

# Potniško letalo

Gorazd Planinšič, FMF UL

Univerza v    Universitas  
*v Ljubljana    Labacensis*



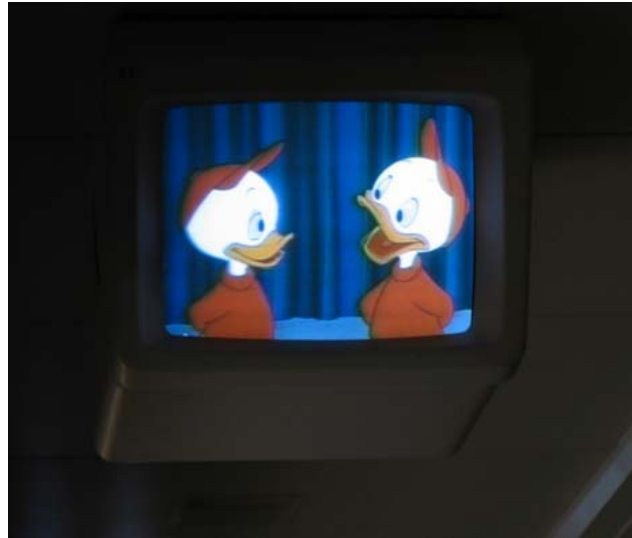
DMFA, Gozd Martuljek 10.11.2006

**Kot potnik v  
letalu**

# Polet čez Atlantik (Boeing 747)



# Kako preživeti dolge ure leta?



Zabavno za večino potnikov.



Dolgočasno za vse,  
razen za fizike...

LH 446

Fr. → Denver  
22.6.06

SEIT 1966

HAERKASTEN  
ALTER

loc. time	km/h	m	°C
2:48	900	11582	-55
2:51	899	11582	-56
2:55	890	11582	-57
58	896	11582	-56
3:02	898	11582	-56
05	892	-	-55
07	892	-	-57
13	898	-	-57
16	914	-	-
20	920	10515	-49
23	913	9601	-45
27	911	8839	-37
30	877	8229	-32
33	793	7070	-2
36	409	21000	3
37	571	491	-12
40	861	16282	23
	579	475	
42	529	4090	2

Lokalni čas na mestu pristanka

Hitrost glede na Zemljo (ground speed)

Nadmorska višina

Zunanja temperatura

do pristanka  
4 min

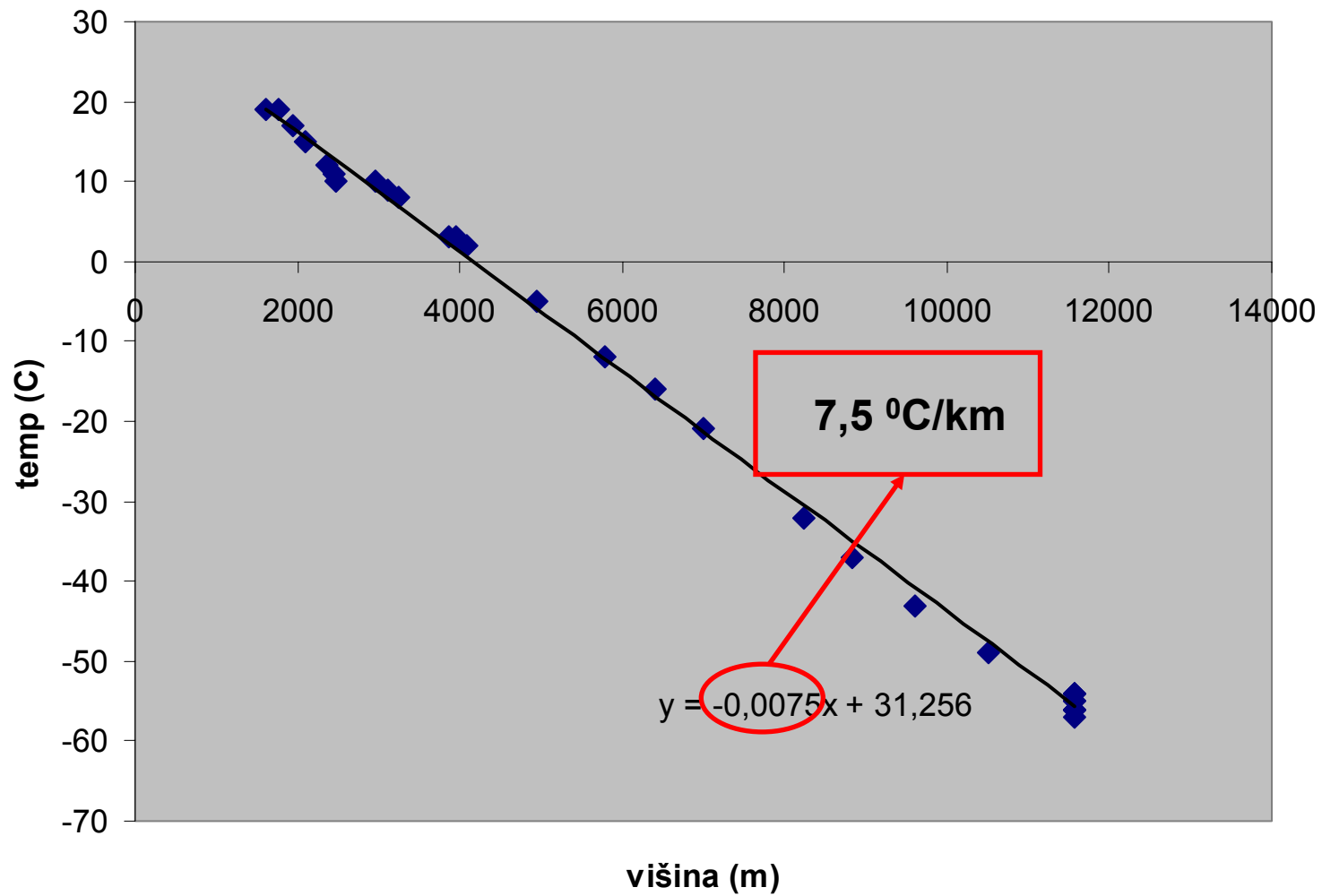
(23 km/h)

**KAJ LAHKO ŠE IZVEMO IZ TEH PODATKOV?**

→ \* mph/feet/F

Spreminjanje zunanje  
temperature z  
nadmorsko višino

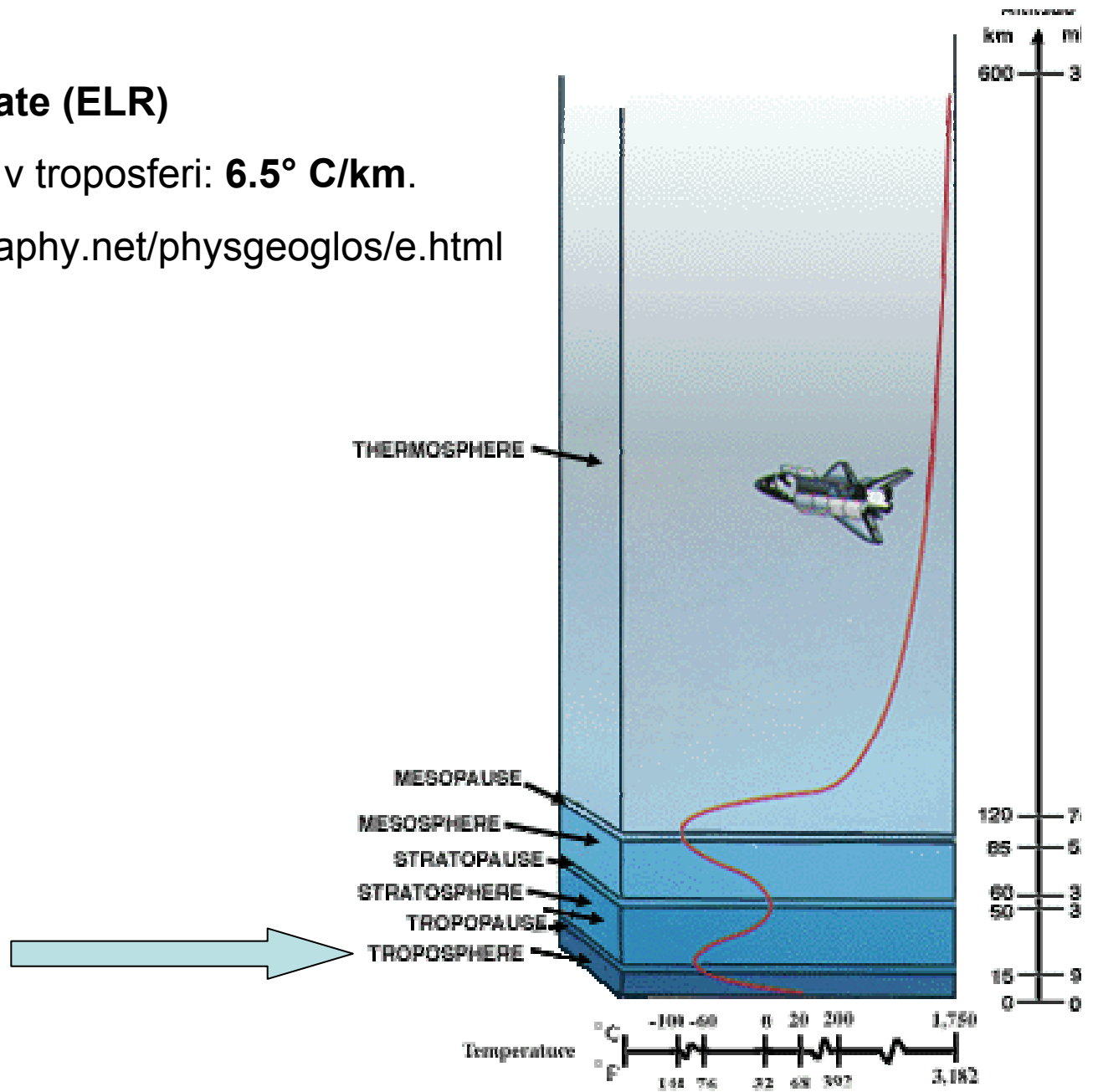
# ODVISNOST TEMPERATURE OD NADM. VIŠINE



# Environmental Lapse Rate (ELR)

Povprečna vrednost ELR v troposferi: **6.5° C/km.**

<http://www.physicalgeography.net/physgeoglos/e.html>





# Sila zračnega upora na avion

$$F_u = \frac{1}{2} c_u \rho S v^2$$

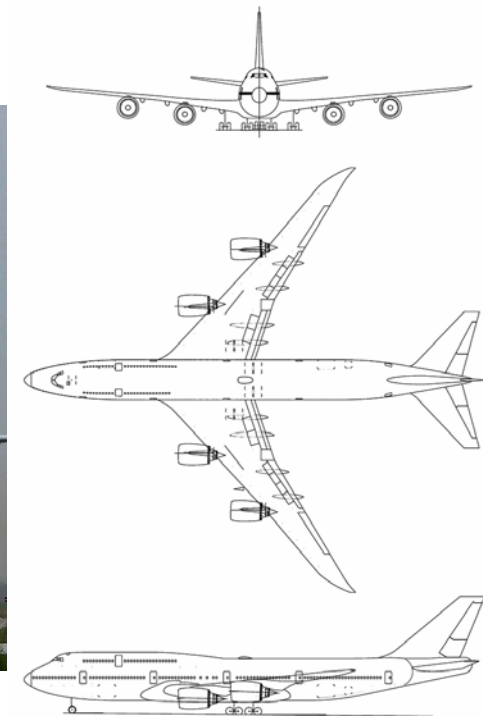
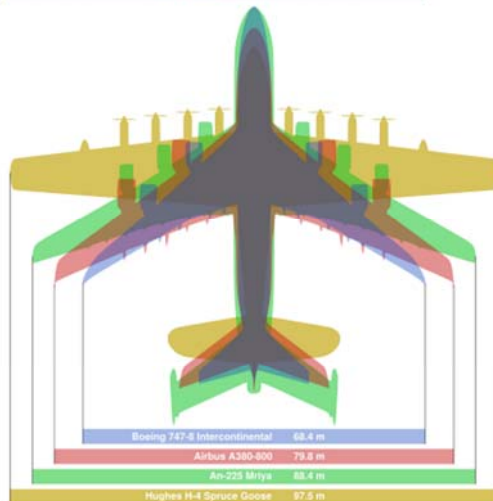
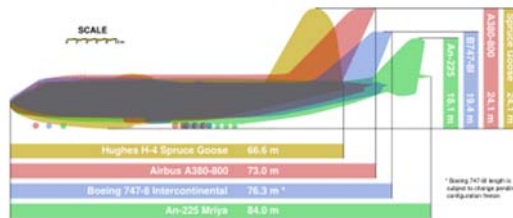
Google:

- **$c_u$  koeficient upora** (za potniško letalo  $c_u=0,012$ )

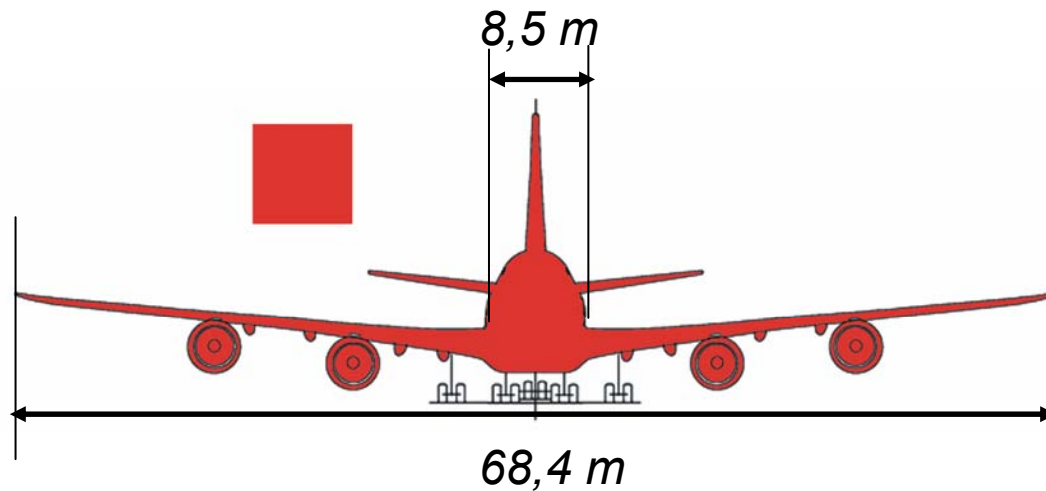
<http://www.aerodyn.org/Drag/tables.html#system>

- **S prečni presek telesa** (ocenimo iz podatkov o razponu kril in fotografij)

[http://en.wikipedia.org/wiki/Boeing\\_747](http://en.wikipedia.org/wiki/Boeing_747)



Ocena za Boeing 747 iz fotografij  
in podatkov razpona kril:  $S=130\text{ m}^2$



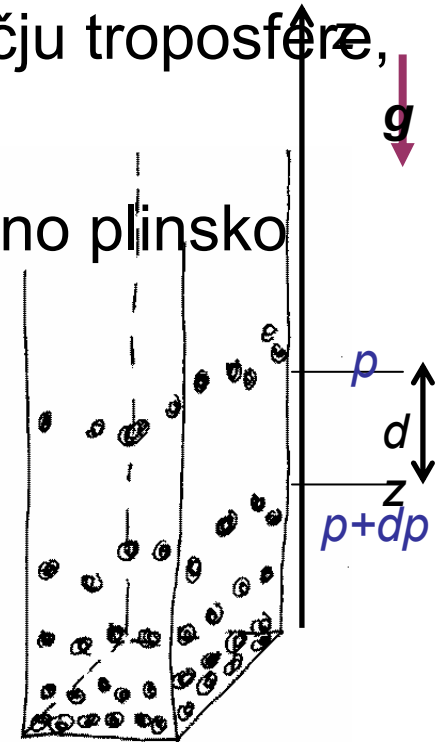
Določanje označene ploščine: Program *Image J*,  
(<http://rsb.info.nih.gov/ij/>)

# Kako se gostota zraka na Zemlji spreminja z višino?

Privzemimo, da je temperatura zraka konstantna

(NI RES, toda približek je uporaben v območju troposfere,  
t.j. približno do 15 km n.v.)

Uporabimo izraz za hidrostatski tlak in splošno plinsko  
enačbo, pa dobimo:



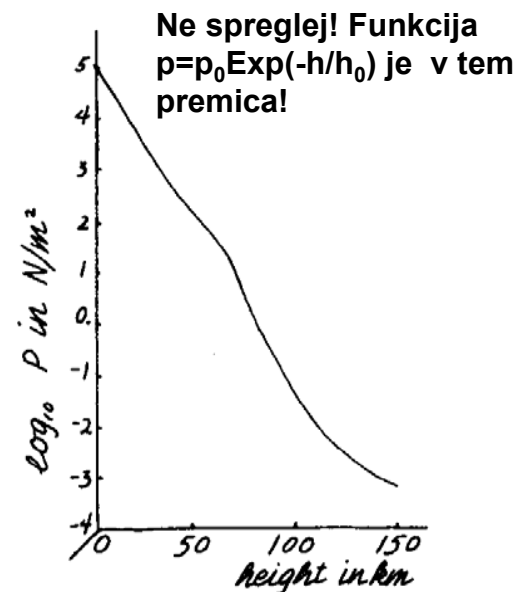
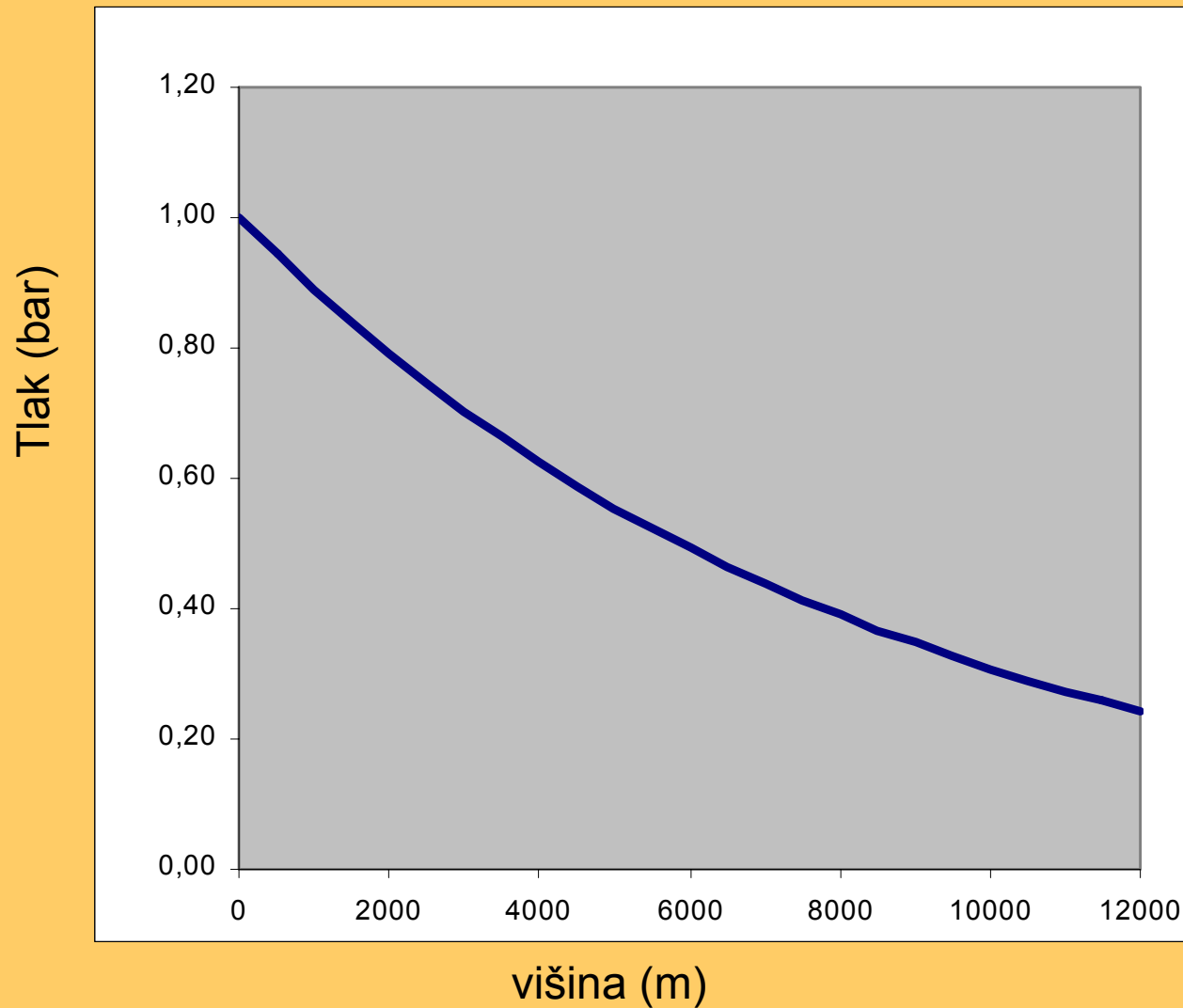
$$p = p_0 e^{-\frac{h}{h_0}} \Rightarrow \rho = \rho_0 e^{-\frac{h}{h_0}}$$

*(barometrska enačba)*

kjer je

$$h_0 = \frac{p_0}{\rho_0 g} \approx 8500m$$

# Spreminjanje tlaka z višino v izotermni atmosferi



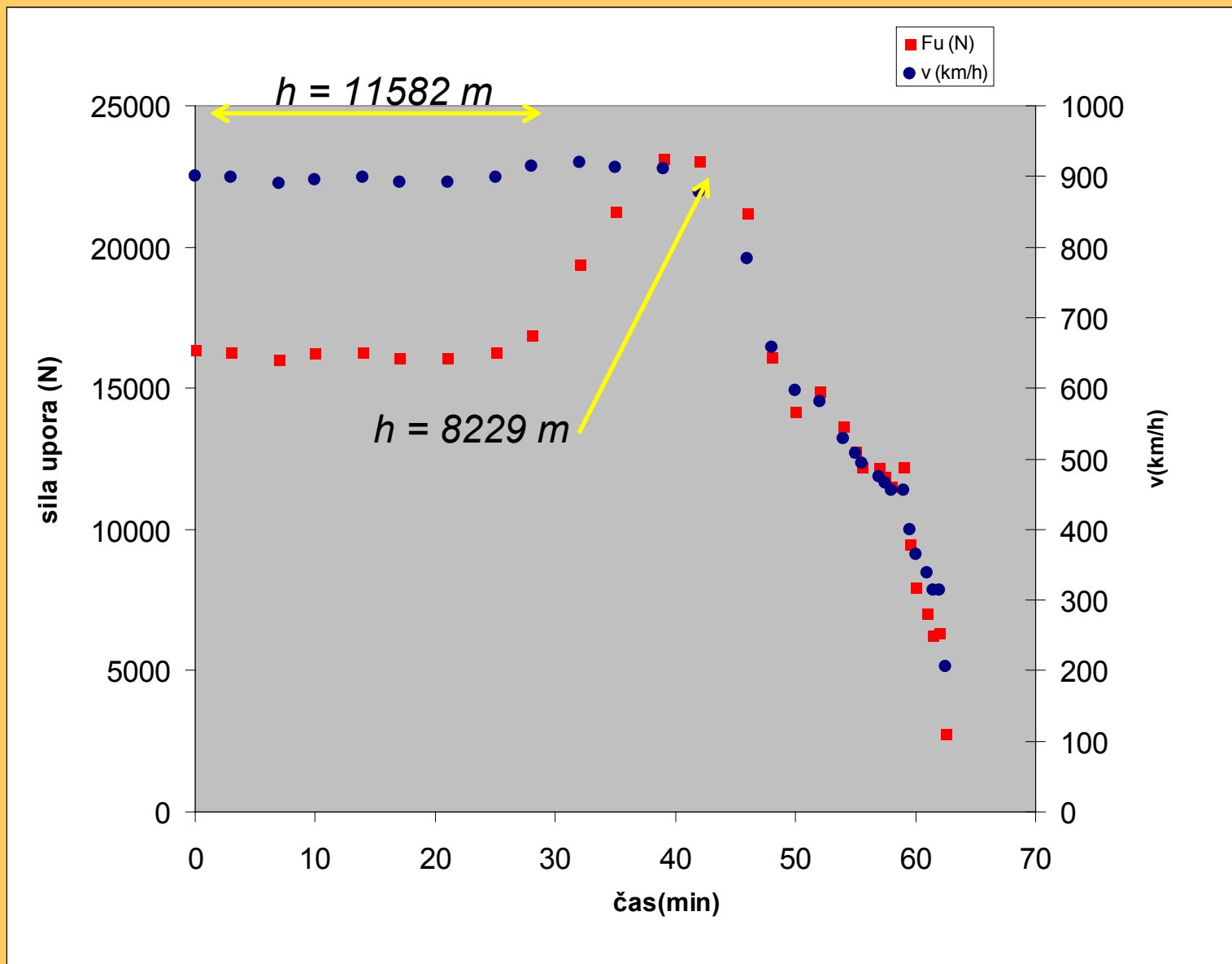
Izmerjena odvisnost  
 $p(h)$

(C. Swartz, Teaching Introductory  
Physics, AIP press, 1998)

čas (min)	v (km/h)	višina(m)	T(deg C)	rho (kg/m3)	p(mbar)	v <sup>2</sup> (m2/s2)	F (N)
0	900	11582	-55	0,31	256	62500	14976
3	898	11582	-56	0,31	256	62223	14909
7	890	11582	-57	0,31	256	61119	14645
10	896	11582	-56	0,31	256	61946	14843
14	898	11582	-56	0,31	256	62223	14909
17	892	11582	-55	0,31	256	61394	14711
21	892	11582	-54	0,31	256	61394	14711
25	898	11582	-54	0,31	256	62223	14909
28	914	11582	-54	0,31	256	64460	15445
32	920	10515	-49	0,35	290	65309	17742
35	913	9601	-43	0,39	323	64319	19456
39	911	8839	-37	0,42	353	64037	21188
42	877	8229	-32	0,46	380	59346	21097
46	783	7010	-21	0,53	438	47306	19410
<b>48</b>	<b>658</b>	<b>6401</b>	<b>-16</b>	0,57	471	33408	14726

Del meritev dobljenih med poletom in izačunov pri ocenjenih vrednostih  $c_u$ ,  $S$ ,  $\rho_0$  in  $\rho_0$ .

# Spreminjanje hitrosti in sile upora med pristajanjem letala





**Tipična višina letenja (11500 m) je izbrana tako, da:**

- **letalo leti s čim večjo hitrostjo** (tipična potovalna hitrost B747 na višini leta je 1047 km/h, največja hitrost, ki jo lahko doseže pa 1127 km/h)
- **pri tem porabi čim manj goriva** (če bi letel nižje, bi bila poraba goriva bistveno večja /glej meritve/)
- **je razlika med tlakom v kabini in zunanjim tlakom še sprejemljiva za trdnost konstrukcije letala** (če bi letel višje, bi bila tlačna razlika večja)

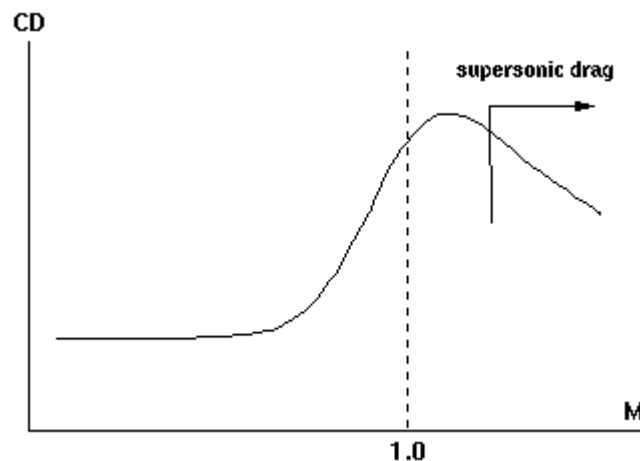
Povprečna sila upora med letom na višini 11km (glej meritve): **16 kN**

Potisna sila motorjev (Tehnični podatki o B 747-400):

$$274 \text{ kN} \times 4 = \mathbf{1096 \text{ kN} !?}$$

Ali to pomeni, da bi lahko B747 zlahka letel z nadzvočno hitrostjo? Ali smo se kje zmotili v razmišljanju?

- Napačni vhodni podatki ( $c_u$ ,  $S$ )
- Potisna sila je podana za razmere na zemlji. Na višini potovanja je potisna sila manjša zaradi manjše gostote zraka.
- Kvadratni zakon upora velja le pri hitrostih, ki so majhne v primerjavi z zvočno hitrostjo (B747 leti s potovalno hitrostjo 900 – 1050 km/h kar ustreza  $M$  od 0,74 do 0,86).



<http://aerodyn.org/map.html>

# Temperatura zraka v potniški kabini

# Kako zagotovijo primerno temperaturo v potniški kabini letala?

Tipična višina leta: 11000 m

Tipična zunanja temperatura:  $-55\text{ }^{\circ}\text{C} = 218\text{ K}$

Ali to pomeni, da je treba zunanji zrak segrevati preden ga vodijo v potniško kabino?

Zračni tlak na višini 11500 m je približno 260 mbar.

Tlak, ki ga vzdržujejo med letom v potniških letalih je približno 750 mbar (kot na vrh 2440 m visoke gore).

**Če hočemo zagotoviti potrebno koncentracijo kisika, moramo zunanji zrak stisniti približno na 1/3 začetne prostornine.**

Ker poteka stiskanje hitro, je sprememba adiabatna  
=> zrak se segreje

$$TV^{\kappa-1} = T_0V_0^{\kappa-1}$$
$$\frac{T}{T_0} = \left(\frac{V_0}{V}\right)^{\kappa-1} \approx 3^{0,4} = 1,5$$

Zrak:  $\kappa = 1,4$

$T=1,5 T_0 = 327 K = 54^\circ C \Rightarrow$  Preden zrak  
spustijo v kabino, ga morajo ohladiti !!

## **Nekaj POSKUSOV, ki jih lahko naredimo na letalu:**

- Prazna plastenka, ki jo odpremo in tesno zapremo med letom, bo ob pristanku nekoliko sploščena. Če izmeriš koliko vode potegne vase plastenka, ko zavzame prvotno obliko, lahko izračunaš tlak, ki je bil v letalu med letom (težave z novimi predpisi!).
- Z utežjo (npr. prstan) na vrvici lahko izmeriš kot, ki ga vrvica oklepa z navpičnico pri pospeševanju med vzletom => oceniš pospešek letala.
- Z merjenjem kota pod katerim vidiš obzorje, lahko oceniš nadmorsko višino na kateri leti letalo (on privzetku, da je letalo v vodoravnem položaju).

Kot  
opazovalec  
na tleh



Fotografija preleta potniškega letala





16:55:11

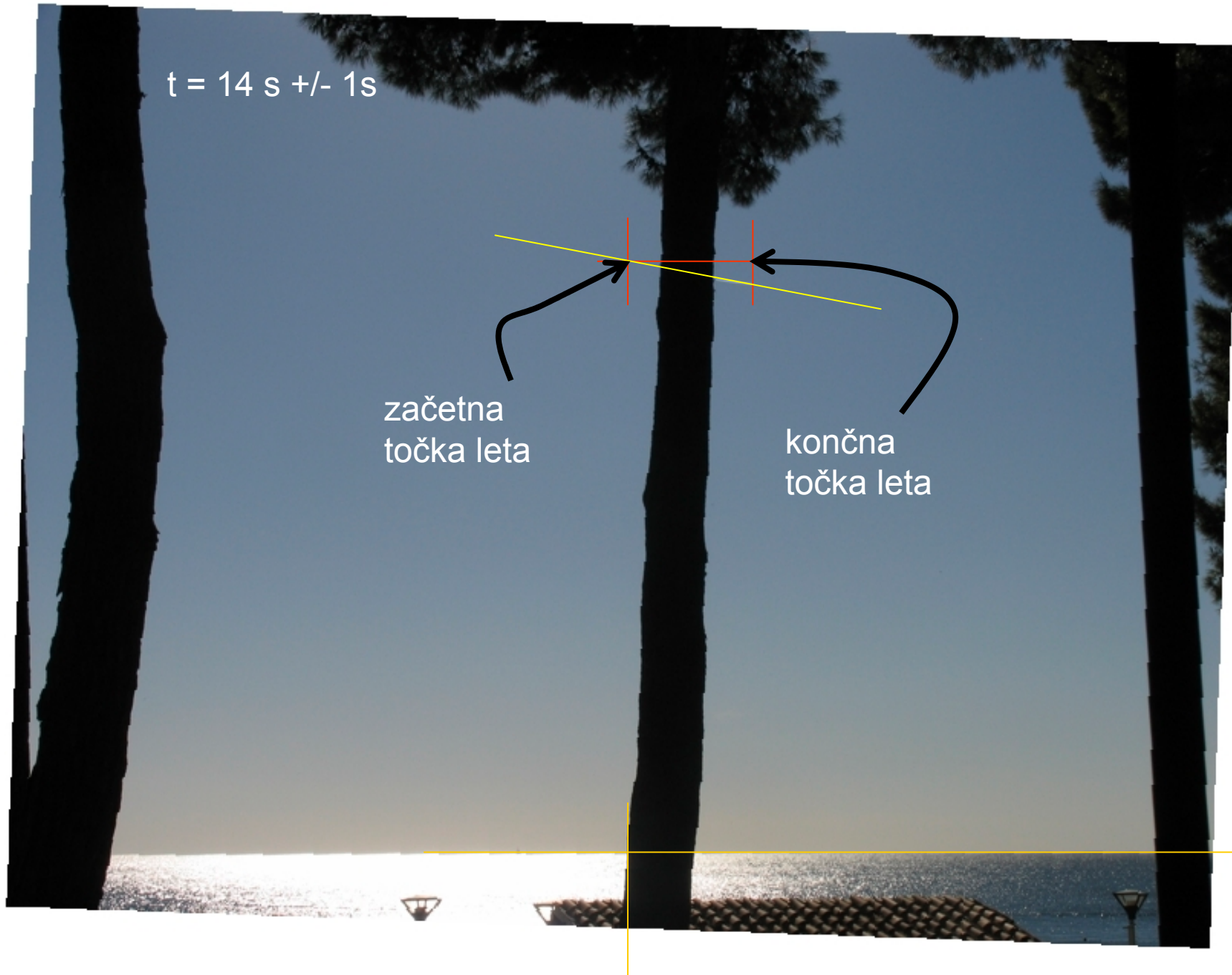
Fotografijo sem zavrtel, tako da je obzorje vodoravno in rob debla na vseh fotografijah "na istem mestu".

Digitalni fotoaparati zabeleži čas posnetka na sekundo natančno

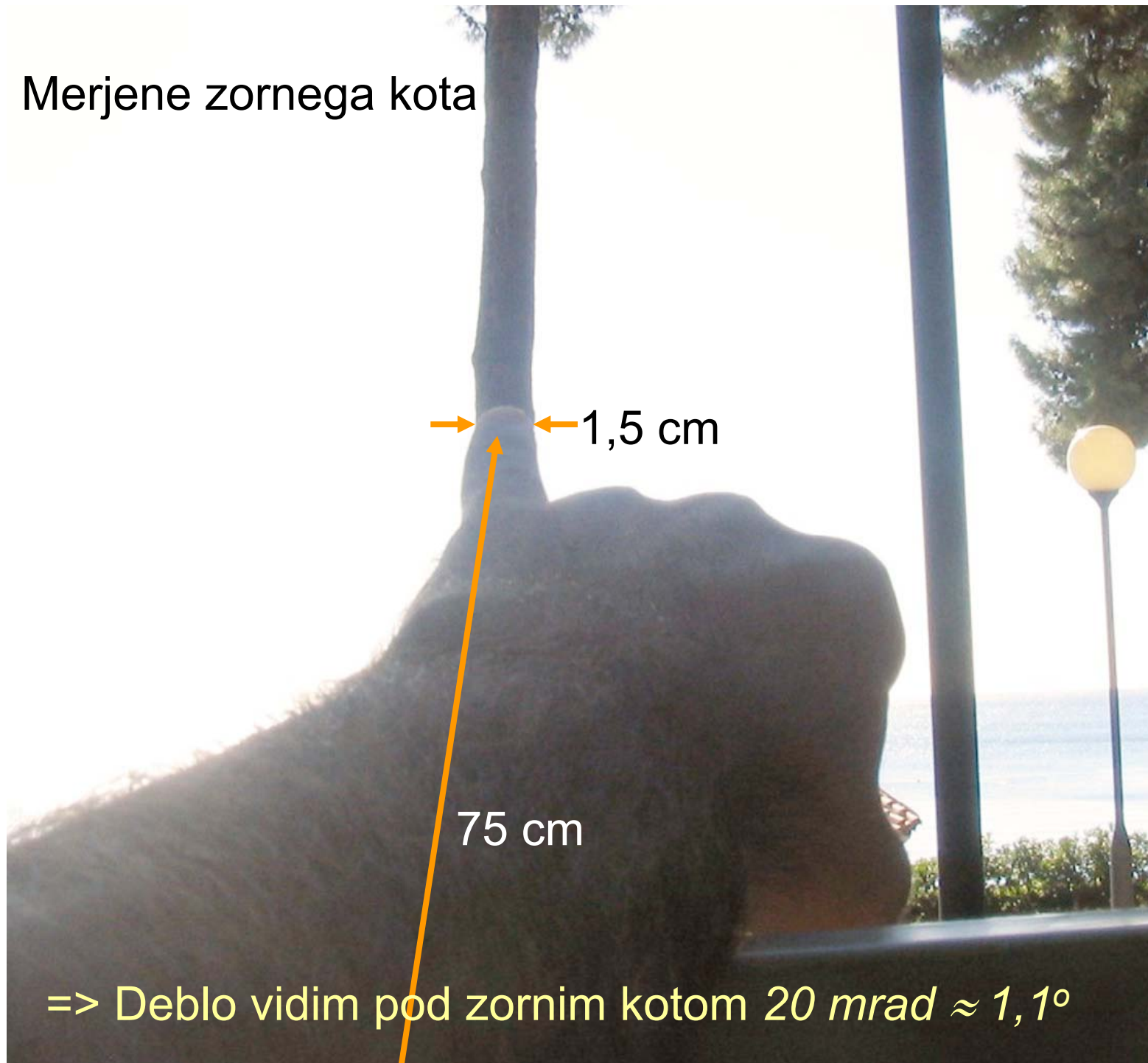
$t = 14 \text{ s} \pm 1 \text{ s}$

začetna  
točka leta

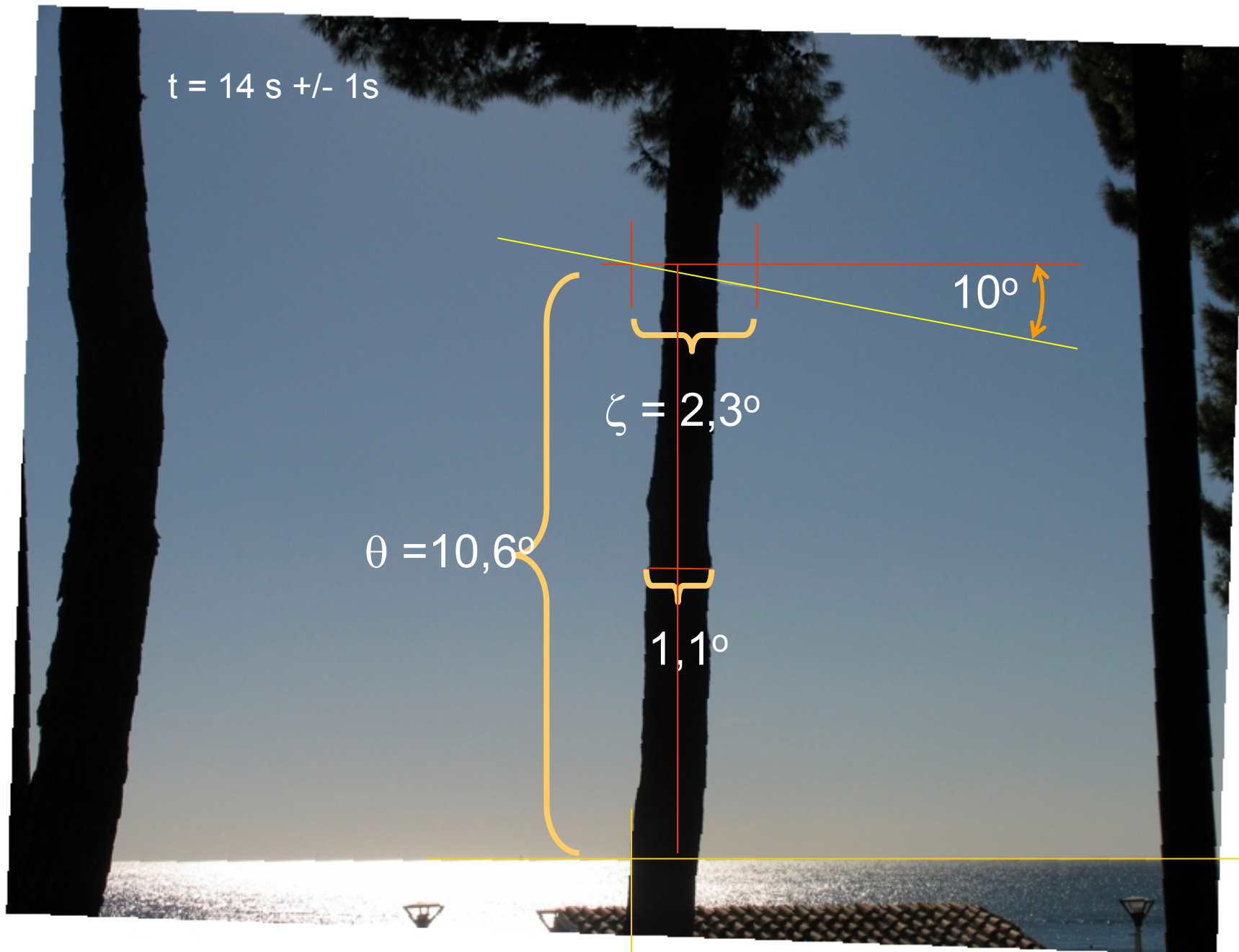
končna  
točka leta



Merjene zornega kota



$t = 14 \text{ s} \pm 1 \text{ s}$



$\theta = 10,6^\circ$

$\zeta = 2,3^\circ$

$1,1^\circ$

$10^\circ$

...zdaj lahko ocenim še ostale zorne kote

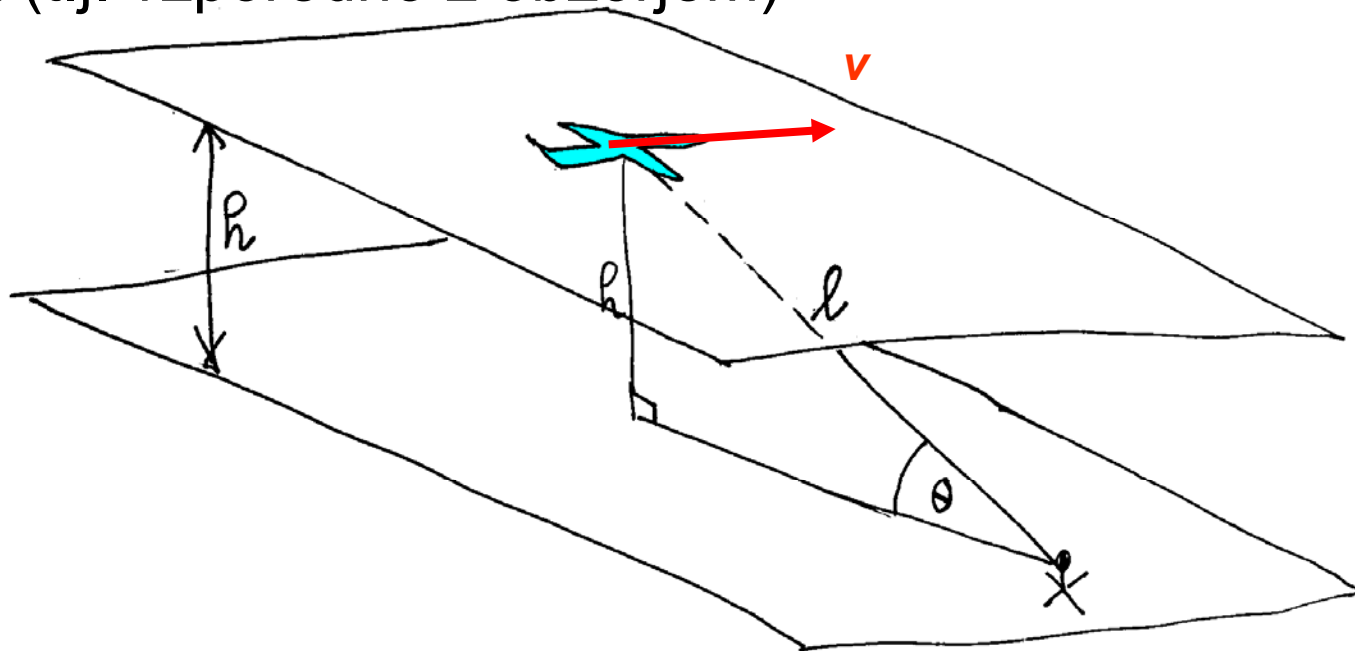
Vemo še, da potniška letala letijo na nadmorski višini približno  $h=10500$  m ( $\pm 500$  m)

Kaj novega lahko izvemo na podlagi teh podatkov?

Izračunamo lahko oddaljenost letala, hitrost letala in smer leta!

Privzetek: letalo potuje na razdalji, ki je dosti večja od višine poleta

Prvi približek: letalo se giblje prečno na smer našega pogleda (t.j. vzporedno z obzorjem)

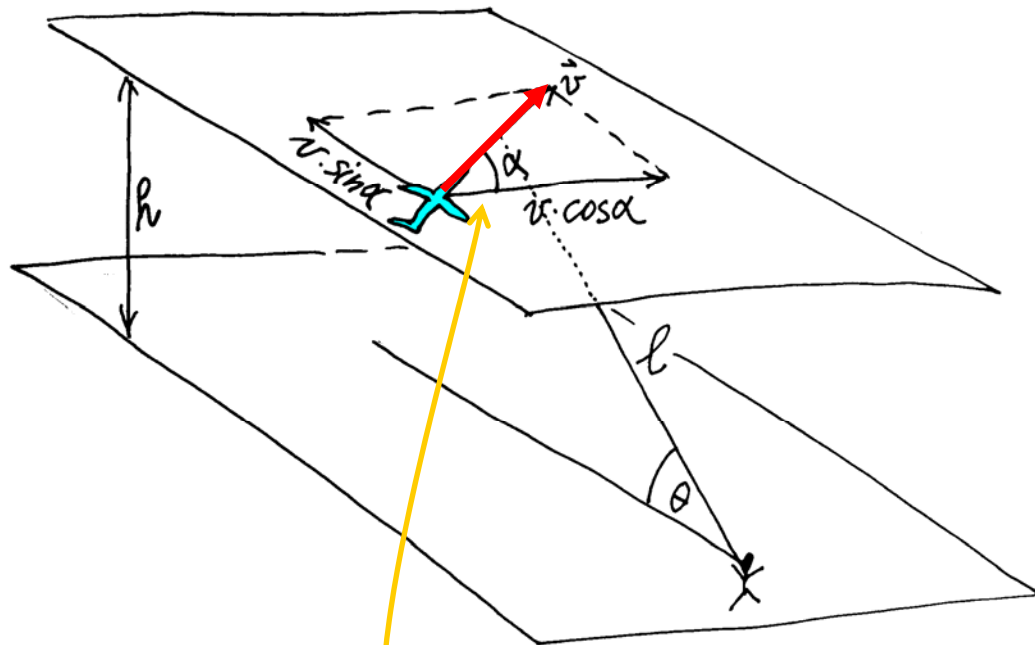


$$l \approx \frac{h}{\theta} = 55,2 \text{ km}$$

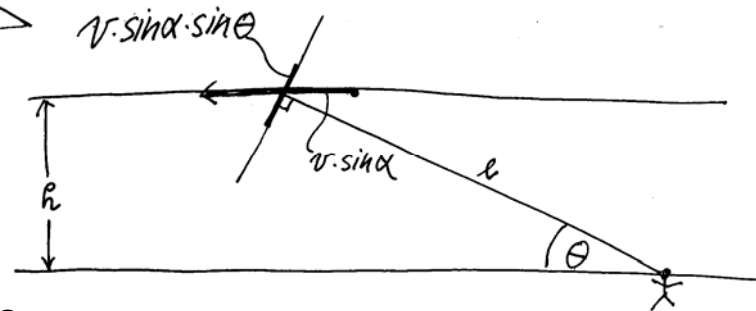
$$v = \frac{l \xi}{t} = 160 \text{ m/s} = 570 \text{ km/h}$$

...prepočasi ...

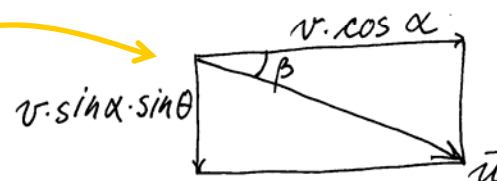
Boljši približek: upoštevamo, da se letalo giblje pod kotom glede na smer našega pogleda



Opazovalec vidi projekcijo gibanja na ravnino, ki je pravokotna na smer pogleda

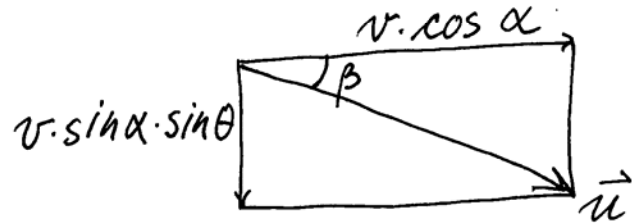
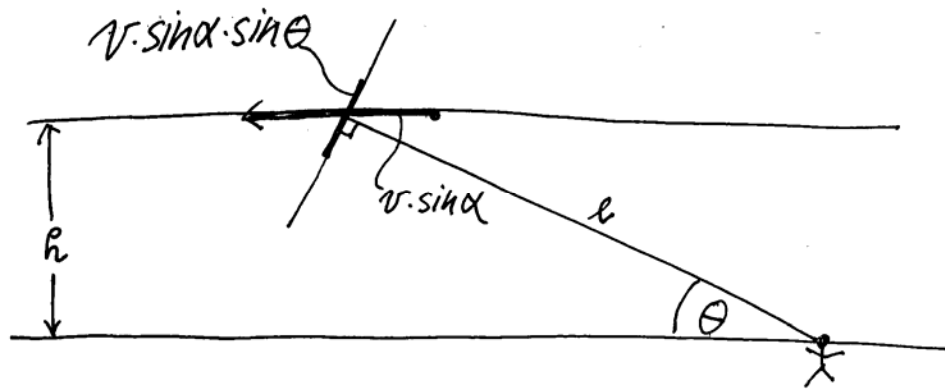


Tako vidi opazovalec na tleh "hitrost letala razstavljeno na komponente"



(Še vedno s privzetkom  $l \gg h$ , vdt !)





$$\tan \beta = \frac{v \sin \alpha \sin \theta}{v \cos \alpha} = \tan \alpha \sin \theta \Rightarrow \tan \alpha = \frac{\tan \beta}{\sin \theta} = 0,96 \Rightarrow \alpha = 44^{\circ}$$

Letalo je letelo približno pod kotom 44 stopinj glede na pravokotnico na opazovalčev pogled.

$$v = \frac{l\xi}{t \cos \alpha} = 789 \text{ km/h}$$

**Bolje!**

# Kam je letelo letalo (učeno ugibanje)?



**Priponbe dobrodošle!**

(gorazd.planinsic@fmf.uni-lj.si)

**Hvala!**