

Lyftkraft utan Bernoulli:

# Ge luften fart nedåt skapar lyftkraft

Det är själva accelerationen av luftmassan nedåt som ger lyftkraft. Glöm allt om "längre väg på översidan"!

Av Martin Ingelman-Sundberg  
Kompletterande teckningar Torgil Rosenberg

Med några få undantag tycks hela världens pilotutbildningslitteratur ge en felaktig föreställning om hur lyftkraft uppkommer. Den internationellt kände vetenskaparen Daniel Bernoulli (1700 - 1782) formulerade en fysikalisk lag som i dessa sammanhang blivit omvänt felaktigt. SKANDINAVISK FLYGHORISONT gör här med hjälp av Martin Ingelman-Sundberg ett försök att ställa allt till rätta.

Martin Ingelman-Sundberg har varit chef för sektionen för underljuds aerodynamik vid Flygtekniska Försöksanstalten FFA 1953-1983, blev privatflygare redan 1939 och är det alltså. Han anser att kunskapen om det rätta förhållandet inte är väsentlig för flygsäkerheten. Det finns åtskilliga olyckor - med stora konsekvenser - som till en del kan ha orsakats av de felaktiga föreställningar som rått.

## Kraft och motkraft

Det förefaller som väldigt många människor av rent allmänintresse vill veta hur flygplan kan hålla sig uppe, men dessutom finns en hel kategori - piloterna - som anses böra känna till hur lyftkraft kan skapas, dvs hur man utan fast underlag kan skapa en kraft uppåt. Lyftkraft har sedan länge behandlats i avsnitt om flygteori under pilotutbildningen.

Det är viktigt det verkligen är att piloterna förstår hur lyftkraft uppkommer, är naturligtvis diskutabelt. Dock har under årens lopp ett antal olyckor skett som kanske skulle ha förebyggts om undervisningen om lyftkraftsskapande varit riktigare än vad som är vanligt i dag. Det gäller speciellt några olyckor i USA som tillskrivits vad som kallas "opredikerbar (!) wake turbulence", istället för bristfällig flygteoriundervisning.

Trots att tidigare meningsfyllda förklaringar till lyftkraften använts åtminstone i Tyskland och Sverige, så har egendomligt meningslösa och felaktiga förklaringar kommit in i några viktiga och mycket påkostade läromedel, och i flera amerikanska och engelska encyklopedier. Och - värst av allt - både i FAAs normgivande

"Pilot's Handbook of Aeronautics" och "Flight Training Handbook" och som rekommenderad teori i ICAOs "Training Manual". De har därmed blivit "sanning" och svåra att förneka. De

kraft i någon riktning när man inte har något fast att ta spjärn emot, är att med något slag av anordning accelerera något slag av massa i motsatt riktning.

När det gäller lyftkraft så är

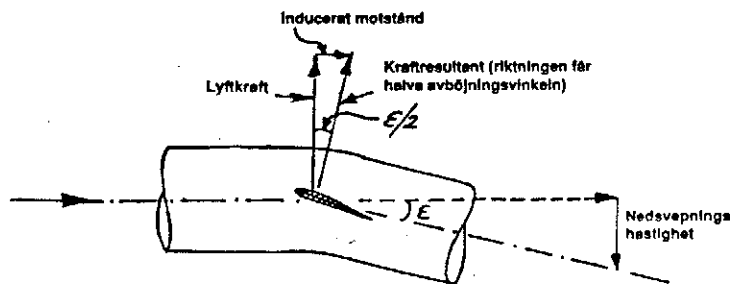


Fig 1. Nedsvepningshastigheten för en vinge med elliptiskt fördelad lyftkraft blir som om vingen aktiverar en luftmassa genom ett "strömrör" med spännvidden som diameter.

skall kommenteras senare i denna artikel. Glädjande undantag utgör dock Erik Bratt's "Praktisk Flygteknik", 1982, och W. Lange-wiesche "Stick and Rudder" i USA.

Tyvärr har detta också medfört att samma felaktigheter vidarebefordrats till nya generationer i segelflygets nya, vackra, obligatoriska utbildnings-bok (1990), godkänd av KSAK och Luftfartsverket.

## Grundprincipen för aerodynamisk lyftkraft

Grundprincipen för att skapa en

det vingen som accelerar en viss mängd av den passerande luften nedåt. En kubikmeter luft har vid marken massan 1,25 kg, dvs en kub med 10 m sidan massan 1,25 ton. (!) Massan är trög, och ger reaktionskrafter om den tvingas ändra sitt rörelsetillstånd. Newton formulerade redan 1687 sina tre lagar om tröghet och reaktion. De är fortfarande de avgörande för vad som händer med både flygplan och luften däromkring.

För 70 år sedan utvecklade den kände tyske aerodynamikern och vetenskapsmannen Ludvig Prandtl sin virvelteori

för beräkning av vingars lyftkraft och strömningsfält. Han visade då också att, om lyftkraften är elliptiskt fördelad i spännviddsled, vilket är optimalt, så verkar det så som om vingen böjer av luftmassan i ett cirkulärt "strömrör" med spännvidden som diameter. Se figur 1.

Den energi per sekund, som måste tillföras den nedåtsvepta luftmassan, dividerad med flyghastigheten, är det inducerade motståndet. Hurnedsvepshastigheten för denna luftmassa varierar med flyghastigheten visas i fig 2.

På 5000 m höjd, där det råder halva lufttäteten, måste nedsvepningshastigheten fördubblas, dvs anfallsvinkeln ökas om inte verkliga farten ökas (true airspeed). Med ställbar propeller och möjlighet att bibehålla effekten sker det "automatiskt".

Eftersom den erforderliga lyftkraften är proportionell mot lastfaktorn, måste nedsvepningsgraden vid brant sväng ökas i motsvarande grad (=högre anfallsvinkel eller högre fart).

## Virvelbildning

Den luftmassa som rör sig nedåt samverkar sedan med den omgivande luften så att denna successivt strömmar dels inåt ovanför, och dels utåt sidan nedanför. Efter en viss tid, när flygplanet har hunnit några spännvidder bort, har det utbildats två parallella luftvirvlar som roterar mot varandra och som relativt sakta rör sig nedåt. Inbördes avståndet mellan dem är ungefär 0,8 ggr spännvidden (figur 3).

Bakom 4-motoriga jetplan kan man ofta se denna successiva virvelkoncentration genom att det två motorkondensstrålarna på

En ännu mer uttömmande artikel i detta ämne - "Lyftkraft utan Bernoulli" - kan beställas hos Svenska Mekanisters Riksförening, Storgatan 19, Box 55, 114 85 Stockholm, tel 08-783 82 31, fax 08-660 33 78. Pris 50:-

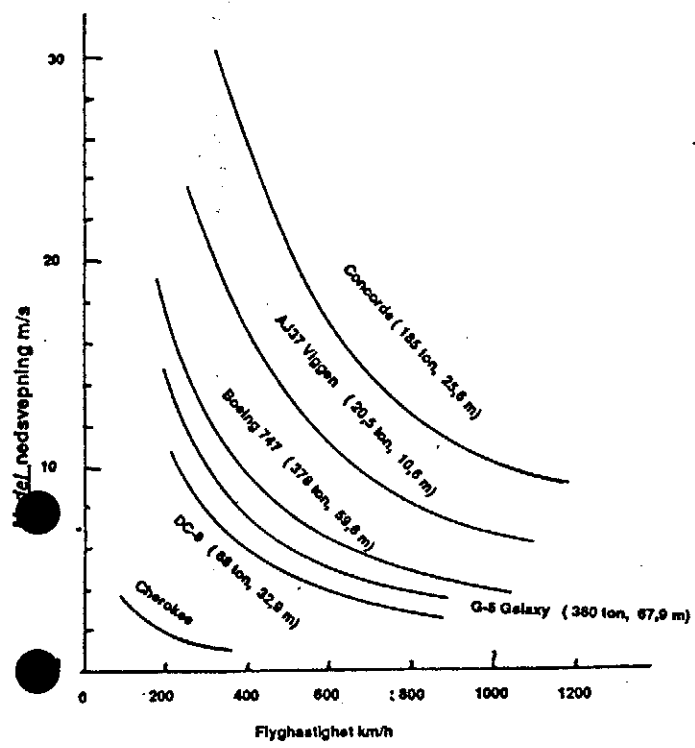


Fig 2 visar hur nedsvepningen vid rak flygbana varierar med hastigheten för några olika flygplansklasser. När virvlarna hunnit koncentreras några spännvidder bakom kan lokalt nära virvelcentra upp till 5 ggr större tvärhastigheter uppstå. Bombplanet B 70, som nämns i texten, kan jämföras med Concorde.

varje sida lindar sig runt varandra, och liksom sammansmälter, varvid de samtidigt visar var virvelcentra ligger.

Det är dessa koncentrerade virvlar som kan vara mycket farliga om ett litet plan kommer in i dem. Lokalt nära deras virvelcentra blir tvärhastigheterna flerdubbelt starkare än den i figur 2 visade medelnedsvepningen närmast bakom vingen. Det lilla planet kan mycket väl få 20-30 m/s uppvind för ena vingen, och en lika stor nedvind för den andra. Vid prov på höjd lär en DC9 - som gick in bakom en 747 - ha kastats över på rygg. Att korsa ett virvelpar vinkelrätt kan också skapa urhållfasthetssynpunkt farligt stora belastningar. Vingbrott har förekommit.

Ofta påstås "att virvlarna orsakas av läckage runt vingspetsen", och de kallas därför "spetsvirvlar". Det kan vara ett missledande namn, eftersom det ger sken av att det rör sig om något litet, lokalt strömningsfenomen endast orsakat av själva vingspetsen.

**Så skapar vingen nedsvepet**

När man diskuterar vad som händer på grund av den relativa rörelsen mellan atmosfären och vingen kan man antingen be-

trakta det som det verkligen är - att vingen rör sig genom en från början stillastående atmosfär - eller som man ser det när man följer med flygplanet eller tittar in i en vindtunnel, dvs luften

strömmar förbi.

Vingen - det kan mycket väl vara en platta - är i vila omsluten på alla sidor av atmosfären, som vid marken utövar ett tryck av 100 000 Pa på alla dess sidor. (Pa = Pascal. 100 000 Pa = 1000 hPa = 1013 mb.) Lyftkraften är då 0 eftersom trycken över och under vingen balanserar varandra.

Om vingen däremot rör sig framåt med en liten vinkel, anfallsvinkel, relativt rörelseriktningen, tvingas luften närmast undersidan att röra sig nedåt, varvid trögheten hos dessa "luftpaket" orsakar en reaktionskraft mot vingundersidan som adde-

ras till atmosfärstrycket, så att det lokala trycket blir större än detta. Tryckökningen börjar redan en bit från profilen och ökar succesivt in mot ytan.

Ovanför vingen kommer det 100 000 Pa starka atmosfärstrycket att tvinga de närmaste luftskikten in mot den undanvikande vingöversidan, men trögheten hos deras massa, medför att en del av de 100 000 Pascalen avlastas från vingytan, så att trycket över denna blir lägre än atmosfärstrycket.

Vid framkanten - mellan övertrycksområdet under ving-

(forts nästa sida)

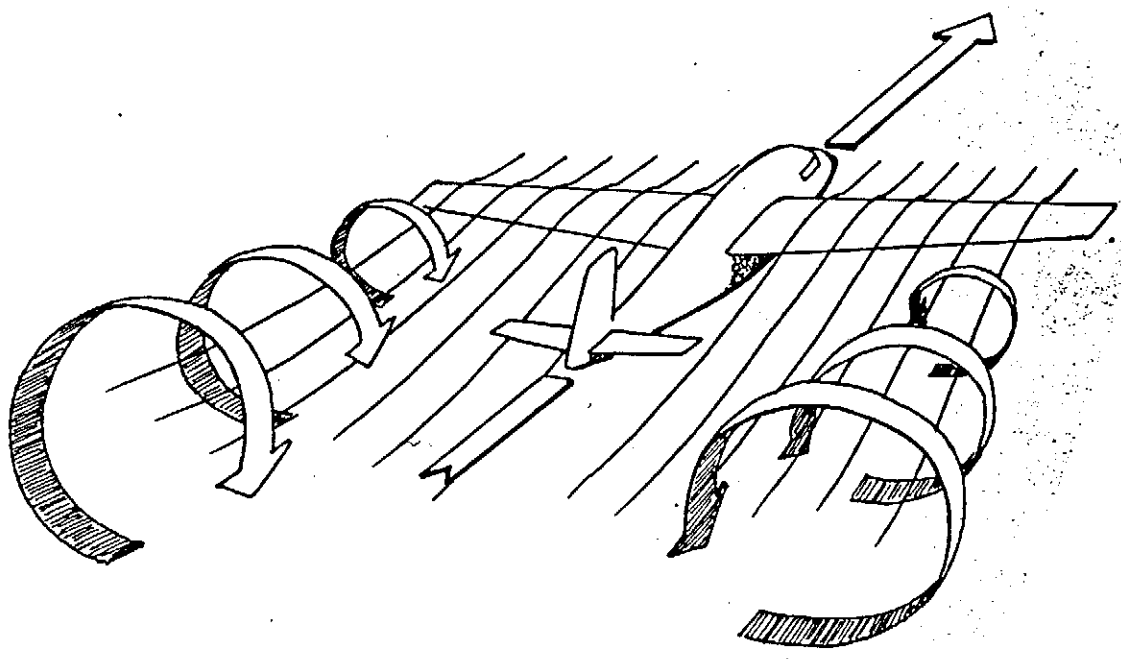


Fig 3: Hela vingen är det verktyg som accelererar luftmassan nedåt. Ovanför denna strömmar luft in från sidorna och nedanför ut mot sidorna så att en virvelbildning uppstår. Det är dessa virvlar som har kallats "unpredictable wake turbulence". Speciellt i samband med stora tunga plans start och landning är de farliga för andra flygplan. Jämför med fig 2!

## Ge luften fart nedåt...

(forts fr föreg sida)

en och det undertryck som råder ovanför vingen - kommer luften att **accelereras uppåt** på grund av att varje litet "mikroluftpaket" påverkas av ett högre tryck på sin undersida än på sin översida, och alltså bli utsatt för en

accelererande kraft uppåt. När de skall böja av runt framkanten inträffar emellertid ytterligare ett fenomen, nämligen att **centrifugalkrafterna** på "paketen", på grund av den starkt krökta banan, kommer att bli mycket

stora, och balanserar en mycket större del av atmosfärtrycket än för vingöversidan i övrigt. Det låga trycket gör att den lokala hastigheten ökar ytterligare, med åter ökade tryckavlastande centrifugalkrafter som följd.

Ser man det från planet - så att luften strömmar förbi (fig 4) - kan man tala om centrifugalkrafter inte bara runt själva profilosen, utan även längre bak över vingen.

orsaka en motsvarande omströmning också vid bakkanten. Den skulle då dels minska övertrycket under vingens bakre del, men också fylla ut och reducera undertrycket ovanför vingen så att ingen lyftkraft skulle bli kvar. Fenomenet **avlösning** för undersidans strömning vid bakkanten utgör alltså lyftkraftens förutsättning men samtidigt, för översidans strömning, dess begränsning.

# rätt



Lyftkraft åstadkommes genom att vingen - i detta fall en plan platta med anfallsvinkel - accelererar luften nedåt. Detta ger en reaktionskraft (motkraft) uppåt (=lyftkraft).

# fel

(ur Time-Life-Svalan: Flyg)



**BERNOULLIS PRINCIP** som förklarar hur lyftkraften skapas av ett flygplansvingar. Illustreras i dessa tre schematiska teckningar. En vätska, som pressas igenom en förträngning i ett rör (ovan), rinner snabbare samtidigt som det tryck den utövar mot rören väggar minskar.



**DEN FÖRTRÄNGDA LUFTSTRÖM** som visas här och som bildas av två motstående flygplansvingar, ger samma resultat som det förträngda röret ovan: luften som rör sig mellan vingarna accelererar, och fartökningen åker på ett lägre tryck mellan de båda välvda ytor.



**SAMMA PRINCIP** gäller när luftströmmen påverkas av en enda vinge. Den accelererande luftströmmen på vingens översida utövar ett mindre tryck än luftströmmen på dess undersida. Det är denna kontinuerliga tryckskillnad som ger upphov till och underhåller lyftkraften.

**Kommentar:** Mellan de två övre bilderna och den nedersta ligger stora tankefel. Att tala om "samma princip" är en logisk kullerbytta. Situationerna är inte alls jämförbara! I den översta bilden är det riktigt att tala om Bernoullis lag. I den andra är det fel att säga att fartökningen skapar ett lägre tryck, det kan i så fall lika gärna vara tvärtom, d v s att det lägre trycket skapar fartökningen. I den nedersta bilden har man ändrat förutsättningarna fullständigt. Det finns ju inte längre någon "förträngning".

## Framkantrundningen viktig för maximal lyftkraft - stallfart

För att inte av luftens seghet (viskositet) orsakat gränsskikt-material skall ansamlas mellan framkantens yta och den yttre luftströmmen och "avlösa" denna från ytan blir framkantens form (rundning) av dominerande betydelse för hur stor anfallsvinkel vingen kan ges innan gränsskiktsansamling sker mellan vingytan och ytterluften. I sådant fall medför detta att ytterluften inte längre kommer att accelereras nedåt = ingen lyftkraft.

För vingar med små framkantsradier ("spetsiga" ving-profiler) kan omkring framkanten lokala strömningshastigheter på upp till 10 ggr flyghastigheten uppstå. För ett modernt trafikflygplan utan framkantklaffar är den lokala framkanthastigheten 5 ggr flyghastigheten normalt vid hög anfallsvinkel. Det betyder att lokal ljudfart, Mach 1, kan inträffa redan vid en flyghastighet av 250 km/h. Machtalet kan således ha betydelse även i landningsfasen.

Det är också därför som översidans mjuka välvning är så viktig för att förskjuta den slutligen oundvikliga avlösningen så långt bak som möjligt.

## Avlösning lyftkraftens begränsning - men också dess förutsättning

Om luften inte hade den seghet, viskositet, som alltså kan ställa till problem i form av avlösning för översidans strömning, skulle tryckskillnaden mellan undersidan och översidan kunna

## Framkantklaffar och bakkantklaffar

Den hastighet **nedåt** som vingen har gett luften då den lämnar bakkanten bestämmer helt vilken lyftkraft man får. Det är därför bakkantklaffar är så effektiva att öka lyftkraften vid oförändrad anfallsvinkel, medan framkantklaffar inte har någon verkan alls i detta avseende. Framkantklaffens uppgift är istället enbart att **fördröja avlösningen vid högre anfallsvinklar**. (Medför därigenom att man kan bibehålla lyftkraft vid lägre fart.)

## Felaktiga lyftkraftsförklaringar

I flera lyftkraftsförklaringar ingår en ologisk referens till Bernoullis lag som eleverna först fått lära sig med mer eller mindre verklig förståelse.

Bernoullis lag lyder: "**Längs en och samma förlustfria strömning är summan av statiskt och dynamiskt tryck konstant.**"

Lagen innehåller emellertid inget om orsak eller verkan, utan anger endast ett samband som sådant.

Man kan i själva verket finna situationer både av typen att statiska trycket är lågt därför att hög fart måste skapas genom ett accelerationsskapande tryckfall - som för mittlinjen i ett venturi - och av typen att farten blir hög därför att en krökt strömning genom tröghetskrafter avlastar atmosfärtrycket från ytan såsom för "sidorna" av en tväranbläst cylinder. Strömningen ovanför en vinge hör definitivt till den senare typen.

I de vanliga förklaringarna ingår alltid ett mer eller mindre

felaktigt påstående att farten ovanför vingen av något skäl blir högre, och att "därför måste trycket enligt Bernoulli vara lägre" och "alltså får man en tryckskillnad som lyfter".

**Alternativ 1:  
"Längre väg"**

Vanligast är att man ritat upp en profil med plan undersida och välvd översida, och så påstår man:

"Eftersom distansen längs översidan är längre än längs undersidan, så måste farten på översidan vara större, och alltså "enligt Bernoulli" trycket lägre, än på undersidan för att de luftpaket som når framkanten samtidigt återigen skall mötas i fas vid bakkanten".

Detta påstående finns exempelvis anslaget på en stor plansch vid entrén till US Airforce Museum i Dayton, det åhördes också i "De lärde i Lund" för ett antal år sedan, och det står i Jepsens "Private Pilot Manual".

Dels finns inget logiskt skäl varför luftströmmen ovanför vingen skall ligga i fas med luft-

strömmen under vingen när de möts vid bakkanten, dels är det just detta som *inte sker på grund* av att vingen ger lyftkraft helt oberoende av profil, en plan platta eller tjock profil är egalt. Det visar sig ju också att man kan flyga på rygg både med välvda profiler och med symmetriska.

En variant på alternativ 1 återfinns i en USA-encyklopedi 1963 med ett långt kapitel om flyg där man påstår att vid ökad anfallsvinkel flyttar sig främre stagnationspunkten ned på undersidan, och då blir ju vägen längs översidan ännu längre, och alltså luft hastigheten högre och trycket lägre. Varför flyttar sig då stagnationspunkten?!

**Alternativ 2:  
"Venturi"**

Detta är en mycket vanlig förklaring som spreds vida genom Shells snygga utbildningsfilmer om flyg från 40-talet, och även Time-Life's bok om "Flyg" på 60-talet och nämnda FAA-böcker.

Här utgår man från ett 2-dimensionellt venturi med trång

sektion där farten av kontinuitetsskäl är höjd, och "därför" enligt Bernoullis lag "trycket lågt". Sedan tar man bort övre halvan av venturit och antyder att undre halvan skall motsvara en vinge. Det är ju helt ologiskt, för då bortfaller ju utgångsvillkoret om en trång sektion.

En i logiskt hänseende besläktad, men möjligen ännu felaktigare, förklaring, återfinns i den av Liber Läromedel 1979 utgivna "Grundflygutbildning, Flygtekniska ämnen". Där beskriver man först hur en tryckfördelning runt en tväranblåst cylinder ser ut. Sedan skär man bort underhalvan och antyder att överhalvans tryckfördelning skulle gälla för denna som vinge betraktad. Denna beskrivning torde ta priset ifråga om irrelevans.

**Negativa effekter  
av felaktig pilotutbildning**

Det mest allvarliga med de felaktiga föreställningarna är att man förlorar förståelsen för att *luftnedsvepningen* (ge luften fart nedåt) är *grundförutsättningen*

för att flygplanet skall hålla sig uppe. Om detta ger "Bernoulliförklaringarna" ingen som helst information.

Att man vid pilotutbildningen lagt så mycket vikt vid de olika "bernoulliförklaringarna" har naturligtvis inneburit ett icke oväsentligt slöseri med tid, men framför allt har medvetenheten i pilotkretsar om luftnedsvepningen och virvlarna försenats ca 50 år, från Prandtl till dess att en olycka med en Twin Otter inträffade just på grund av "unpredictable (!) wake turbulence" på Kennedy-flygplatsen i New York i början av 70-talet.

Kunskapen har hela tiden existerat, men inte hos rätt människor - piloter och trafikledare.

Kanske skulle inte heller det F-104-flygplan, som i samband med en reklamfotografering flög alldeles intill ett långsamtflygande B 70 överljudsbombplan, ha gripits av dess virvlar med katastrofal kollision som följd om det tidigare nämnda entréanslaget vid US Airforce Museum haft ett riktigt budskap.

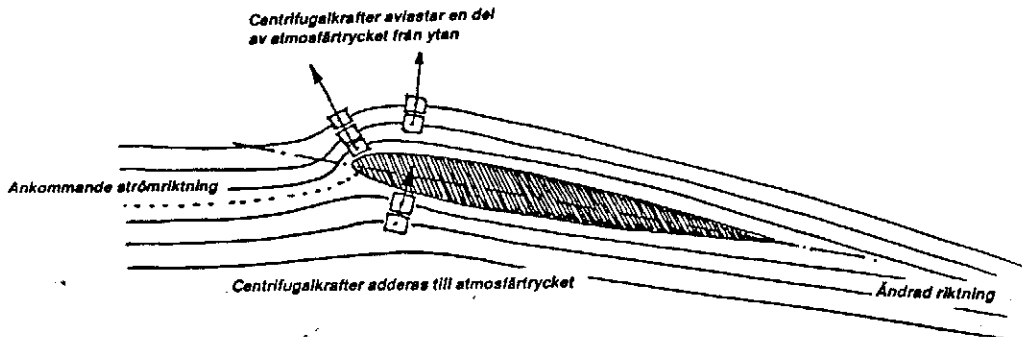
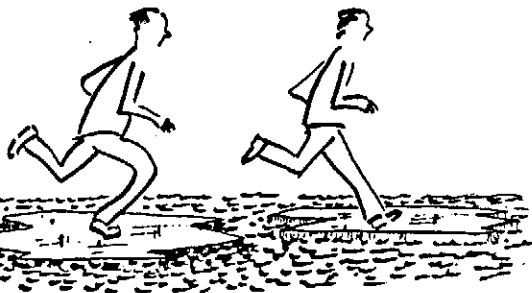
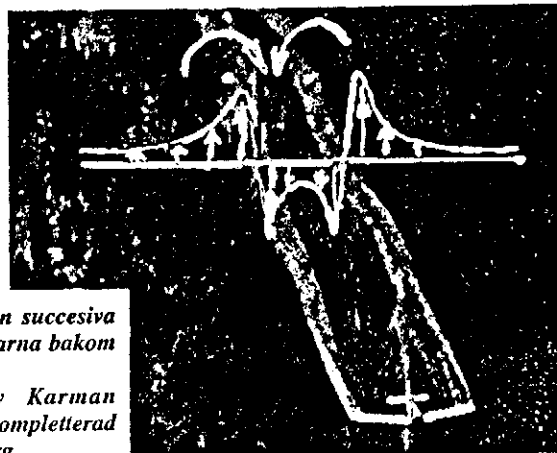


Fig 4: Så här påverkar "luftpaketen" vingen genom sin rörelse och som skapar tröghetskrafter.



En likhet finns med att hoppa från isflak till isflak. Skulle man stå kvar på isflaket sjönk det. Det är således motståndet mot att putta isflaket nedåt under en kort tidsrymd som gör att "jumparen" håller sig "flytande" genom att hoppa från flak till flak.



Puderflygplanet visar den successiva koncentrationen av virvlarna bakom planet. Bilden hämtad ut v Karman "Aerodynamics", 1954, kompletterad av M Ingelman-Sundberg.