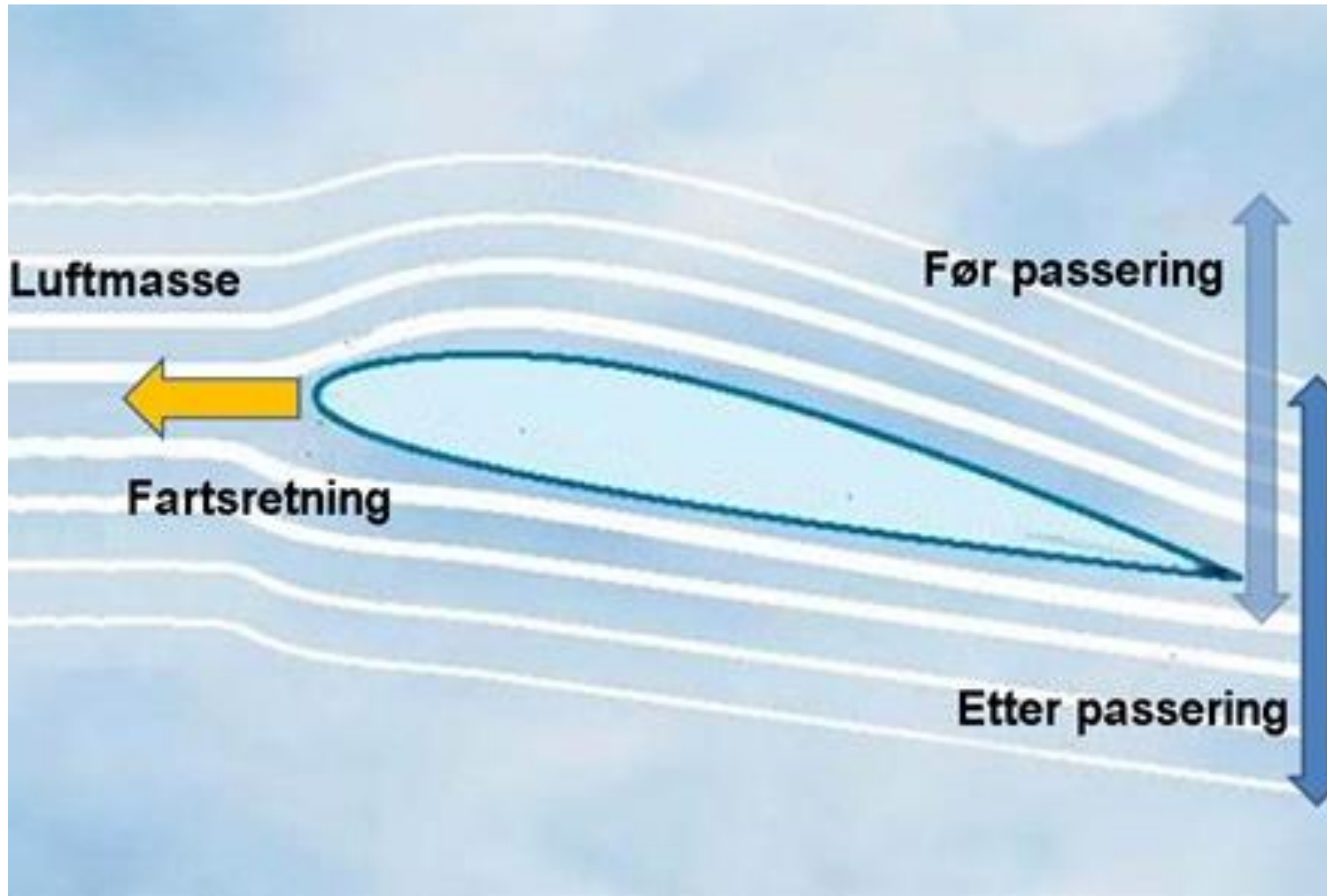
Når vingen passerer en luftmasse så flyttes luften et stykke ned på den tiden det tar vingen å passere.

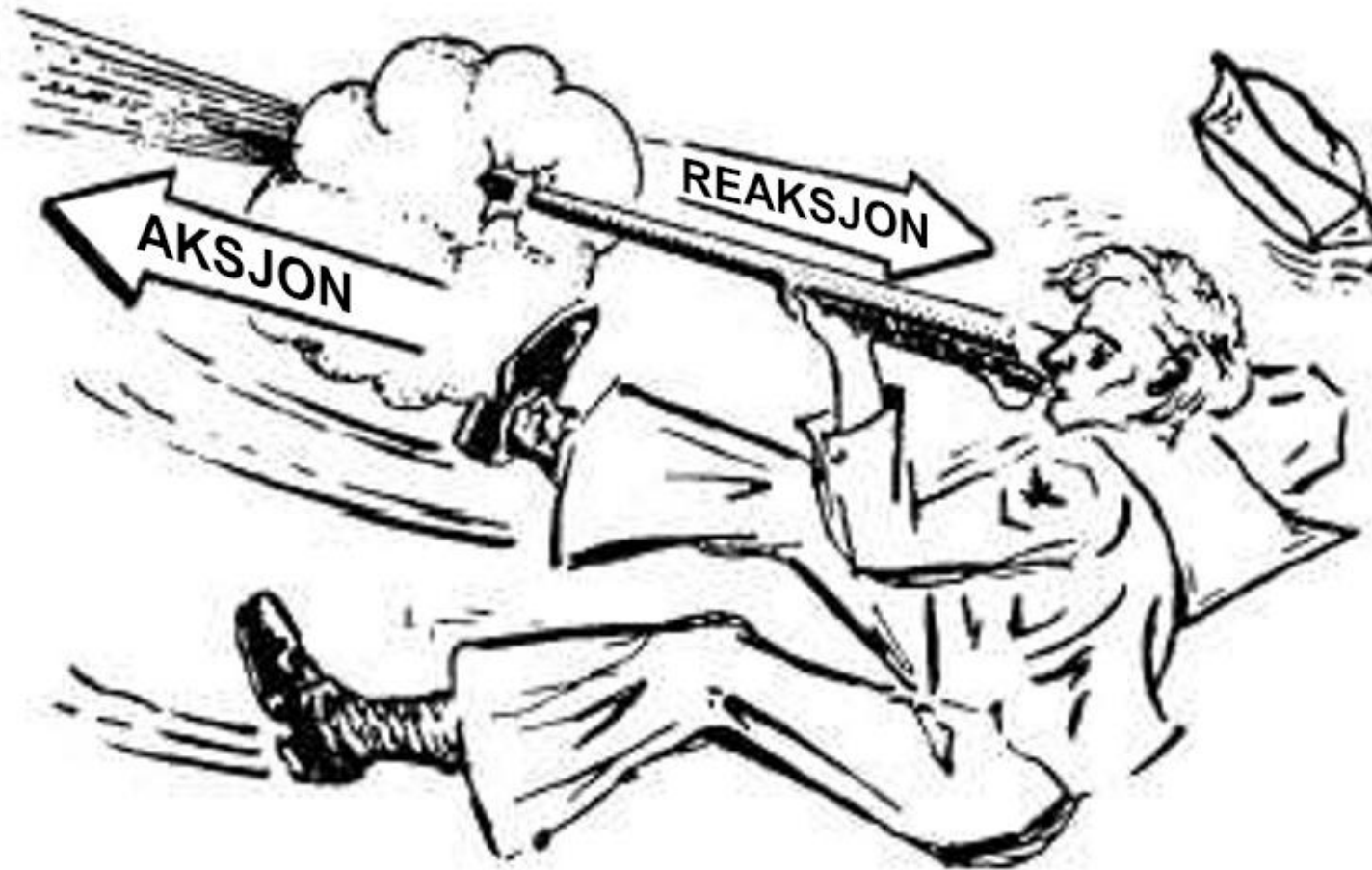
Flyttingen aksellerer luftmassen i hele vingespennet, og vingen utfører med dette en kraft på luftmassen rettet nedover.

Kraften (F) er lik masse (m) ganger aksellerasjon (a):

$$F = m \times a$$

Jo større hastighet, desto større aksellerasjon og mer kraft skapes.

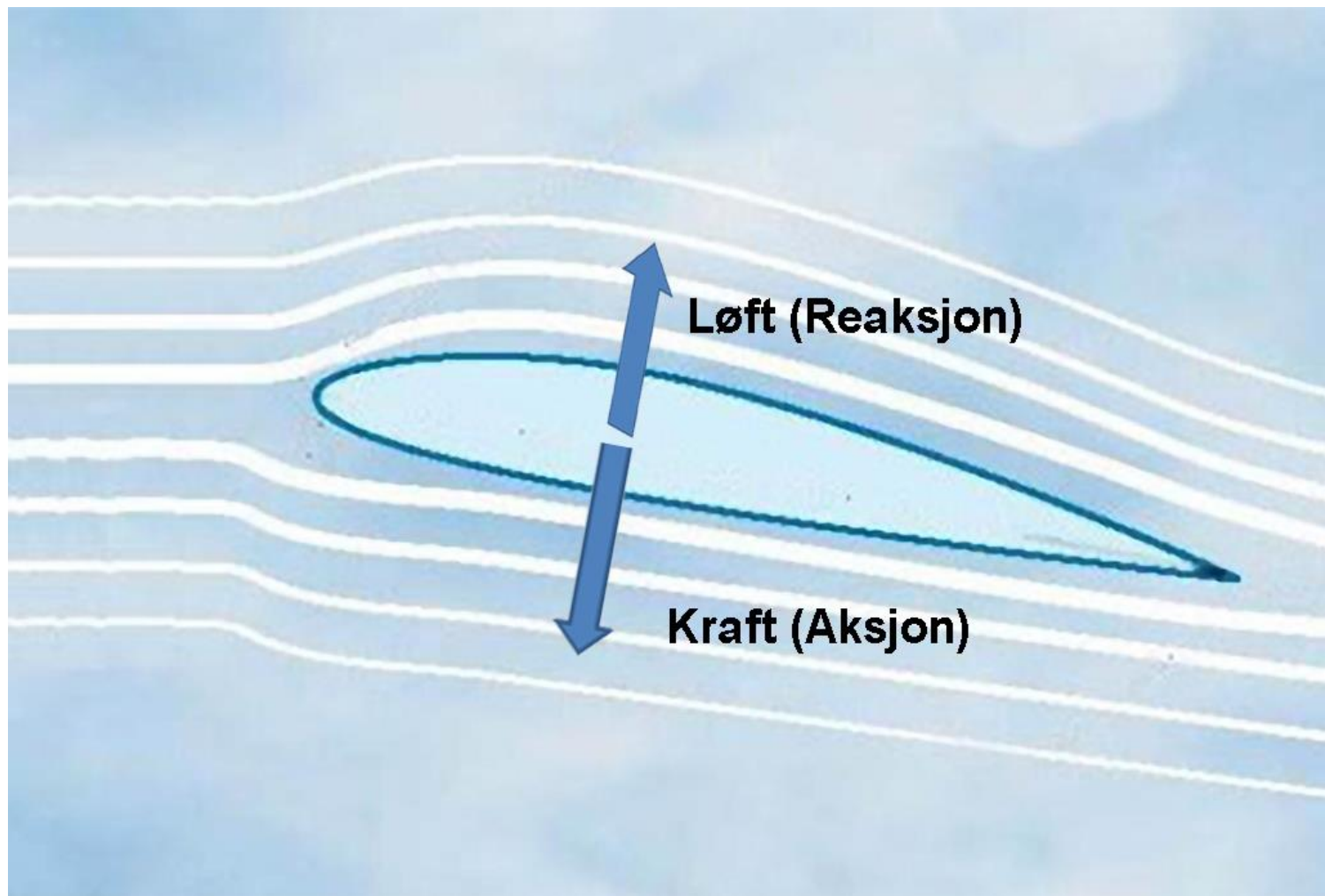




Newtons 3. lov

«Kreftene mellom to gjenstander som påvirker hverandre er i par er like store og motsatt rettet»

Vi sier også at en «aksjon» vil gi en tilsvarende og motsatt rettet «reaksjon»



Newtons 3. lov

Det betyr at vingen får et løft som «Reaksjon» tilsvarende den kraften vingen bruker på «Aksjonen» med å flytte luftmassen nedover under passasjen



Flate vinger

Det er også flere andre faktorer som får vingen til å «flyte eller surfe» i luften i den retningen som gir minst motstand.

For eksempel kan en helt flat vinge gli langt gjennom luften fordi den finner minst motstand i den retningen.

På den annen side vil vingen yte stor luftmotstand og bremse kraftig dersom den skulle falle loddrett mens de lå i horisontal stilling.



Luftstrømning – grunnleggende aerodynamikk

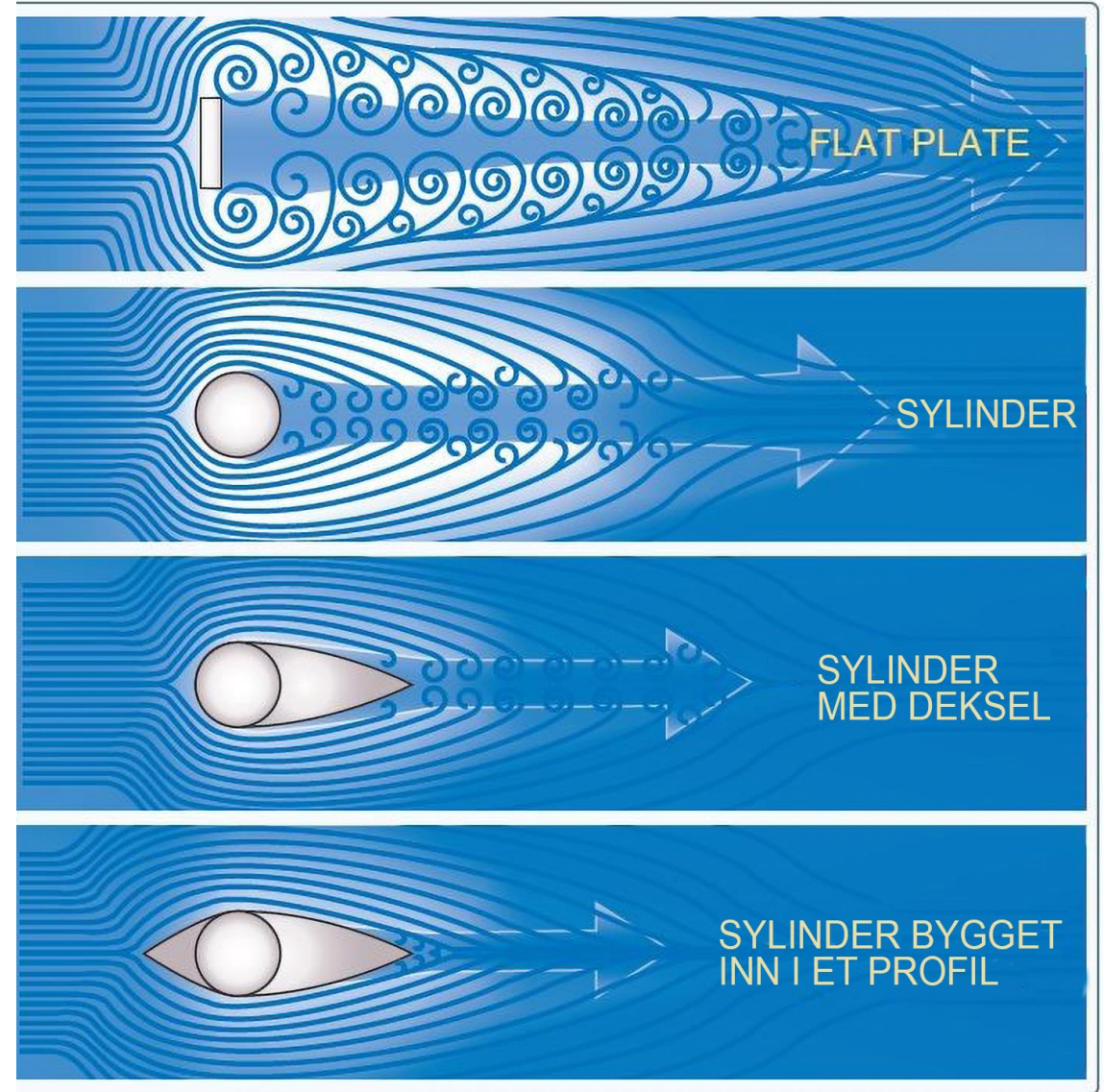


NORGES LUFTSPORTFORBUND

Strømlinjer

- Strømlinjer er linjer som viser retningen til en væske- eller gass-strøm
- Når gassen eller væsker strømmer uten turbulens, kaller vi det for laminær strømning. Da er linjene glatte
- Dersom strømmen er turbulent, har strømmen virvler
- Hvordan en gass eller væske strømmer forbi et objekt er helt avhengig av hvordan objektet er utformet
- Hvis strømlinjene følger objektet, kalles det for strømlinjeformet
- Når strømlinjene ligger tett sammen viser de høye hastigheter, og når de ligger langt fra hverandre, lavere hastigheter

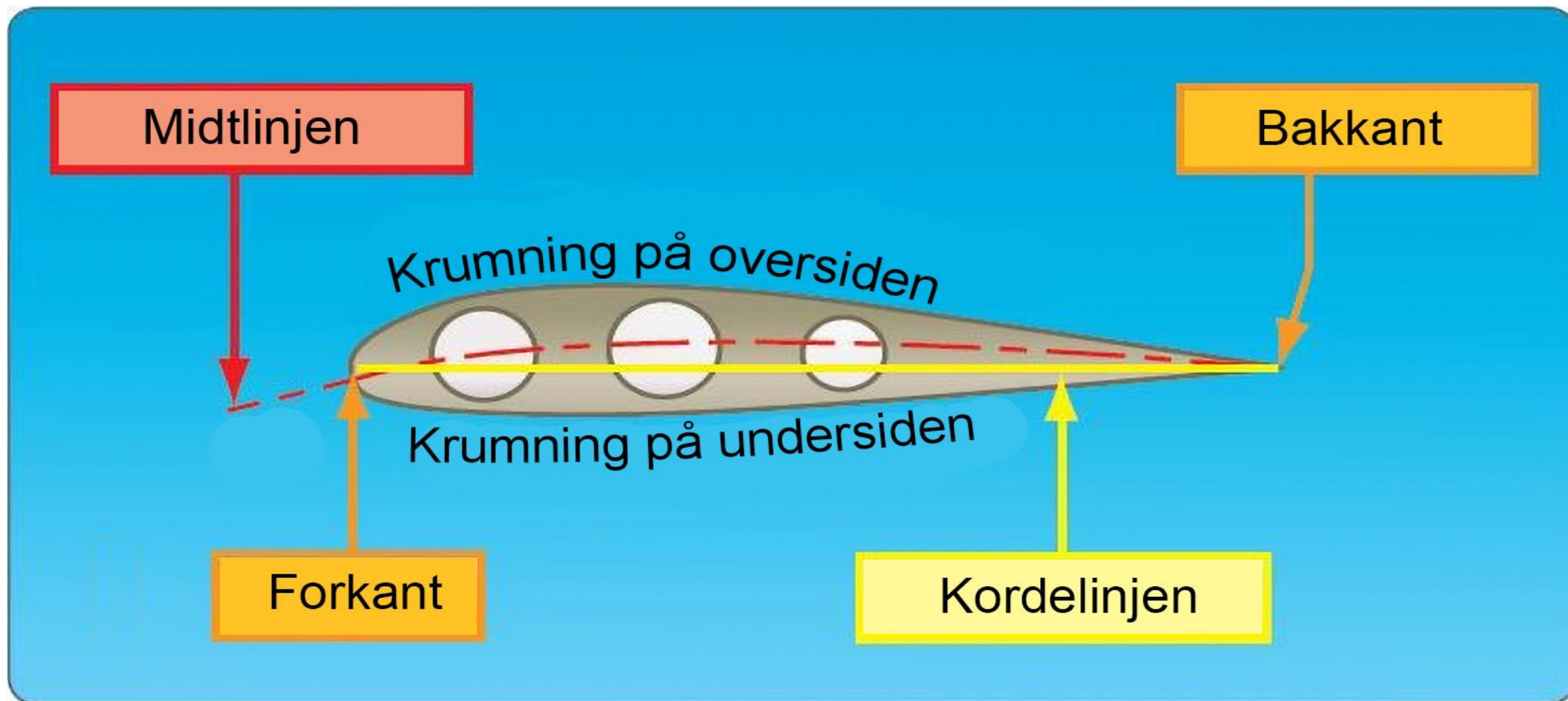
Strømlinjer



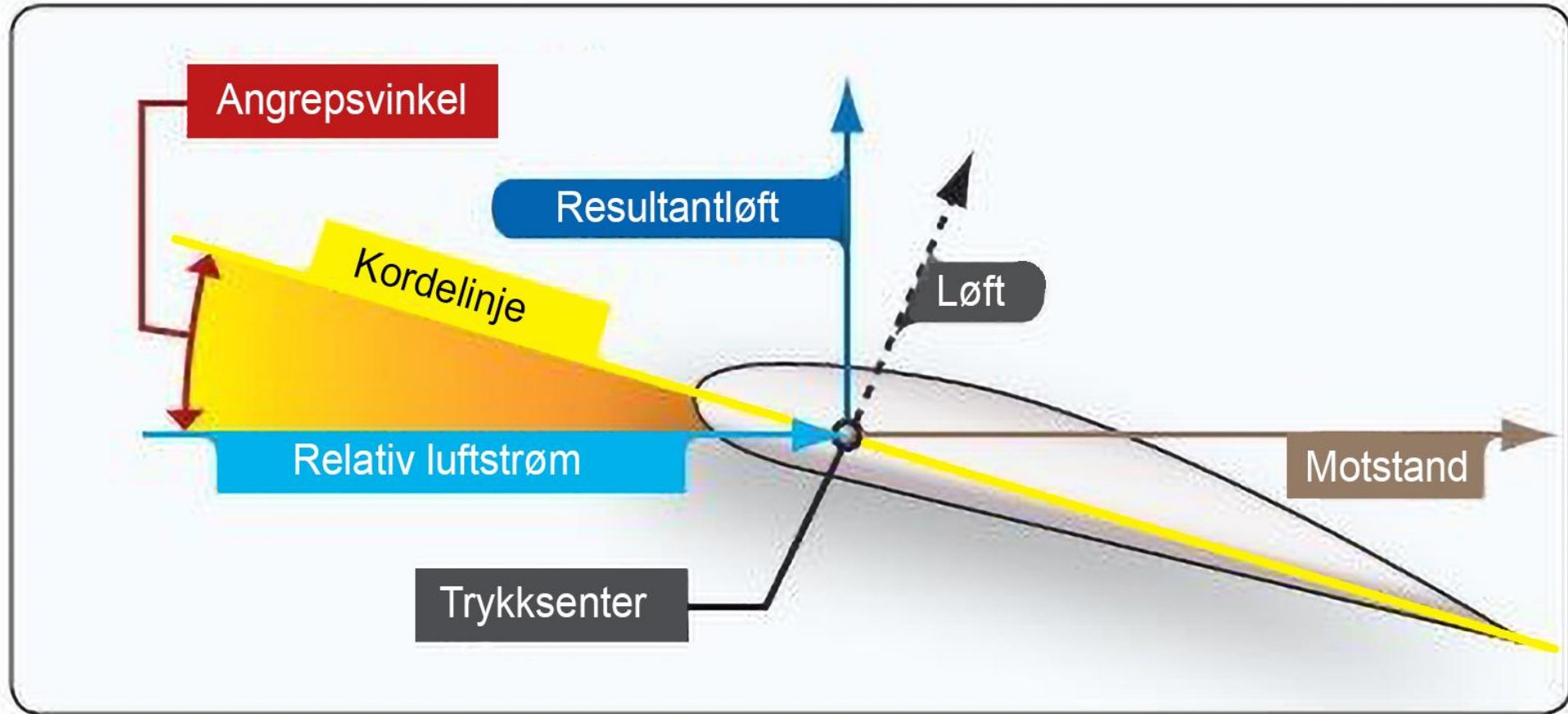
To- dimensjonal og tre- dimensjonal strømning

- Når vi snakker om en to-dimensjonal strømning, tenker vi på hvordan luften strømmer rundt et profil av vingen
- Et profil er et tverrsnitt av en vinge
- Når vi snakker om en tre-dimensjonal strømning, tenker vi på hvordan luften strømmer rundt en vinge. Da eksisterer det også strømmer som virker på tvers av vingespennet

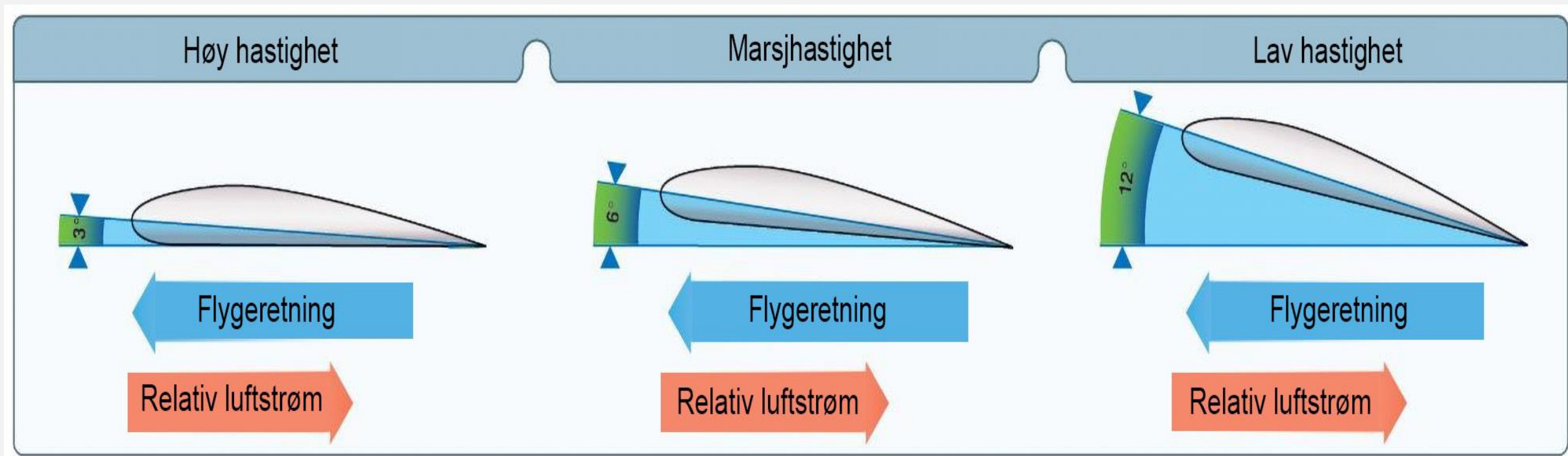
Profil



To-dimensjonal luftstrømning



Angrepsvinkel, relativ luftstrøm og hastighet



Angrepsvinkelen er vinkelen mellom vingens korde og retningen på relativ luftstrøm

Vingevridning (twist)

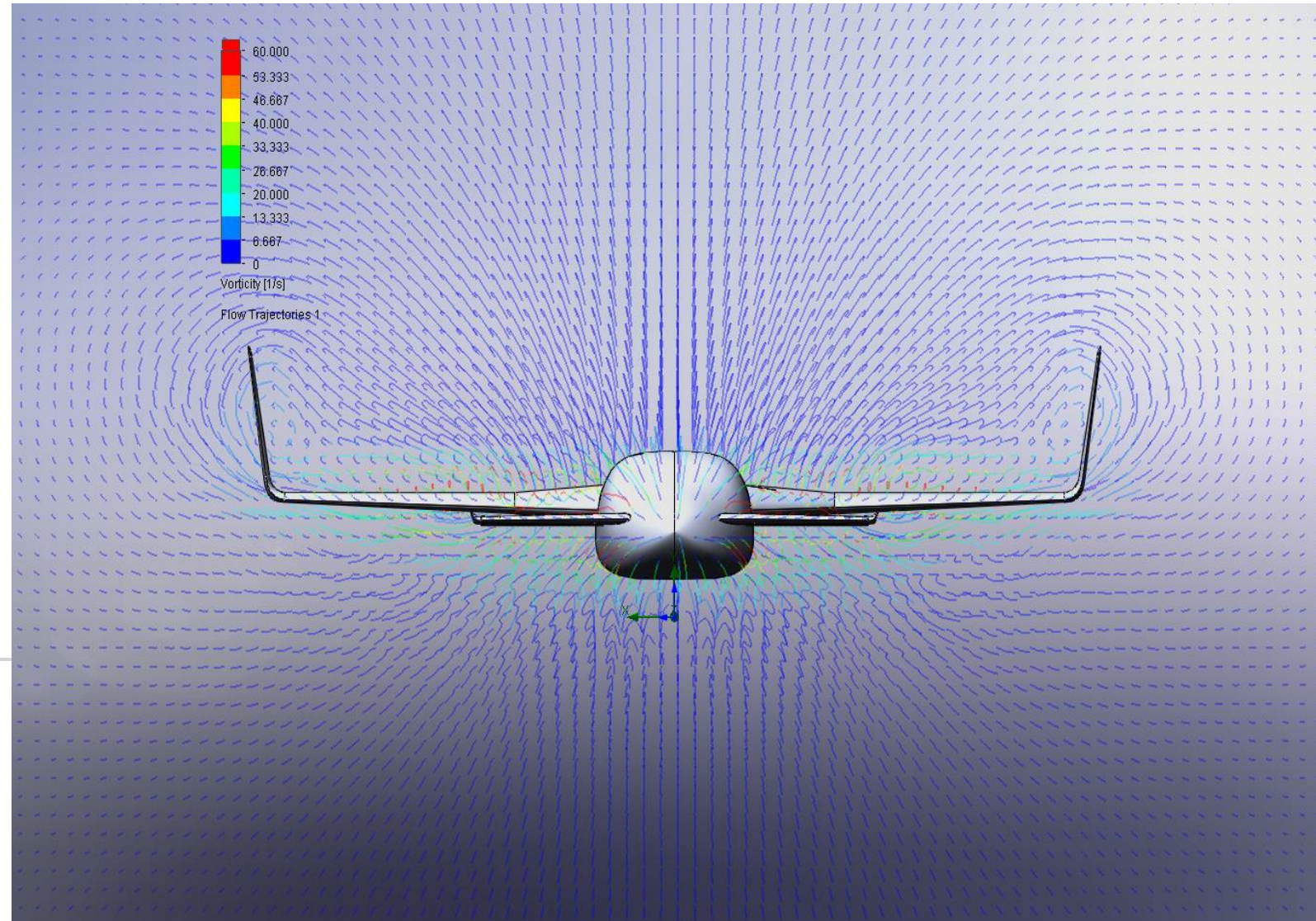
- Geometrisk
- Aerodynamisk

Vingevridning (engelsk Washout) gir bedre steileegenskaper da luften begynner å slippe vingen ved roten, slik at vi har luft over balanserorene (som sitter ytterst på vingen) så lenge som mulig

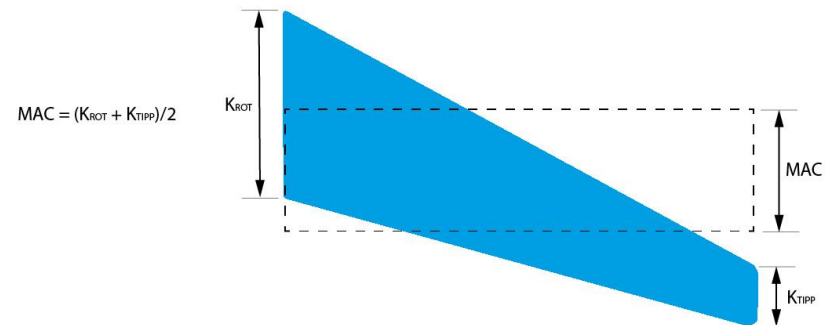
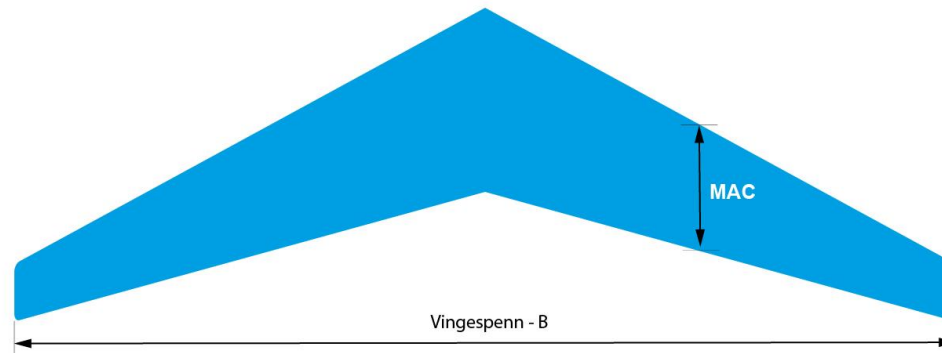
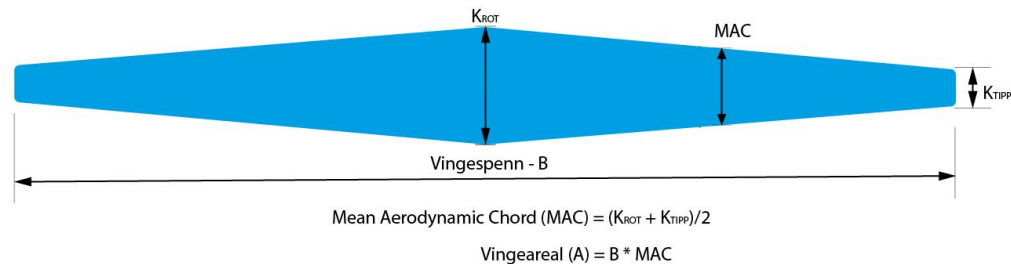
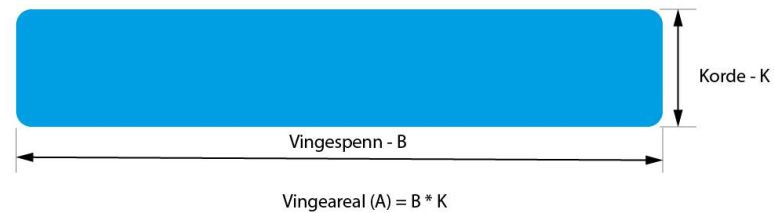
- Med en geometrisk vridning, er **monteringsvinkelen** ved vingetippen lavere enn monteringsvinkelen ved vingeroten.
- Med en aerodynamisk vridning brukes det **forskjellige profilformer** fra vingeroten til vingetippen.



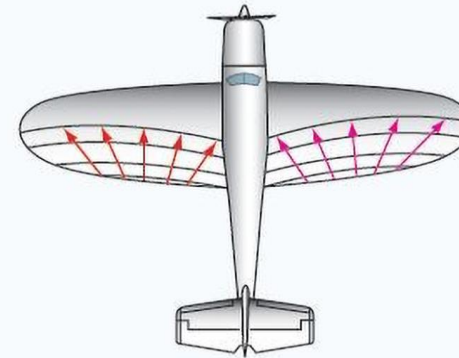
Tre- dimensjonal strømning



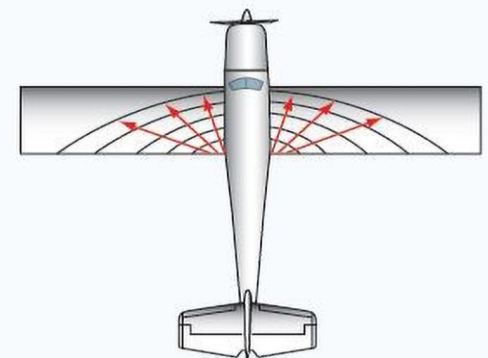
Vinge og begreper



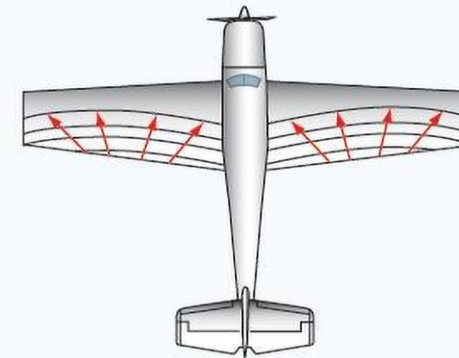
Forskjellige vingeformer



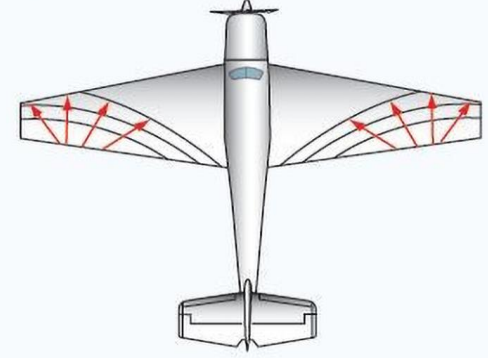
Elliptisk vinge



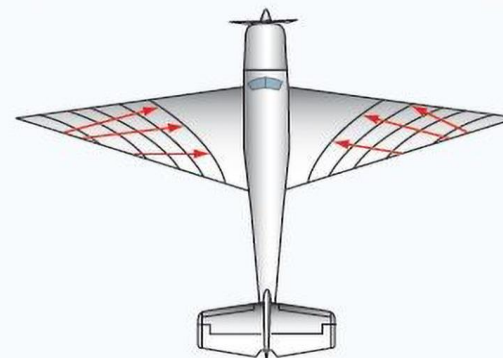
Rektangulær vinge



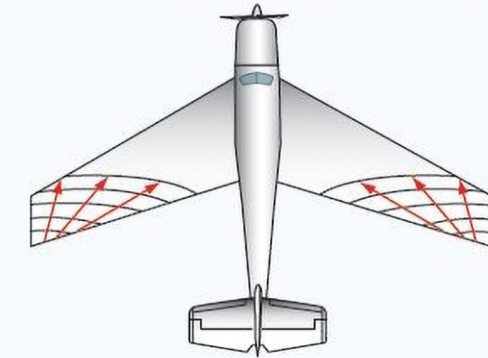
Moderat avsmalende vinge



Sterkt avsmalende vinge



Spisset vinge



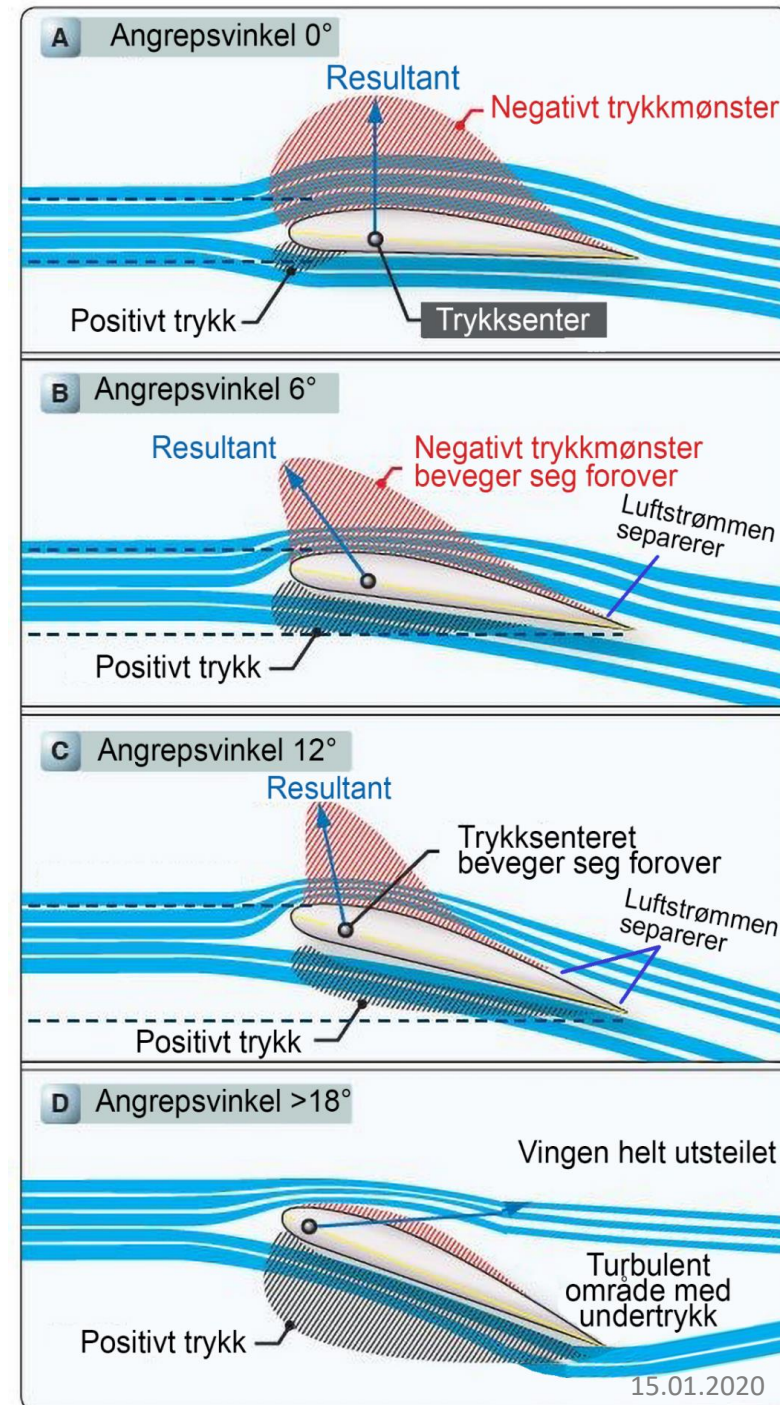
Pilformet vinge

Endring av angrepsvinkelen og flyting av trykksenteret

Trykksenteret er resultantkraften av trykkfordelingen rundt et vingeprofil

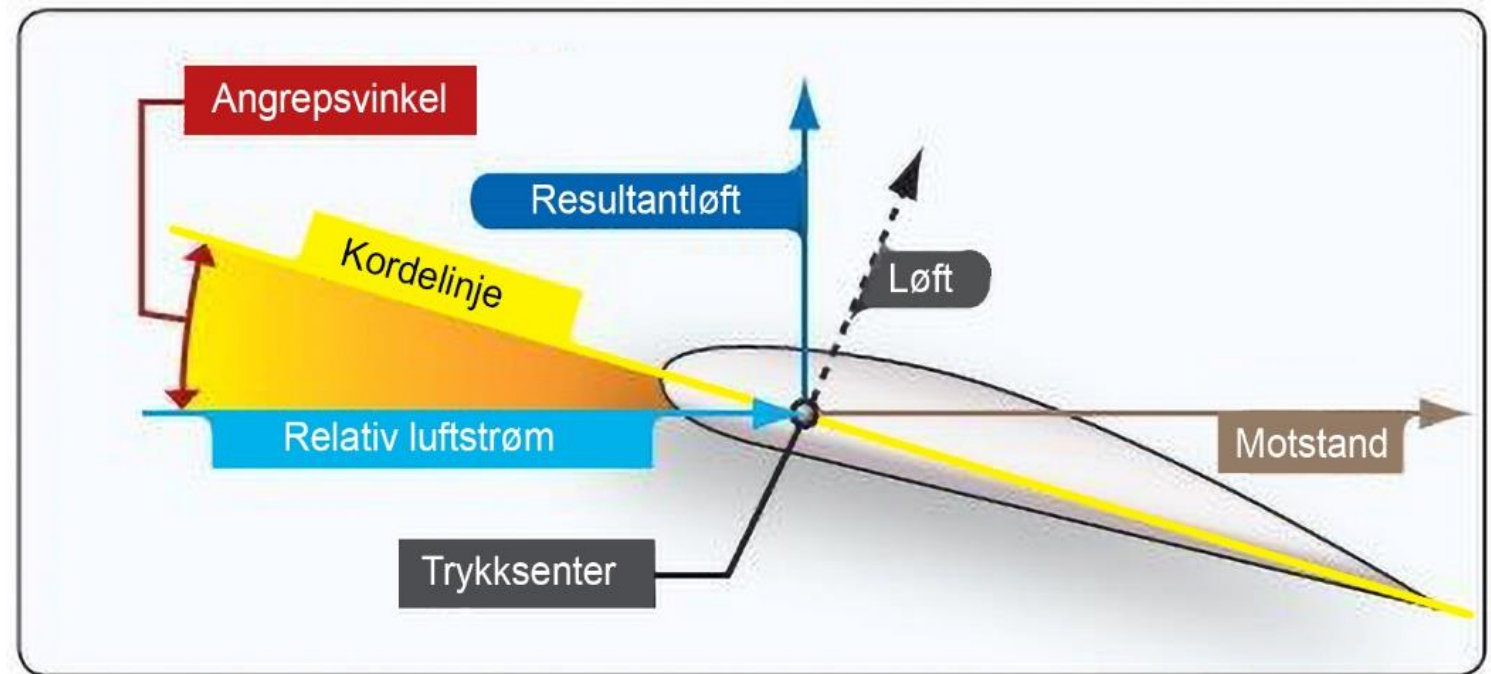
Der luftstrømmen over vingen begynner å separeres fra vingens overflate kalles overgangspunktet

Bak overgangspunktet er luftstrømmen turbulent, og gir ikke løft



Løftsenteret

- Dersom vi samler alle profilene og løftvektorene fra trykksenterne i ett punkt på vingen, får vi en resultantkraft som angriper vingen i et punkt som vi kaller for løftsenteret (CL - center of lift)
- Hvor løftsenteret blir liggende er avhengig av vingens form og av angrepsvinkelen
- Plassering har viktig betydning for flyets stabilitet



Tyngdepunktet (TP)

- Det punktet hvor flyet ville balansert dersom det ble opphengt i det, altså flyets balansepunkt
- Punktet hvor tyngdekraften virker
- Plassering er ekstremt viktig for flyets stabilitet
- Vi må derfor ha fremre og bakre grenser for hvor tyngdepunktet kan plasseres



Vingetippvirvler

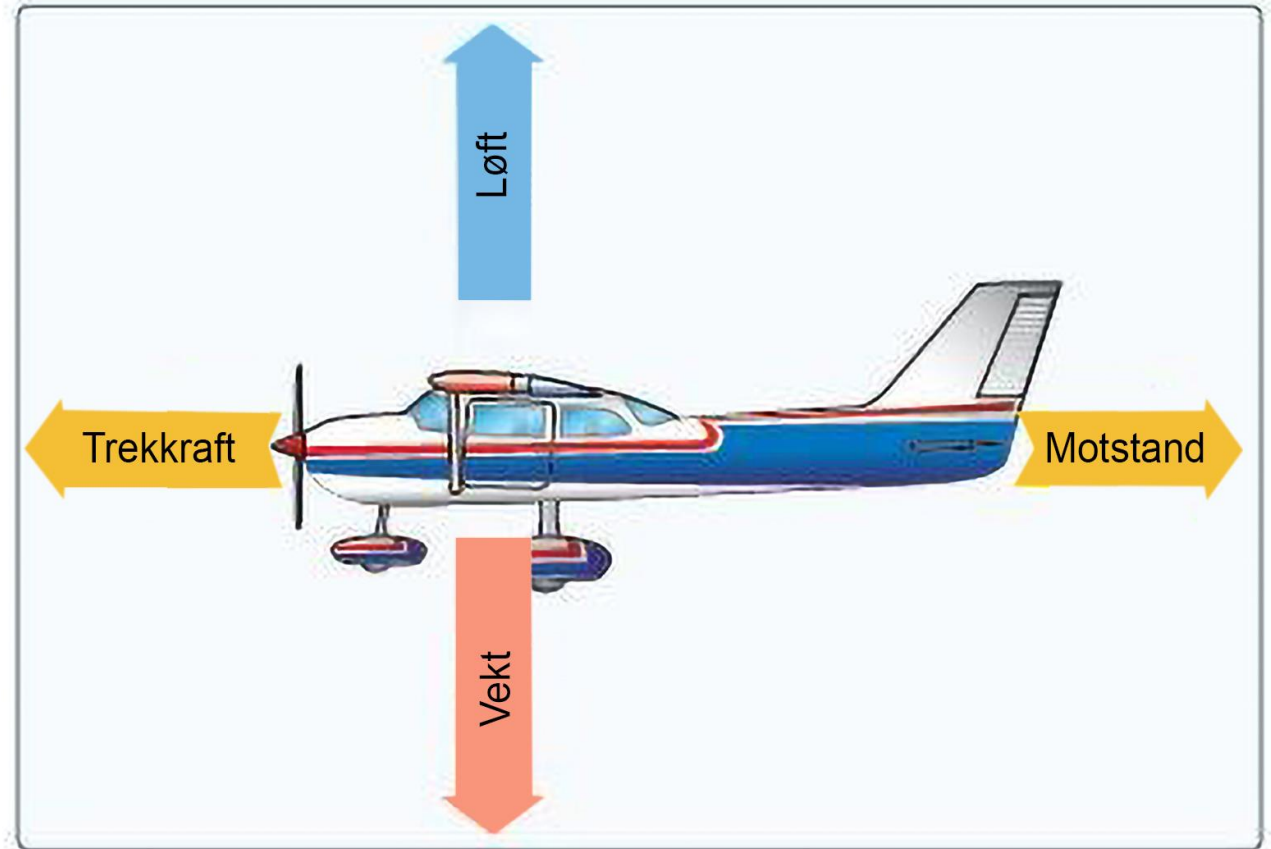


Vingetippvirvler - årsak

- Det er en trykkforskjell mellom trykket på vingens underside og trykket på oversiden
- Overtrykket under vingen prøver å utligne undertrykket over vingen, og det eneste stedet det kan skje er ved vingetippene – vi får vingetippvirvler
- I tillegg renner det luft ned bak vingen som vi kaller for «downwash»
- Flyets størrelse, masse, vingebelastning, sideforhold, angrepsvinkel, hastighet og flapsposisjon er faktorer som bidrar til å minske eller øke vingetippvirvlenes styrke

Fire krefter

- Løft som virker oppover gjennom flyets løftsenter
- Trekk-kraft er den kraften som motor/propell skaper
- Vekt er kraften som trekker flyet (massen) nedover på grunn av tyngdekraften
- Motstand er kraften som virker bakover





Løftformelen

Løftkoeffisient

- Mange variabler som virker inn på løftet
- Samler disse i en enkeltstående faktor som kalles for en løftkoeffisient
- Representerer løftet til en vinge uten at det er bundet til et spesifikt mål
- Løftkoeffisienten varierer med angrepsvinkel og vingens form
- Vi kan styre angrepsvinkelen, og også endre vingens form ved å sette ut flaps og / eller slats
- Løftkoeffisienten betegnes C_L

Løftformelen

- Løftet varierer med vingens angrepsvinkel og form
- Løftet er proporsjonalt med luftens tetthet
- Løftet varierer med kvadratet av hastigheten
- Løftet er proporsjonalt med vingens areal

$$L_{\text{ift}} = C_L \times \frac{1}{2} \rho v^2 s$$

The diagram illustrates the lift formula $L_{\text{ift}} = C_L \times \frac{1}{2} \rho v^2 s$ with the following annotations:

- Tetthet** (Density): A green label with an arrow pointing to the ρ term, which is enclosed in a green box.
- Vingens areal** (Wing area): A blue label with an arrow pointing to the s term.
- Hastighet** (Velocity): A red label with an arrow pointing to the v^2 term.
- Angrepsvinkel** (Angle of attack): A red label with an arrow pointing to the C_L term.
- Vingens form** (Wing shape): A purple label with an arrow pointing to the C_L term.



Typer motstand

Typer motstand

- Parasittmotstand
- Formmotstand
- Friksjonsmotstand
- Interferensmotstand
- Indusert motstand

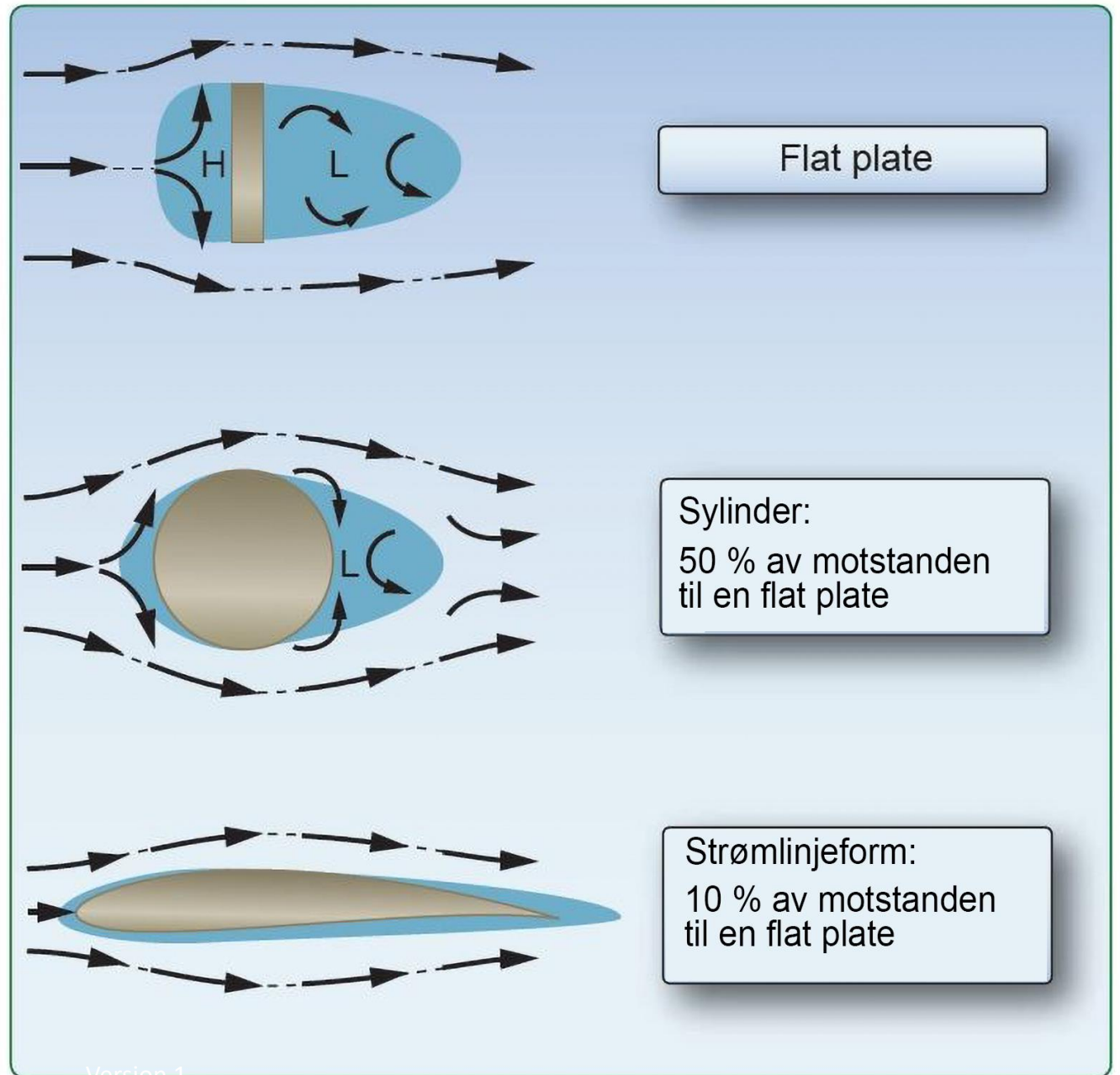
Parasittmotstand

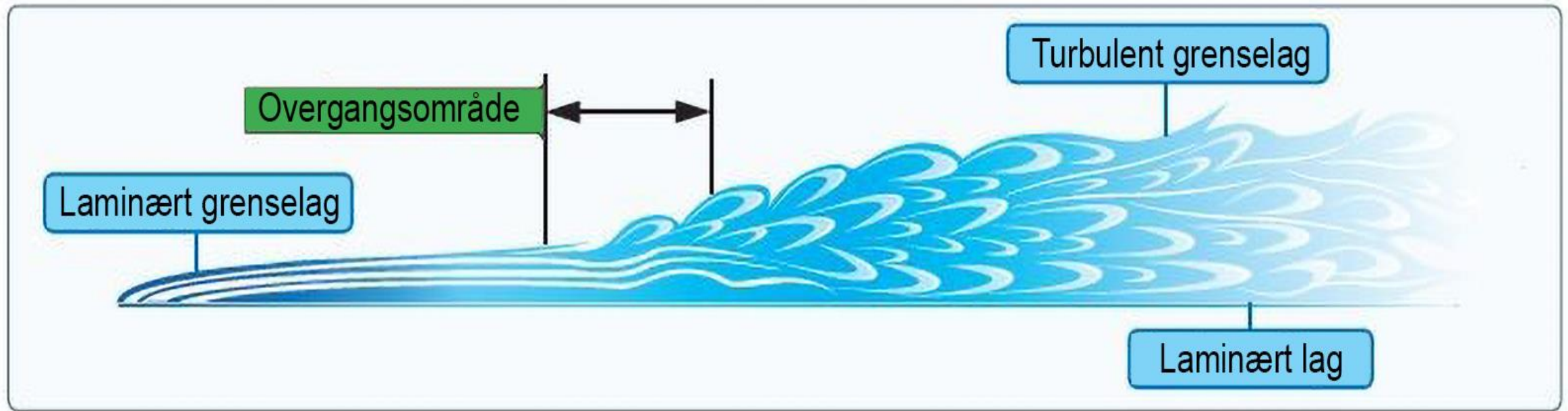
$$D_p = C_{Dp} \frac{1}{2} \rho V^2 S$$

- Delt i tre typer
 - Formmotstand
 - Friksjonsmotstand
 - Interferensmotstand
- Varierer kvadratisk med farten – dobler vi farten øker parasittmotstanden fire ganger
- Varierer proporsjonalt med tettheten og vingens areal
- Varierer omvendt proporsjonalt med angrepsvinkelen, da hastigheten minker med økende angrepsvinkel og øker med lavere angrepsvinkel

Formmotstand

- Skyldes formen på flyet og vingene
- Bygger seg opp et trykk foran flyet og et lavere trykk bak som gir en motstandskraft
- Konstruktøren vil gjøre flyet så strømlinjeformet som mulig

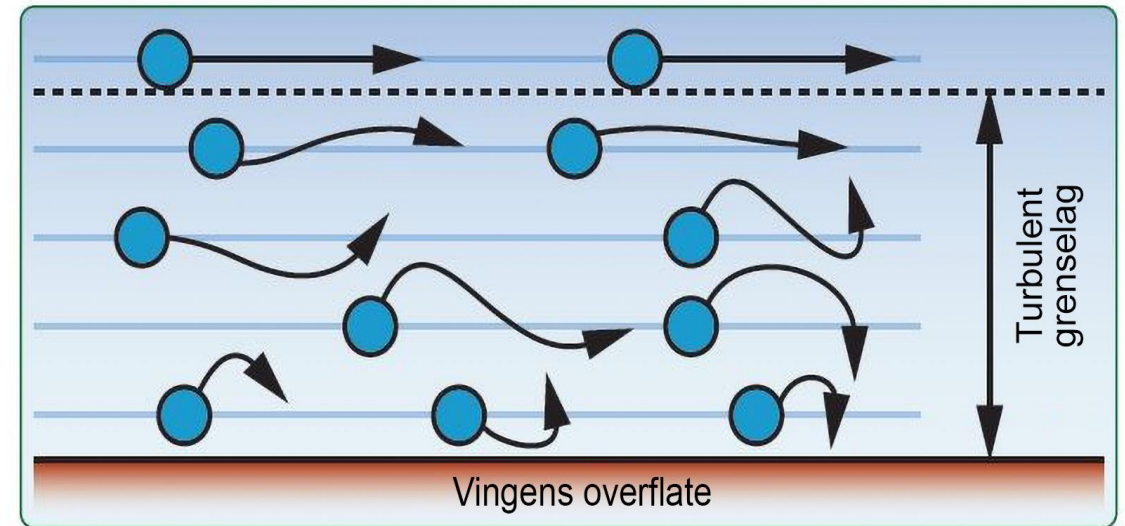
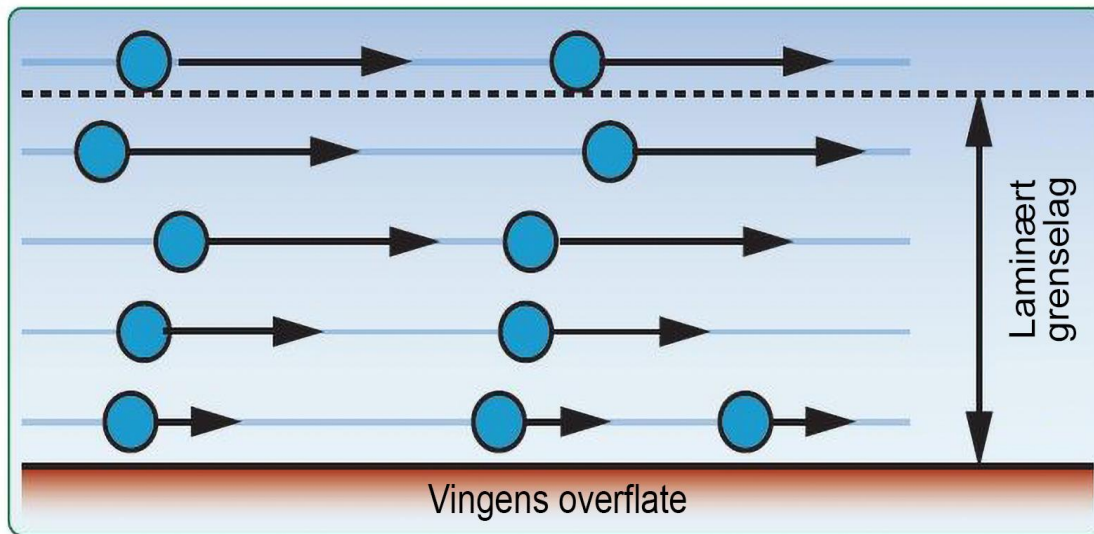




Friksjonsmotstand og grenselaget

- Friksjon mellom luften og flyet
- Luften bremses opp i grenselaget
- Reduseres ved å holde vingen ren

Laminært og turbulent grenselag



Interferensmotstand

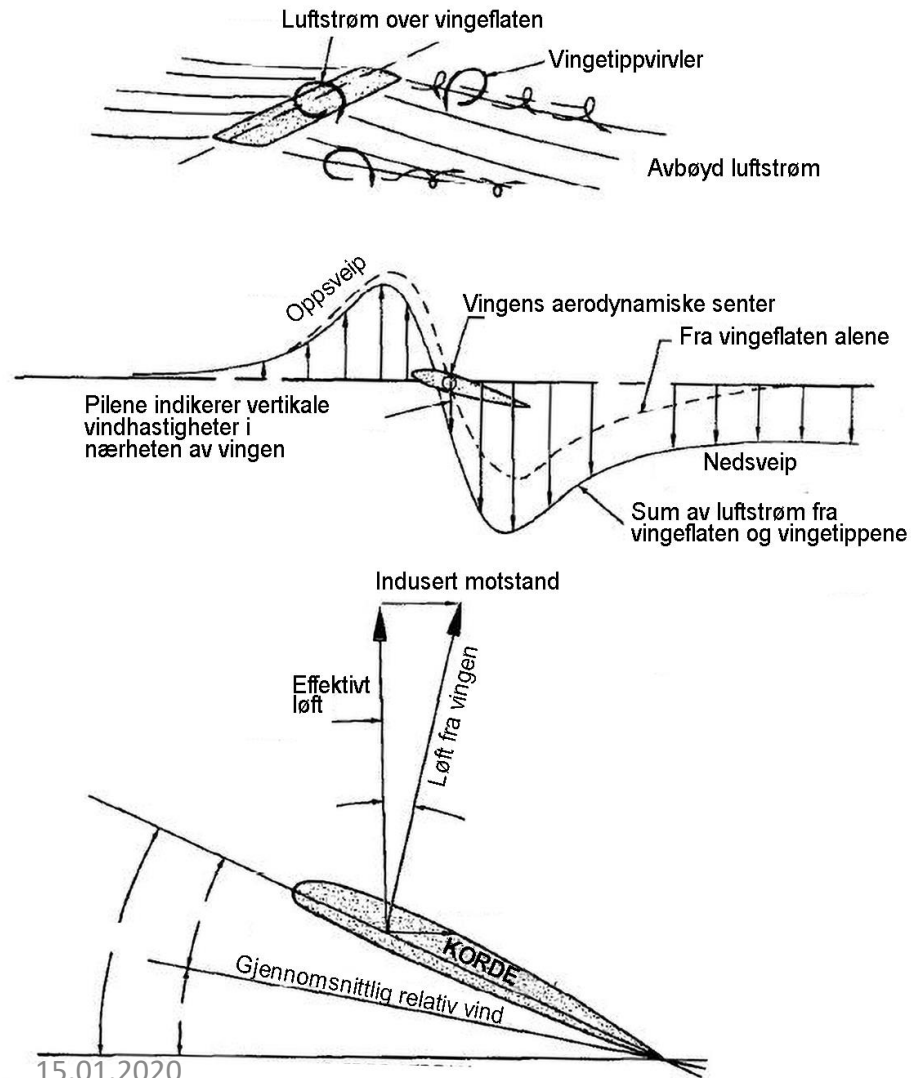
- Motstand som skyldes at to gjenstander står ved siden av hverandre i samme luftstrøm
- Reduseres ved hjelp av strømlinjeformede deksler og overganger

Vingebelastning

Vingebelastning er flyets totale masse delt på vingearialet



Indusert motstand



- Effektivt løft virker vinkelrett på bevegelsesretningen
- Det finnes en motstand som utvikles – induseres – når det produseres løft
- Når angrepsvinkelen øker, vil også den bakovervirkende kraften øke, og indusert motstand øker
- Varierer omvendt proporsjonalt med sideforholdet
- Også vingestrømmene rundt vingene virker inn
- Indusert motstand er størst på et tungt fly med høy vingebelastning, lavt sideforhold som flyr med høy angrepsvinkel og flaps innfelt

Totalmotstand

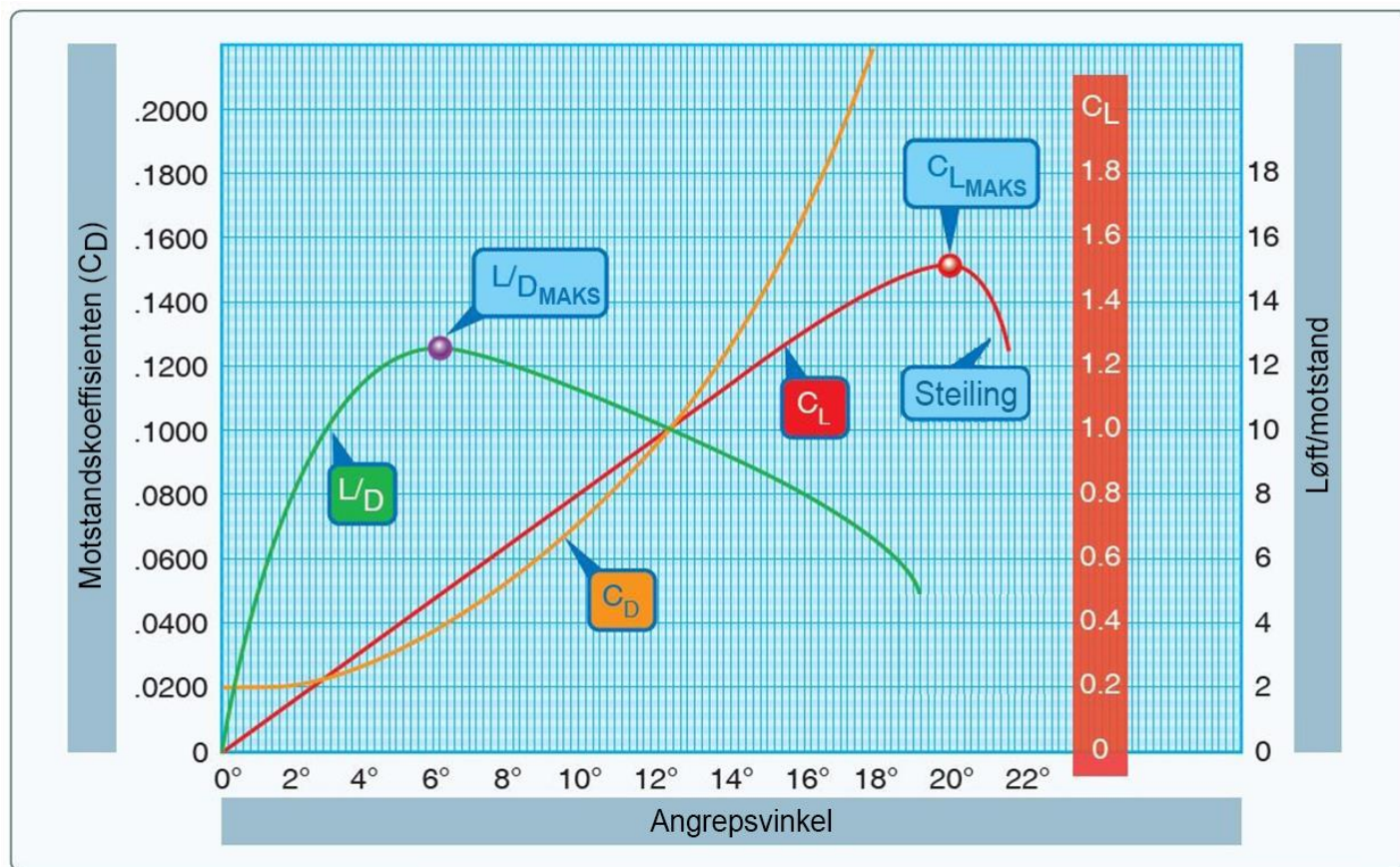
- $C_D = C_{Dp} + C_{Di}$
- Total motstandskoeffisient = parasittmotstandskoeffisient + koeffisienten for induert motstand

$$D = C_D \times \frac{1}{2} \rho \times V^2 \times S$$

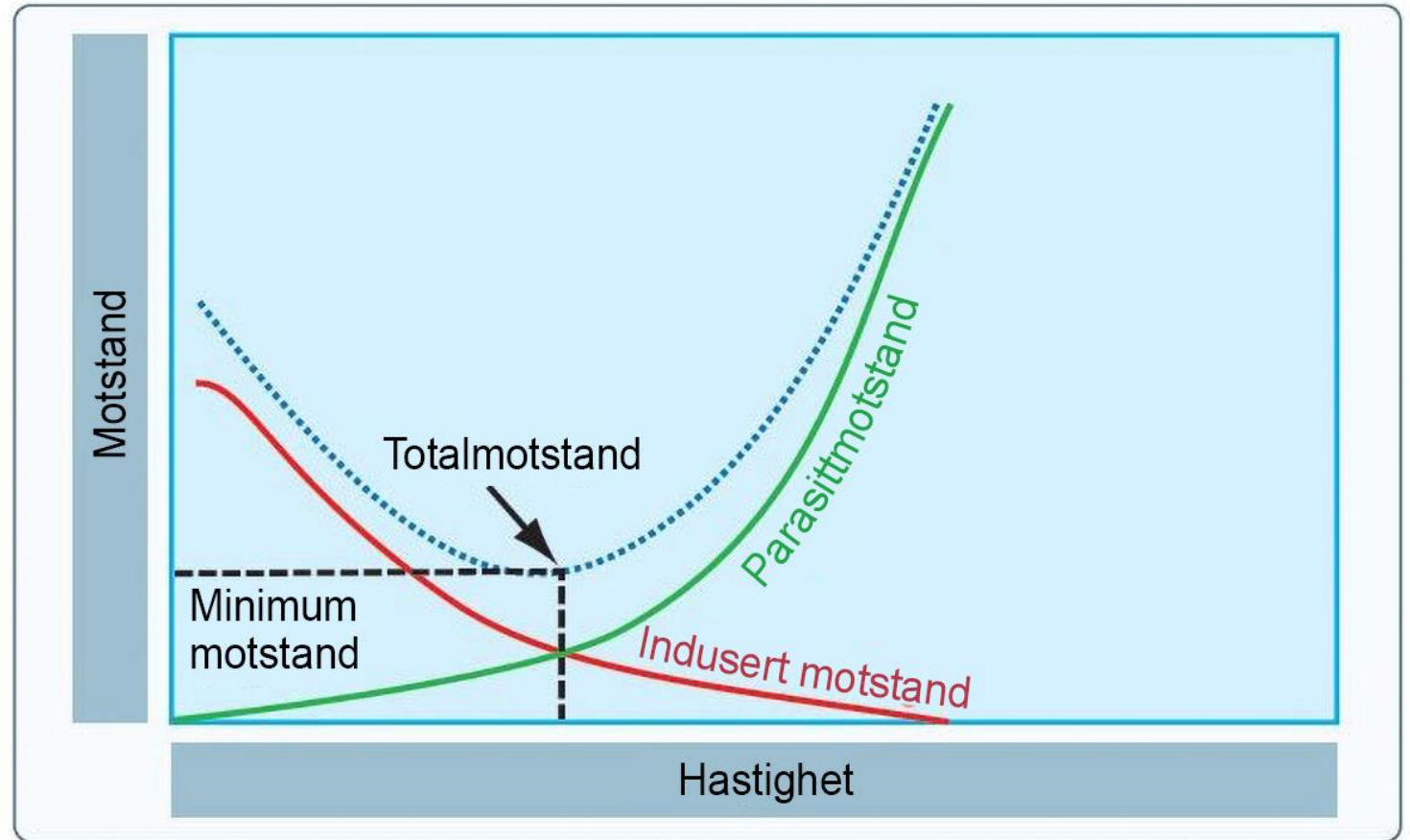


Løft og motstand

Løft- og motstand og angrepsvinkelen



Løft- og motstand og hastighet





Bakkeeffekt

Avgang i bakkeeffekt

Bakkeeffekten minker
indusert motstand



Vi kan fly med lavere
indikert hastighet



Øk farten i bakke-
effekt til V_X eller V_Y



Bakkeeffekten avtar
raskt med høyden



Bakkeeffekt



Bakkeeffekt

- Hvilken effekt bakken har på løft og motstand når vi tar av eller lander
- Økning av løft og reduksjon av indusert motstand, men kun i et høydesjikt som på mindre fly tilsvarer halve vingespennet

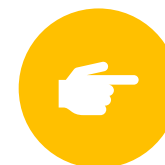
Bakkeeffekt



Gir lokalt et høyere statisk trykk



Fører til at fartsmåler og høydemåler viser for lave verdier



Stigefartsmåleren indikerer synk



Kan under visse forutsetninger brukes til å øke akselerasjonen



Gjør det mulig å ta av med et for tungt og feillastet fly



Gjør det mulig at vi med feil teknikk «flyter» langs banen når vi skal lande



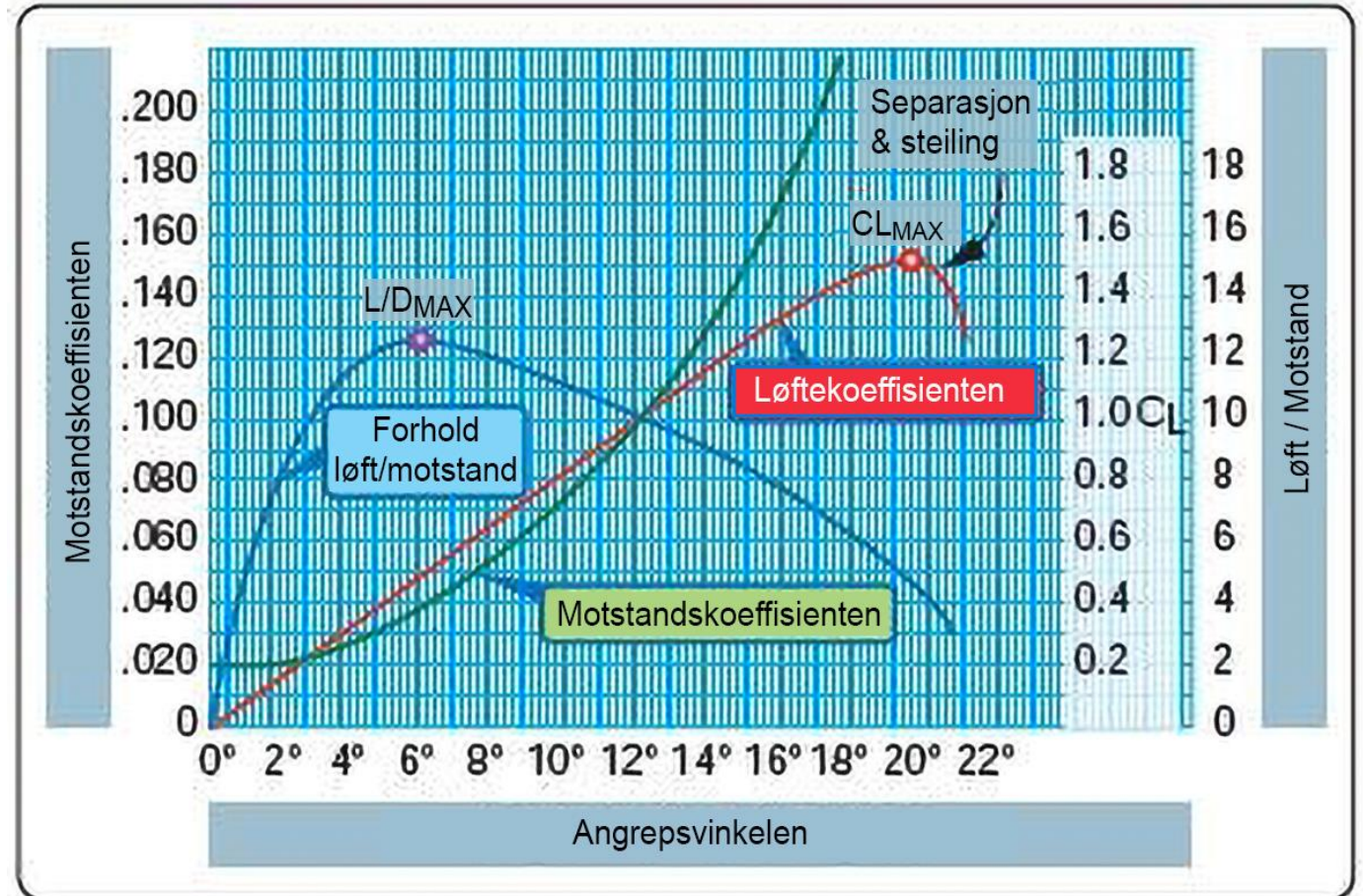
Bakkeeffekten har vært medvirkende til flere alvorlige hendelser og ulykker, noen også med dødelig utgang



Angrepsvinkel, steilefart og steiling

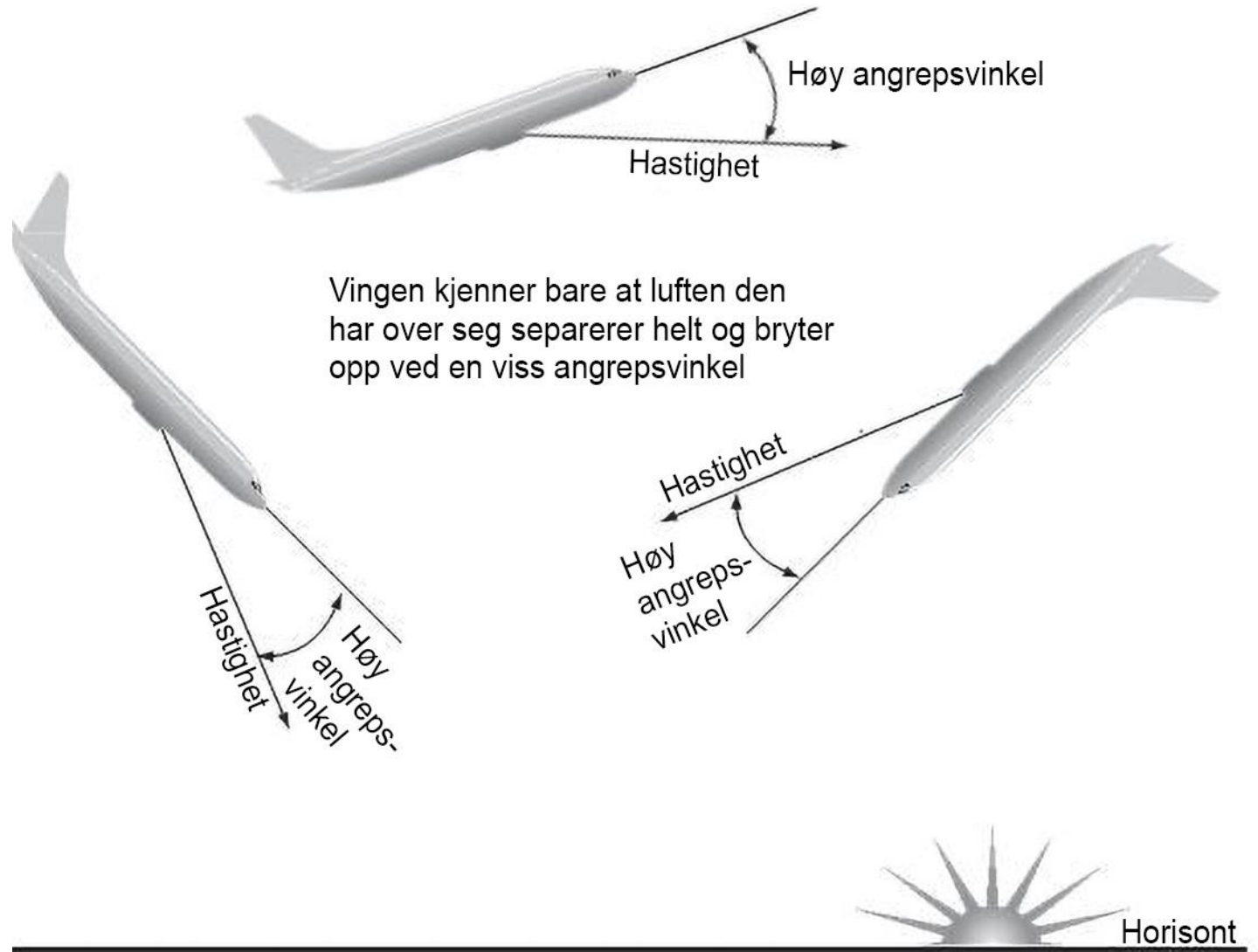
Steilevinkel 1/2

- Når vingens angrepsvinkel øker til et punkt hvor hele luftstrømmen over vingen er turbulent – sier vi at vingen steiler
- Vi har fremdeles noe løft fra undersiden av vingene
- Vi kaller denne vinkelen for «steilevinkelen» eller «kritisk angrepsvinkel»



Steilevinkel 2/2

- Vingen kjenner kun at luften den har over seg separerer helt og bryter opp ved en viss vinkel
- Vingen er nå steilet
- Det kan skje i hvilken som helst hastighet, nesestilling og motorsetting, men kun om kritisk angrepsvinkel overskrides



Likevel kan vi snakke om steilefart

- Til enhver angrepsvinkel er det en tilsvarende hastighet. Den leses ut fra flyets fartsmåler og er indikert
- Hastigheten vi har når vingen når kritisk angrepsvinkel kalles for steilefart
- Den varierer med følgende faktorer:
 - Økt masse gir høyere steilefart
 - Øker når tyngdepunktet beveger seg forover
 - Øker når vi krenger
 - Utfelt flaps senker steilefarten
 - Snø, is, rim – alt belegg på vingen øker steilefarten
 - Turbulens kan øke steilefarten

15.01.2020

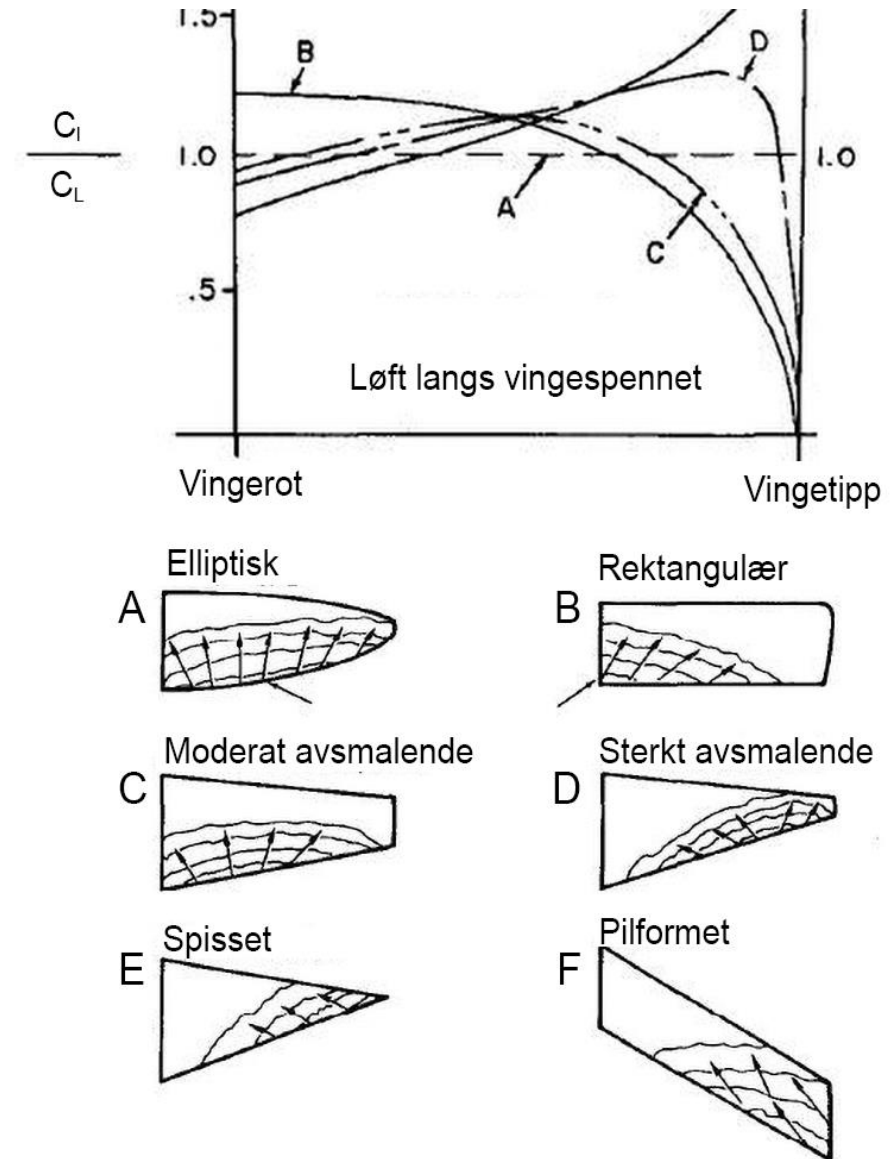
Versjon 1



By Cel 84 - Own work, CC BY-SA 3.0

Steilinger

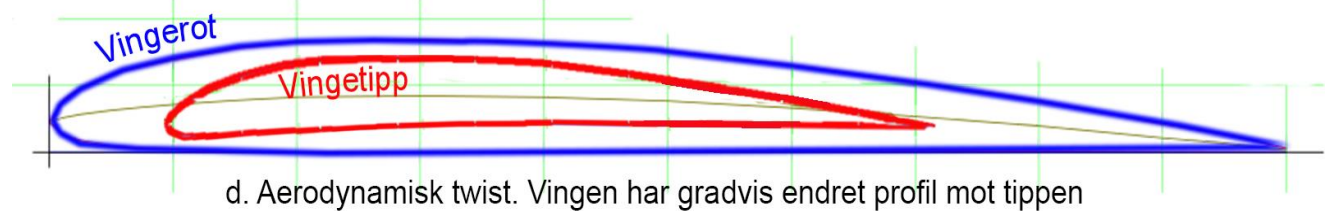
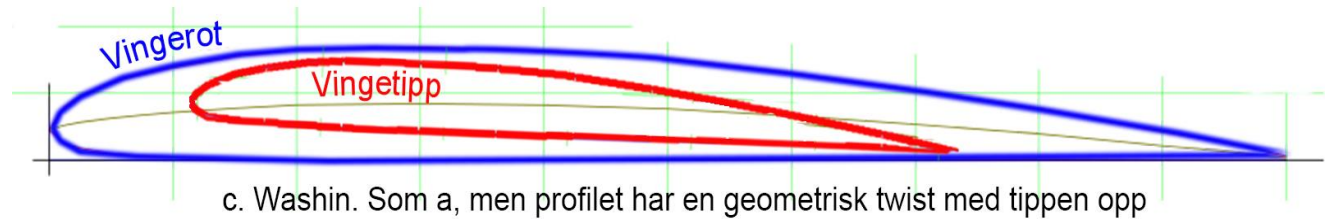
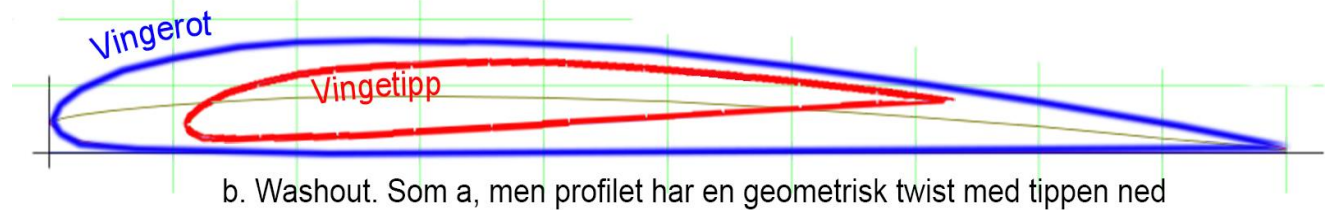
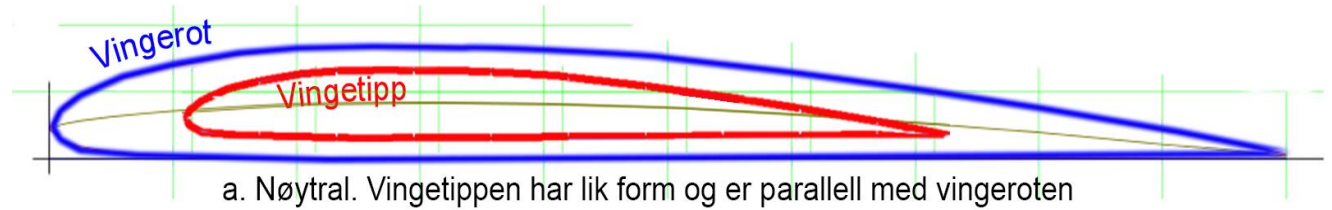
- Haleflaten er montert med en vinkel som gjør at den steiler etter vingene
- Det er kraften fra haleflaten vi bruker for å bryte en steiling
- Flykonstruktøren lager vingen slik at den steiler innenfra og ut – og slik at vi holder kontroll over balanserorene lengst mulig



Gode steileegenskaper 1/4

- *Aerodynamisk vridning («aerodynamic twist»).*
 - Det brukes forskjellige profilformer fra vingeroten til vingetippen
 - Gir bedre steileegenskaper da luften begynner å slippe vingen ved roten, slik at vi har luft over balanserorene så lenge som mulig
- *Geometrisk vridning («geometric twist»)*
 - Angrepsvinkel ved vingetippen lavere enn angrepsvinkelen ved vingeroten
 - Samme profilform som er vridd over vingens lengde
 - Gjør at trykket rundt vingen endres slik at vi får mindre tap av luft ved vingetippene. Gir mindre induisert motstand
- En vinge kan både ha geometrisk og aerodynamisk vridning

Gode steilegenskaper 2/4



Gode steilegenskaper 3/4



Vortilons. Faste plater som er festet under vingen ved fremkanten. Når vingen nærmer seg steiling, er platene montert på en slik måte at de genererer virvler og lager energi til luftstrømmen, slik at det forsinkes separasjon av luftstrømmen



Stall strip. En smal kant som festes på vingens fremkant, spesielt nær vingeroten for at vingen skal steile forsiktig og kontrollert.



Stall fence eller wing fence. En flat plate som står i samme retning som vingens korde. Stopper luftstrømmen som går ut mot vingetippene, og hindrer at hele vingen steiler samtidig. Er vanlig på fly med pilformede vinger



Gode steilegenskaper 4/4

- Fra venstre: Stallstrips
- I midten: Vinglets
- Til høyre: Stall fence / wing fence



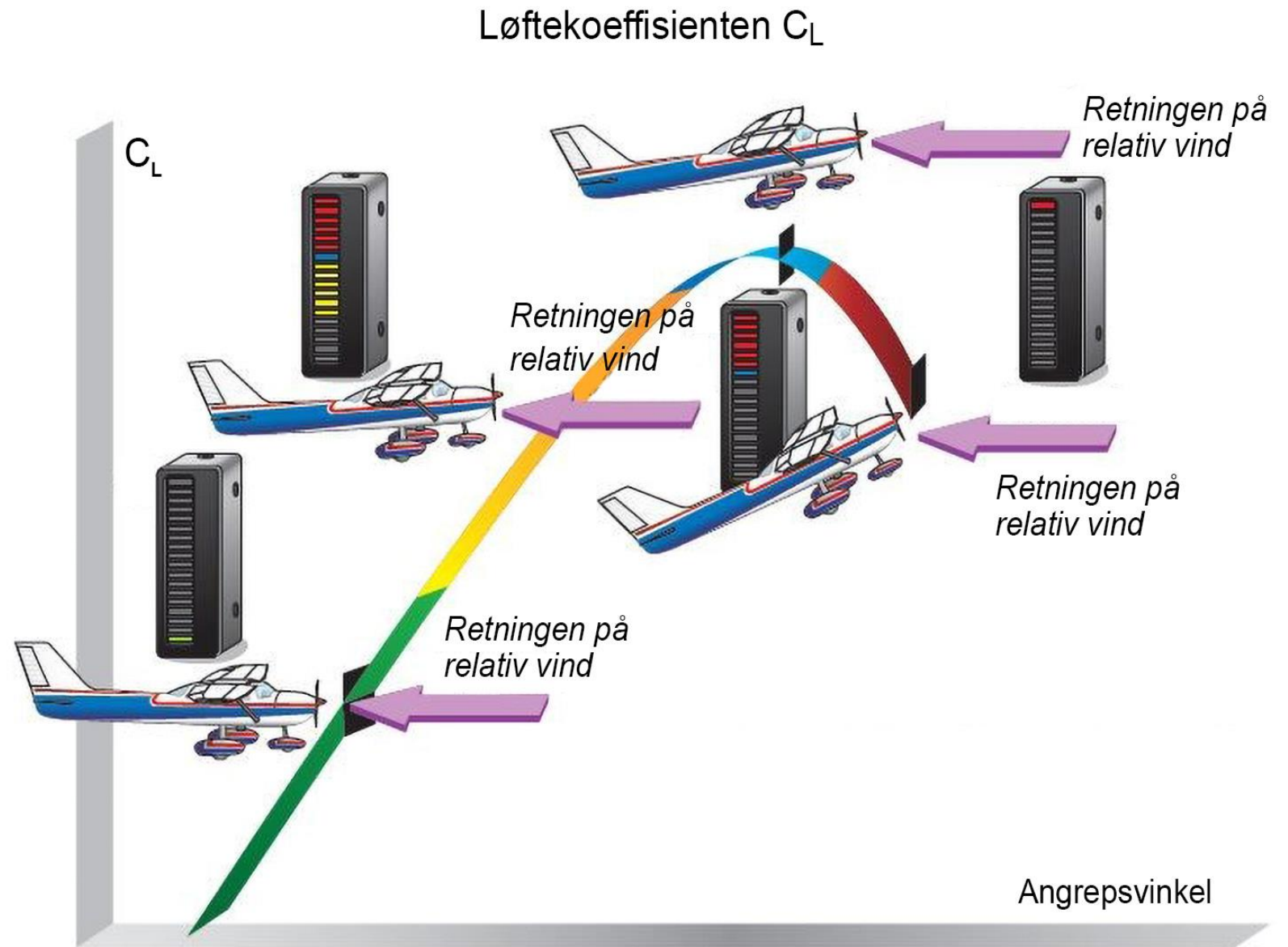
Steilevarsel

Flyet «sier i fra» - på en eller flere måter

- Nesestilling er høyere enn normalt (men som vi har sett – ikke nødvendigvis)
- Farten er lav eller synkende
- Det er en forandring i vindsuset
- Viseren på fartsmåleren «blafrer»
- Flyet rister
- Høyderor, balanseror og / eller sideror har dårligere effekt
- Flyet taper fort høyde
- Steilevarslet sier ifra (det kommer på ca. fem knop over steilehastigheten) eller lyser opp (om det varsles ved hjelp av lys). Men er noe upresis

AoA indikator

(iconaircraft)





Steilinger

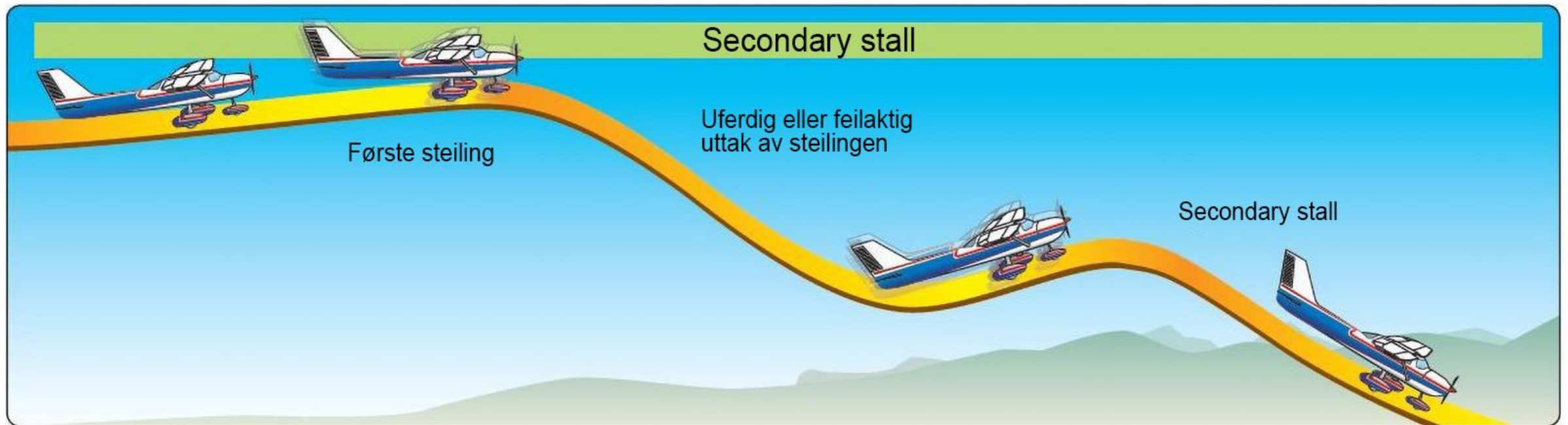
Steilinger i forskjellige konfigurasjoner 1/4



Steilinger i forskjellige konfigurasjoner 2/4



Steilinger i forskjellige konfigurasjoner 3/4



Steilinger i forskjellige konfigurasjoner 4/4

Steiling med høyderorstrim satt for høy nese

Konfigurer flyet for landing og etabler normal innflygings-hastighet.
Trim flyet for høy nese

Gi full gass for å simulere en avbrutt landing og la flyets nese løfte seg

Før full steiling skyv stikka fremover til steilevarselet forsvinner. Etabler normal stigning og trim flyet

Fortsett flygningen



Utvikling av spinn

Spinn

- Fortsettelse på en steiling
- Den ene vingen har sluttet å fly – luftstrømmen over vingen er helt turbulent
- Den andre vingen fortsetter å fly – og har fremdeles noe laminær luftstrøm over vingen
- Vingen som steiler først, dropper ned
- Flyet begynner å dreie rundt vertikalaksen i samme retning som den nedgående vingen – og både krenger og dreier
- Kategorier: Normal, invertert og flatspinn



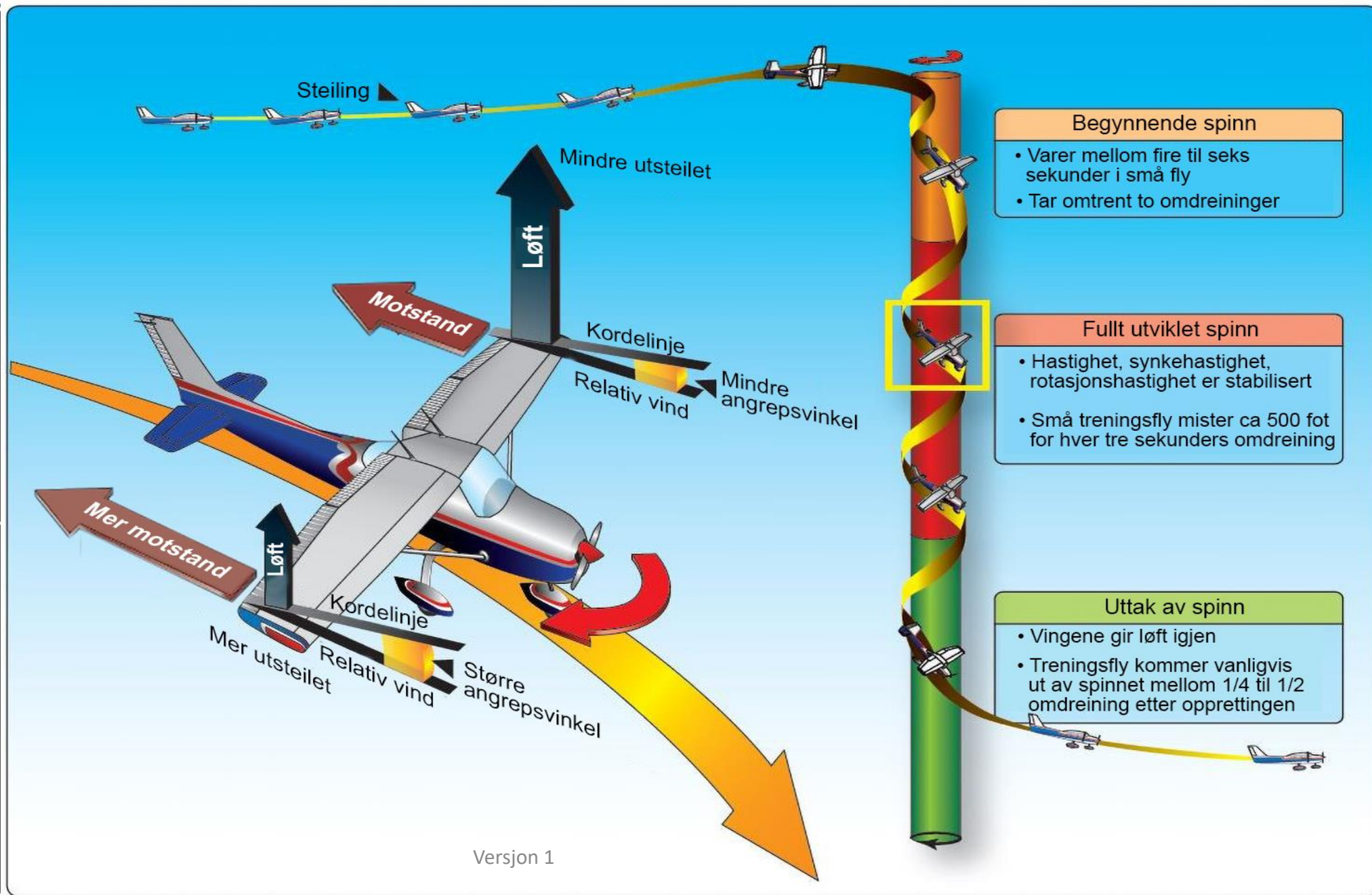
Kjennetegn på et vanlig spinn

- Bratt vinkel – nesen på flyet peker ned
- Rask rotasjon
- Lav eller flimrete fartsmålervisning
- Meget høy gjennomsynk
- Manglende respons fra balanse- og høyderor

Kjennetegn på et invertert- og et flatspinn

- Invertert spinn:
 - Flyet ligger opp-ned i spinnet
 - Krenge- og girebevegelsene foregår i motsatte retninger
- Flatspinn:
 - Flyet girer rundt vertikalaksen
 - Stilling i luften ligger nesten parallelt med horisontlinjen
 - Høy rotasjons hastighet

Spinnetts faser



Normalmetode for å komme ut av et spinn

1. Motor til tomgang
2. Sparker fullt motsatt sideror for å redusere giringen
3. Sentrerer balanserorene for å redusere angrepsvinkelen på vingen som går ned
4. Skyver stikka eller rattet progressivt fremover til rotasjonen stopper for å ta flyet ut av steilingen
5. Sentrerer sideroret når rotasjonen har stoppet
6. Retter opp fra stupet vi er kommet inn i
7. Gir på motorkraft

(Faktorenes orden er **ikke** likegyldig)



Muligheter for å endre C_L max

Flaps

- Flaps øker løft og motstand
- Monteres på baksiden av vingen
- Felles ut og noen ganger også ned



Grunnleggende vingeprofil



Enkel flaps



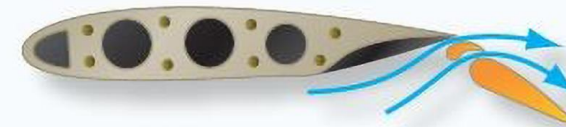
Split flaps



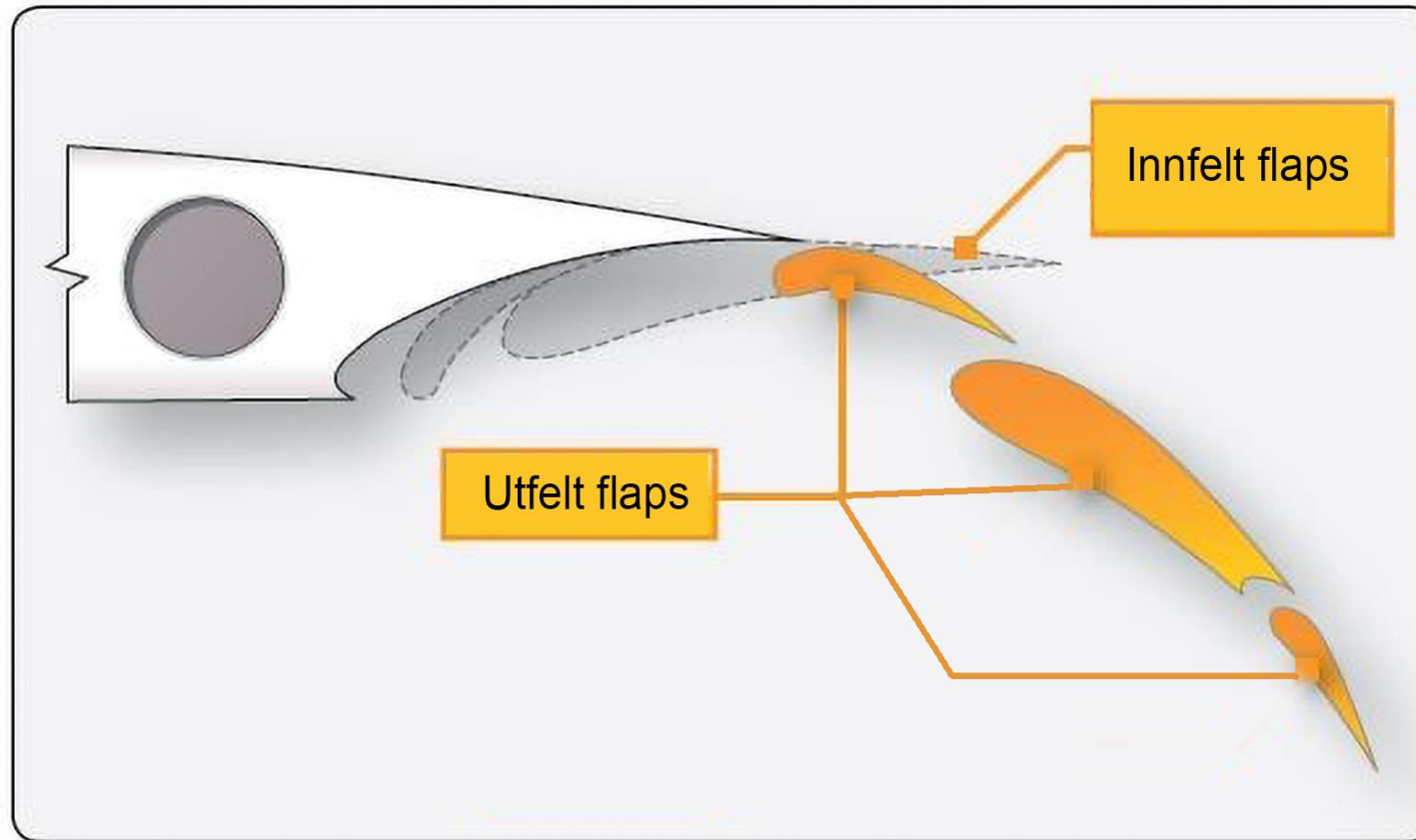
Slotted flaps



Fowler flaps



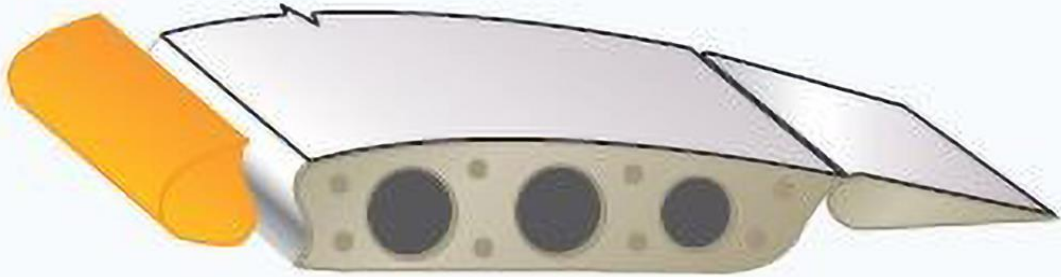
Slotted Fowler flaps



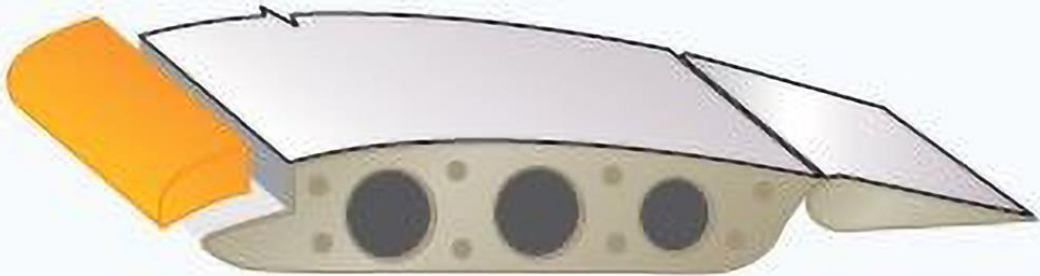
Dobbelt-slotted fowler flaps

Øker både løftet og vingens areal

Fast slat



Bevegelig slat



Slot/slats

- Slats er en ekstra vingefremkant som skyves frem og danner en slot
- Det er en åpning i vingefremkanten. Kalles også for «fremkantsflaps»
- Slat og slot leder luften slik at luften på oversiden av en vinge holdes strømlinjeformet så lenge som mulig
- Vi kan ha en slot uten å ha en slat, men en slat danner alltid en slot



Faktorer som virker negativt inn på flyets aerodynamikk

Snø, is og rim



- Du kan få spørsmål om hvilken effekt snø, is og rim har på en vinge/fly i alle fag
- Snø, is og rim vil ALLTID ha negativ effekt
- [NASA](#) har laget et meget godt undervisningsopplegg for dem som vil vite mer



Aviation Education Multimedia Library

Snø, is og rim

- Punktet hvor luften deles over og under vingen forandres, luftstrømmens hastighet og retning endres
- Luften blir turbulent mye tidligere enn normalt
- Med belegg på vingen blir marginene steilevarslet gir redusert
- Flyets innebyggede steileegenskaper ødelegges, og vingene kan steile asymmetrisk
- Flyets masse og motstand øker, og det vil i beste fall føre til at det flyr saktere og bruker mer drivstoff, samt at det klatrer dårligere
- Det blir vanskelig å manøvrere

Snø, is og rim

- Haleflaten kan steile ut fordi is, snø og rimbelegg forårsaker at luften brytes opp. Luftstrømmen blir turbulent. Det er viktig å være klar over at det kan dannes is på halepartiet før den legger seg på vingene eller andre deler av flyet. Det finnes ikke noe varselsystem som sier ifra om halen er steilet ut
- Is på propellen ødelegger en nøye avbalansering, og kan føre til vibrasjoner og tap av trekk-kraft, og i verste fall at den rister i stykker på grunn av ubalanse. Når isen kastes av propellen (enten fordi vi har propell med avisingssystem, eller vi flyr inn i varmere luftmasser) kan den gjøre at flyet blir skadet, noe vi spesielt kan se på tomotors fly

15.01.2020

Versjon 1



Andre faktorer som virker negativt ▶

- Et skittent fly med insekter, søle og eller «skit på vingan», kropp og hjul vil også ha ukjente flygeegenskaper
 - gi lavere løft og
 - økt motstand
- [Et ekstremtilfelle](#)

Luftbremser / spoilers

- Dette er systemer som er laget for å ødelegge («spoil») løftet
-
- I en sving kan spoilers bruke til å kontrollere krenge-momentet alene eller sammen med balanserorene
 - Tas spoilers ut samtidig, øker motstanden og løftet blir mindre – viker som en luftbrems
 - Etter landing settes spoilers ut for å dumpe løftet over vingen og sørge for at vekten av flyet ligger på hovedhjulene – slik at vi får maksimal effekt ut av hjulbremsene





Del 2 Stabilitet



Begreper og definisjoner

Begreper og definisjoner

- Statisk og dynamisk stabilitet
- Positiv, negativ og nøytral stabilitet
- Lengdeakse, tverrakse og vertikal akse
- Lengdestabilitet, retningsstabilitet og tverrstabilitet
- Tyngdepunktets plassering
- PIO – Pilot Induced Oscillations

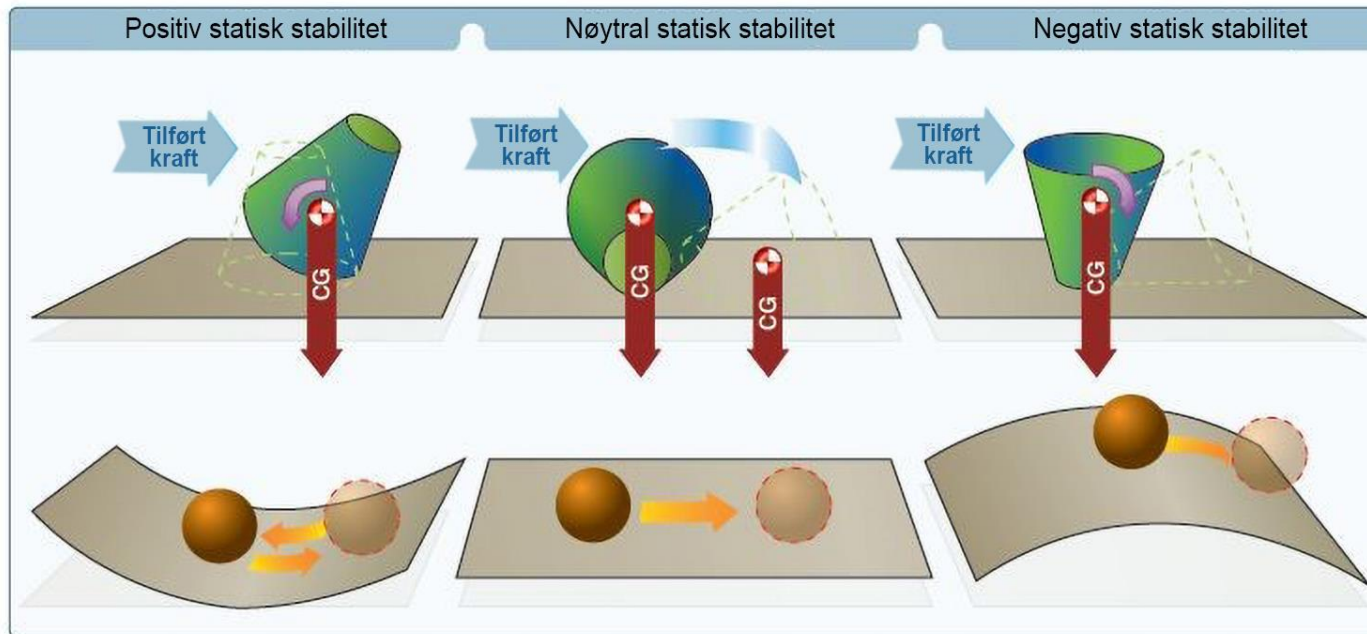


Statisk og dynamisk stabilitet

Stabilitet og likevekt

- Likevekt er når alle kreftene som virker på et fly er i balanse
- Aerodynamisk stabilitet er om flyet blir utsatt for en forstyrrelse under flyging, skal det være konstruert på en slik måte at det selv kommer tilbake til den stillingen det hadde før forstyrrelsen skjedde – altså til likevekt

Statisk stabilitet – flyet er konstruert slik at det prøver å komme tilbake til likevekt



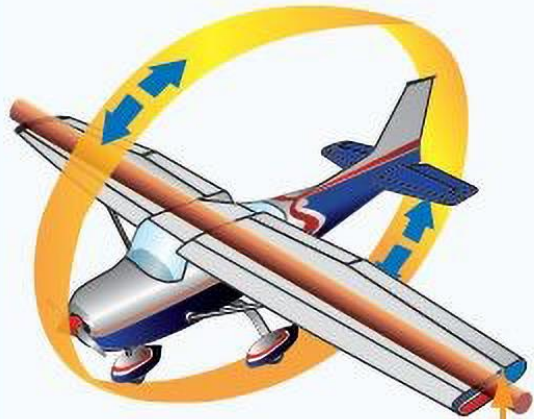
- Positiv statisk stabilitet: Flyet prøver å komme tilbake til likevekt
- Nøytral statisk stabilitet: Flyet vil hverken komme tilbake til den stillingen det hadde, ei heller vil det fortsette og eventuelt øke i den retningen det ble forstyrret i. Det er indifferent
- Negativ statisk stabilitet: Flyet vil fortsette og eventuelt øke i den retningen det ble forstyrret i. Det er ustabilt

Aerodynamisk
stabilitet – flyet
er konstruert
slik at det
kommer tilbake
til likevekt



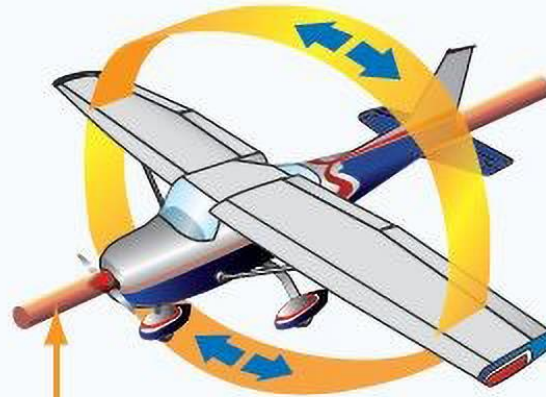
Lengdeakse, tverrakse og normal akse

Nese opp og ned



Tverrakse

Krengning

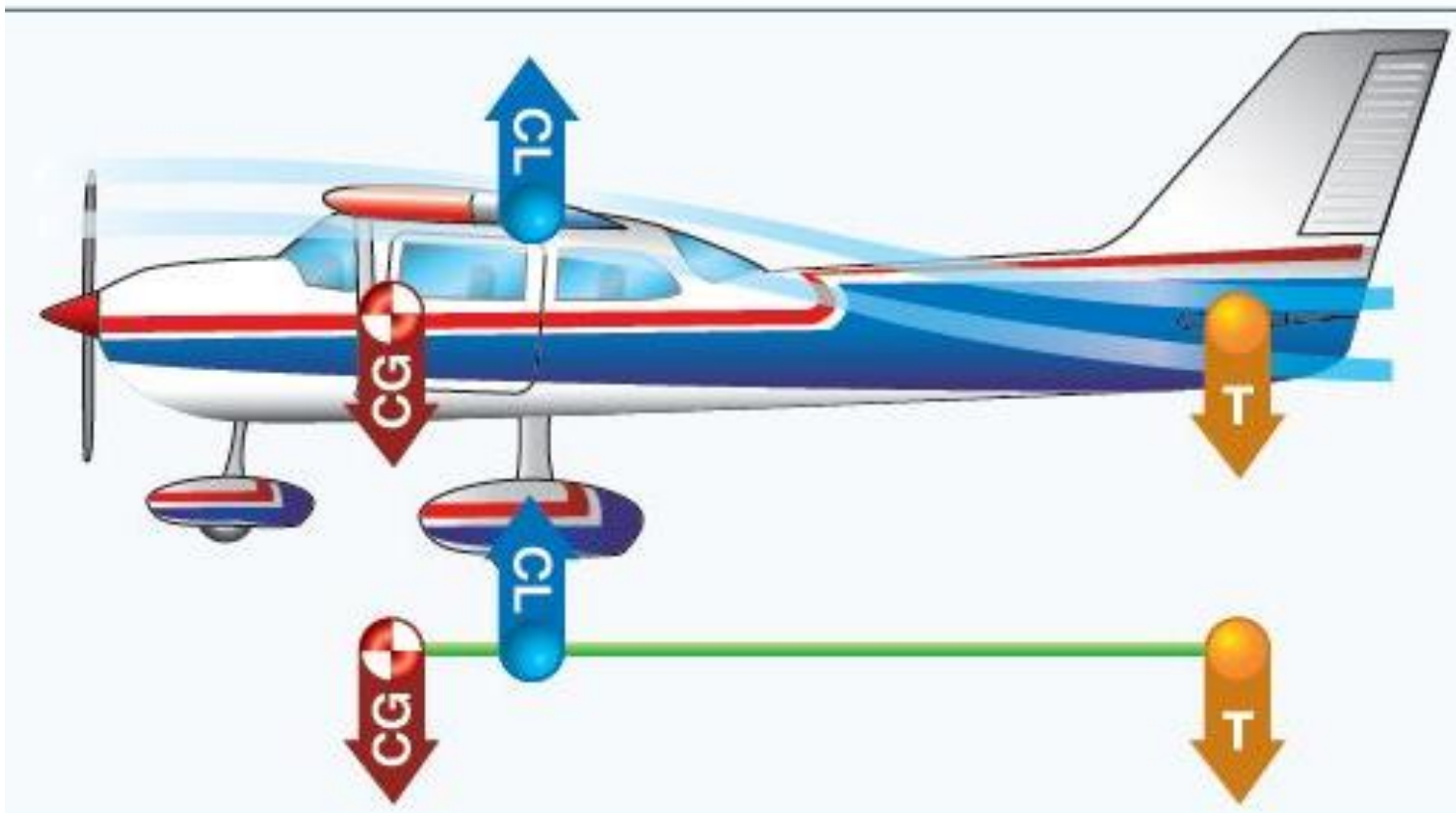


Lengdeakse

Dreining



Vertikalakse

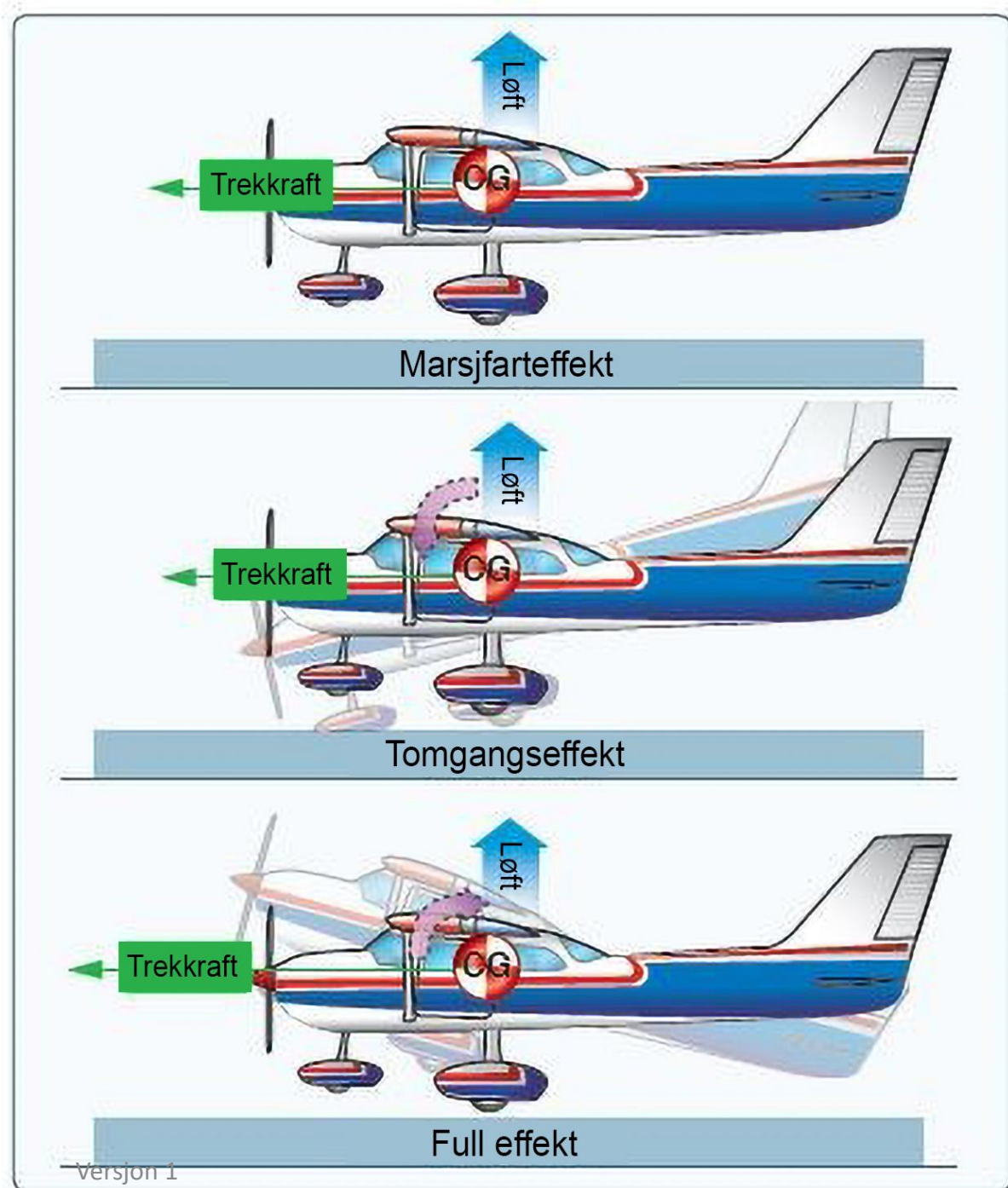


Statisk og dynamisk lengdestabilitet

- Stabilitet om tverraksen
- Tenk på det som stabilitet i lengderetningen på flyet
- Dersom flyet eksempelvis setter nesen opp på grunn av et vindkast – må summen av vingens og halens krefter sørge for at nesen kommer ned igjen
- De fleste fly er konstruert noe «nesetunge» – det må derfor finnes en kraft som virker nedover på halen slik at nesen holdes oppe
- Angrepsvinkel, løftsenter (CL) og trekk-kraft virker inn
- Men tyngdepunktets (CG) plassering er viktigst!

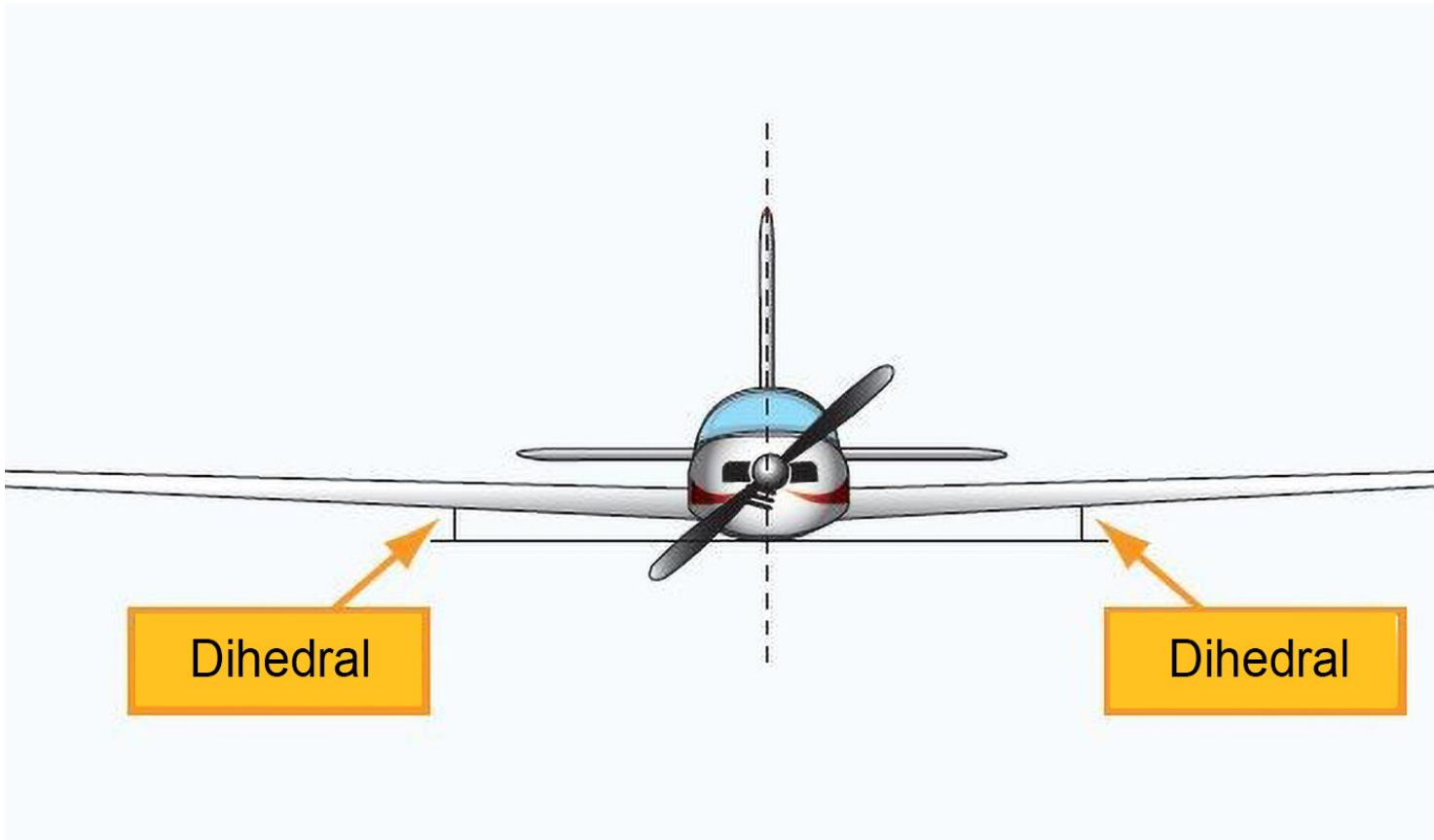
Propellens trekkraft påvirker lengdestabiliteten

15.01.2020



Et feil lastet fly – ødelegger lengdestabiliteten

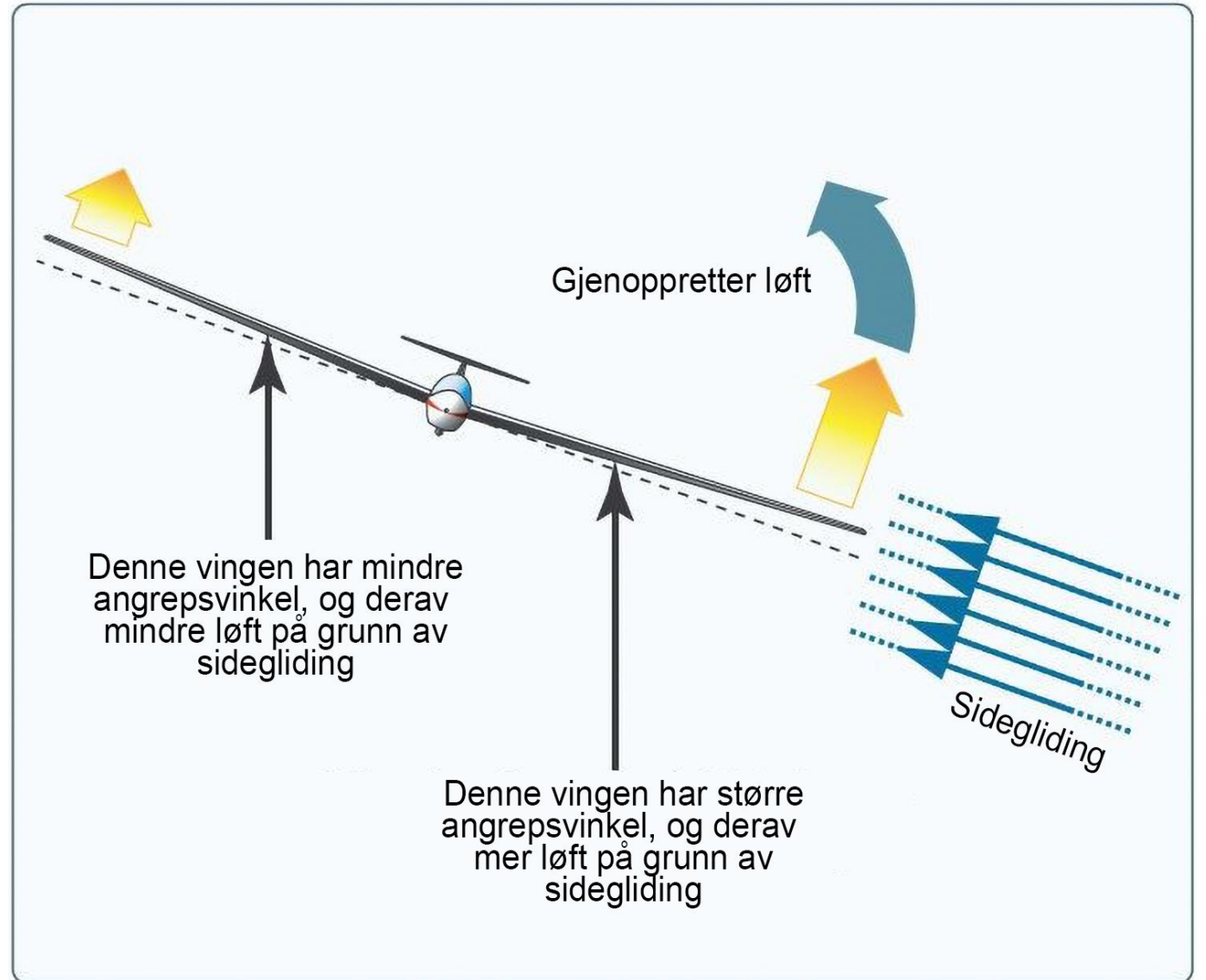
- Konsekvens: Høyderoret klarer ikke å kontrollere flyets stilling i luften
 - Er tyngdepunktet for langt bak kan vi risikere steiling og spinn
 - Er tyngdepunktet for langt foran kan vi risikere at vi ikke klarer å ta av, eller holde nesen oppe under landing
- Når vi brenner drivstoff underveis endres tyngdepunktets plassering noe, avhengig av flymodell
- Et tyngdepunkt som i utgangspunktet ligger «langt foran eller langt bak» kan da i løpet av en flytur beveges seg på feil side av tillatte grenser



Statisk og dynamisk tverrstabilitet

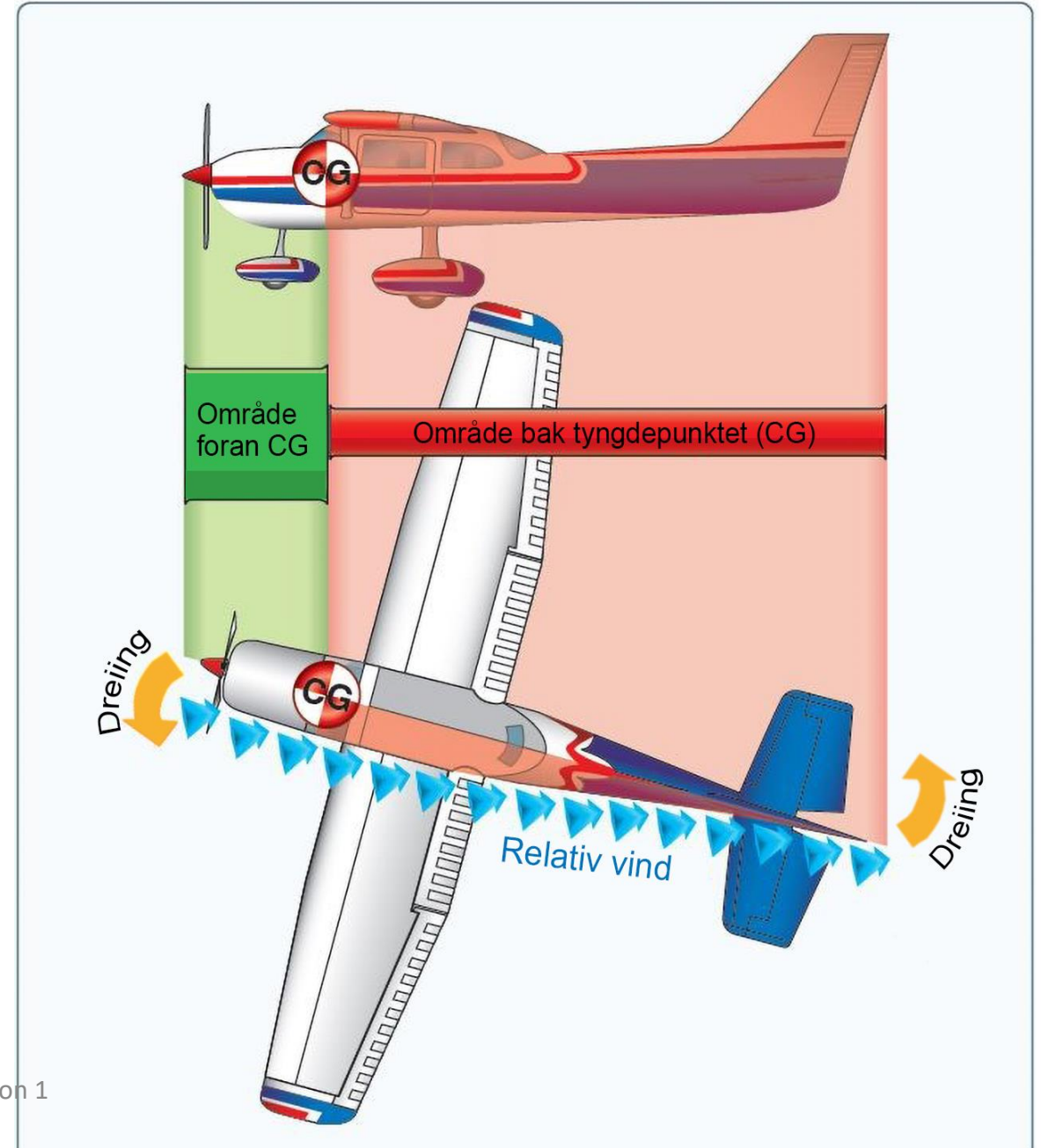
- Stabilitet om lengdeaksen
- Tenk på det som stabilitet på tvers i flyet
- Dersom eksempelvis et vindkast løfter opp den ene vingen, skal den komme ned igjen av seg selv
- Vingene konstrueres gjerne med en v-form. Det kalles for «dihedral» på engelsk

Statisk og dynamisk tverrstabilitet



Statisk og dynamisk retningsstabilitet

- Stabilitet om vertikalaksen
- Dersom vi får et plutselig dreiemoment om vertikalaksen – skal flyet rette seg opp av seg selv
- Pilformede vinger kan monteres for å bedre retningsstabiliteten





Kraftbalanse

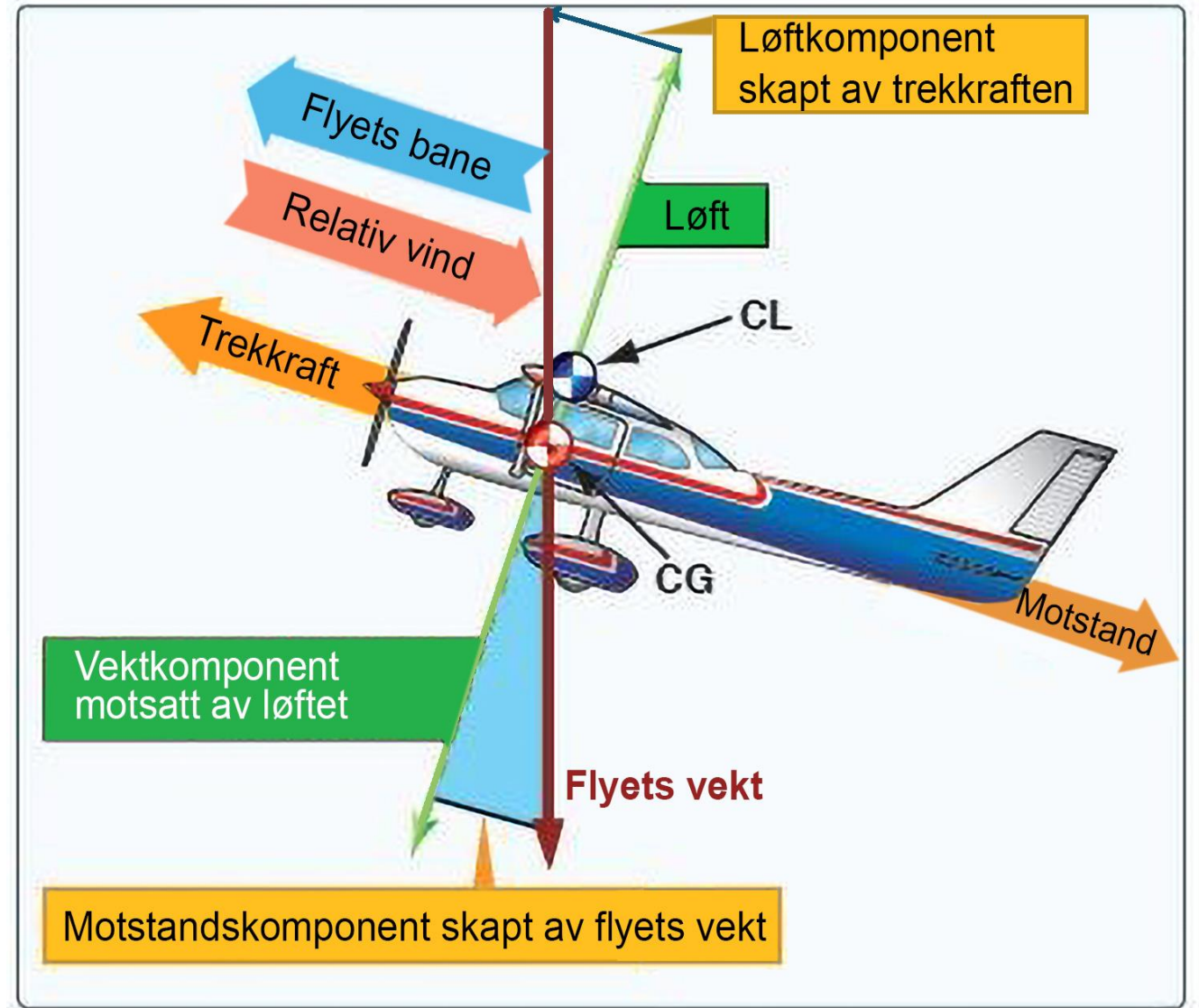
Forskjellige vinkler

- Angrepsvinkelen er vinkelen mellom vingens korde og relativ vind
- Monteringsvinkelen («angle of incidence») er vinkelen mellom vingens korde og lengdeaksen
- Nesestilling («pitch angle») er vinkelen mellom flyets lengdeakse og horisonten
- Prøv å tegne de tre vinklene opp på et ark slik at du ser forskjellene

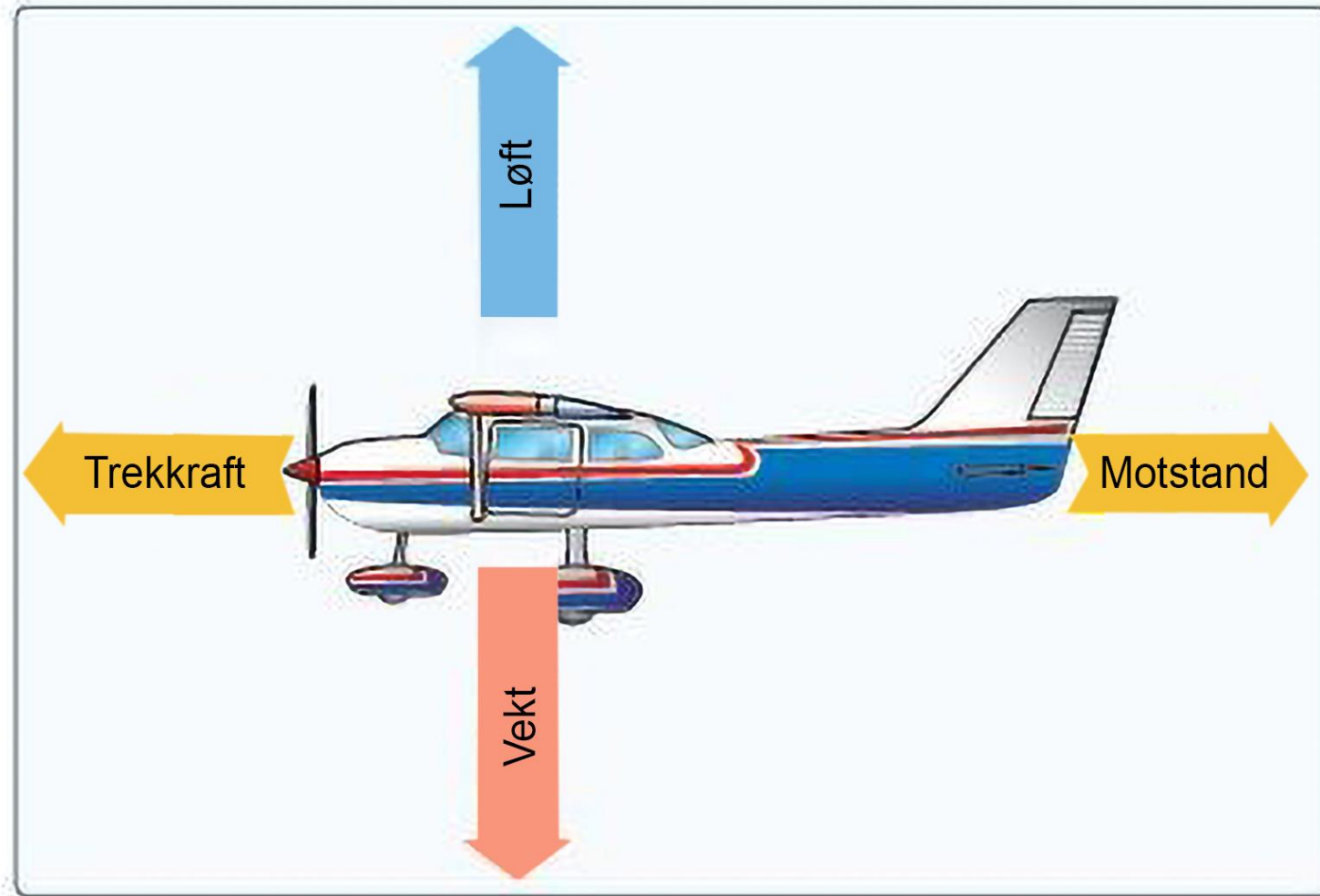
De fire kreftene

- Vi repeterer:
- Løft, motstand, trekk-kraft og vekt
- Når trekk-kraft og motstand utligner hverandre er hastigheten konstant
- Når løftet og vekten utligner hverandre er høyden konstant
- Øker trekk-kraften vil flyet akselere og hastigheten øke, og siden motstanden er avhengig av farten vil også motstanden øke
- Når motstanden er tilsvarende trekk-kraften vil flyet ikke lenger akselere, men holde en ny og høyere hastighet

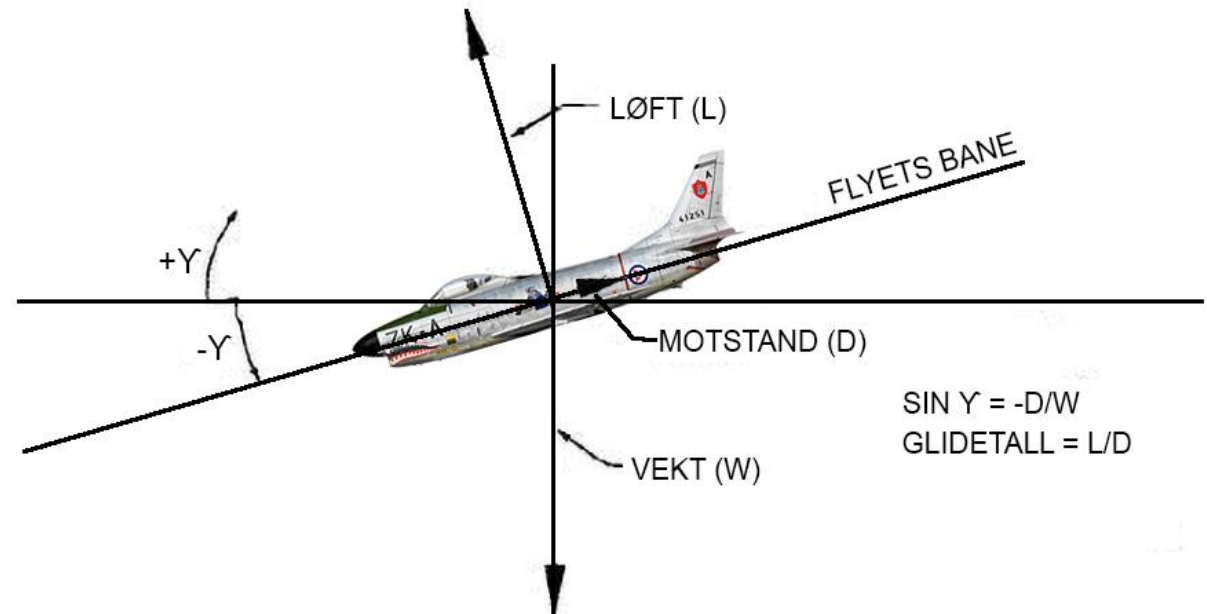
De fire kreftene i likevekt – stigning



De fire kreftene i likevekt – marsjflyging



De fire kreftene i likevekt – glidning



Sakteflyging



Sakteflyging
Høy angrepsvinkel
Mye motorkraft
Konstant høyde

- Flyets nese er plassert høyere i horisonten, hastigheten er lavere, men vi flyr fremdeles horisontal uten at farten øker eller høyden forandres

De fire kreftene i likevekt – flyging med høy AoA

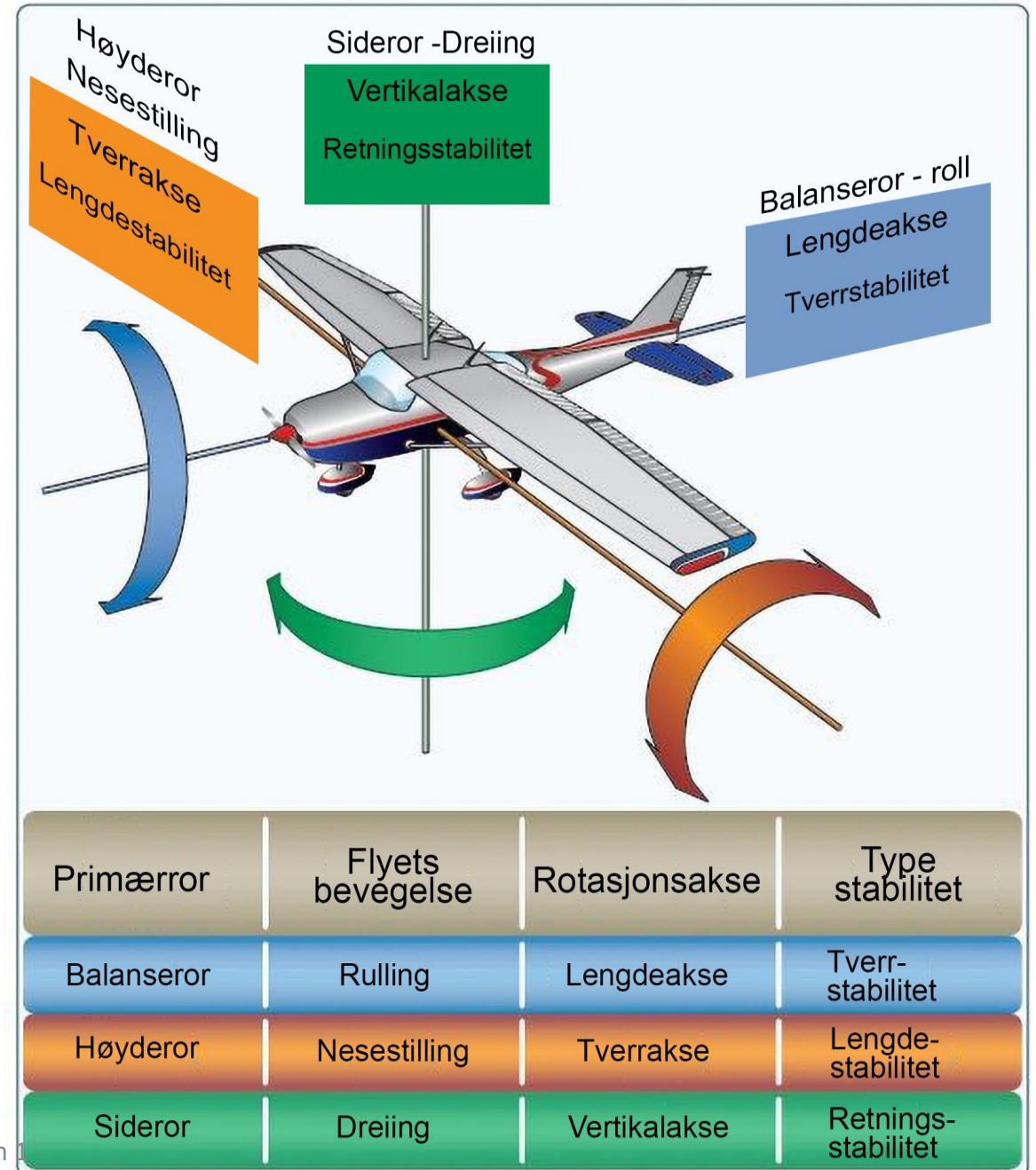


Del 3 Kontroll



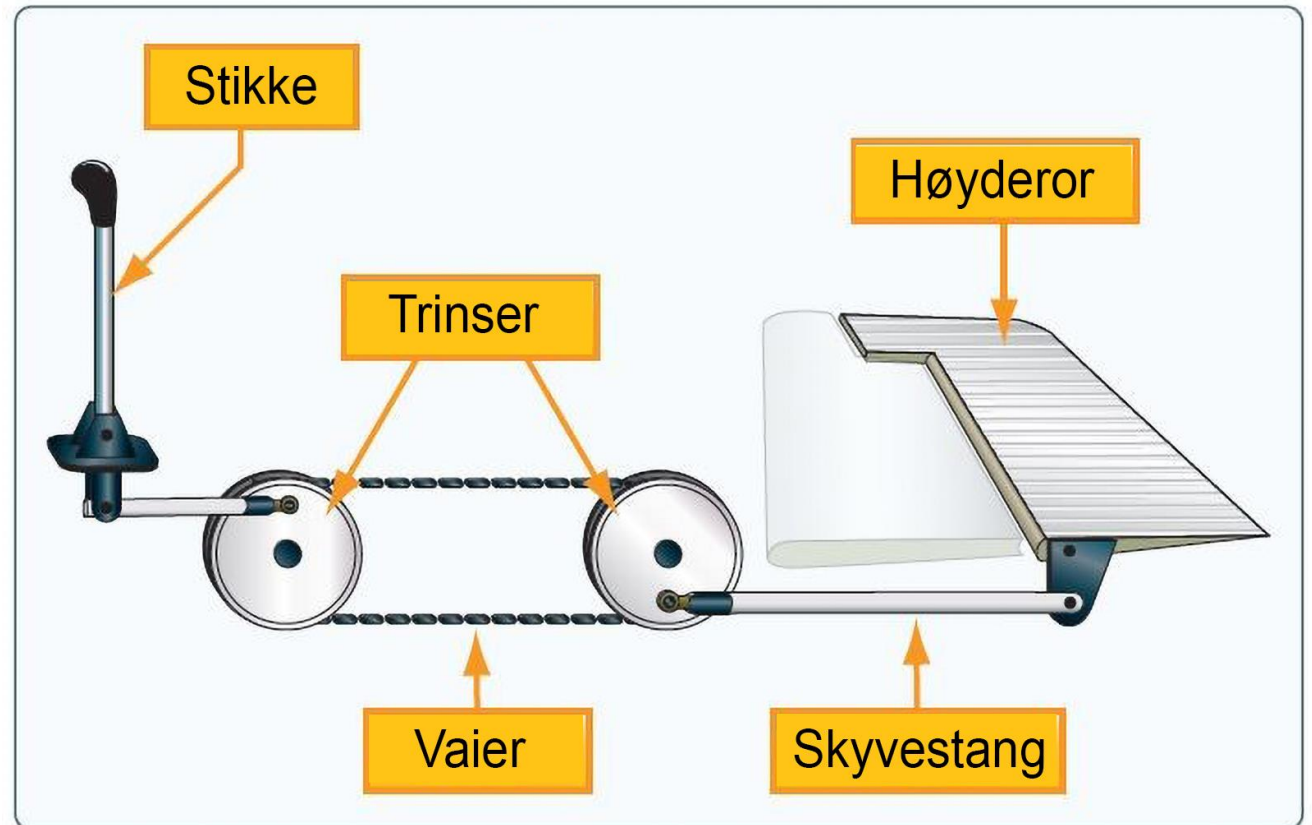
Kontroll om aksene

Ror, bevegelse, akse og stabilitet



Høyderorets primær- og sekundæreffekt

- Plassering: I halen
- Primæreffekt: Flyets nese dreier om tverraksen, slik at vi stiger eller går ned
- Sekundæreffekt: Ikke direkte aerodynamisk, men gjør at flyets hastighet synker eller går opp
- Avhengig av hvordan tyngdepunktet ligger i forhold til halen

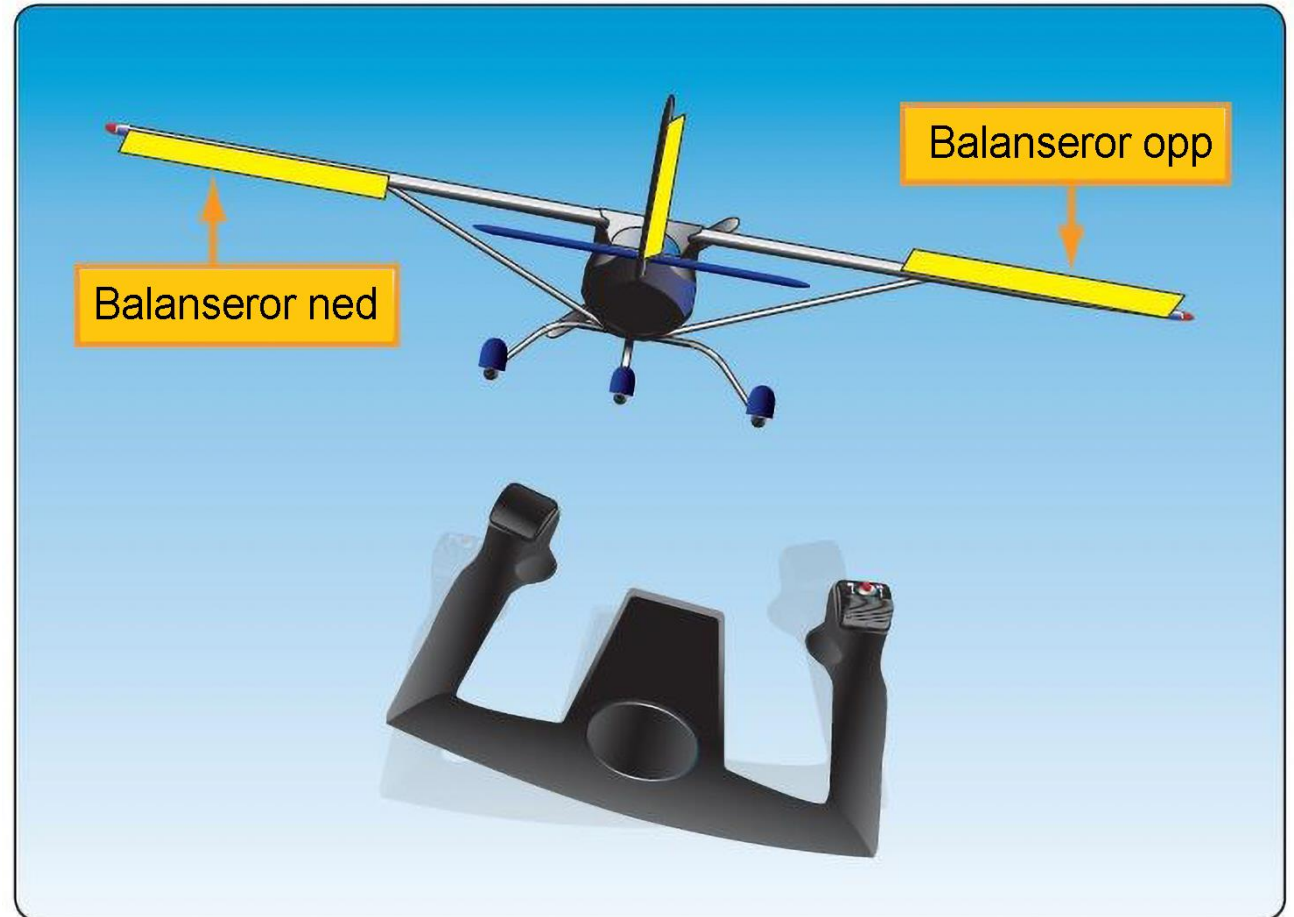


Siderorets primær- og sekundæreffekt

- Plassering: I halen
- Primæreffekt: Beveger flyet fra side til side om vertikalaksen
- Sekundæreffekt: Vi får et rullemoment om lengdeaksen. Vingen som ligger motsatt av retningen som nesen dreier, vil løftes

Balanserorets primær- og sekundæreffekt

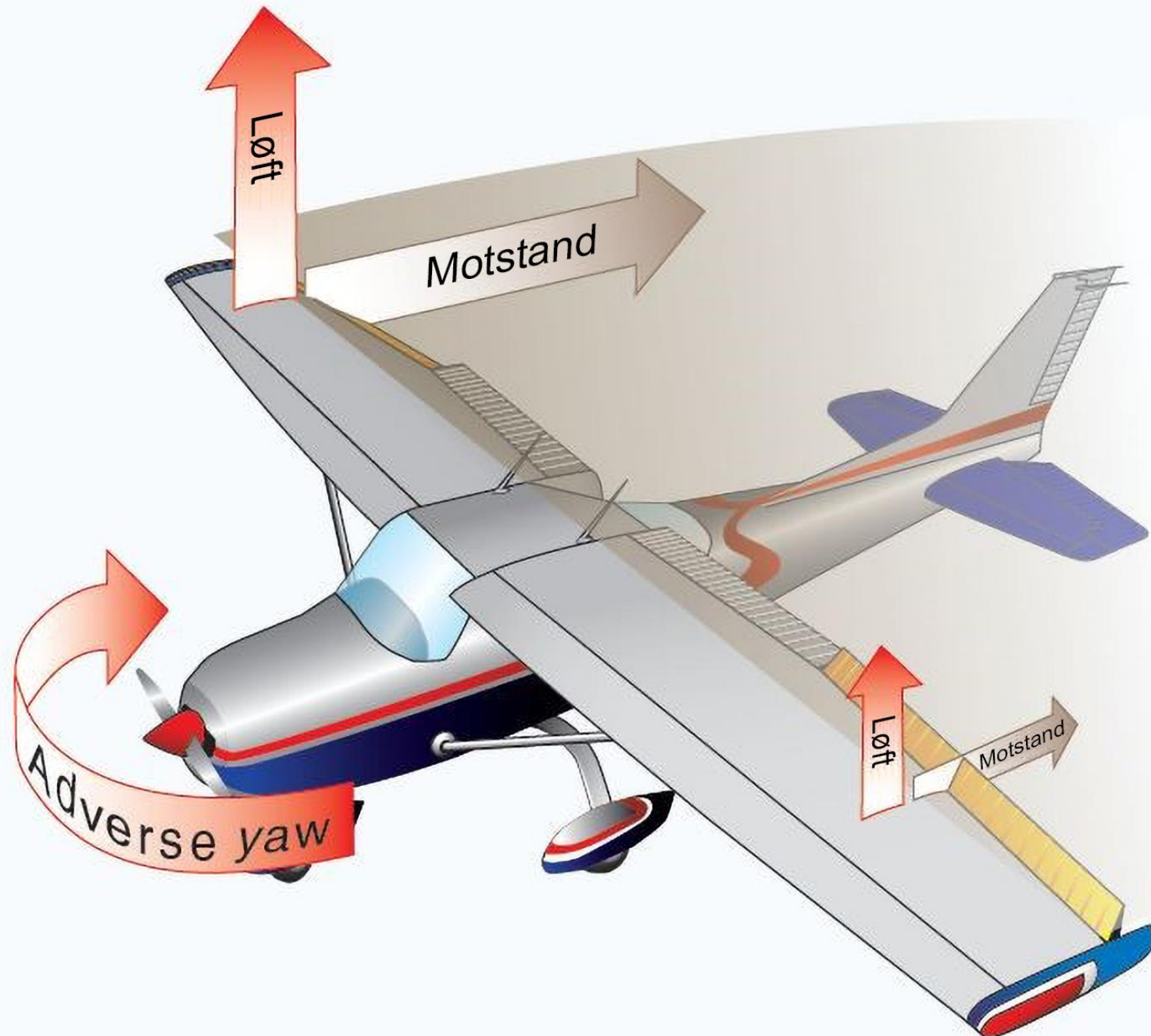
- Plassering: Ytterst på hver vinge
- Primæreffekt: Flyet krenger om lengdeaksen
- Sekundæreffekt: Flyet dreier om vertikalaksen



Balanserorsbrems

- Vingen med balanseror som går ned lager mer løft (vingen går opp) enn vingen hvor balanseroret går opp (vingen går ned)
- Det betyr mer motstand som gjør at hastigheten på vingen som går opp synker
- Vingen bremser i forhold til den vingen som går ned og vi får balanserorsbrems («adverse yaw») – det vil si en dreining motsatt den veien vi krenger
- Vi fikser dette ved enten å differensiere balanserorene, det vil si at balanseroret som går opp, går lengre opp enn balanseroret som går ned, noe som gir større motstand på vingen som går ned,
- eller ved å montere såkalte «friseror» hvor rorene er hengslet slik at roret som går opp stikker forkanten ned på undersiden av vingen og dermed bremser.
- Begge disse metodene eliminerer ikke balanserorsbrems fullt og helt

15.01.2020



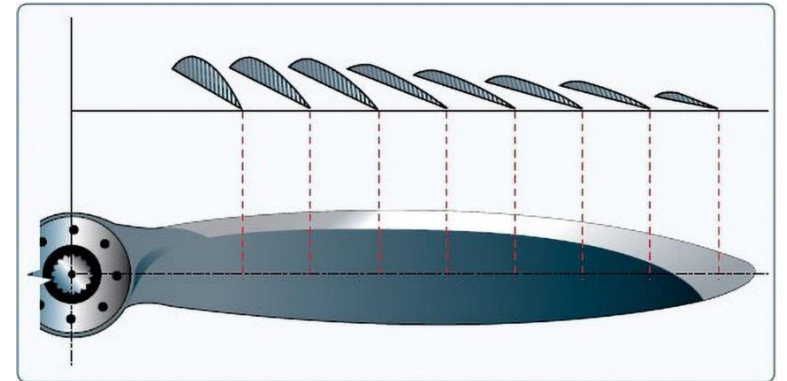
Versjon 1

Nedsveip fra vingen og innvirkning på halen

- Når vingen utvikler løft, vil luften strøkke over og deretter nedover bak vingen, det kaller vi for nedsveip, etter det engelske ordet «downwash»
- Luften som strøkker ned bak vingen treffer oversiden av haleflaten, og skaper en kraft som virker nedover
- Dess hurtigere vi flyr, dess større er kraften på haleflaten (med unntak av T-haler). På fly hvor det er en fast haleflate og et bevegelig høyderor, konstruerer flyfabrikanten derfor haleflaten i en vinkel som gir best stabilitet (balanse) under marsjhastighet / trekk-kraft for akkurat det flyet

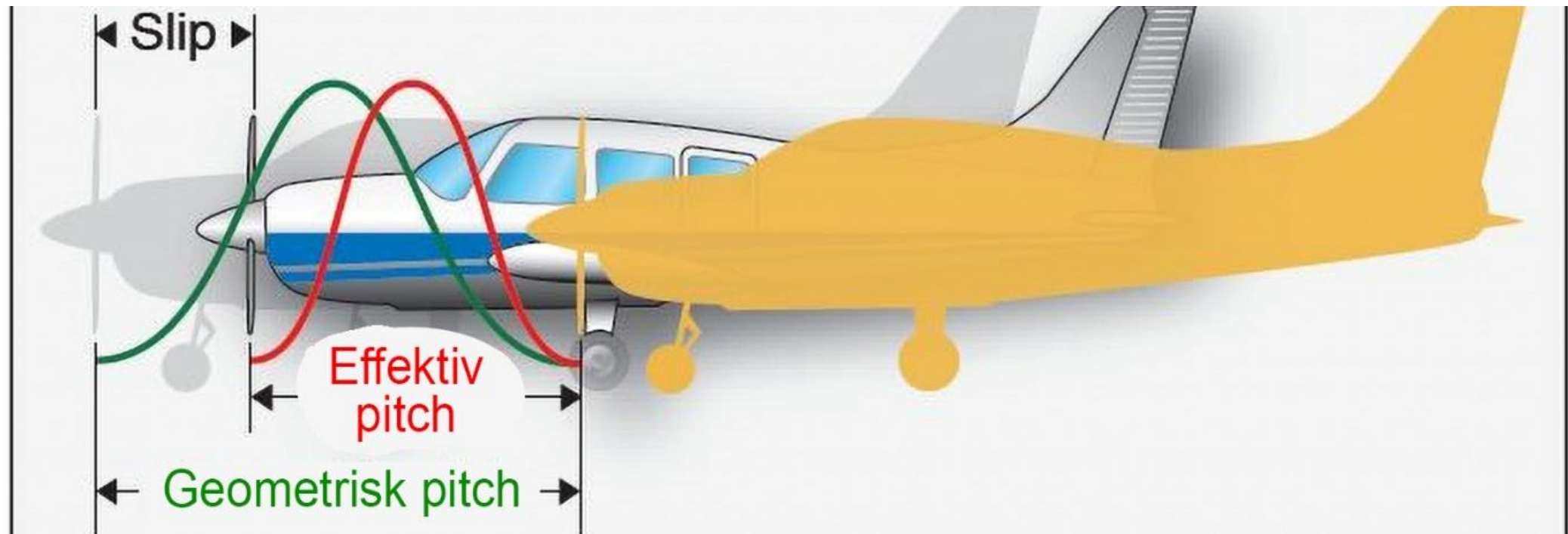
Propellens bladvinkel

- Propellbladene er vridde, det vil si at bladvinkelen avtar gradvis fra propellnavet til propelltippen.
- Det skyldes at propelltippen beveger seg fortere enn den delen av propellen som er nærmest navet og vil tilbakelegge en lengre distance i rotasjonsplanet enn bladvinkelen.
- Uten vridning får vi en forskjellig trekk-kraft over hele propellbladets lengde, noe som ville gitt en stor stressbelastning på bladet



Propellens geometriske og effektive stigning

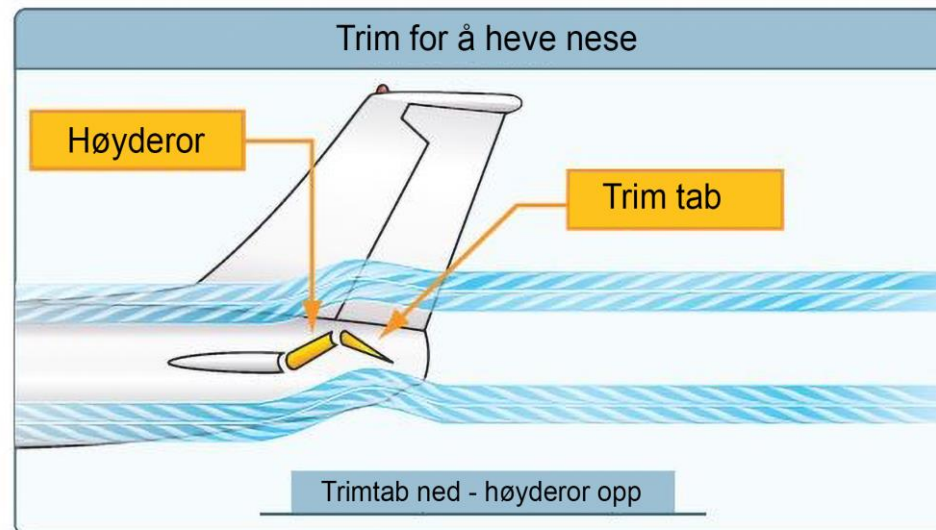
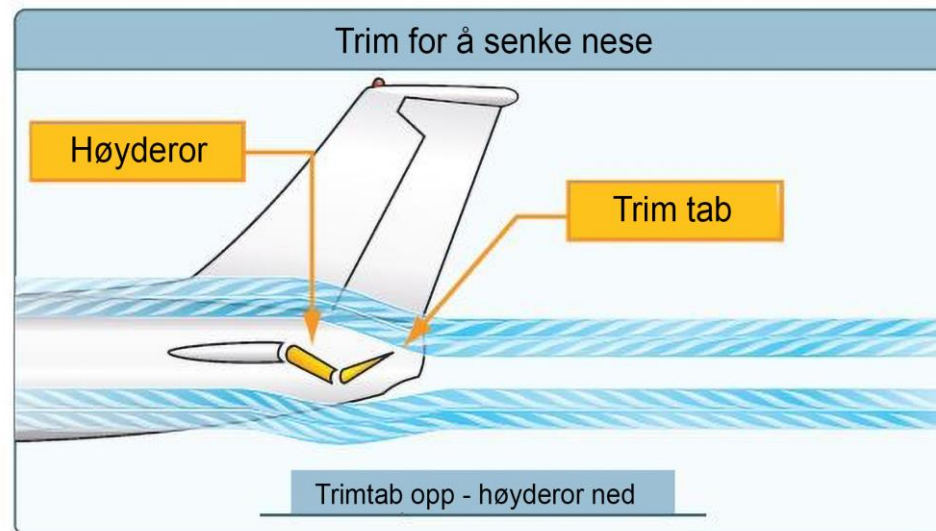
- Vi kaller forskjellen mellom geometrisk (eller teoretisk) stigning, og effektiv stigning for «propeller slipp».
- Geometrisk stigning er den distansen det tenkes at propellen beveger seg på en omdreining under forutsetning av at det ikke er noe slipp.
- Effektiv stigning er den distansen den virkelig beveger seg, slik at $\text{geometrisk stigning} - \text{effektiv stigning} = \text{slipp}$.

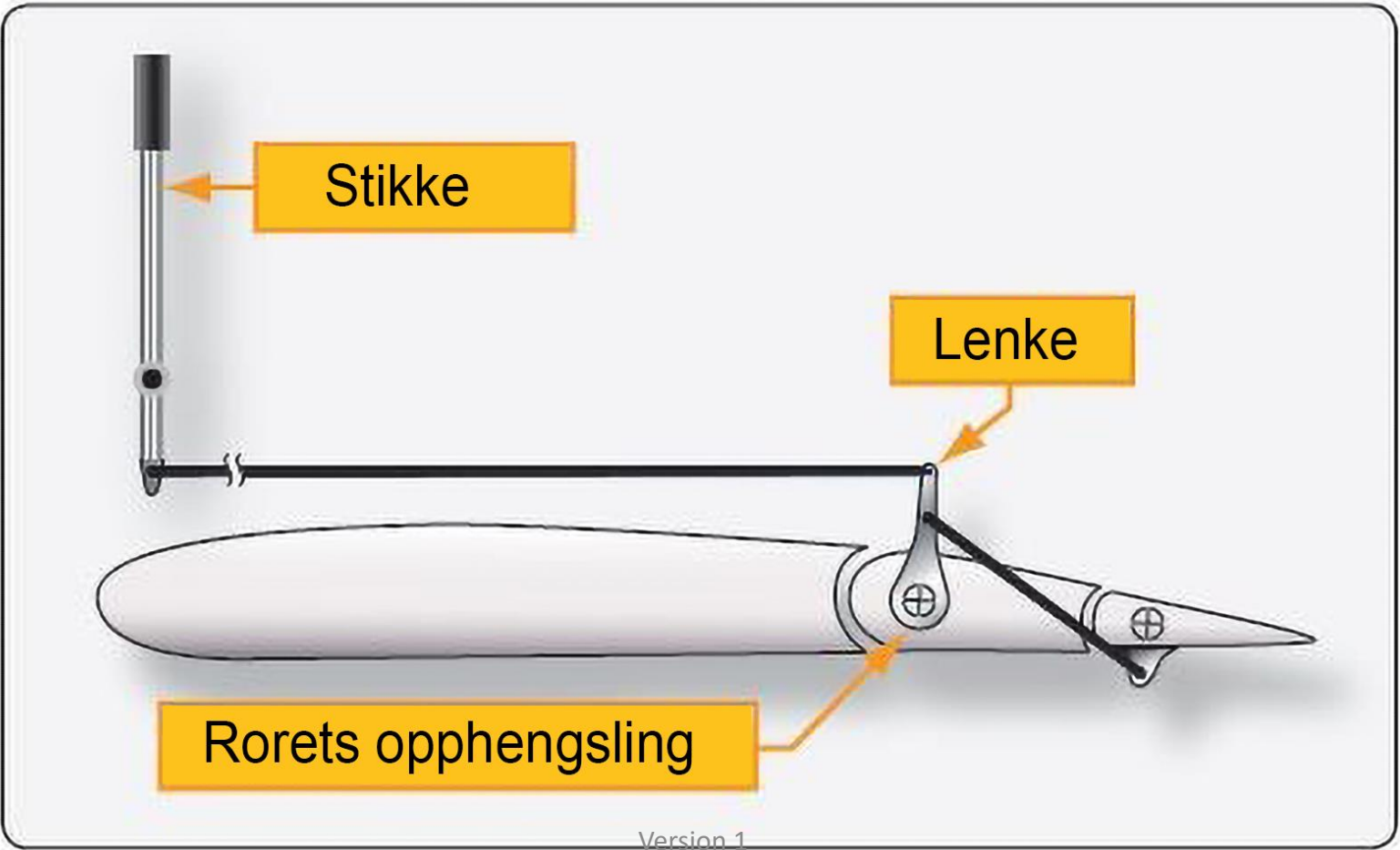


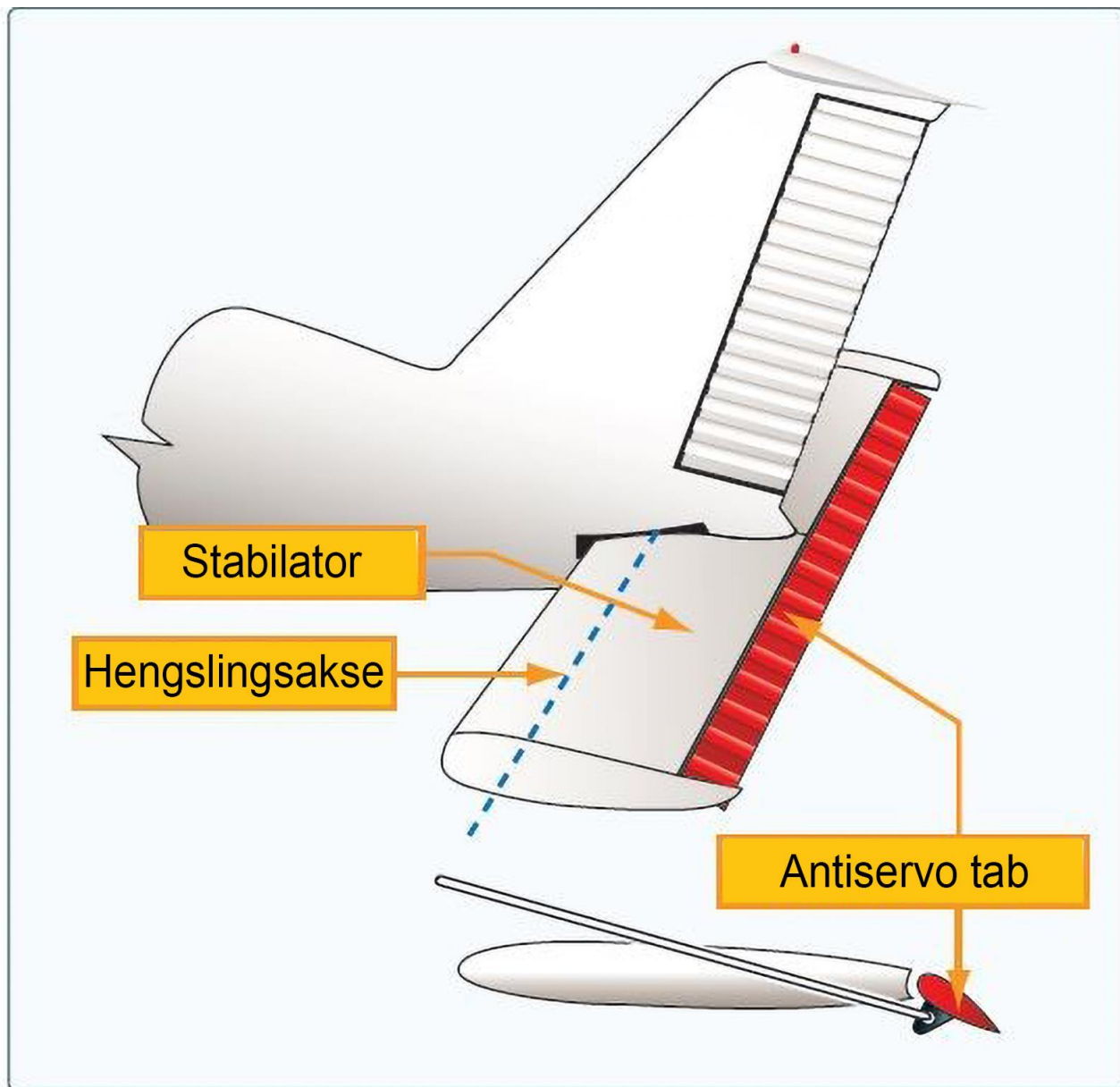


Metoder for å minske krefter som må til for å bevege ror

Trimror







Antiservo-tab



Oversikt hjelperor

Hjelperor og funksjon		
Navn	Plassering på flyet	Funksjon
Flaps	På bakkanten av hver vinge inn mot vingeroten	Øker vingens krumming slik at vi får høyere løft, og kan fly saktere. Det kan igjen gjøre det mulig og lande og å ta av fra korte baner
Trim-tabs	På bakkanten av hovedror	Reduserer kraften som må til for å bevege et hovedror
Balanse-tabs	På bakkanten av hovedror	Reduserer kraften som må til for å bevege et hovedror
Anti servo-tabs	På bakkanten av hovedror	Øker flygerens kontroll på- og hovedrorets effektivitet
Servoror	På bakkanten av hovedror	Hjelper å bevege hovedroret
Spoilers	På oversiden og / eller mot bakkanten av vingen	Minker løftet. Kan også hjelpe til med å krenge flyet
Slats	På forkanten, fra midten av vingen og utover	Øker vingens krumming og gjør at vi får mer løft og kan fly saktere. Lager en slot som luft kan strømme igjennom
Slots	På forkanten, fra midten av vingen og utover	Leder luft opp til oversiden av vingen ved høye angrepsvinkler. Senker steilefarten og gir bedre kontroll på lave hastigheter



Del 4 Begrensninger



Flutter

Hva er flutter?

- Når et materiale blir utsatt for en kraft som virker med samme frekvens som materialets egenfrekvens, kan det oppstå resonans og sterke svingninger - aeroelastisitet
- Kan eksempelvis oppstå ved at variasjon i strømming over en vinge gir endring i trykkfordeling, som igjen påvirker strømmingen, som igjen gir gjentatte endringer og så videre – og det oppstår en syklus.
- I et fly kan en slik resonans føre til flutter i vinger eller ror og rorflater.
- Flutter oppstår som oftest i høye hastigheter og fører raskt til at flyets struktur bryter sammen, om vi ikke får kontroll
- Vi kan føle flutter ved at det er vibrasjoner i rorkontrollene, og vi kan se det dersom vi tar øynene på vingene eller halepartiet

Årsaker til flutter

- Vi kommer inn i vindkast og/eller turbulens og har i utgangspunktet høy hastighet
- Hengslingspunktene til kontrollflater / ror er ikke godt nok balansert, slik at de kommer i egensvingninger
- Tyngdepunktet til rorene (spesielt balanserorene) kan være flyttet
- Luftens tetthet spiller inn på hvordan svingningene oppfører seg, høy tetthet vil utsette punktet hvor flutter slår inn, og også dempe svingningene noe



Konstruksjonsmetoder for å redusere sjansen for flutter

- Konstruktøren kan flytte rorets tyngdepunkt foran hengselinjen ved å
 - Montere innvendige eller utvendige motvekter foran hengselinjen
 - Montere horn
 - Montere bob-vekt(er)
 - Flytte hengselinjen til roret
- Når rorene er avbalansert med vekter kalles det for masseavbalansering
- Når rorene er avbalansert med horn kalles det for aerodynamisk avbalansering



Hastigheter

Hastigheter som er markert på fartsmåleren

Markering	Beskrivelse	Hastighet
Hvit bue («white arc»)	Buen viser hastighetsområdet hvor det er tillatt å bruke flaps. Buens nedre grense er V_{S0} mens øvre grense er V_{FE}	V_{S0} = hastighet for steiling med full flaps V_{FE} = maksimum hastighet for flyging med flaps utfelt
Grønn bue («green arc»)	Dette er normalt operasjonsområde og går fra V_{S1} til V_{NO}	V_{S1} = hastighet for steiling med flaps innfelt («stall clean speed») V_{NO} = maksimum hastighet for normal operasjon («maximum normal operating speed»)
Gul bue («yellow arc»)	Hastigheter i gul bue er i forsiktighetsområdet hvor vi kun aksepterer flyvning om luften er stille. Det er heller ikke tillatt med fulle rorutslag i dette området. Området går fra V_{NO} til V_{NE}	V_{NE} er en hastighet som aldri skal overskrides («Never Exceed Speed»)
Rød linje («red line»)	Rød linje markerer V_{NE} . Går vi over denne hastigheten vil flyet bli strukturelt skadet	

Hastigheter som ikke er markert på fartsmåleren

- Manøvreringshastighet V_A
- Hastighet for å fly med understell ute V_{LE} («Landing gear extended speed»)
- Hastighet for å sette ut eller ta inn understellet V_{LO} («Landing gear operating speed»)



Manøvreringshastighet

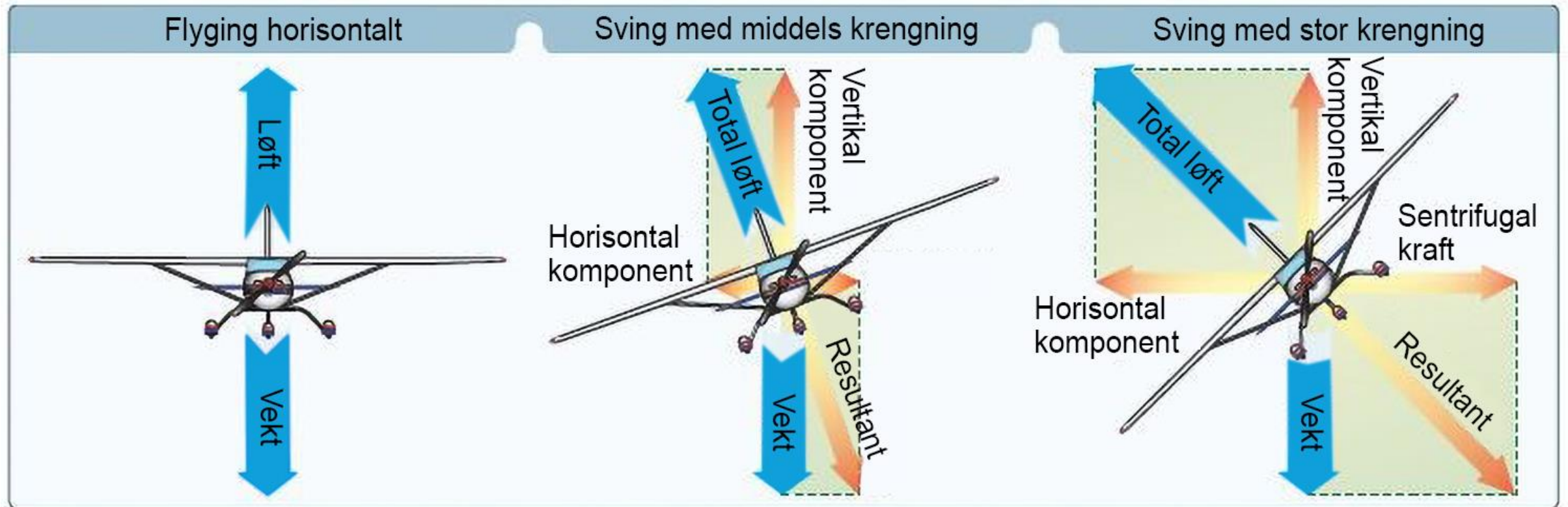
V_A

- Manøvreringshastigheten oppgis normalt med to eller flere verdier avhengig av flyets masse
- Hastigheten synker når vi flyr med et lettere fly, da de aerodynamiske kreftene på et lettere fly får en større strukturell innvirkning
- Vi har ikke lov å overskride V_A i turbulent luft



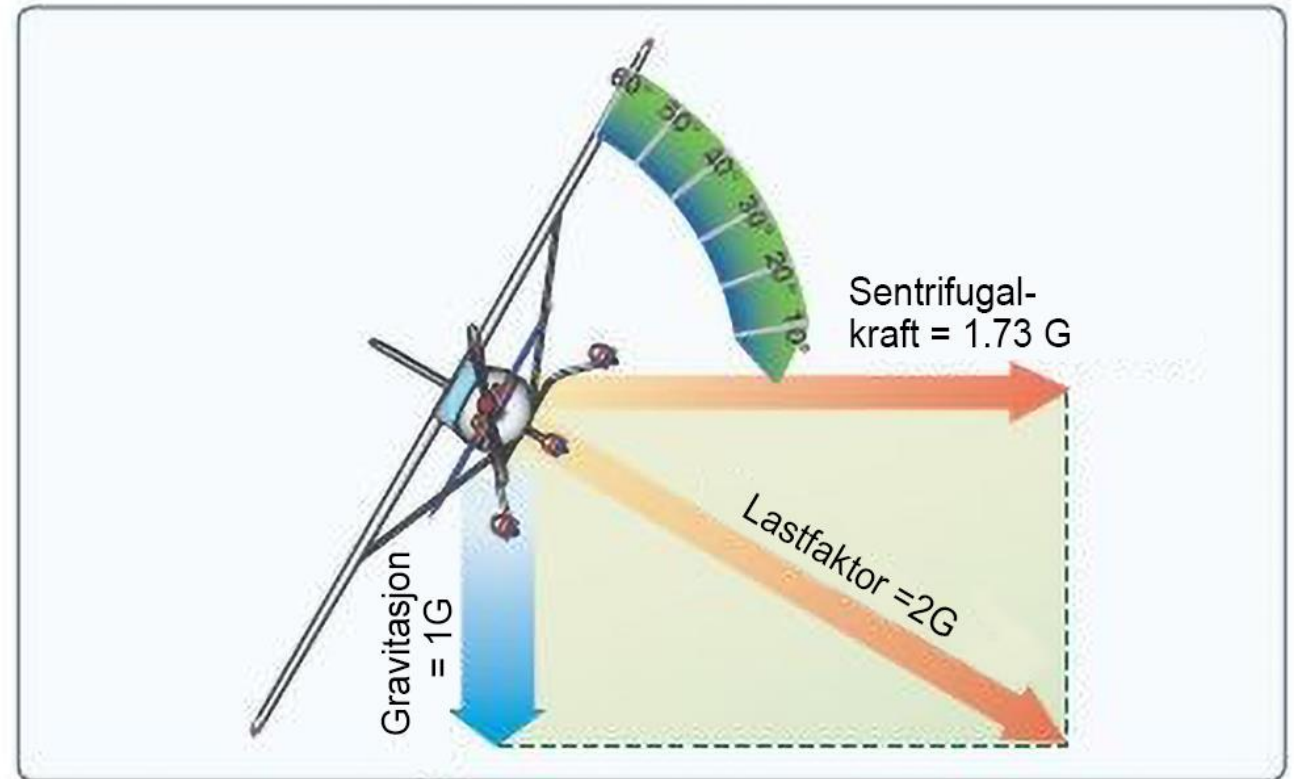
Lastfaktor

Krefter i en sving



Hva er lastfaktor?

- Den belastning flyet opplever under flyging
- Regnes ut ved å ta flyets løft delt på vekt
- Måles i tyngdens akselerasjon
- Sving endrer lastfaktoren

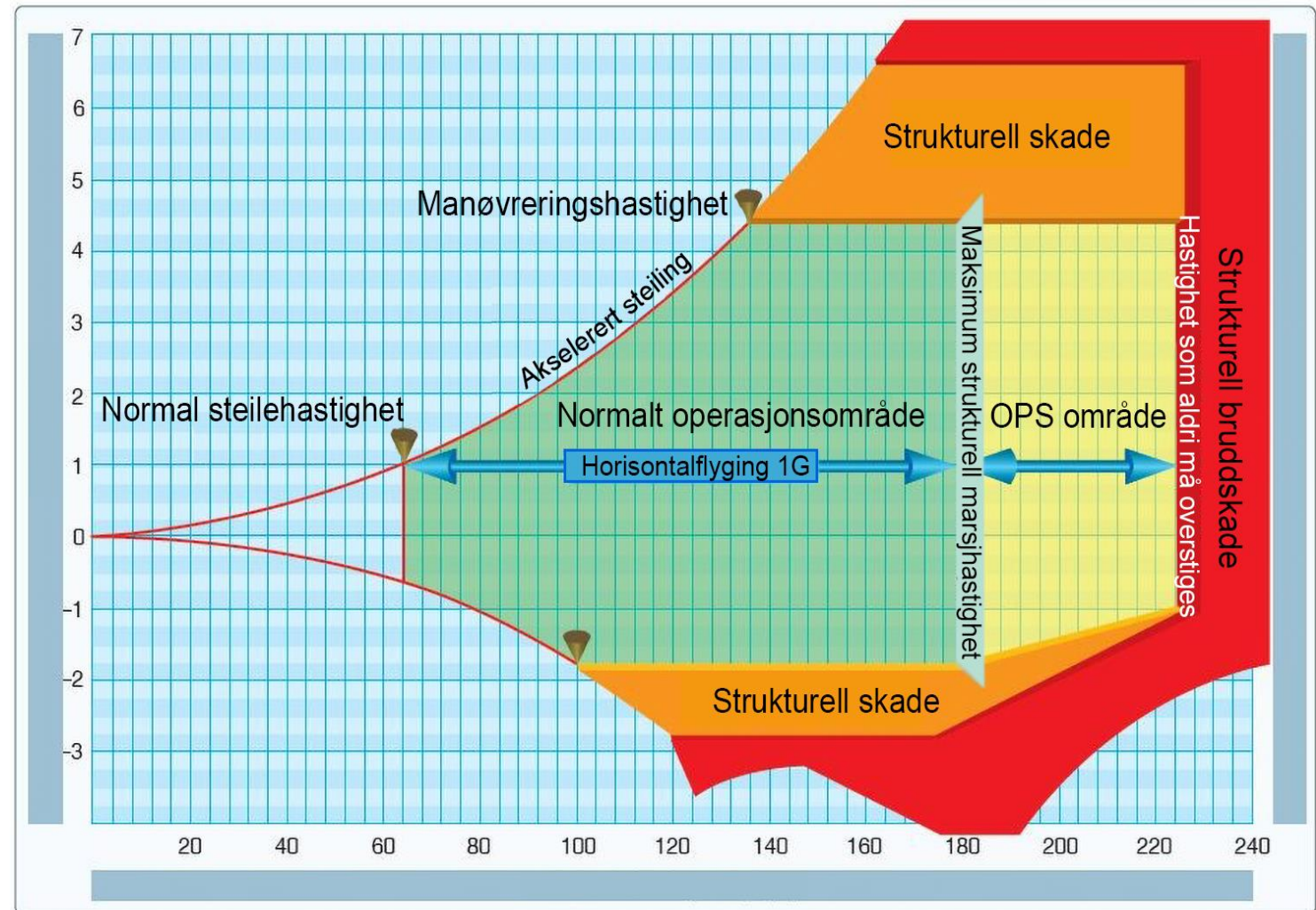


Øket krenging gir øket lastfaktor og steilefart

Krenging i grader:	- tilsvarer en lastfaktor på:	- og gir en økning i steilefart på:
30°	1,15	ca. 1,1
45°	1,44	ca. 1,2
60°	2,00	ca. 1,4

Lastfaktordiagram

15.01.2020



Versjon 1

Skid og slip i en sving

15.01.2020

Skiddende sving



Kula går ut av svingen



Flygeren kjenner sidekrefter som presser ut av svingen

Koordinert sving



Kula ligger i senter



Flygeren kjenner krefter rett ned i setet

Slippende sving



Kula går inn i svingen



Flygeren kjenner sidekrefter som presser inn i svingen

Vektskift

- Disse luftfartøyene styres direkte med en bøyle som er festet til vingen. Bøylen brukes som en vektstang, og en flytter vekten sideveis eller fram og tilbake for å endre retning og høyde
- Trehjulsvognen med nesehjul kalles ofte bare «trike» i dagligtalen
- Det er laget en egen presentasjon om vektskift for de som skal ha utdanning på dette styringssystemet





Slutt fag 5