

ISBILDNING PÅ FLYGPLAN

Tage Andersson

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

INLEDNING	1
1. Typer av is	3
2. Is och flygegenskaper	5
3. Isbildningsdefinitioner	7
4. Isbildningens intensitet under flygning	9
5. En isbildningsmodell	16
6. En metod för isbildningsdiagnos	22
7. Diagnos	28
8. Prognos och briefing	31
9. Möjliga förbättringar	32

Norrköping 1988

INLEDNING

Med isbildning på flygplan avses alla sorters avlagringar av vatten i fast form. Avlagringen kan ske såväl då flygplanet befinner sig på marken som i luften. Den kan finnas på synliga delar som vingar, stabilisatorer och vindrutor, eller dolt som i förgasare till kolvmotorer.

En egenskap har isbildning (nästan undantagslöst) gemensam: Den försämrar planets flygegenskaper. Graden av försämring kan variera från obetydlig till katastrofal. Det faktum att isbildning som avsevärt försämrar planets flygegenskaper är sällsynt gör inte prognostikerns uppgift lättare. Tvärtom, ovanliga fenomen är alltid svåra att förutsäga.

Flygning i moln med underkylda vattendroppar resulterar nästan alltid i att ett tunnt isskikt bildas på t ex vingframkanterna. I regel blir då försämringen av flygegenskaperna så liten att den inte märks. Sådan isbildning är av föga intresse för flygaren. Däremot är isbildning som ALLVARLIGT försämrar planets flygegenskaper vital. Att förutsäga enbart "isbildning" är därför till liten nytta för piloten. Isbildningens INTENSITET eller SVÄRIGHETSGRAD måste också förutsägas, vilket ytterligare komplicerar meteorologens arbete.

Ett tunnt isskikt är dock ej alltid harmlöst. Om rimfrost bildas på vingens översida på ett flygplan på marken blir den släta ytan skrovlig, något som katastrofalt kan försämma lyftkraften.

Beroende på flygplanets form avlagras is olika snabbt på olika delar av planet. Isen växer snabbast på spetsiga delar, som antenner, pitotrör och vingframkanter. Isbildningen kan därför också skilja sig från flygplantyp till flygplantyp. Olika flygplantyper reagerar också olika för isbildning. Deltavingade flygplan, som Draken och Viggen, har flygegenskaper som påverkas relativt litet även av ett tjockt islager på den spetsiga vingframkanten.

Isbildning uppträder vid stratiforma moln i relativt tunna skikt. Om planet snabbt kan passera genom ett sådant skikt, hinner avlagringen ej bli så mäktig. Men om planet tvingas uppehålla sig länge där, kan avlagringen växa sig mäktig. Exempel på detta är vid landning, då planet har låg sjunkhastighet eller kan tvingas behålla samma höjd en längre tid (holding). Ett annat exempel är VFR-flygning, då planet kan stängas in i ett isbildningsskikt mellan marken och molnbasen.

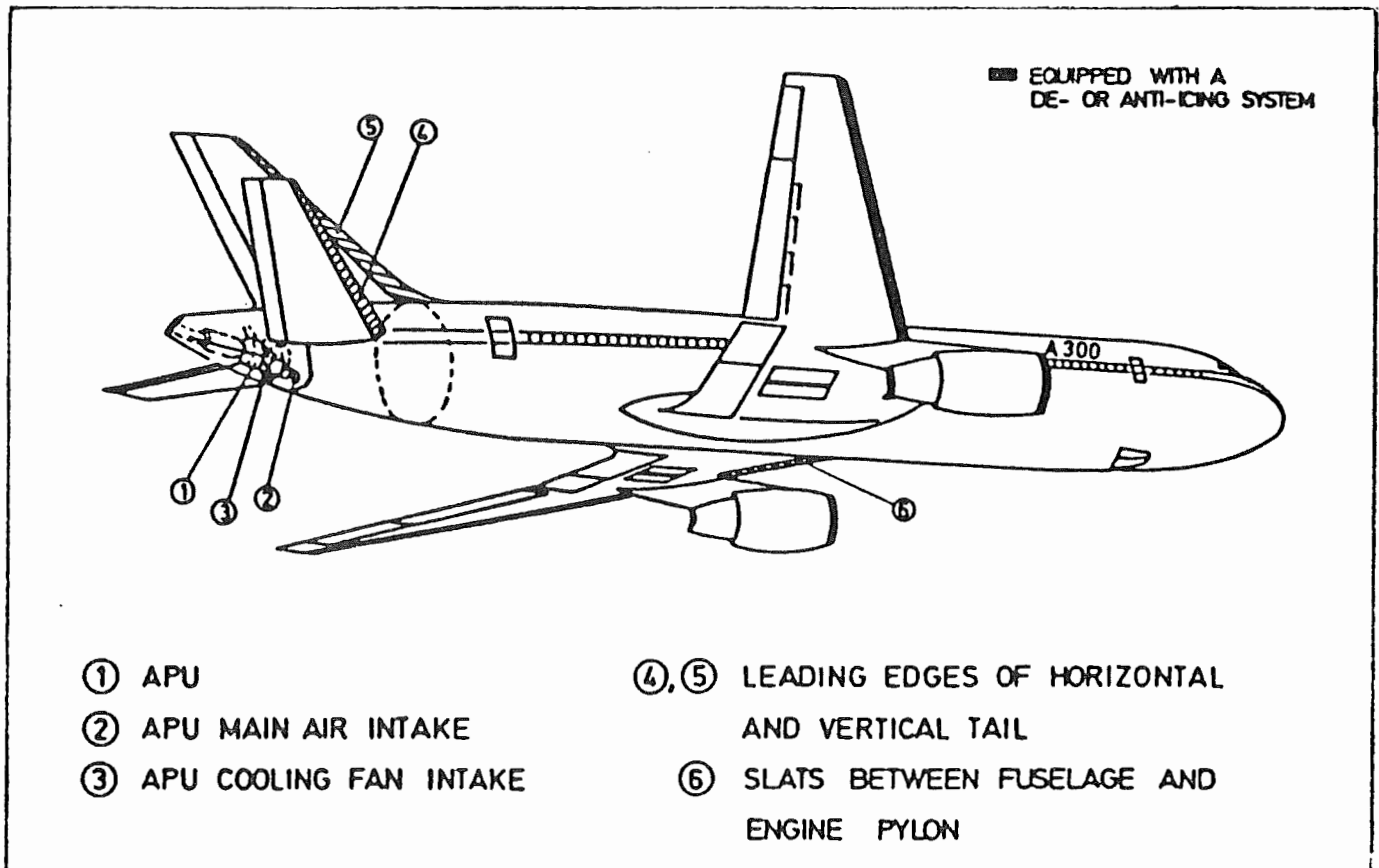
Tunga trafikflygplan har effektiva avisningsanordningar. Därför är de okänsliga för isbildning under flygning. Lätta flygplan och militärflygplan saknar i regel avisningsanordningar på vingar och stabilisatorer. Där kan alltså is obehindrat byggas upp, och dessa flygplan är MYCKET KÄNSLIGARE för isbildning. Jetflygplan har i regel avisningsanordningar på luftintagen till motorn/motorerna.

Helikoptrar har speciellt stora isbildningsproblem. Särskilt är motorerna (gäller jetmotorer) känsliga. Vid ymnig blötsnö

kan snön kväva dem. Is som bildats på luftintagen eller stag på flygkroppen kan lossna (t ex om helikoptern når varmare områden och isen börjar smälta) komma in i motorn och skada kompressorn. Is på huvudrotorn försämrar dess lyftkraft och orsakar allvarliga skakningar. Is på stjärtrotorn kan då den lossnar slungas iväg mot andra delar av helikoptern och skada dem. Is på vindrutan är allvarlig, eftersom den förhindrar sikten framåt.

Uppenbarligen är isbildning på flygplan ett komplicerat problem. Det är endast delvis meteorologiskt. Identiska meteorologiska förhållanden ger olika grader av isbildning, beroende på flygplantyp och flygoperation. Vidare är pilotens upplevelse av isbildningen subjektiv. Att förutsäga isbildning ingår dock i flygmeteorologens uppgifter.

Som nämnts är svår isbildning ett sällsynt fenomen. Andelen haverier som orsakas av isbildning är också relativt liten. Ca 3% av de civila flyghaverierna i USA åren 1973-77 tillskrevs t ex isbildning. Dessa haverier blir dock ofta svåra, med dödlig utgång för besättning och passagerare.



Flygning under isbildningsförhållanden fordrar avisningsanordningar. Av konstruktions- vikt- effekt- och kostnadsskäl söker man begränsa dem så långt som möjligt. Många avisningsanordningar stjälar motoreffekt. I figuren ovan är de kritiska delar av Airbus som har avisningsskydd svarta. Kritiska delar som efter omfattande prov och utredningar ansågs kunna AVVARA avisningsskydd är streckade och numrerade. (APU = Auxiliary Power Unit)

1. TYPER AV IS

Isbildning sker antingen genom att moln/nederbördspartiklar fryser fast på planet eller genom att vattenången direkt övergår till is, sublimation. I det senare fallet bildas rimfrost. Rimfrost som bildas under flygning torde ej ge problem.

Underkylda vattendroppar (moln eller nederbörd), som fryser fast då de träffar planet, är oftast ansvariga för isbildning under flygning. Även iskristaller och snöflingor kan bilda is, som dock i regel ej blir så svår. "Torra" snöflingor eller kristaller kan visserligen ej frysa fast (såvida det ej redan finns underkyllt vatten på anslagsytan) utan kan då i stället erodera ev is. Vanligt är dock att såväl snöflingor underkylda vattendroppar finns, och då kan flingor/kristaller som träffar våta delar frysa fast.

Efter form och konsistens brukar isbildning indelas i (engelska och tyska namn inom parentes):

- * ISBARK eller KLAR IS (CLEAR ICE, KLAREIS)
- * DIMFROST (RIME ICE, RAUHEIS)
- * RIMFROST (HOAR FROST)

ISBARK bildas då stora underkylda droppar träffar planet och flyter ut innan de fryser. Den är typiskt genomskinlig och hård. Finns dessutom iskristaller kan sådana som träffar ännu icke frusna droppar på planet frysa fast, vilket ger en ojämna, vitaktig beläggning

Den typiska formen för isbark som bildas under flygning är s k HORNIS, se fig 1. Vid stagnationspunkten flyter dropparna ut åt bägge hållen, formande de s k hornen. Denna form är också karakteristisk för relativt höga temperaturer, över -10°C . Hornis förstör effektivt de aerodynamiska egenskaperna och lyftkraften nedsätts avsevärt. Den är därför en mycket allvarlig form av isbildning.

En speciell typ av isbark kan bildas vid flygning genom underkyllt regn. Jämfört med molndroppar är regndroppar mycket stora, och hinner flyta långt ut innan de fryser och bilda isbark över stora delar av planet.

DIMFROST bildas då små underkylda droppar träffar planet och genast fryser. Mellan de frusna dropparna finns då luft, och avlagringen blir vit, ogenomskinlig och spröd. Dimfrosten ansluter sig mer till den ursprungliga profilen, se fig 1.

RIMFROST bildas då vattenånga sublimerar på planet. Vit och porös. Under flygning kan rimfrost bildas då planet flyger genom ett område där vattenången är övermättad i förhållande till is, eller då ett kallt flygplan passerar områden med hög fuktighet.

I praktiken förekommer de renodlade typerna sällan. En variant av hornis, som bildas på stora pilvingade flygplan, är "lobster tails", se fig 1.

I appendix 1 diskuteras istypernas beroende av flyghastigheten, lufttemperaturen och frysningförloppet.

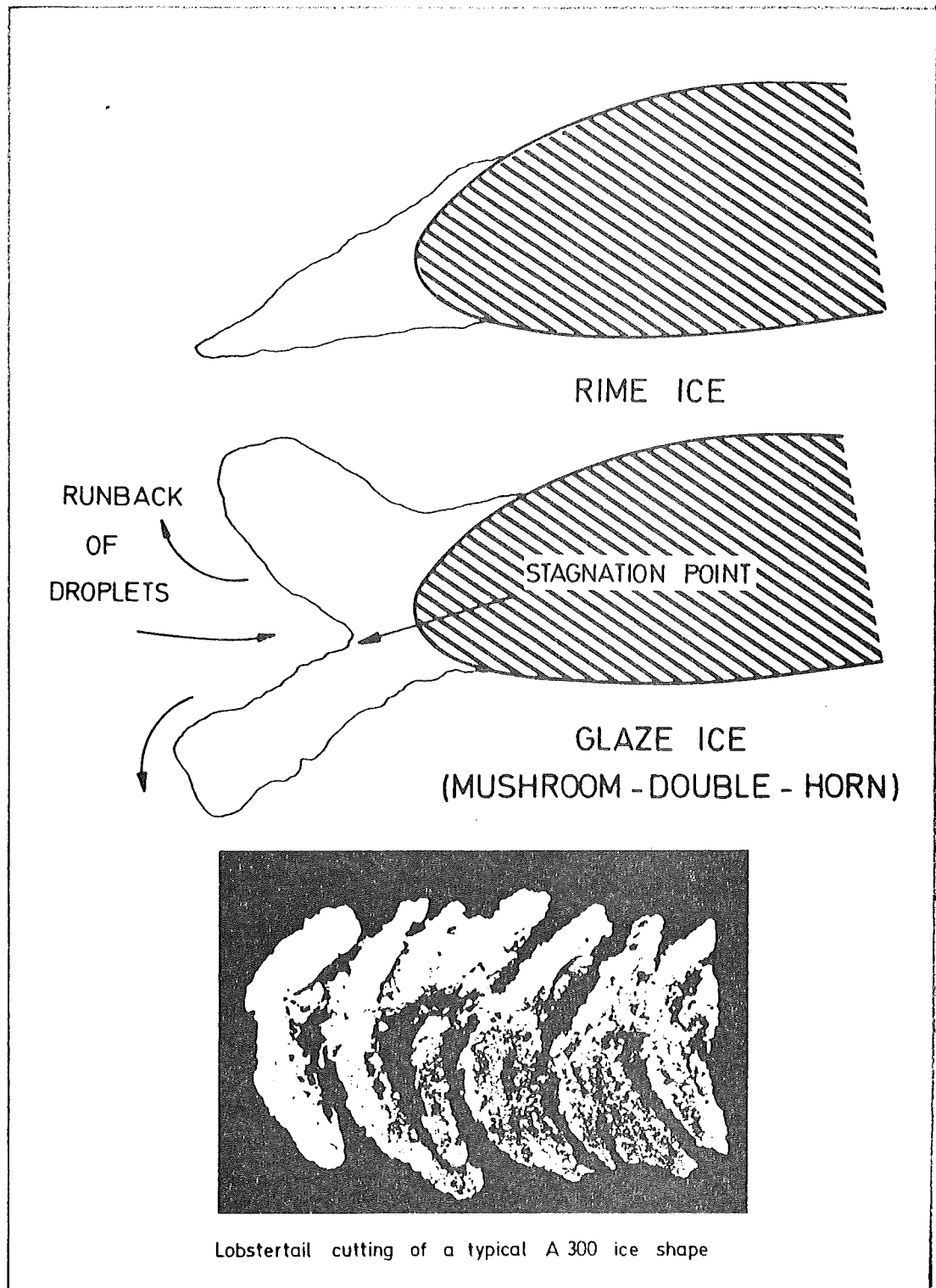


Fig 1: Principskiss av dimfrost (rime ice) och isbark (glaze ice) av hornistyp: "Lobstertail" är hornis som kan bildas på stora, pilvingade flygplan.

2. IS OCH FLYGEGENSKAPER

Isbildning påverkar på flera sätt negativt planets flygegenskaper. Verkan förstärks genom att de olika effekterna adderas. Isen kan dessutom försvåra pilotens arbete genom att försämra sikten ut (is på rutor) eller störa hans kommunikation med omvärlden (is på antenner).

Rent allmänt medför is att

- * luftmotståndet ökar och lyftkraften minskar
- * motorerna störs
- * vikten ökar
- * sikten ut försämras
- * instrumentgivare och antenner störs

Tabell 1 ger en uppräknig av riskfaktorerna. Se även fig 2.

TABELL 1. Isens inverkan på flygegenskaper.

IS PÅ/I	PÅVERKAR NEGATIVT				MEDFÖR/KAN MEDFÖRA
	vikt	luft- motst	drag- kraft	lyft- kraft	
Flygkropp	X	X			Tyngdpunkts- förskjutn.
Vinge och stabilisator	X	X		X	Ökad stall- hast. Tyngd- punktsförskj.
Propeller	X	X	X		Vibrationer
Rotor	X	X	X	X	Vibrationer
Förgasare			X		Motorstopp
Luftintag			X		Motorstopp el skador
Vindruta					Sämre sikt ut
Givare					Felaktiga an- givelser
Antenner					Sämre radio/ /radarprestanda

Förgasaris skiljer sig från övriga istyper genom att den kan uppträda vid plusgrader.

Is på givare kan bl a uppträda på pitotrör (hastighetsgivare) och ytterlufttermometrar. De felaktiga indikeringarna är speciellt allvarliga för hastighetsmätaren.

Isen kan medföra direkta skador genom att lossna och slå mot andra delar av planet. Jetmotorer kan skadas svårt eller förstöras om isstycken via luftintagen träffar kompressorn. Speciellt har helikoptrars luftintag givit stora problem i detta

avseende. Via luftintagen kan också vid ymnigt snöfall blötsnö komma in i motorn och släcka den.

Is på rotorbladen kan också bli kritisk, men brukar slungas loss, varför den ej utgör en så allvarlig riskfaktor som is eller snö i motorn.

Särskilt allvarlig är isbildning på låg höjd. Under landning kan flygplan länge tvingas uppehålla sig i isbildningsskikt med en hastighet som är nära stallgränsen.

De försämrade flygegenskaperna yttrar sig bl a, och viktigast, som en HÖJNING AV STALLHASTIGHETEN. Ett bra sätt att undgå överstegring är då att öka hastigheten, om detta är möjligt med tillgänglig motorstyrka. Is kan ju även nedsätta motoreffekten.

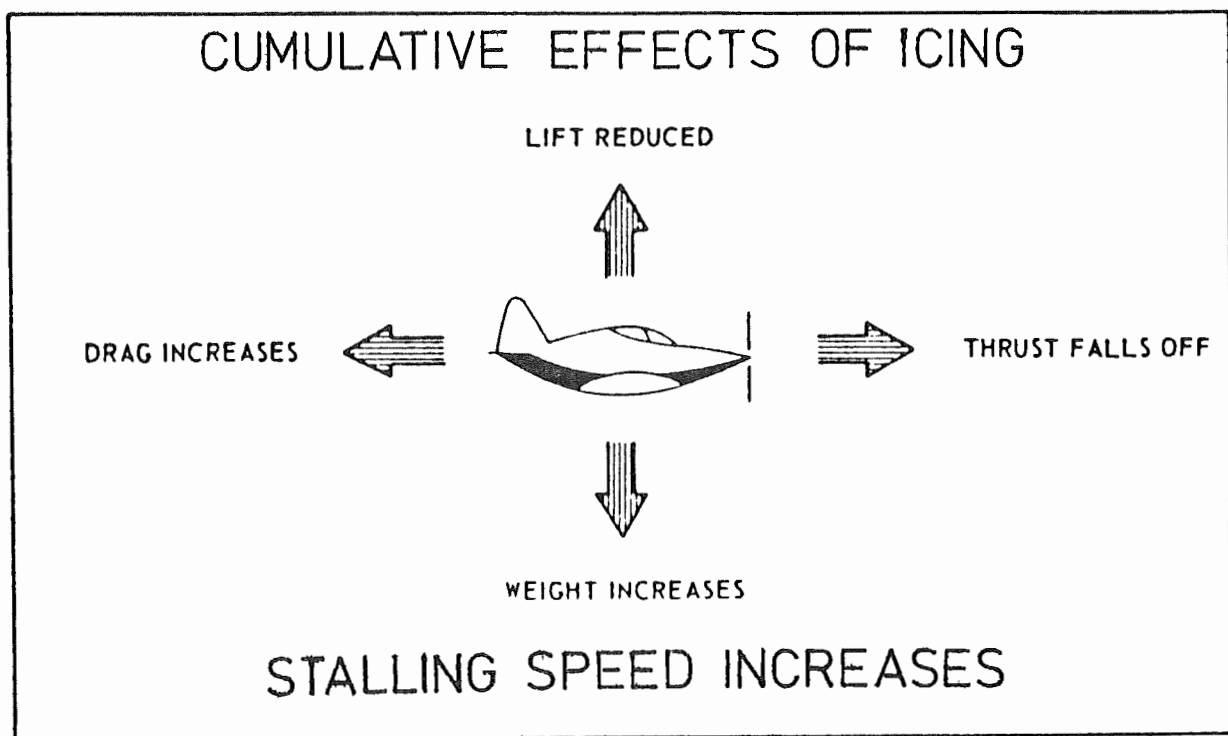


Fig 2: Hur yttre is påverkar flygegenskaperna.

3. ISBILDNINGSGDEFINITIONER

I praktiken finns flera definitioner av isbildning. Gemensamt för dem är att de refererar till PILOTENS UPPLEVELSE av hur isen påverkar planets flygegenskaper. Som exempel ges ICAOs, som bl a tillämpas av den civila luftfarten i Sverige:

MÅTTLIG - förändring av kurs- och/eller flyghöjd kan anses önskvärd

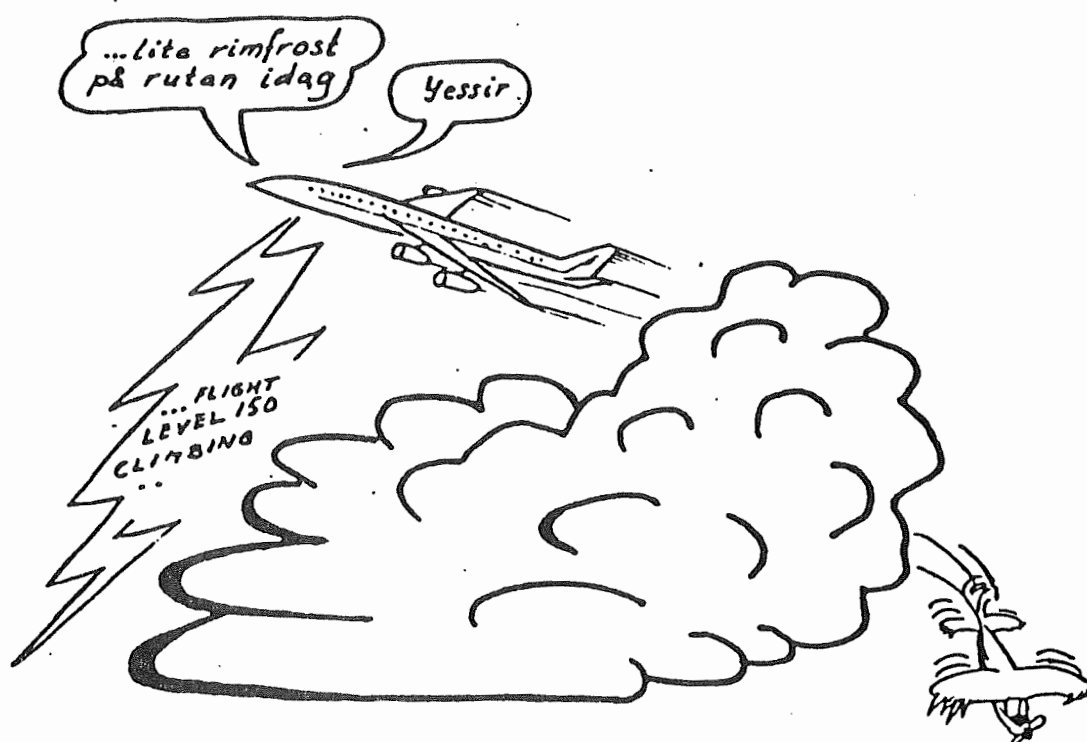
SVÅR - omedelbar förändring av kurs- och/eller flyghöjd anses nödvändig.

Isbildningen bestäms därmed av följande faktorer:

- * AVISNINGSANORDNINGAR. Finns, och används, effektiva sådana kan planet knappast utsättas för svår isbildning
- * HUR IS PÅVERKAR flygplanets prestanda
- * FLYGOPERATIONEN. Ett oskyddat plan som uppehåller sig tillräckligt länge i ett isbildningsskikt drabbas av svår isbildning, oavsett tillväxthastigheten
- * PILOTENS attityd
- * METEOROLOGISKA förutsättningar.

Följande symboler för isbildning används:

Ψ lätt isbildning
 ΨΨ måttlig "
 ΨΨΨ svår "



Den militära vädertjänsten i Sverige tillämpar följande isbildningsgrader:

LÄTT ISBILDNING: Höjd-och/eller kursändring ej nödvändig.

MÅTTLIG ISBILDNING: Höjd-och/eller kursändring önskvärd.

SVÅR ISBILDNING: Höjd-och/eller kursändring omedelbart nödvändig.

Skillnaderna mellan civila och militära flygoperationer är ofta stora. I civil luftfart gäller det ofta att flyga en last, passagerare och/eller gods, till ett bestämt mål vid en bestämd tidpunkt. Att ej kunna genomföra detta medför ekonomiska förluster. Militära operationer innebär ofta utbildning eller träning av vissa moment. De har därför större flexibilitet. Område för en flygövning kan kanske väljas efter vädret, en annan övning kan väljas, eller flygningen kan utbytas mot ett annat moment, utan att det medför några allvarliga konsekvenser.

En prognos av svår isbildning, som förhindrar vissa operationer, har därför betydligt större konsekvenser för civil luftfart än för militär. Därför är man i civil flygvädertjänst betydligt mer restriktiv med prognosen 'svår isbildning' än i militär. Detta medför i sin tur att prognoser för civil luftfart ej utan vidare kan användas för militär och vice versa.

Om isbildningsprognoser enbart avsåg METEOROLOGISKA förhållanden, och piloten själv fick översätta prognosen till sitt flygplan och sin operation, skulle dessa och andra icke-meteorologiska faktorer försvinna eller i varje fall minska i betydelse.

Air Weather Service i USA hävdar i sin manual AWSM 105-39 att isbildningsprognoser ska ge den SANNOLIKA MAXIMALA ISBILDNINGENS INTENSITETEN ENLIGT METEOROLOGISKA KRITERIA för den plats och tid prognosen gäller. Ett flygplan där och då behöver INTE NÖDVÄNDIGTVIS uppleva just denna intensitet. Med andra ord, en prognos 'svår isbildning' kan vara korrekt även om ett flygplan upplever endast lätt eller ingen. Orsakerna kan vara många; flygplanet har avisningsanordningar påslagna, skiktet med svår isbildning passerar snabbt, osv.

I Air Weather Service manual refererar isbildningens svårighet till dess effekter på vissa flygplantyper. Ett utdrag ur deras manual följer. Det är läsvärt!

3. Intensities of Icing:

a. **Intensity Forecasts.** AWS policy is that forecasts of icing intensity should represent the probable maximum intensity based upon meteorological criteria expected to exist at a point in space and time for which the forecast is made, and not necessarily the intensity which the aircraft will encounter. This is because the variations in flight paths actually flown, aircraft types, and pilot procedures and techniques are non-meteorological factors which influence the actual ice accumulation of a particular aircraft under a given set of meteorological conditions. The individual pilot must determine the effect which a forecast icing intensity will have on his particular aircraft based on his knowledge of his aircraft and other non-meteorological operational considerations.

* b. **Intensity Standards.** The standards for reporting icing are based on a recommendation set forth by the subcommittee for the Aviation Meteorological Services in the Office of the Federal Coordinator for Meteorology in Nov 1968.

(1) **Trace of icing.** Icing becomes perceptible. Rate of accumulation slightly greater than rate of sublimation. It is not hazardous even though deicing/anti-icing equipment is not utilized, unless encountered for an extended period of time—over one hour.

(2) **Light icing.** The rate of accumulation may create a problem if flight is prolonged in this environment (over one hour). Occasional use of deicing/anti-icing equipment removes/prevents accumulation. It does not present a problem if the deicing/anti-icing equipment is used.

(3) **Moderate icing.** The rate of accumulation is such that even short encounters become potentially hazardous and use of deicing/anti-icing equipment or diversion is necessary.

(4) **Severe icing.** The rate of accumulation is such that deicing/anti-icing equipment fails to reduce or control the hazard. Immediate diversion is necessary.

Convention has been to designate icing intensity in terms of its operational effect upon the reciprocating engine, straight wing transport aircraft, as C-54, C-118. The pilot will, after receiving the icing intensity forecast, refer to the aircraft dash one for recommended actions. If necessary, AWS personnel will emphasize to the pilot that the icing intensities were verified against straight wing reciprocating transport aircraft. The pilot must refer to the aircraft dash one for specific instructions when flying in icing areas prescribed by the forecast. AWS personnel, in turn, must be familiar with effects of icing on a particular aircraft in order to properly assess pilot reports of icing conditions.

c. **International Differences.** Although all concerned US Federal agencies have now agreed to these standard definitions of icing intensities, international standardization has not yet been accomplished. Some other countries use completely different terms to describe the various intensities and types of icing and give no indication of the standard aircraft type to which their icing intensities refer. The World Meteorological Organization (WMO) uses 10 code figures in the TAF for icing but does not explain the meaning of the intensities and does not refer to any standard aircraft type. (See AWSM 105-24 for WMO TAF Code and relationship of the WMO code figures to the intensities given in table 4).

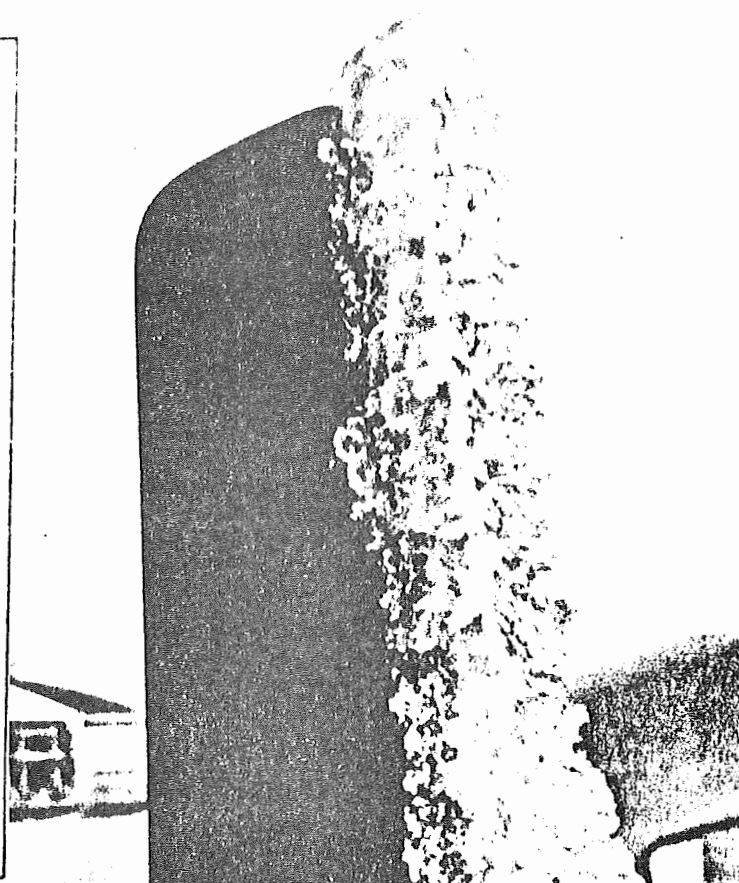
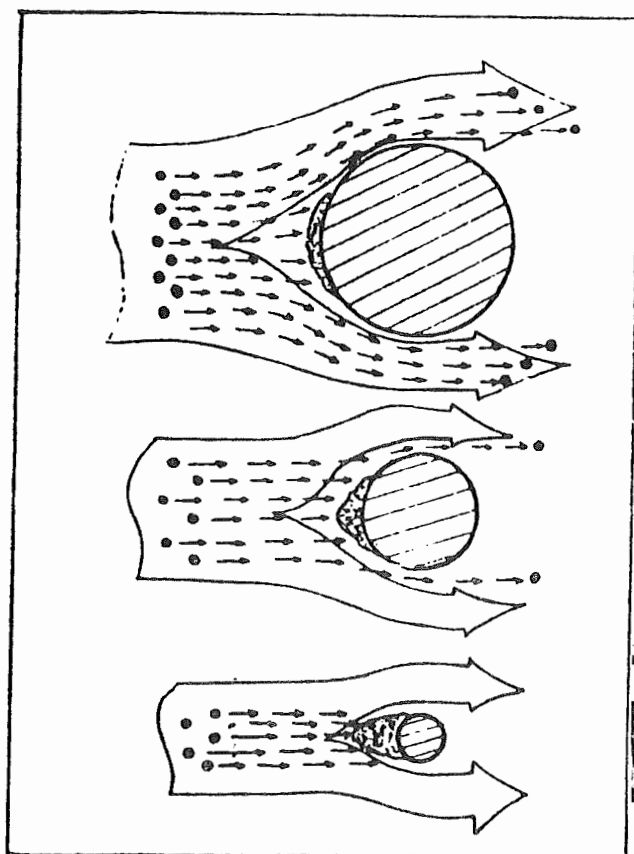
4. ISBILDNINGENS INTENSITET UNDER FLYGNING

Med isbildningens intensitet avses här isens TILLVÄXTHASTIGHET. Denna är ej ensam avgörande för isbildningens SVÅRIGHET enligt de tidigare givna graderingarna. Sambandet mellan de två är tvärtom diskutabelt.

Isbildning drabbar också flygplan på marken, och kan medföra allvarliga konsekvenser (motoris, rimfrost). Här skall vi emellertid behandla isbildning under flygning.

a. AERODYNAMISKA FAKTORER

- * Anslagsytans profil. Ju spetsigare, desto mindre avböjs luftströmmen och desto fler droppar träffar, se fig 3.
- * Hastigheten. Ju högre hastighet, desto fler droppar träffar.
- * Temperaturen i förhållande till omgivningen. På g a friktionen har planet högre temp än omgivande luft. Vid de hastigheter som används vid start och landning är dock denna temperaturskillnad liten, någon $^{\circ}\text{C}$.



A radio mast about twelve inches high, loaded with drag-causing ice. Things like this can't be deiced. The more of these "ice catchers" on an airplane, the less time one can stay in ice—deicer-equipped or no. (ESSA photo)

Fig 3: Spetsiga profiler avlänskar luftströmmen obetydligt, och isen växer snabbt.

En typ av avisningsanordning består i att värma känsliga delar, vingframkanter, pitotrör, vindrutor mm.

Ett flygplan värms emellertid av friktionen mot luften och den adiabatiska kompressionen av luftströmmen. I klar luft ges approximativt ytemperaturen T_s av

$$T_s = T_0 + 1.15 \cdot (V/100)^2$$

T_0 = ytterluftens temperatur, °C

V = flygplanets hastighet, knop.

Om flygplanets hastighet är 100 knop blir alltså uppvärmningen drygt 1 °C. Under isbildningsförhållanden måste emellertid en del av detta värmetillskott förbrukas för att uppvärma de underkylda dropparna och avdunsta en del av det vatten som samlats på planet. Ett värmetillskott fås av dropparnas rörelseenergi och det latent värme som frigörs då vattnet fryser, men nettoresultatet blir en lägre ytemperatur än i klar luft.

b. METEOROLOGISKA FAKTORER

- * Luftens vatteninnehåll
- * Luftens temperatur
- * Dropparnas storlek

För isbildning fordras att luftens (dropparnas och planets) temperatur är under 0 °C. Isbildning har observerats vid alla temperaturer mellan 0 och ca -40 °C, men är i stratiforma moln vanligast och allvarligast vid RELATIVT HÖGA TEMPERATURER, 0 till ca -15 °C. I Cumulonimbus dock ned till ca -25 °C.

Större vatteninnehåll medför snabbare tillväxt. Droppstorleken är emellertid också betydelsefull. Mycket små droppar följer luftströmmen runt planet och träffar det ej, se fig 4. Nu finns emellertid en koppling mellan vatteninnehåll och droppstorlek. Vattenrika moln innehåller också stora droppar, kanske rentav av duggregnsstorlek.

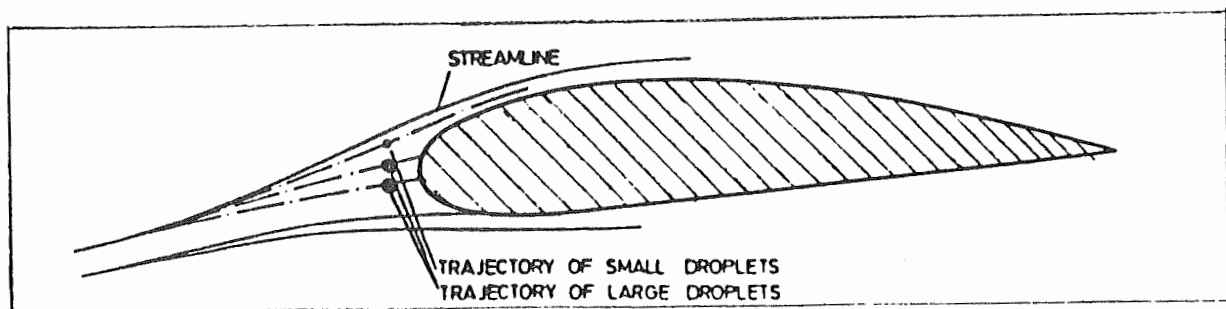


Fig 4: Stora droppar avlänkas endast obetydligt.

Varken droppstorlek eller vatteninnehåll mäts rutinmässigt. Vid analys av isbildningsrisk är man därför hänvisad till att arbeta med andra storheter. Radiosonderingar ger inte bara

luftens temperatur, utan även dess fuktighet (i ångform). Hög fuktighet i kombination med lämpliga temperaturer indikerar stor risk för isbildning.

För den automatiska analysen av radiosonderingar vid SMHI används följande kriterier för stratiforma moln:

Temperatur -2 till -13°C och

Fuktighet $T \leq -8(T - T_d)$

T = lufttemperatur i $^{\circ}\text{C}$.

T_d = daggpunktstemperatur i $^{\circ}\text{C}$

Fukthetstvillkoret innebär att vattenången skall vara övermättad i förhållande till is. Vattenångans mättnadstryck är ju lägre över is än vatten. Egentligen innebär kriteriet endast att ången skall sublimera på flygplanet (om det har luftens temperatur), dvs bilda rimfrost. Erfarenheten visar dock att villkoret är rimligt.

Konvektionsdiagnos av radiosonderingar utförs även automatisk, och ger en prognos för bildning av Cumulonimbus, där som tidigare nämnts risken för svår isbildning är stor i intervallet 0 till -25°C .

I frånvaro av mätningar av de mest relevanta storheterna, vatteninnehåll och droppstorlek, tillgriper man även andra hjälpmedel. Väderkartan innehåller bl observationer av moln och nederbörd. Vissa nederbördsformer är bra indikatorer på isbildning:

* Frysande (underkylt) regn eller duggregn

* Iskorn

* Kornsnö

Vid fronter med kraftig nederbörd finns ofta vattenrika moln.

Vattenrika moln på låg nivå, Stratus och Stratocumulus, bildas ofta då kall luft strömmar över varmt hav (varmt i förhållande till luften). Utefter kuster innebär då Stratus (med temperatur strax under 0°C) vid pålandsvind stor isbildningsrisk.

Under inversioner blir moln vattenrika. Stratus och Stratocumulus under en inversion innebär då stor risk för allvarlig isbildning. Ex, se fig 5.

En annan viktig informationskälla är rapporter från flygplan, AIREP och QBC. Dessa måste kritiskt granskas m a p flygplantyp och flygoperation.

Erfarenhetsmässigt vet man att Stratus måste nå en viss vertikal utsträckning för att ge svår isbildning. Denna kritiska måktighet torde vara 400-500 m.

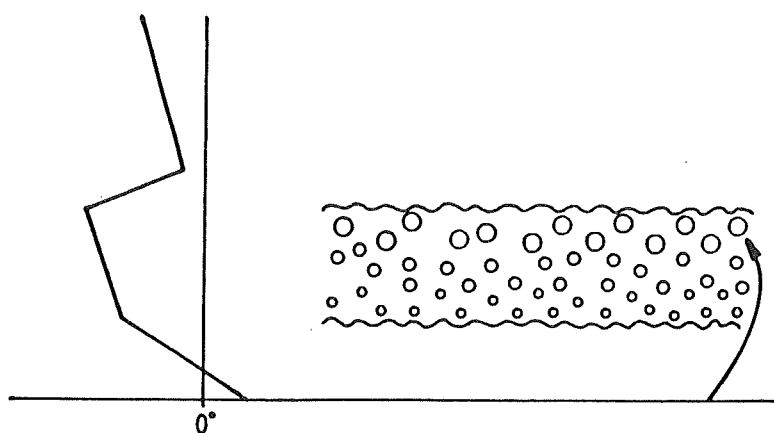


Fig 5a: Under en inversion ackumuleras stora droppar.

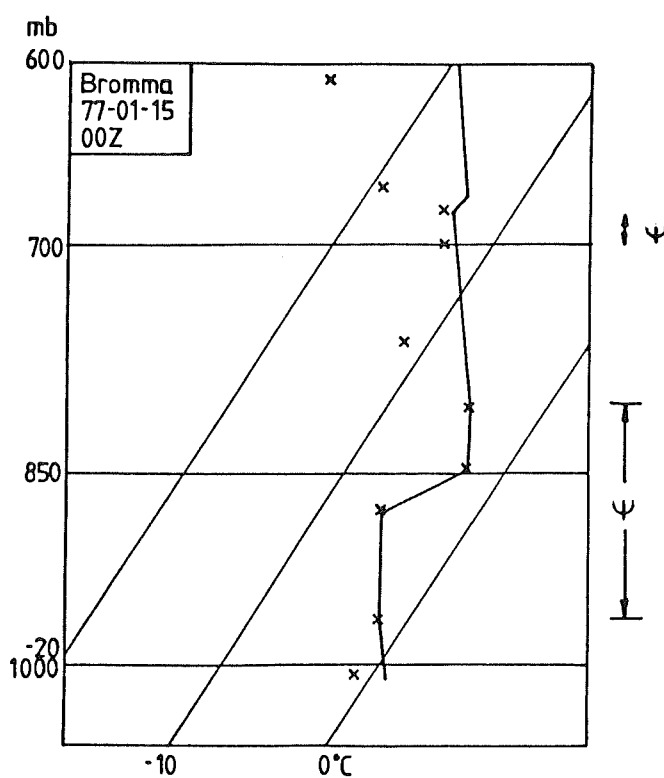


Fig 5b: En typisk isbildningssituation i Stratus. Analys av isbildningsrisk är utförd enligt SMHIs metod. Under inversionen ackumuleras molnvatten. Vinden var östlig, och luften hade passerat ett relativt varmt hav och tillförts mycket vattenånga. Temperaturen i Stratus-täcket var ca -5°C . Betingelserna för isbildning var synnerligen gynnsamma. Några timmar efter sonderingen störtade en landande Viscount (Kälvestahaveriet).

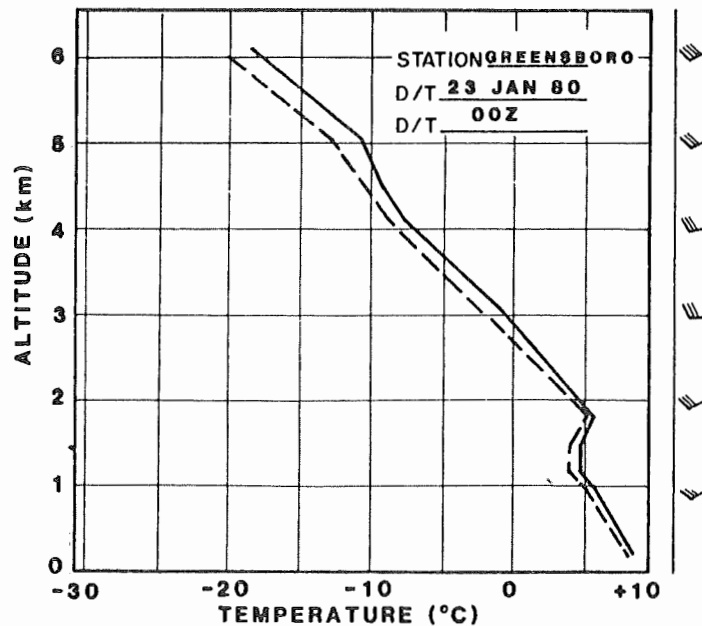


Fig 5c: Sondering genom en varmfront som gav ihållande måttligt-kraftigt regn, men endast SPORADISKT LÄTT ISBILDNING. Droppspektrum var smalt med stora droppar, diameter i regel över 400 μ m. Att isbildningen trots detta nästan uteblev kan förklaras dels av att få underkyllda droppar fanns (de flesta var frusna tills de nådde under 0°C-isotermen), dels av att vatteninnehållet i nederbörd är relativt litet (400 μ m är nederbördsstorlek).

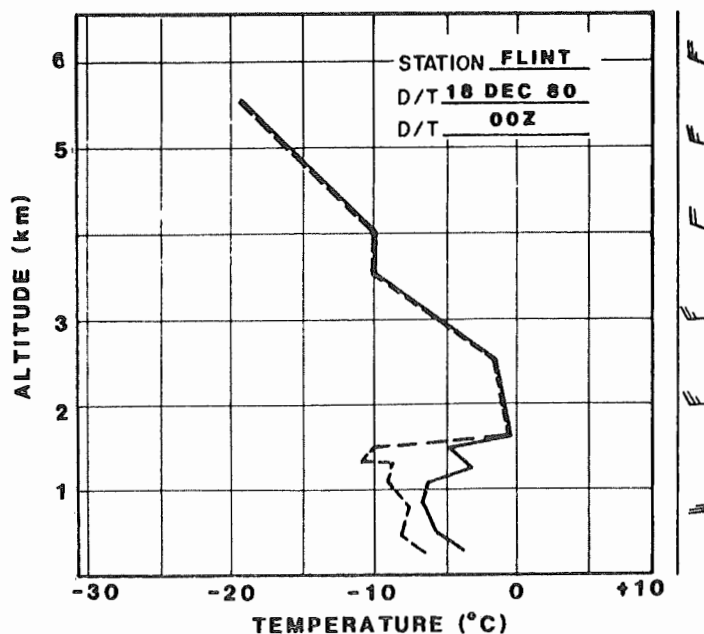


Fig 5d: Sondering genom en varmfront som gav intermittent snöblandat regn och MÄTTLIG ISBILDNING. Droppspektrum var bredare än i Fig 5c och det fanns gott om underkyllda molndroppar.

UNDERKYLT REGN (FREEZING RAIN) bildas då regndroppar från ett högre skikt med plusgrader faller genom en inversion, vid vars

bas temperaturen är under 0°C , se fig 6. På flygplan i luften ger underkyllt regn utbredd isbark över stora ytor.

Underkyllt regn är sällsynt, men ger när det förekommer i regel svår isbildning. En typisk vädersituation är kraftig varmluft-sadvektion över ett kallt högtryck, då skiktningen blir just som i fig 6.

Observera att det inte är något krav för isbildning att skikt med plusgrader skall finnas. I atmosfären är i regel molndropparna flytande ned till låga temperaturer. Finns nederbördsutlösning kan underkylda molndroppar växa och övergå till underkyld nederbörd. Om underkyllt duggregn/regen fryser innan det nått marken fås kornsnö/iskorn. Därför är dessa nederbördsformer indikatorer för isbildning.

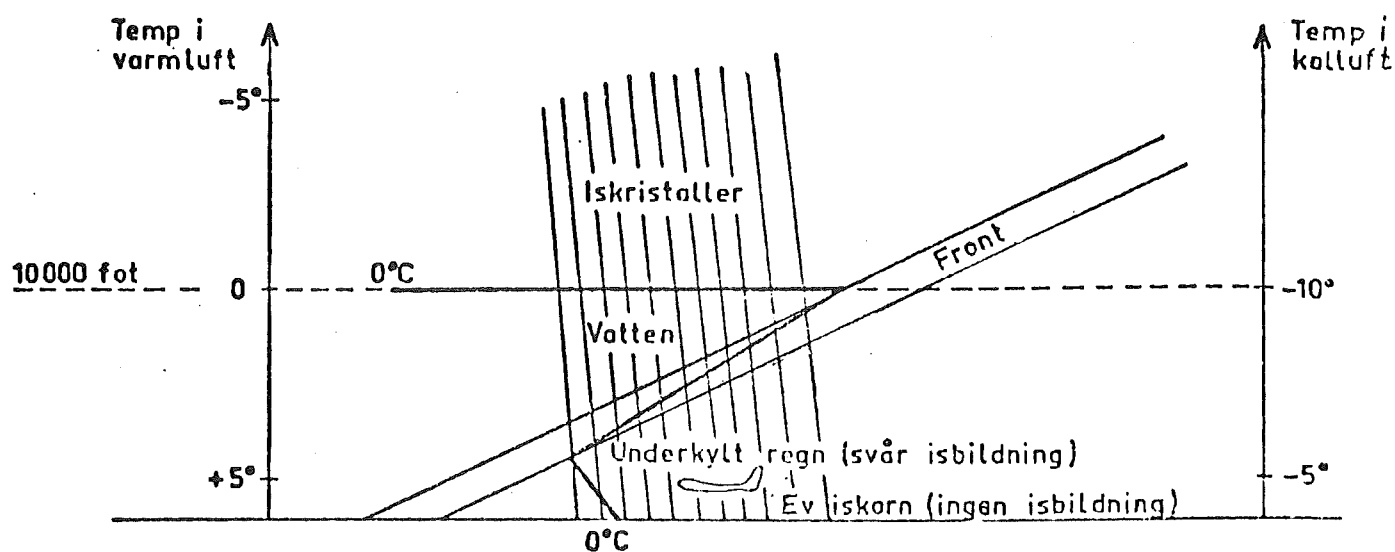
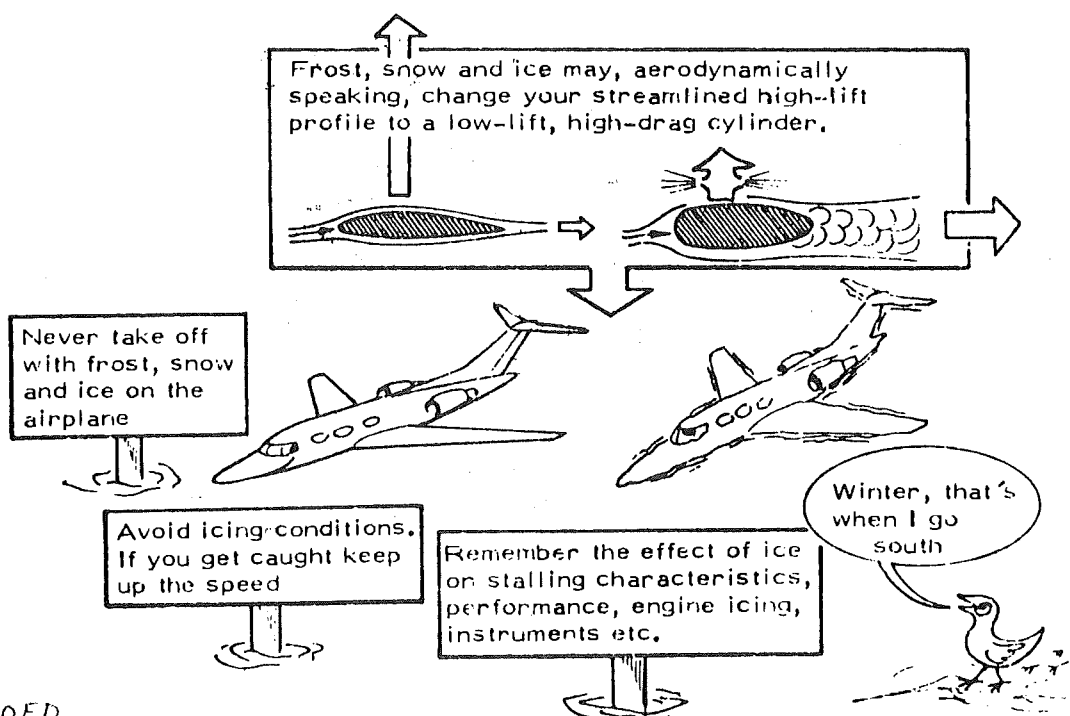


Fig 6: Underkyllt regn.



5. EN ISBILDNINGSMODELL

Isbildningens intensitet bestäms av

* hur stor vattenmängd per tidsenhet som träffar planet

* hur stor del av denna vattenmängd som fryser.

Om allt vatten som träffar planet fryser blir

$$RG = 3600 \cdot U \cdot W \cdot E \quad (1)$$

RG = tillväxthastigheten, gram/cm³ timme

U = föremålets (flygplanets) hastighet rel luften, cm/sek

W = luftens innehåll av flytande vatten, gram/cm³

E = uppsamlingseffektiviteten

Uppsamlingseffektiviteten är en komplicerad funktion av flera parametrar. För en cylinder med cirkulär genomskärningsyta är den relaterad till en faktor k enligt

$$k = (2s/9u)(a^2 \cdot U/R) \quad (2)$$

a = droppens radie, cm

u = luftens viskositetskoefficient, 0.000017 poise

s = droppens densitet

R = cylinderns radie, cm

Sambandet mellan k och E visas av fig 7.

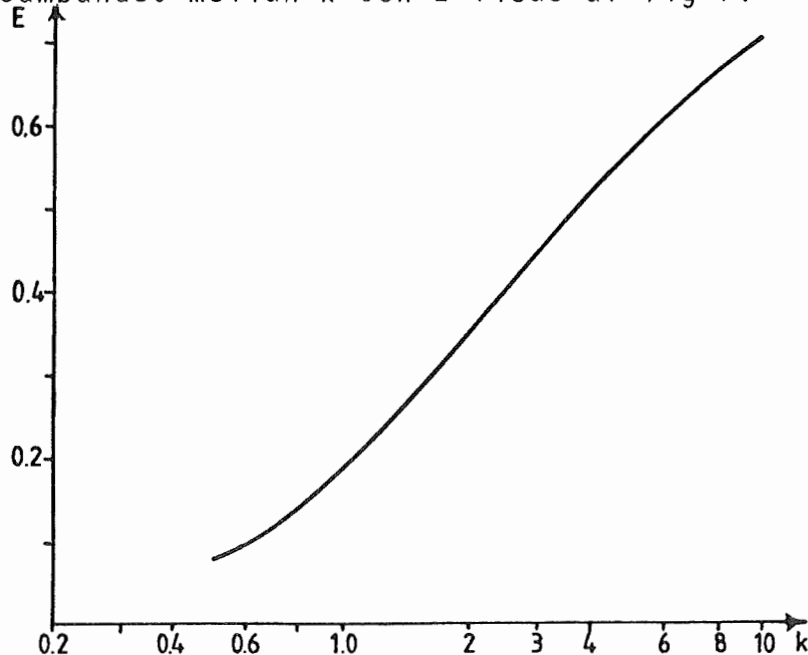


Fig 7: Cylinderns uppsamlingseffektivitet E som funktion av k.

Uppsamlingseffektiviteten växer alltså med k. (Strikt gäller kurvan för flyghöjd 3000 m enl standardatmosfären, R = 3.8 cm och U = 8940 cm/sek, dvs 200 miles/timme).

För oss är högra parentesen i ekv (2) intressant. Den visar att k beror av

- * den AERODYNAMISKA faktorn R (föremålets profil)
- * den FLYGOPERATIVA faktorn U (planets hastighet)
- * den METEOROLOGISKA faktorn a (dropparnas radie).

Uppsamlingseffektiviteten är alltså omvänt proportionell mot R , innebärande att is lagras snabbare på spetsiga föremål än trubbiga. På antenner och pitotrör byggs alltså is upp snabbt. Detta stöds av erfarenheten: radiobortfall p g a att antennen brutits av isbelastning är välkänt. Pitotrör har ofta elektrisk uppvärmning för att förhindra isbildning.

Uppsamlingseffektiviteten är direkt proportionell mot droppradien i kvadrat. Detta innebär att mycket små droppar kanske inte ens träffas; de avböjs alltför mycket, jfr fig 4.

För att komma vidare måste på något sätt isbildningens intensitet definieras. I slutet av 40-talet infördes av dåvarande NACA följande definitioner av isbildningens intensitet som funktion av tillväxthastigheten RG :

```

-----
* LÄTT ISBILDNING:   RG = 1-6 gram/cm2 och timme
* MÅTTLIG ISBILDNING: RG = 6-12 " " "
* SVÅR ISBILDNING:   RG > 12 " " "
-----

```

Genom att ansätta värden på flyghastighet U , radie R och flyghöjd kan isbildningens intensitet bestämmas som funktion av droppstorlek och vatteninnehåll. Med de tidigare använda storheterna ($U = 200$ miles/timme, $R = 3.8$ cm och flyghöjd 3000 m) fås kurvorna i fig 8.

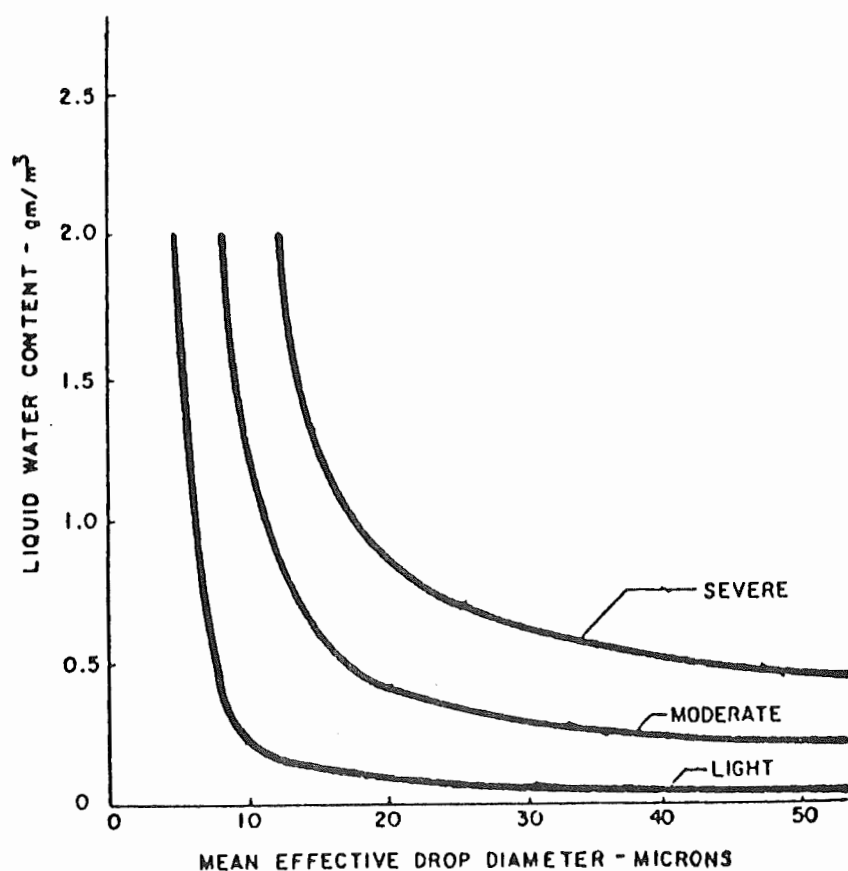


Fig 8: NACAs definition av isbildningsintensitet.

Uppenbarligen kan flera kombinationer av droppstorlek och vatteninnehåll ge samma isbildningsintensitet. Vid en droppstorlek av 15 μm (μm betecknar mikrometer, dvs milliondels meter) fordras t ex 1.3 gram/cm^3 för svår isbildning. Med dubbelt så stora droppar räcker det med 0.6 gram/cm^3 . För små droppar, diameter under 12 μm , fås ej svår isbildning.

Uppenbarligen behövs för att diagnosticera eller förutsäga isbildningens intensitet enligt denna skala kännedom om såväl droppstorlek som vätskeinnehåll. Om man antar ett samband mellan droppstorlek och vätskeinnehåll räcker det med en storhet. Vanligen brukar man då arbeta med vätskeinnehållet och införa en storhet, effektiva droppdiametern. Effektiva droppdiametern är en mediandiameter i meningen att hälften av mängden vatten finns i droppar mindre än denna, hälften i droppar större.

För närvarande utförs inga rutinmässiga mätningar av droppspektrum och/eller vatteninnehåll i moln. De direkta mätmetoder som finns är komplicerade, och används endast i forskning. Fjärranalysmetoder har ännu ej utvecklats. Det s k totala vatteninnehållet kan visserligen skattas med väderradar, men den fångar droppar av nederbördsstorlek, ej de mindre molndropparna. Isbildning förekommer ofta i moln som ej ger nederbörd.

Fig 9 visar att isbildning i regel sker vid relativt höga temperaturer. Detta kan tillskrivas att såväl andelen underkylda droppar som droppstorlek och vattenmängd tenderar att öka med temperaturen.

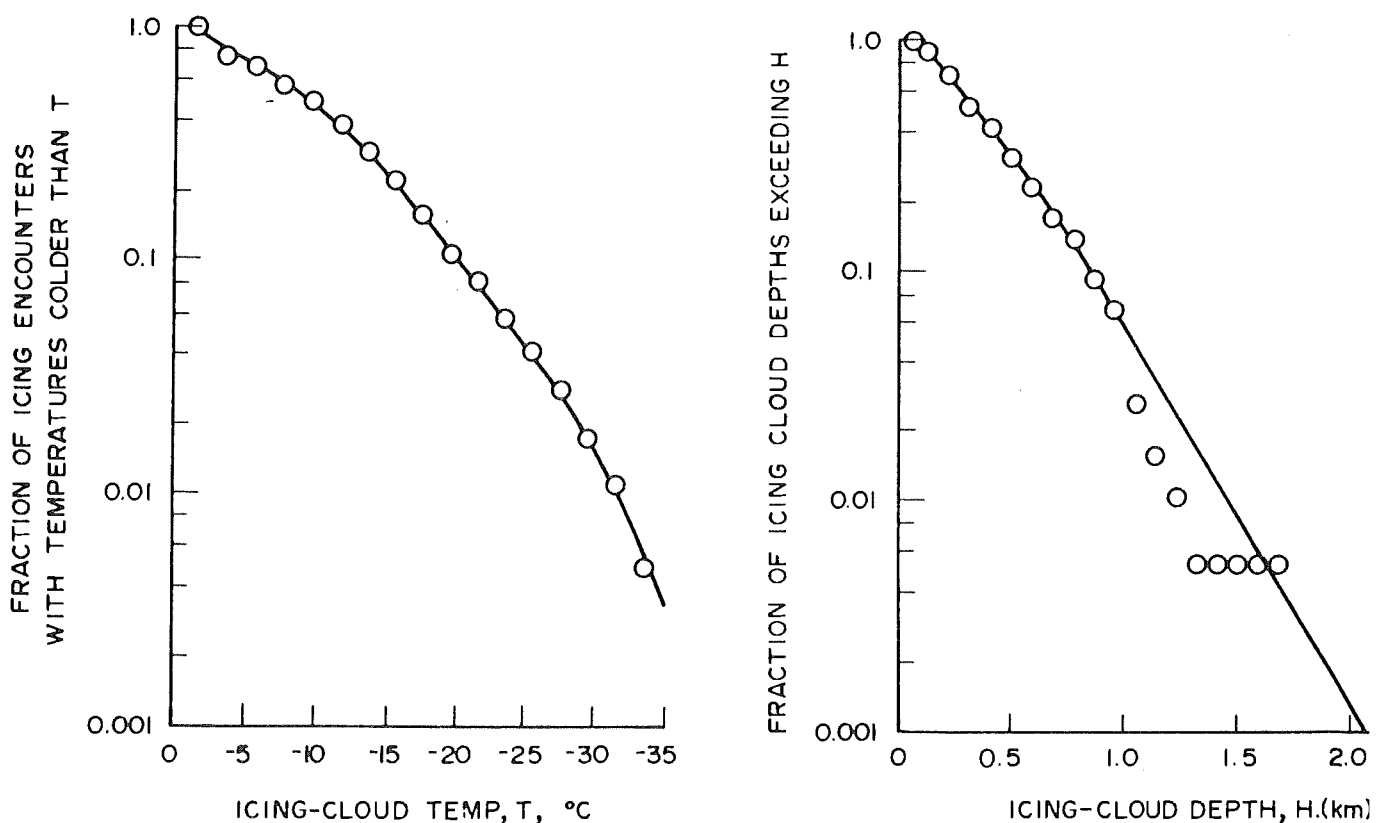


Fig 9: Kumulativa frekvenser av isbildningsmolns temperatur och vertikala utsträckning. Enligt den vänstra figuren har 90% av isbildningsmolnen temperatur över -20°C .

För kvalitativ analys av isbildningsrisk kan Fig.8 dock användas. Då måste meteorologen göra en DIAGNOS av

- a) DROPPARNAS FAS (IS ELLER VATTEN)
- b) DROPPARNAS STORLEK
- c) MOLNETS VATTENINNEHÅLL.

Några hjälpregler kan ges:

- a) Partikeltyp

Stratus, Stratocumulus under en låg inversion, temperatur 0 till -10°C : Sannolikt underkylda droppar. Jämför med SYNOP. Underkyld nederbörd indikerar droppar, snö iskristaller.

Altostratus, Nimbostratus: Underkylda droppar främst i molnets aktiva delar, där vertikalvinden är uppåtriktad. Inom molnets äldre, passiva delar väntas mest frusna partiklar.

Cumulonimbus: Här finns i regel underkylda droppar, åtminstone inom uppvindsområdet.

- b, c) Dropparnas storlek och molnets vatteninnehåll

Såväl droppdiameter som vatteninnehåll visar stora variationer i horisontell led.

Stratus, Stratocumulus: Typiska värden är ca 10 μm resp några tiondels g/m^3 för moln som ej ger isbildning. En sammanfattning av tillgängliga mätningar från underkylda stratiforma moln ger fig 10. Merparten av dessa data kommer från moln som ej gav måttlig eller svår isbildning. Flygningar genom kallluft-Stratus över varmt hav har gett vatteninnehåll uppåt 1 g/m^3 i molnens övre delar.

Vatteninnehåll över 0.5 g/m^3 är sällsynt, liksom droppdiameter över 25 μm . Enligt fig 8 fordras för svår isbildning 0.7 g/m^3 om effektiva droppdiametern är 0.25 μm . Så vattenrika och stordroppiga stratiforma moln är sällsynta. Svår isbildning är också sällsynt i stratiforma moln.

I extremfall kan Stratus och Stratocumulus kanske nå 30 μm resp 1 g/m^3 . I Fig 11 finns då endast ett litet område med svår isbildning i stratiforma moln. Sådana moln ger också i regel endast lätt isbildning. Gå in med typiska värden på vatteninnehåll och droppstorlek (fig 10) i fig 11 och se var du hamnar!

Situationen är helt annorlunda för Cumulonimbus. Vatteninnehåll över 0.5 g/m^3 och effektiv droppdiameter över 30 μm finns praktiskt taget alltid i Cumulonimbus. Inte i hela molnet, men i delar av det. Det är en av orsakerna till att flygning i Cumulonimbus bör undvikas. I stora delar av molnet är det riskfritt, endast lätt isbildning och turbulens. Men för närvarande finns inga säkra metoder att identifiera och undvika molnens farliga delar.

Altostratus och Nimbostratus har i regel lägre temperatur än

Stratus och Stratocumulus och därmed större andel frusna droppar och lägre mängd flytande vatten.

Cumulonimbus når betydligt högre vatteninnehåll och har ett brett spektrum av underkylda droppar, alltså även stora, över säj 30 μm .

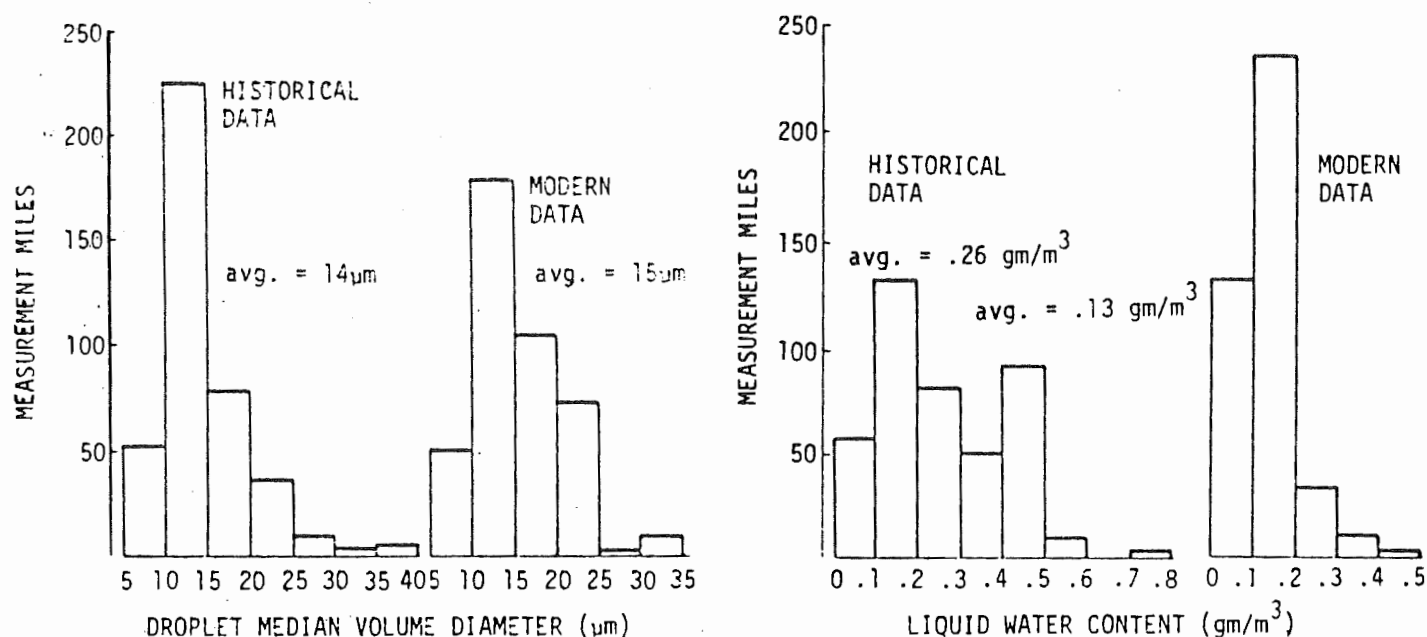


Fig 10: Frekvenser av droppdiameter och vatteninnehåll enligt 400 miles genomflygningar av underkylda stratiforma moln. 'Historical data' avser NACAs undersökning 1946-48. 'Modern data' avser undersökningar 1978-79.

Fig 11 ger möjlighet till en grov diagnos (first guess) av isbildningssituationen. Genom att skatta vatteninnehåll och effektiv droppdiameter kan man se vilket område (light, moderate, severe) som är sannolikt.

NACAs definitioner är "meteorologiska" i meningen att de enbart bestäms av meteorologiska storheter och därför, åtminstone i princip, är förutsägbara. Som tidigare framhållits är emellertid isbildning ENDAST DELVIS bestämd av meteorologiska faktorer. I praktiken används också, som vi sett, HELT ANDRA DEFINITIONER på lätt, måttlig och svår isbildning.

Genom att fixera värden på effektiv droppdiameter har Air Weather Service i USA kunnat utarbeta den kvantitativa metod för diagnos av isbildning som beskrivs i nästa kapitel.

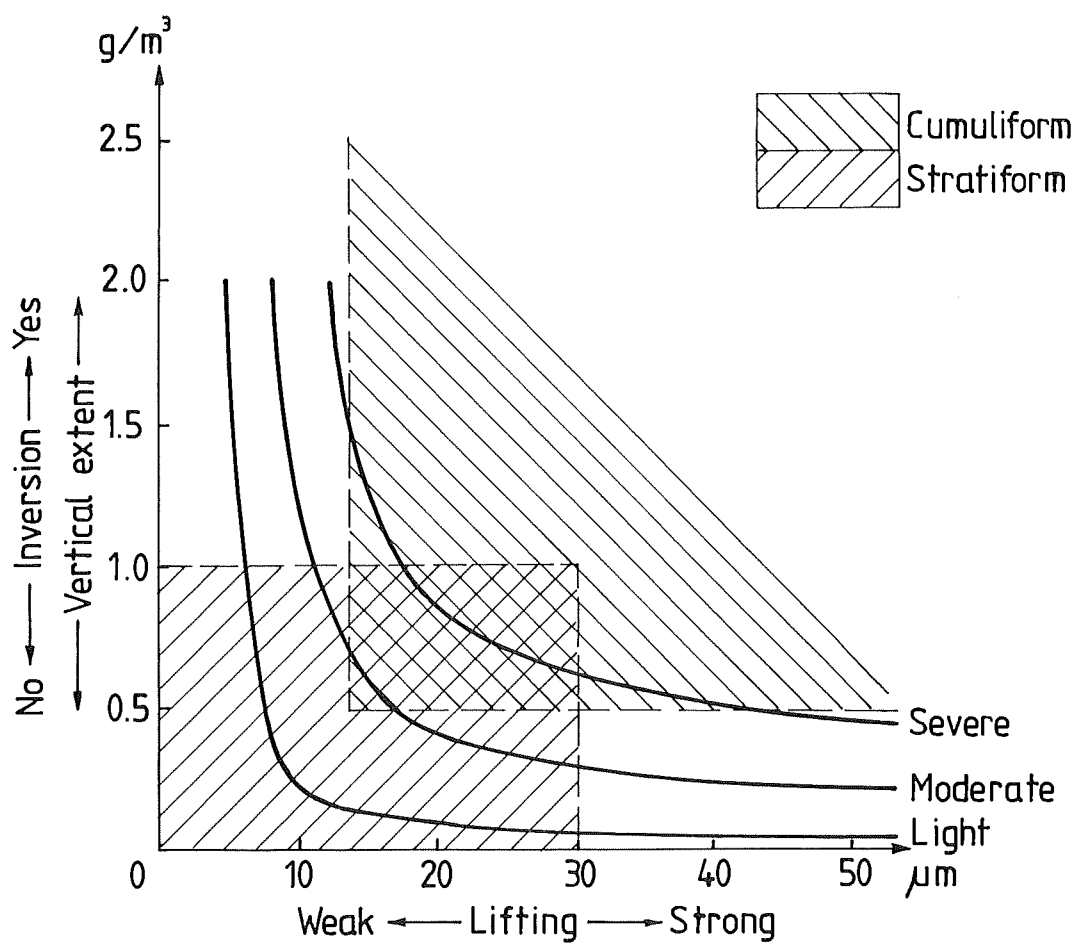


Fig 11: 'First guess' av isbildningsförhållanden.

6. EN METOD FÖR ISBILDNINGSDIAGNOS

Air Weather Service i USA har utarbetat en huvudsakligen adiabatisk metod för isbildningsdiagnostik, som bl a tillämpas av svenska militära vädertjänsten och där kallas LWC-metoden (LWC=liquid Water Content). Härledning av denna metod följer.

Man antar att effektiva droppdiametern är

- * 14 μm för skiktmoln
- * 17 μm för konvektiva moln.

Enligt fig 8 kräver dessa droppdiametrar följande vatteninnehåll för resp isbildningsintensitet:

ISBILDNINGS- INTENSITET	CUMULIFORMA MOLN, g/m^3	STRATIFORMA MOLN, g/m^3
LÄTT	0.08 - 0.49	0.12 - 0.68
MÄTTLIG	0.50 - 1.0	0.69 - 1.33
SVÅR	över 1.0	över 1.33

STRATIFORMA MOLN

Man antar en hävningskondensationsnivå (Lifting Condensation Level, LCL) 1000 hPa, och vid den fuktadiabatiska hävningen bildar halva kondensatet molnet. Empiriskt anses detta ge en god approximation till det verkliga vatteninnehållet.

Beteckningar:

T = temperatur, $^{\circ}\text{K}$

P = lufttryck, hPa

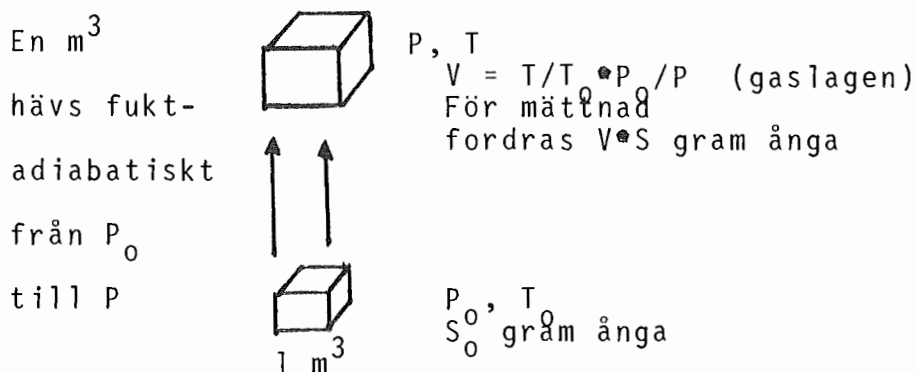
e = mättnadsångtryck över vatten, hPa

S = vattenångans mättnadsdensitet, gram/m^3

W = vatteninnehåll, gram/m^3

V = volymen

Låt index $_0$ beteckna LCL, alternativt molnbasen.



Under hävningen ökar volymen från 1 till $V = T/T_0 \cdot P_0/P$.
 För mättnad fordras $V \cdot S$ gram ånga.

Under hävningen har $S_0 - V \cdot S$ gram kondensat, och per volymenhet finns följande mängd kondensat:

$$W = S_0/V - S$$

Enligt gasernas allmänna tillståndslag:

$$e = S \cdot R_v \cdot T$$

R_v = gaskonstanten för vattenånga (217 i dessa enheter)

$$W = 217/T \cdot (e_0 \cdot P/P_0 - e) \quad (3)$$

Som tidigare anförts, approximeras molnets vatteninnehåll som halva detta värde.

För att (ur radiosondering) avgöra om hävning sker tillämpas frostpunktskriteriet. Moln (som alltså förutsätts bildade genom adiabatisk hävning) antas finnas där

$$T_f > T, \text{ eller}$$

$$(T - T_d) < -0.2 \cdot T_d$$

T_f = frostpunkten, $^{\circ}\text{C}$
 T_d = daggpunkten, $^{\circ}\text{C}$
 T = lufttemperaturen, $^{\circ}\text{C}$

Det hela bygger på approximationen $T_f = 0.8 \cdot T_d$

KONVEKTIVA MOLN

I princip som för stratiforma moln, men man antar högre hävningskondensationsnivå (LCL), att allt kondensat blir molnvatten, och att entrainment sker.

PRAKTISKT UTFÖRANDE

Man arbetar med överlägg, som läggs på den plottade sonderingskurvan. Överläggen består av kurvor för lika W , se fig 12. Tex för stratiforma moln är kurvan för svår isbildning vatteninnehåll 1.33 gram/m^3 , dvs $W = 2.66$ enligt modellen ovan. Se även appendix 2.

ÖVERLÄGG FÖR OREDSSONS DIAGRAM (enl LWC metoden)

Överläggen, fig 12, har konstruerats enligt följande:

- * Stratiforma moln: Fuktadiabatisk hävning från hävningskondensationsnivån (LCL) 1000 hPa. Kondensat enligt ekv 3. Halva kondensatet ger molnvatteninnehållet. Gränser enligt tabell på sid 22.
- * Cumuliforma moln: Fuktadiabatisk hävning från LCL på 900 hPa, utan entrainment. Kondensat enligt ekv 3 och gränser enligt tabell på sid 22.

Kurvor för lätt isbildning har utelämnats. För sådan fordrar metoden i stort sett endast ett ca 200 m mäktigt moln.

1. Välj representativ sondering.
2. Bestäm sannolik isbildningstyp.
 - A. Om sonderingen är villkorligt labil ($\gamma_s > \gamma_d$) är isbark sannolikast. Nedre temperaturgräns för isbark -25°C .
 - B. Om sonderingen är fuktstabil är dimfrost sannolikast. Använd frostpunktskalan för att avgöra i vilka nivåer isbildning väntas. Placera frostpunktskalan utefter isobarerna så att dess temperatur, T , sammanfaller med sonderingens. Där sonderingens daggpunkt ligger till höger om skalans värde ($T-l$) väntas isbildning. ANM: Dessa kriterier för isbark/dimfrost är egna för modellen. De skiljer sig från vad som i regel anges i litteraturen, nämligen att dimfrost bildas vid låga och isbark vid höga temperaturer, jfr sid 3.
3. A. Om sonderingen saknar fronter, drag en vertikal linje (vinkelrätt mot isobarerna) uppåt genom LCL eller molnbasen.
B. Om fronter/inversioner finns, drag ingen vertikal linje.
4. Lägg LCL-skalans temperaturskala utefter sonderingens LCL- (eller molnbas-) isobar, så att skalans 0°C -isoterm sammanfaller med det termodynamiska diagrammets.
5. Avläs isbildningens intensitet.
 - A. Om sonderingen är fuktlabil, avläs vertikallinjens skärningar med de streckade isbildningslinjerna.
 - B. Om sonderingen är fuktstabil, avläs skiktningsskurvans skärningar med de helldragna isbildningslinjerna.

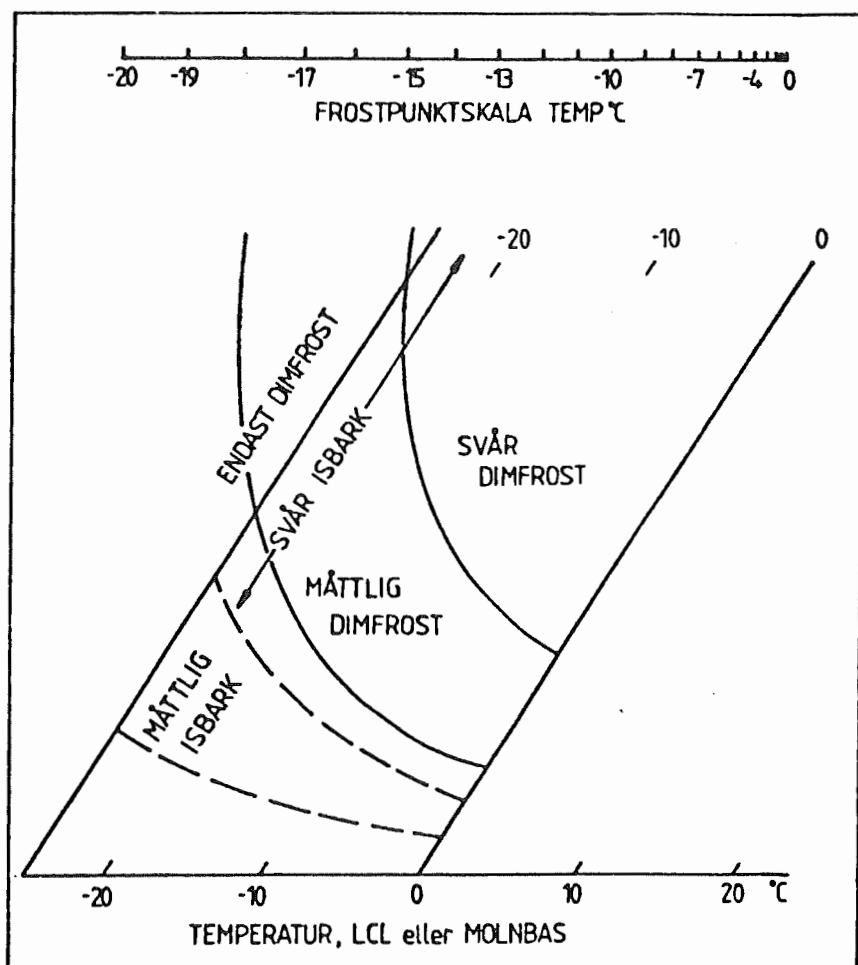


Fig 12: Överlägg för Oredssons termodynamiska diagram.
 Streckade kurvor avser cumuliforma moln
 Heldragna " " stratiforma " .

EXEMPEL: Vi illustrerar metoden med Brommasonderingen, fig 13.

1. Med frostpunktskalan fås dimfrost mellan 960 och 800 hPa, samt mellan 700 och 680.
2. Hävningskondensationsnivån ligger på 995 hPa. Överläggets temperaturskala placeras på denna nivå, så att 0° -isoter-men sammanfaller med det termodynamiska diagrammets.
3. Eftersom sonderingen har inversion dras ingen vertikallin-je.
4. Kurvan för måttlig dimfrost skär skiktningsskurvan i B. Skiktningen är fuktstabil i B-C. Diagnosen blir alltså måttlig dimfrost här.
5. Mellan C och D är skiktningen fuktlabil. I analogi med exemplen i appendix 1 används då kurvorna för cumuliforma moln. Under (det realistiska) antagandet att moln kommer att bildas mellan C och 700 hPa, trots att sonden passerat ett molnfritt skikt här, blir diagnosen svår isbark för skiktet C-D. (Att C ligger invid kurvan för svår dimfrost är en tillfällighet).
6. Övanför D ingen isbildning p g a det stora daggpunktsdefi-citet.

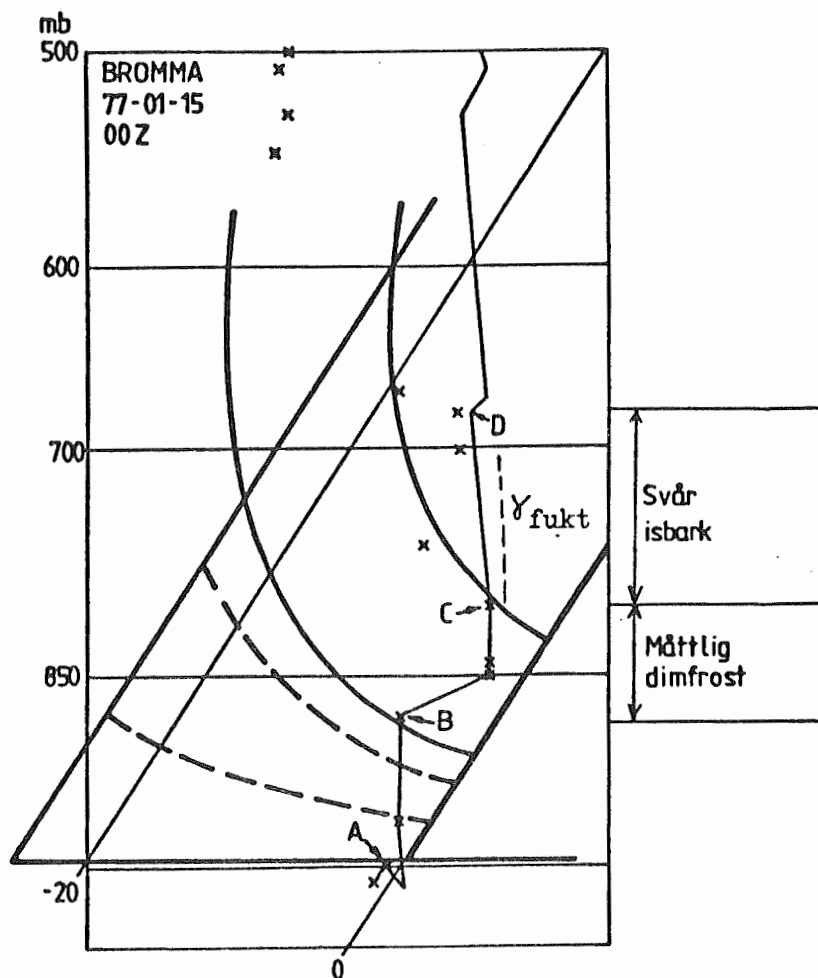


Fig 13: Analys av Brommasonderingen 1977-01-15, 00z.

Kommentar: För isbildningsförhållandena morgonen 1977-01-15 finns ett makabert facit: En Vickers Viscount störtade under inflygning för landning på Bromma på grund av svår isbildning. Metoden ger alltså svår isbark över C i fig 13, dvs över 810 mb eller 6000 fot. Vid störtningen kl 0759z hade Viscounten 2000 fots höjd.

En Convair vågade kl 0605 inte ligga och vänta på 3000 fot, men rapporterade ändå måttlig till svår isbildning (jfr ICAOs definition).

Detta visar LWC-metodens stora svaghet: Den är oanvändbar på låga nivåer. Svår dimfrost kan t ex ej diagnosticeras på höjder under 5000 fot. Orsaken är att modellen förutsätter adiabatiska processer, medan isbildning i själva verket ofta orsakas av icke-adiabatiska som ackumulation av molndroppar under en inversion, eller utfällning av underkyld nederbörd.

För trafikflyget är isbildning främst ett problem på låga nivåer i samband med landning, alltså då metoden är OANVÄNDBAR.

Till metodens fördelar hör att den understryker betydelsen av fuktlabil eller fuktindifferent skiktning. Däremot tar den ej hänsyn till inversioner, partikeltyp eller luftens trajektorier. Om metoden skall tillämpas måste det alltså ske med OMDÖME.

7. DIAGNOS

Analysera temper. Se särskilt upp med inversioner och fuktlabil skiktning under dem. Observera att LWC-metoden EJ kan diagnosticera isbildning i lägsta skikt.

Analysera SYNOP-kartan. Beakta moln, hydrometeorer och vid kuster pålandsvind och havsvattnets temperatur.

Analysera flygplanrapporter, satellit- och radarbilder.

SCHEMATISKA REGLER

- MOLN: Cu con.  vid temp $< 0^{\circ}\text{C}$.
- Cb.  0 till -25°C . Vatteninnehållet i Cb är i regel störst i molnets övre "trefjärdedel".
- Ns, As.  över områden med måttlig-kraftig nederbörd i intervallet 0 till -15°C över frontens aktiva delar, dvs där man har uppåtriktade vertikalkvindar och nybildade droppar ej hunnit övergå till iskristaller. Empiriska resultat antyder att vatteninnehållet är störst några hundra meter över frontytan. - Se upp med insprängda Cb.
- Sc, St.  0 till -15°C under inversioner. Molnen måste ha några hundra meters mäktighet. Isbildningen är i regel svårast strax under inversionen.
- Ci, Cs, Cc. Består i regel av iskristaller och ger ej is. Dock har sporadiskt måttlig isbildning rapporterats vid temperatur av ca -40°C . Kan inträffat då fuktig luft med hög vindhastighet övertvärar skandinaviska bergskedjan. Kuriosa.
- SKIKTNING (LAPSE RATE) Fukttindifferent eller fuktlabil skiktning inom åtminstone delar av molnet.
- PARTIKELTYP Risken för isbildning är större i moln som består av mest underkylda vattendroppar än i moln som består av iskristaller.
- VÄDERSITUATION  Snabbt varmluftsinsbrott efter kallt högttryck.
- NEDERBÖRD:  vid * underkyllt regn och duggregn
* iskorn
* kornsnö
* blöt snö (speciellt helikoptrar)
- VIND: St som bildas då kall luft strömmar över varmt hav blir

ofta vattenrika. Yttrar sig i sonderingar som labila skikt under inversion. Ψ - Ψ över hav och lovartsidan av land.
St-moln kan förstärkas eller bildas då luft strömmar uppför sluttningar. Vid stabil skiktning sänks då också 0° -isotermen.

FLYGPLANRAPPORTER: Beakta flygfas och flygplantyp. Vid start stiger i regel planen så snabbt att nämnvärd is ej hinner bildas. De kan dessutom vara preparerade med avisningsvätska. Det är normalt att startande flygplan ej upplever nämnvärd isbildning ens i meteorologiskt sett svåra isbildningssituationer. Tunga trafikflygplan har effektiva avisningsanordningar och skall strängt taget ej kunna råka ut för svår isbildning i ICAOs mening (jfr deras def av svår isbildning) eftersom alla känsliga delar skall vara skyddade av avisningsanordningar! Dessutom måste beaktas att moln ej är homogena i vare sig tid eller rum. Dvs, inom ett St som ger svår isbildning finns även vattenfattiga områden. Svår isbildning är regel i Cb, men omfattar inte hela molnet.

SATELLITBILDER ger molnens utbredning, approximativa höjd och temperatur.

RADAR ger detaljerad info om nederbördens läge och höjd. Molndroppar ger visserligen ej eko, men väl duggregn. Moderna radar ger dessutom ett mått på nederbördens vatteninnehåll. Ett tydligt "Bright Band" indikerar att molnet ovanför detta huvudsakligen består av iskristaller. Bright Band kan också användas för att följa 0°C -isotermens höjd, eftersom det ligger ca 300 m under den. På radarns standardpresentation är visserligen ofta höjdupplösningen för dålig (ca 1 km) för noggrann följning, men det går att ta ut data med bättre höjdupplösning. Fig 14 visar ett typiskt Bright Band, som snabbt höjde sig. I skiktmoln finns praktiskt taget alltid Bright Band, i Cumulonimbus finns det ofta utanför molnens aktiva delar och i gamla moln under upplösning.

Diagnosen SVÅR ISBILDNING i skiktmoln skall ej undvikas, men man bör se till att ha fog för den. Ett viktigt indicium är frostpunktsanalysen; inom ett några hundra meter mäktigt skikt bör SMHIs kriterium¹⁾ vara uppfyllt. Detta är emellertid ej tillräckligt. Åtminstone något av följande kriterier bör dessutom vara uppfyllt:

- * Entydiga, bedömt pålitliga flygplanrapporter som ger svår isbildning
- * Underkylt regn, underkylt duggregn, iskorn eller kornsnö rapporteras
- * Relativt mäktiga moln under en inversion. Har man dessutom

vid kuster pålandsvind från varmt hav får detta kriterium mycket stor vikt.

* Radareko från skiktet

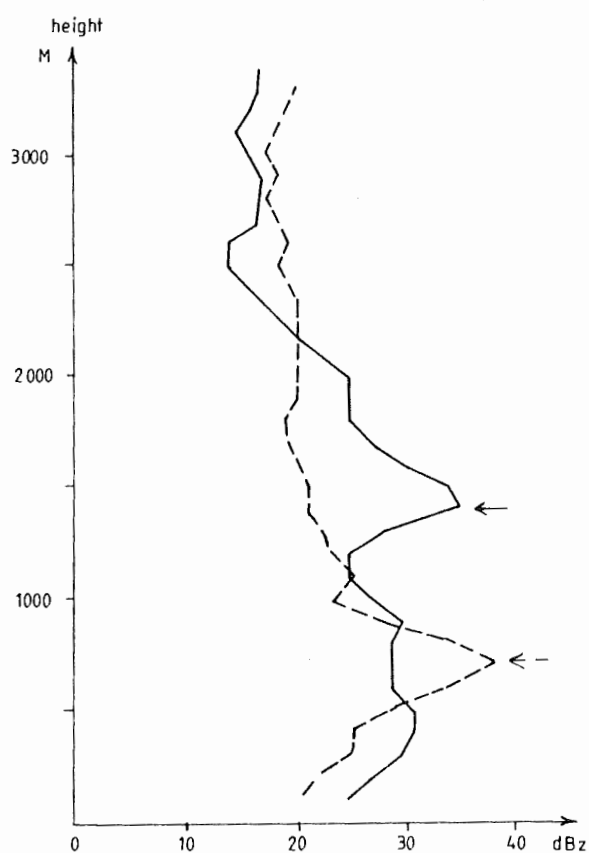


Fig 14: Ett Bright Band som snabbt höjde sig. SMHIs dopplervä-
derradar i Norrköping.

--- 86-12-05 kl 09:45 UTC.
— 86-12-05 kl 11:05 UTC.

8. PROG NOS och BRIEFING

Man måste använda sig av gängse prognosmetoder, dvs förflytta fronter och luftmassor, bedömma orografins inverkan vid advektion samt termiskt betingade stabilitetsändringar och därmed sammanhängande begynnande resp upphörande konvektion.

Vid BRIEFING bör speciellt inversioner på låg höjd uppmärksammas, liksom observationer av underkyld nederbörd, kornsnö, iskorn och blötsnö. Dessutom bör fjärranalys, som radar och satellit, utnyttjas. Speciellt radar är värdefull, eftersom den ständigt ger aktuell information. Även om denna inte är direkt kopplad till isbildning, kan sådant som 0°C-isotermen följas, liksom Cumulonimbuscellers såväl geografiska läge som deras intensitet och toppars höjd.

Givetvis bör även tillgängliga färska flygplanrapporter och debriefingar utnyttjas.

Anpassa, om möjligt, briefing till piloten, flygoperationen och flygplantypen.

Undvik att rekommendera höjder. Betona däremot de nivåer som bör undvikas.

9. MÖJLIGA FÖRBÄTTRINGAR

Läsarna som hunnit hit (eftersom detta är kurslitteratur finns kanske sådana) känner sig, förhoppningsvis, förvirrade och frågande: "Vad är svår isbildning? Denna uppenbart viktiga storhet, som kan menligt inverka på flygsäkerheten, och vädertjänsten därför skall varna för. Den civila med SIGMET, den militära med något motsvarande, i Sverige ISBVA."

SIGMET är avsedd för kommersiellt flyg, ej privatflyg. Trafikflygplan har i regel avisningsanordningar. Deras effektivitet varierar från typ till typ, men i regel är tyngre trafikplan byggda för att klara alla isbildningsförhållanden, och har därför effektivast avisningsanordningar. Vilken flygplantyp skall SIGMET avse? En AIRBUS med imponerande uppvärmning av känsliga delar, eller en litet allmänflygplan utan skydd?

Vilken flygoperation skall avses? Vilken pilot? Optimisten eller pessimisten? Listan kan göras lång.

Att utvecklingen av isbildningsmeteorologin effektivt hämmas av diffusa definitioner och brist på entydiga observationer, är sedan länge såväl känt som erkänt. En amerikan, A. Hilsenrod, sammanfattade 1978 på ett ypperligt sätt den fortfarande rådande situationen:

"MAJOR IMPROVEMENTS OF ICING FORECASTS WILL EVOLVE ONLY WHEN WE MEASURE, REPORT AND FORECAST ICING IN QUANTITATIVE FORM. TO THIS END WE NEED:

- (1) INSTRUMENTS TO MEASURE AND REPORT ICING CONDITIONS, AND
- (2) CHANGES IN THE CURRENT DEFINITIONS OF ICING CONDITIONS."

Situationen kan alltså, åtminstone teoretiskt, förbättras.

En vettig, internationell definition är nog knappast att vänta.

Instrument för att mäta tillväxthastigheten (jfr NACAs definition) finns däremot redan, både enkla och komplicerade. Med tillgång till resultat från sådana skulle meteorologen kunna arbeta med en METEOROLOGISK storhet i stället för den PSYKISK - OPERATIV - AERODYNAMISK - SOCIAL - METEOROLOGISKA som nuvarande isbildningsdefinitioner ger. En prognos av tillväxthastigheten skulle piloten kunna översätta till sin egen flygplantyp och operation betydligt bättre än nuvarande SIGMET. - Med andra ord, prognosen skulle enbart ge de METEOROLOGISKA BETINGELSERNA för isbildning.

Exempel på ett enkelt och billigt hjälpmedel för observation av isens typ och tillväxthastighet ger fig 15. Observationer från flygplan med sådana 'instrument' skulle kunna bilda ett nytt observationssystem och ge meteorologen en fysikalisk storhet att diagnosticera och förutsäga.

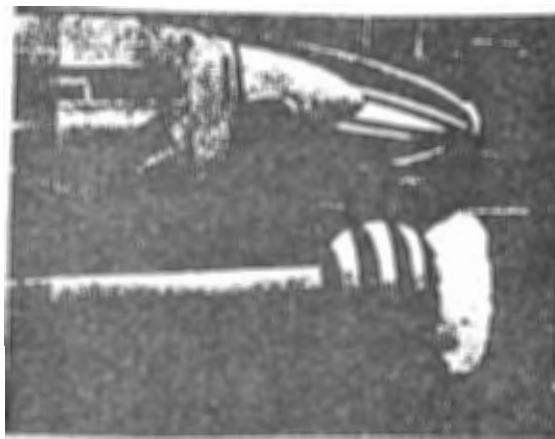


Fig 15: Mätkropp för kvantitativ skattning av isbildningens intensitet. Mätkroppen utgörs av en sfär, se principskissen till vänster. På bilden till höger det praktiska utförandet. Hornis har bildats på sfärens front.

En del flygplan har redan betydligt mer sofistikerade instrument för att upptäcka isbildning och starta avisning. Fig 16 visar Fokker F 28s. Genom två luftintag i ett utstickande rör (nedre vänstra delbilden) strömmar luften på ömse sidor förbi ett membran (diaphragm). Det ena luftintaget är uppdelat i flera små. Då is bildas täpps relativt snabbt det uppdelade luftintaget, membranet buktar sig, ett relä sluter en strömkrets, motoravisningen startar och en varningslampa tänds på instrumentbrädan. Samtidigt uppvärms luftintagen så att isen smälter och strömkretsen bryts. Fås ingen ny kontakt inom 60 sek, (dvs täpps ej luftintaget till) slocknar lampan och avisningen upphör.

Tillgång till observationer från instrument av denna och liknande typ skulle vara ovärderliga för meteorologen. Trots att detta ännu ej kunnat ordnas och alla andra svårigheter som här diskuterats är

meteorologen den som bäst kan diagnosticera och förutsäga de **meteorologiska** faktorer som är **NÖDVÄNDIGA** för isbildning.

FOKKER F-28

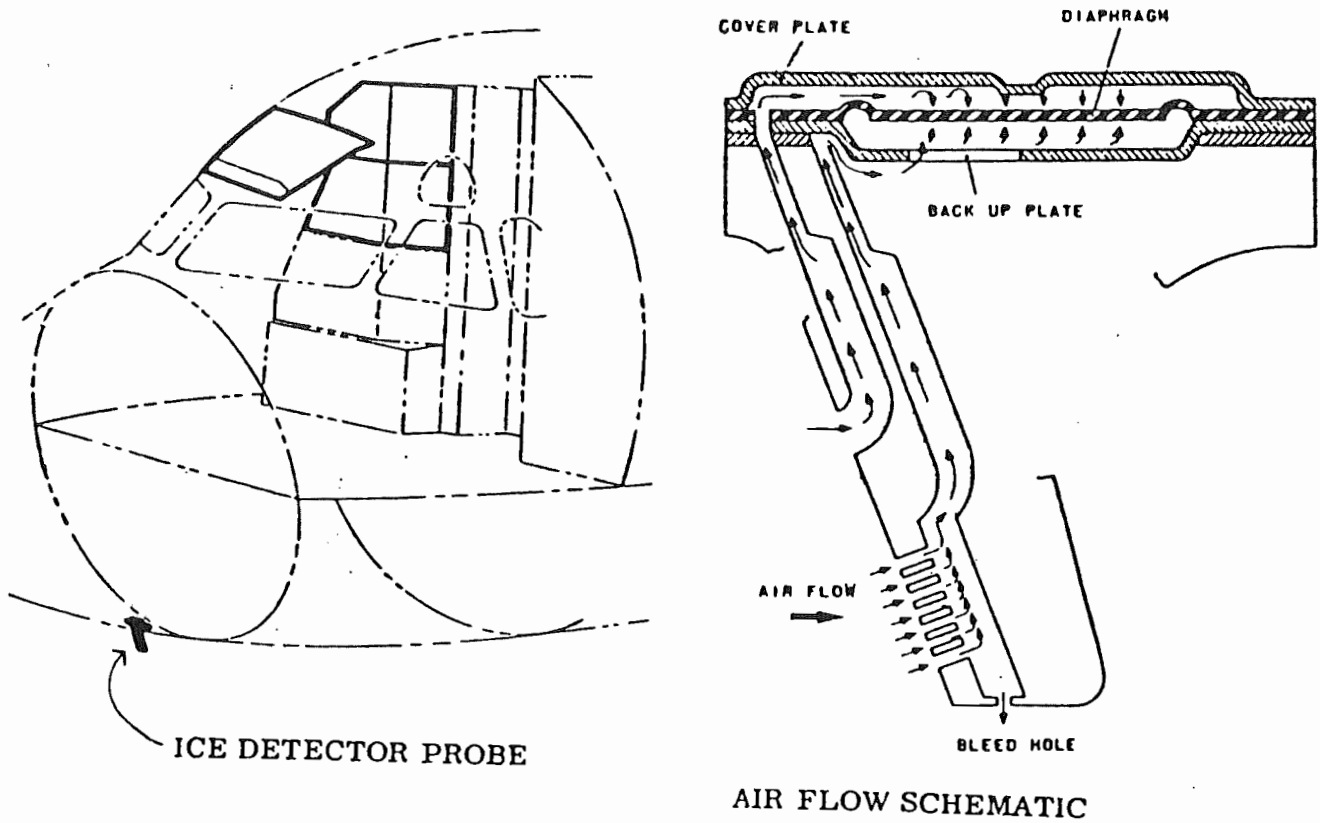


Fig 16: Isbildningsvarnare på Fokker F 28.

Referenser:

1. Best, A C: Occurrence of high rates of icing on aircraft. Met Office, Professional Notes, No 106, 1952.
2. Dept of the Air Force: Forecasters Guide on aircraft icing. AWSM 105-39, 1969.
3. ICAO: Doc 444-RAC/501/11: Rules of the air and air traffic services. Eleventh Ed, 1978. Sid A4.
4. ICAO: Meteorological Service for international air navigation. Annex 3. Eight Ed, 1976. Sid 27.
5. Laschka, B and Jesse, R E: Ice accretion and its effects on unprotected aircraft components. AGARD Advisory Report No 127: Aircraft icing. Ottawa, Canada, Sept 30, 1977.
6. Messinger, B L: Airframe design for protection against icing. Aircraft Ice Protection, Report of Symposium, April 28-30, 1969, sid 195-214. FAA, Washington D.C.
7. Militära Vädertjänstens Centralorgan: Rapport från litteraturstudier av isbildningsproblem. OVÅ, Nr 2, 1980.
8. Newton, D W: An integrated approach to the problem of aircraft icing. AJAA Aircraft Systems & Technology Meeting, Seattle. Washington/August 22-24, 1977.
9. Roed, A: The effects of snow and ice on aircraft drag and stall.
10. Rosenquist, S: Erfarenheter från undersökningen av Brommahaveriet. VBV, Medd Nr 32, SMHI, 1977.
11. Sweeny, H J and Cohen, I D: Some microphysical processes affecting aircraft icing - final report. Airforce Geophysical Laboratory, Hanscom AFB, AGL-TR-85-0100, Environmental Research Papers, No 914, 8 May 1985.

Isens typ kan relateras till 3 faktorer

- * flygplanets hastighet
- * luftens temperatur
- * frysandsandelen.

Frysandsandelen, n , är den andel av vattnet som omedelbart fryser då det träffar planet. En frysandsandel 0.8 innebär då att åtta tiondelar omedelbart fryser. Resterande två tiondelar hinner flyta ut något innan de fryser. Fig visar vilka istyper man kan vänta vid droppstorlek 15 μm och vatteninnehåll 0.45 g/m^3 som funktion av hastighet och temperatur.

Om frysandsandelen är 1, dvs allt vatten fryser omedelbart, bildas dimfrost. Vid frysandsandel under 0.66 hinner vatten flyta ut innan det fryser och bilda hornis. Figuren visar också en övergångstyp mellan hornis och dimfrost, som fås vid frysandsandel omkring 0.8.

Om is bildas eller ej beror av flygplanets yttemperatur, T_s , som bl a bestäms av hastigheten och molnets vatteninnehåll. Om yttemperaturen är över 0°C fås ingen frysning. Det är dock först vid höga hastigheter som denna dynamiska uppvärmning når större belopp.

Vid de hastigheter som är aktuella vid landning, omkring 100 knop, kan, med dessa molnkaraktistika, hornis väntas ned till 15°F , dvs -9°C . Den ofarligare istypen, dimfrost, kan då väntas vid temperaturer under 7°F (-14°C).

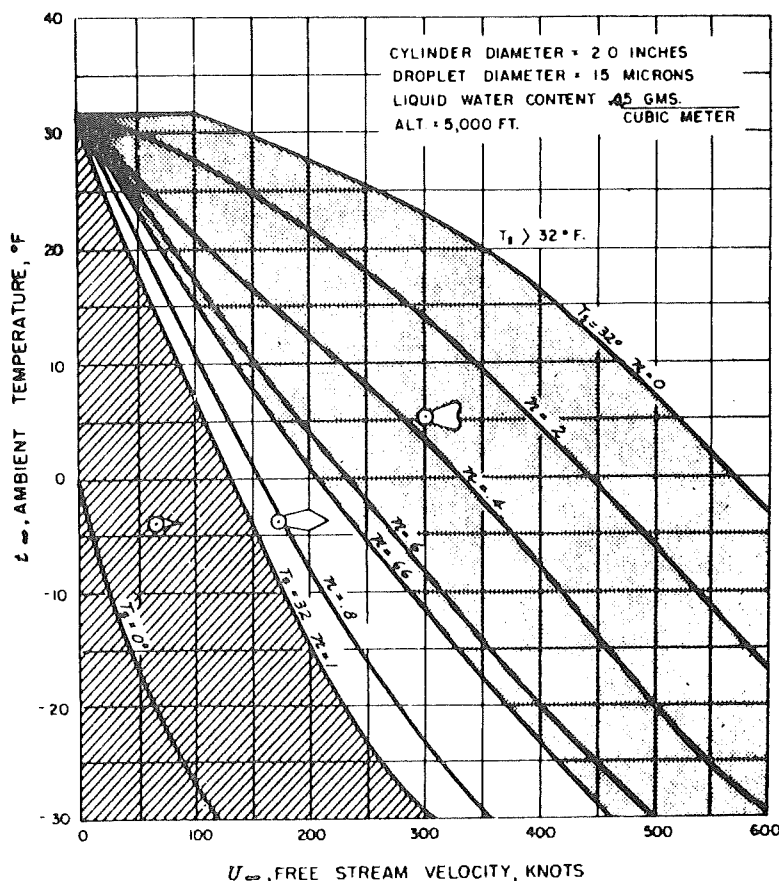


Fig . Istypens beroende av hastighet, U , och lufttemperatur, t , i $^\circ\text{F}$. Efter Messinger, Aircraft Ice Protection, Report of Symposium, April 28-30, 1969, FAA, sid 195-212.