Sűrű setét az éj,
Dühöng a déli szél,
Jó Budavár magas
Tornyán az érckakas
Csikorog élesen.

Arany János: V. László (részlet)

A légkör mozgásjelenségei, a Poisson-egyenlet

Makra László

A légkör megismeréséhez vezető út lépései:

1. száraz, nyugalomban lévő tiszta légköri levegő;
2. nedves, nyugalomban lévő tiszta légköri levegő;
3. valódi légkör a benne előforduló mozgásfolyamatokkal együtt;

Légköri mozgások:

a. függőleges irányú;
b. vízszintes irányú;

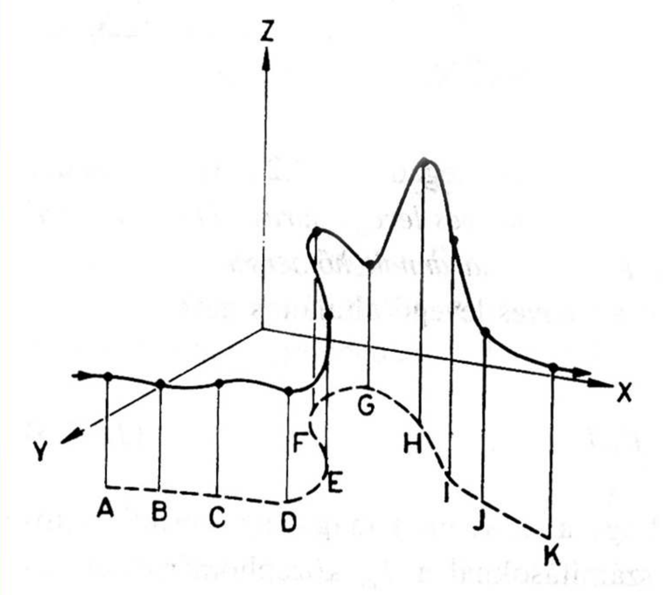
Légköri mozgásjelenségek → időjárási folyamatok és kölcsönhatások;

⇒ a légköri mozgásjelenségek tanulmányozása, okainak feltárása alapvető a meteorológiában;

Függőleges légmozgások

- Egy mozgó levegőrészecske pályájának vannak vízszintes és függőleges összetevői;
- Általában a függőleges komponens nagysága elhanyagolható a vízszinteshez képest;
- A függőleges légmozgások tanulmányozása alapvető;

  ok: a levegő a vertikális elmozdulása során olyan fizikai változásokon megy keresztül, melyek lényegesek az időjárás alakulása szempontjából;

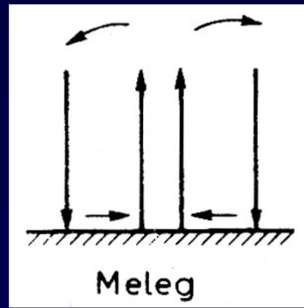


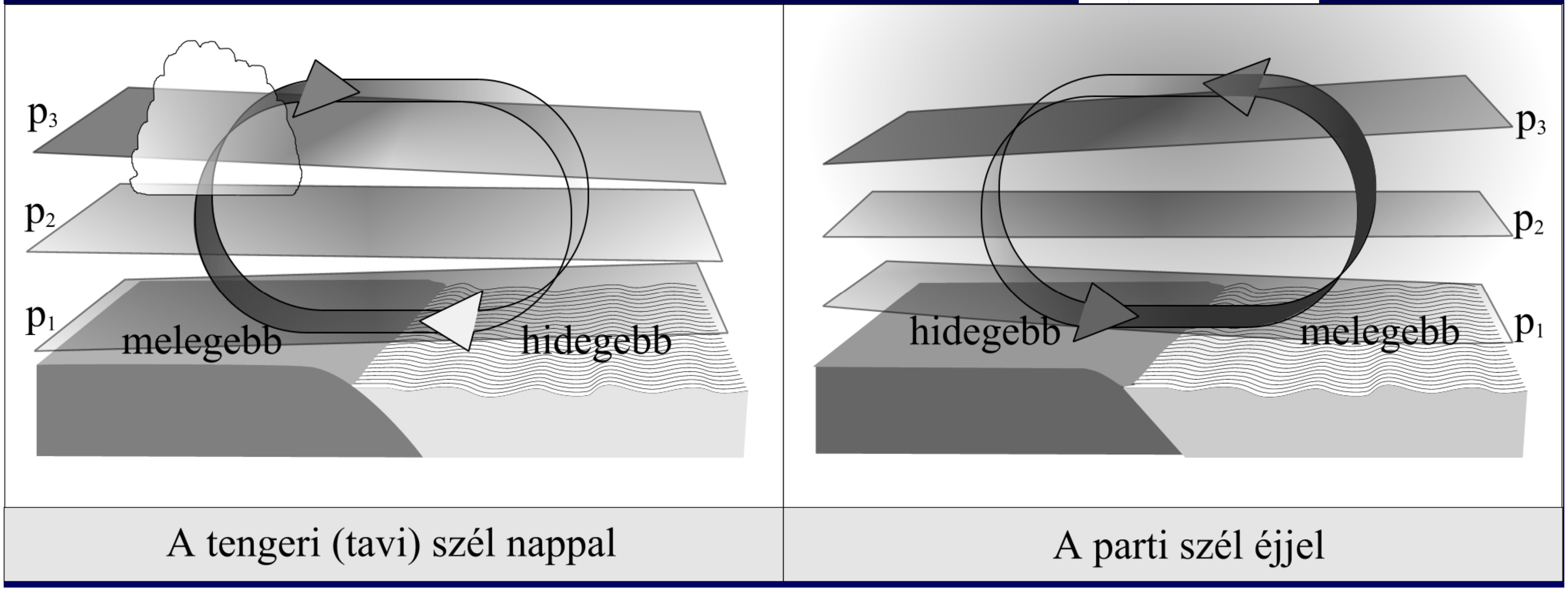
2.9. ábra. Egy mozgó légrész pályája

Függőleges légmozgások keletkezése

A levegő vertikális elmozdulásának főbb típusai (és azok okai):

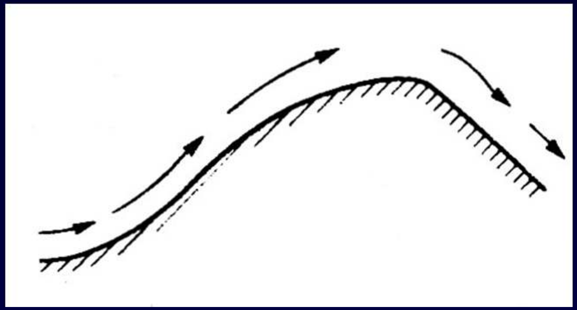
- konvekció
  (a felszín eltérő felmelegedése miatt);

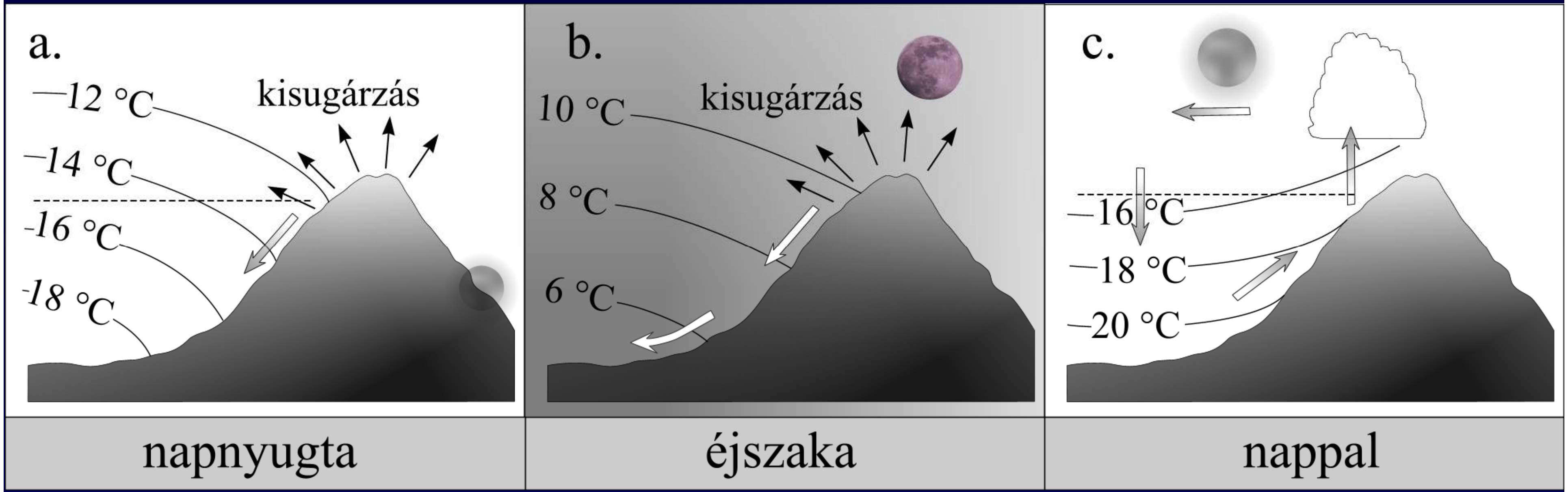




A levegő vertikális elmozdulásának főbb típusai (és azok okai):

- orográfiai akadályok
  (az emelkedési kényszer miatt);



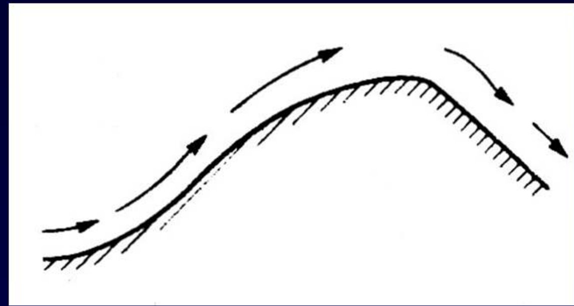


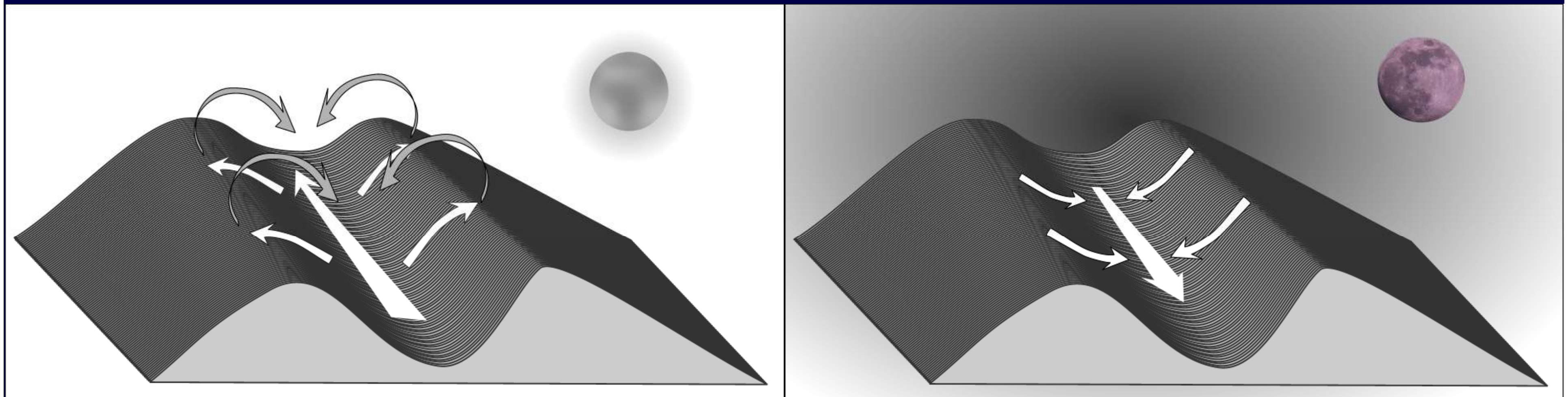
A hegy – völgyi szél napi menete.

vastag nyilak: a légáramlás iránya;
vékony vonalak: hőmérsékleti izovonalak;

A levegő vertikális elmozdulásának főbb típusai (és azok okai):

- orográfiai akadályok
  (az emelkedési kényszer miatt);





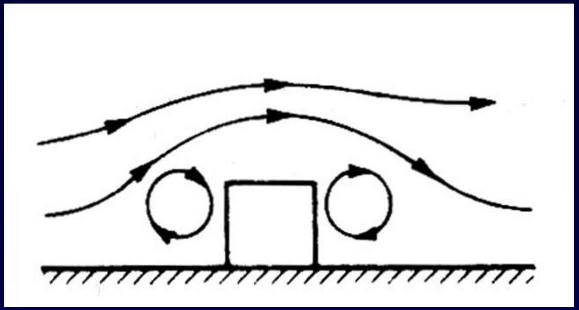
nappal

éjszaka

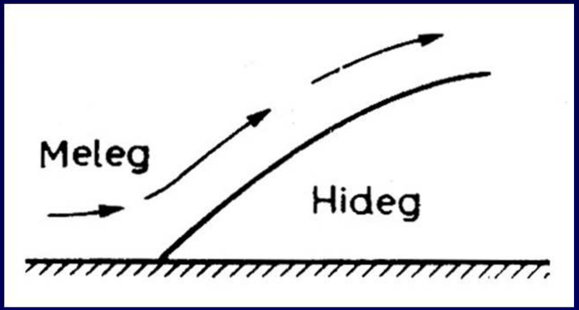
A hegy-völgyi szél és a lejtőszél napi menete

A levegő vertikális elmozdulásának főbb típusai (és azok okai):

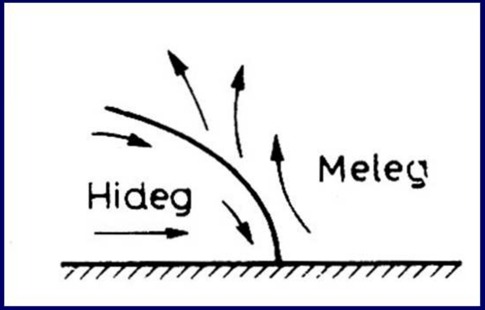
- turbulens légáramlások (a súrlódás és az eltérő felszínhőmérsékletek miatt);



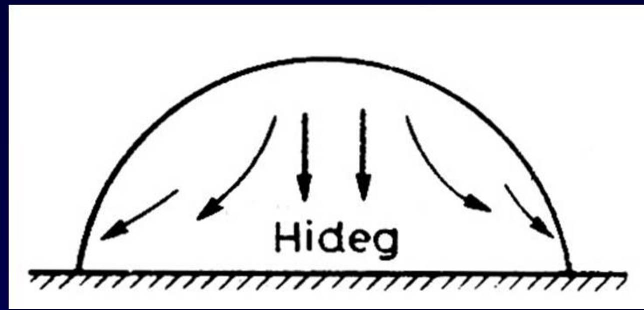
- melegfronti eredetű légáramlások (az eltérő hőmérsékletű, s ily módon eltérő sűrűségű légtestek találkozása miatt);



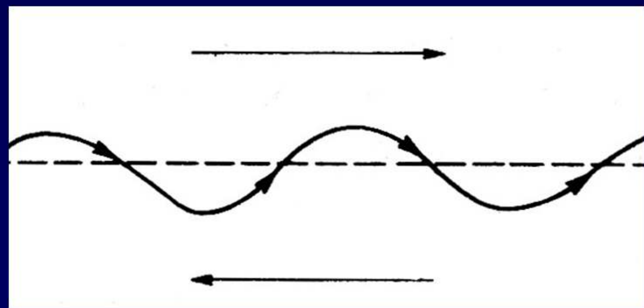
- hidegfronti eredetű légáramlások (az eltérő hőmérsékletű, s ily módon eltérő sűrűségű légtestek találkozása miatt);



- anticiklon belsejében
  (leszálló légáramlások a talaj közeli szétáramlás miatt)



- egymás fölötti eltérő hőtartalmú és ellentétes irányban áramló légtestek mentén
  (az eltérő sűrűségekből adódó hullámmozgások miatt);



▪ Hőmérséklet-változás függőleges légmozgásokban

- függőleges légmozgások ⇒ megváltozik az elmozduló légrészecske hőmérséklete ⇒ kondenzáció, felhő- és csapadékképződés → azaz időjárás-változás;

- <u>vízszintes légmozgások</u> → hőmérséklet-változás hosszú áramlási pálya megtétele után (több száz-, több ezer km);

- <u>függőleges légmozgások</u> → hőmérséklet-változás rövid áramlási pálya megtétele után (néhány száz méter);

Tekintsünk tömegegységnyi levegőt (m = 1)

- ha ez a levegő zárt térfogatban van ⇒ a vele közölt hőenergia teljes egészében a hőmérsékletét növeli, mivel térfogattágulás nem léphet föl;
- ha ez a levegő nincs zárt térfogatban ⇒ a vele közölt hő egy része a hőmérsékletét emeli, a másik része a levegőrész kitágulását idézi elő (a levegőrészre ható külső nyomás ellenében végzett munka);

  ✓ ha a hőmérsékletnövelésre fordított energia mennyiségét meg akarjuk határozni, ismernünk kell a levegő fajhőjét;

  A hőmennyiség az energia egyik megjelenési formája ⇒ egysége ≡ mechanikai energia vagy munka egysége:

  1 J = 1 N·m

A korai fizikában a hőmennyiség alapmennyiség;

egysége: 1 cal (1 kcal) az a hőmennyiség, amely 1 g (1 kg) víz hőmérsékletét 1 ºC-kal (14,5 ºC-ról 15,5 ºC-ra) emeli;

Későbbi tapasztalatok: $\Rightarrow$ a hő az energia, vagy munka egyik megjelenési formája

$\Rightarrow$ a hő átalakítható mechanikai munkává;

$\Rightarrow$ a mechanikai munkával hő állítható elő;

1 cal = 4,1868 J

1 kcal = 4186,8 J

Ha egy *m* tömegű test ΔQ hőenergia-mennyiséget vesz föl
⇒ hőmérséklete ΔT mértékben emelkedik.

Kimutatható, hogy:

$$\Delta Q = c \cdot m \cdot \Delta T$$

ha a test tömege egységnyi (m = 1); s a hőmérséklet-emelkedés 1 ºC (ΔT = 1) ⇒

$$\Delta Q = c$$

- **mit jelent *c*:** fajlagos hőkapacitás, vagy fajhő;
- **mit fejezi ki *c*:** hogy mekkora hőenergia-mennyiség felvétele szükséges az egységnyi tömegű test hőmérsékletének 1 ºC -os emeléséhez;

$$c = \frac{\Delta Q}{m \cdot \Delta T}$$

$$\left[N \cdot m \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}\right] \rightarrow \left[kg \cdot m \cdot s^{-2} \cdot m \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}\right] \rightarrow \left[m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}\right]$$

- Ideális gázoknak kétféle fajhőjük van:

  c_v: állandó térfogaton vett fajhő;

  c_p: állandó nyomáson vett fajhő;

  [Ideális (tökéletes) egy gáz, ha molekulái a közöttük lévő átlagos távolsághoz képest pontszerűnek tekinthetők, és az ütközésektől eltekintve nem hatnak egymásra.]

- Száraz levegőben, t = 0 °C hőmérsékleten:

  $c_v = 718\ \mathrm{m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}}$

  $c_p = 1005\ \mathrm{m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}}$

- Az ideális gázok kétféle fajhőjének és az R gázállandónak a kapcsolata:

$$\boxed{c_p - c_v = R}$$

Közöljünk az adott kiindulási térfogatban lévő tömegegységnyi levegővel ($m = 1$) dQ elemi hőenergia-mennyiséget.

Mivel meghatározott kezdeti térfogatról van szó $\Rightarrow$ a létrejövő dT elemi hőmérséklet-növekedés $c_v \cdot dT$ mennyiségű energiát használt el.

Mivel a vizsgált levegőtömeg nincs zárt térfogatban $\Rightarrow$ fellép a külső p nyomás ellenében végzett dV nagyságú elemi térfogattágulás;

$\Rightarrow$ a felvett energia egy része a dV nagyságú tágulás elvégzésére fordítódik. Ez a tágulási munka egyenlő $p \cdot dV$ -vel.

Innen:

$$dQ = c_v \cdot dT + p \cdot dV$$

A továbbiakban ezt az egyenletet elemezzük speciális feltételek között.

Adiabatikus hőmérséklet-változások

Definíció: az olyan hőmérséklet-változást, amelynek során a levegő a környezetétől nem vesz fel hőt, s a környezetének nem ad le hőt, hőcserementesnek, vagy adiabatikusnak nevezzük.

A légkörben vertikálisan elmozduló légtestek hőmérséklet-változásai túlnyomó részt adiabatikusak. Hőcsere csak a határrétegekben történik, melynek térfogata a légtest teljes térfogatához képest elenyésző.

A kiindulási egyenletünket újra leírva:

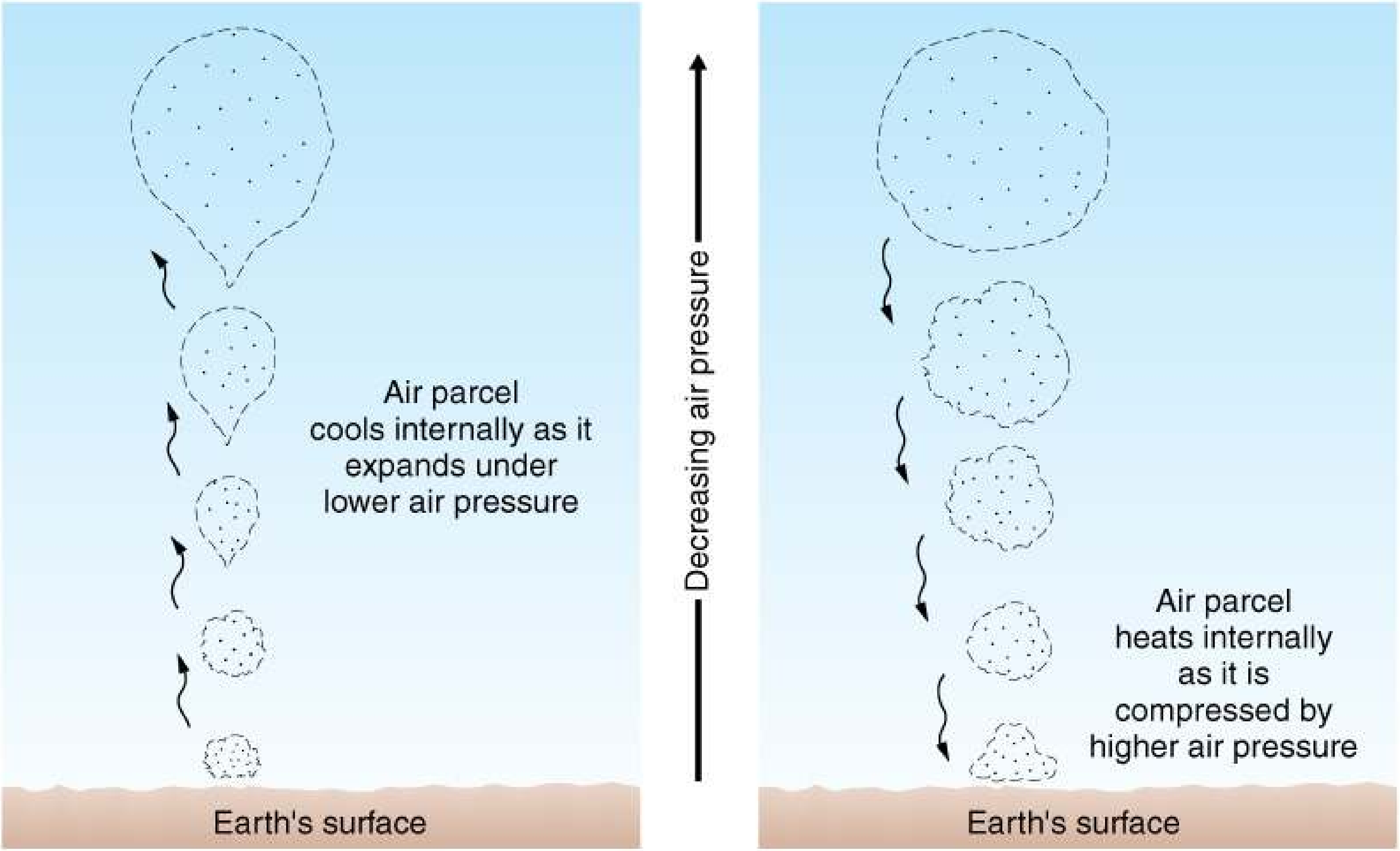
$$dQ = c_v \cdot dT + p \cdot dV$$

Mivel: $dQ = 0$ $\Rightarrow$ $p \cdot dV = -c_v \cdot dT$

A fenti egyenlet fizikai jelentése:

- Ha a levegő emelkedik, kisebb nyomás alá kerül $\Rightarrow$ kitágul $\Rightarrow$ térfogata növekszik (*dV* előjele pozitív), s miután nincs külső hőfelvétel $\Rightarrow$ a tágulási munkához az energiát saját hőkészletéből meríti $\Rightarrow$ a hőenergia-tartalma csökken (*dT* negatív előjelű);
- Ha a levegő süllyed, nagyobb nyomás alá kerül $\Rightarrow$ összenyomódik $\Rightarrow$ a térfogata csökken (*dV* előjele negatív) $\Rightarrow$ a levegő az összenyomódás miatt hőenergiát nyer saját hőkészletéből (*dT* pozitív előjelű);

Adiabatikus folyamatok



(a) Cooling by expansion

(b) Heating by compression

Liger-Belair és mtsai (Reims-i egyetem) eltérő módon megdöntött poharakba frissen kitöltött pezsgők oldott CO_2-tartalmát hasonlították össze.

Eredmény: a megbillentett poharakba töltött pezsgő szénsavtartalma kb. 8%-kal magasabb, mint a függőlegesen álló poharakba öntötté, és alacsonyabb hőmérsékleten kevesebb CO_2 illant el.

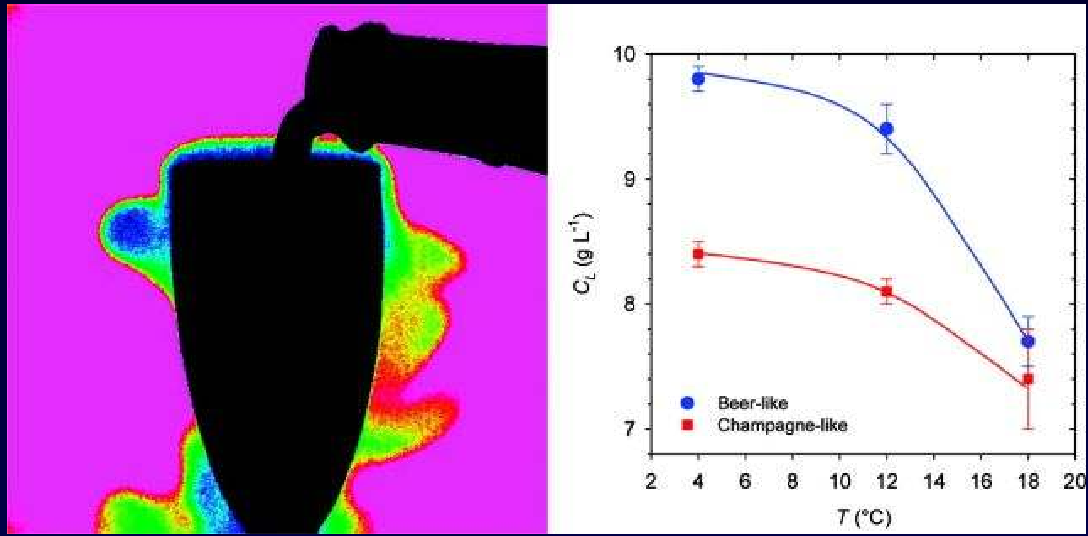
A mérések szerint a pezsgők kezdeti - közvetlenül a dugó eltávolítása utáni - szénsav koncentrációja 11,4 g/l volt. A méréseket két öntési móddal ("sörszerű”-vel és „pezsgőszerű”-vel) három különböző hőmérsékleten (4°C, 12°C és 18°C) végezték.

sörszerű felszolgálás: döntött pohár falán csorgatás;

pezsgőszerű felszolgálás: függőleges pohár közepébe töltés;

⇒ **sörszerű felszolgálás esetén sokkal kevesebb szénsav szökik el;**

⇒**minél magasabb a pezsgő hőmérséklete, annál nagyobb a felszolgálási szénsavveszteség (a szénsav diffúziós együtthatója és a pezsgő viszkozitása erősen hőmérsékletfüggő);**



A pezsgőből elszökött szén-dioxid (infravörös termográfia). A CO_2 sűrűsége a levegő sűrűségének a másfélszerese, így szinte folyik lefelé az üvegből kikerülő CO_2. (A CO_2 molekulasúlya: 44 kg·kmol^{-1}; a nedves levegő molekulasúlya: 28,6 kg·kmol^{-1}; $\Rightarrow$ 44 / 28,6 = 1,538)

A kék vonal a "sörszerű", a piros a "pezsgőszerű" felszolgálás hőmérséklet-függését mutatja.

Ha szénsavasabb pezsgőt szeretnénk inni:

1) Behűtött (praktikusan 12°-ra behűtött) pezsgőt szolgáljunk fel!

2) A pezsgőspalack úgy nyissuk ki, hogy ne pukkanjon!

3) Kb. 30-45° szögben döntsük a poharat sörszerű kitöltés mellett!

Feladat:

Határozzuk meg, hogy a függőlegesen mozgó száraz levegőben lezajló adiabatikus hőmérsékletváltozás milyen függvénye a vertikális elmozdulás mértékének?

A vertikális elmozdulás mértéke egyaránt kifejezhető légnyomás- és magasság-skálán, mivel e két változó kapcsolata egyértelmű:

$$dp = -g \cdot \rho \cdot dz$$

$\Rightarrow$ két feladatot kell megoldani:

a. feladat:

Ha egy p_0 nyomású és T_0 hőmérsékletű száraz légrész vertikális elmozdulása során, adiabatikus hőmérséklet-változás fellépte után egy p nyomású végállapotba jut, akkor ott milyen T hőmérsékletet vesz föl?

b. feladat:

Ha egy z_0 magasságú és T_0 hőmérsékletű száraz légrész vertikális elmozdulása során, adiabatikus hőmérséklet-változás fellépte után egy z magasságú végállapotba jut, akkor ott milyen T hőmérsékletet vesz föl?

a. feladat:

A kiindulási egyenletünket újra leírva:

$$dQ = c_v \cdot dT + p \cdot dV$$

Mivel: $dQ = 0$ $\Rightarrow$ $p \cdot dV = -c_v \cdot dT$

A levegő térfogatának meghatározása körülményes, így iktassuk ki a *dV* térfogatváltozást. Ehhez használjuk föl az általános gázegyenlet térfogatos alakját:

$$p \cdot V = R \cdot T$$

A változók differenciálásával megkapjuk az általános gázegyenlet elemi változásokra vonatkozó alakját:

$$p \cdot dV + V \cdot dp = R \cdot dT$$

$$p \cdot V = R \cdot T$$

$$p \cdot dV + V \cdot dp = R \cdot dT$$

Fejezzük ki az általános gázegyenletből *V*-t, s írjuk be értékét a fenti differenciálegyenletbe:

$$V = \frac{R \cdot T}{p}$$

Innen:

$$p \cdot dV + \frac{R \cdot T}{p} \cdot dp = R \cdot dT$$

Most helyettesítsük be $p \cdot dV$ helyére a $-c_v \cdot dT$ kifejezést:

$$-c_v \cdot dT + \frac{R \cdot T}{p} \cdot dp = R \cdot dT$$

Átrendezve kapjuk:

$$R \cdot T \cdot \frac{dp}{p} = (R + c_v) \cdot dT$$

Korábban már említettük a c_v, a c_p és az R közötti kapcsolatot, miszerint:

$$R + c_v = c_p$$

Most bizonyítsuk be, hogy ez tényleg így van!

Tekintsük először a kiindulás egyenletünket:

$$dQ = c_v \cdot dT + p \cdot dV$$

Majd írjuk föl ismét az általános gázegyenlet elemi változásokra vonatkozó alakját:

$$p \cdot dV + V \cdot dp = R \cdot dT$$

Fejezzük ki ez utóbbiból $p \cdot dV$-t:

$$p \cdot dV = R \cdot dT - V \cdot dp$$

Mivel a nyomás állandó (hisz a levegőrészecske az emelkedés során tágul, mivel nincsen zárt térfogatban) $\Rightarrow$ $dp = 0$;

Ebből adódik, hogy:

$$p \cdot dV = R \cdot dT$$

$p \cdot dV$-t helyettesítsük be az alábbi kiindulási egyenletünkbe:

$$dQ = c_v \cdot dT + p \cdot dV$$

Innen kapjuk, hogy:

$$dQ = c_v \cdot dT + R \cdot dT = (c_v + R) \cdot dT$$

Majd a hőmérséklet-változásra jutó hőmennyiség-változás:

$$\frac{dQ}{dT} = c_v + R$$

Másrészről:

$$dQ = c_p \cdot m \cdot dT$$

Innen a hőmérséklet-változásra jutó hőmennyiség-változás:

$$\frac{dQ}{dT} = c_p$$

hiszen tömegegységnyi levegőről van szó, azaz $m = 1$.

Innen adódik, hogy

$$c_v + R = c_p$$

Ezzel a bizonyítást elvégeztük.

Visszatérve eredeti feladatunkhoz, c_p-t helyettesítsük be az alábbi egyenletbe:

$$R \cdot T \cdot \frac{dp}{p} = (R + c_v) \cdot dT$$

Ekkor a következő összefüggést kapjuk:

$$R \cdot T \cdot \frac{dp}{p} = c_p \cdot dT$$

Innen átrendezéssel és egyszerű átalakítással:

$$\frac{dT}{T} = \frac{R}{c_p} \cdot \frac{dp}{p}$$

Az elemi változásokat T_0 és T, valamint p_0 és p között összegzendő, a fenti egyenletet a megadott határok között integráljuk:

$$\int_{T_0}^{T} \frac{dT}{T} = \frac{R}{c_p} \cdot \int_{p_0}^{p} \frac{dp}{p}$$

Az integrálást az $\frac{1}{T}$ és az $\frac{1}{p}$ függvények primitív függvényeire elvégezve kapjuk:

$$\left[\ln T\right]_{T_0}^{T} = \frac{R}{c_p} \cdot \left[\ln p\right]_{p_0}^{p}$$

Aminek egyszerű megoldása:

$$\ln T - \ln T_0 = \frac{R}{c_p} \cdot (\ln p - \ln p_0)$$

Figyelembe véve, hogy száraz levegőre

$$\frac{R}{c_p} = 0{,}286$$

az alábbi összefüggést kapjuk, mely egyúttal az a. feladat megoldása:

$$T = T_0 \cdot \left(\frac{p}{p_0} \right)^{0{,}286}$$

A fenti összefüggés a **Poisson-egyenlet**, mely a hőmérséklet és a nyomás kapcsolatát rögzíti száraz légkörben lezajló adiabatikus hőmérséklet-változások esetén.

b. feladat:

Ha egy z_0 magasságú és T_0 hőmérsékletű száraz légrész vertikális elmozdulása során, adiabatikus hőmérséklet-változás fellépte után egy z magasságú végállapotba jut, akkor ott milyen T hőmérsékletet vesz föl?

A feladat megoldásához induljunk ki a már ismert alábbi összefüggésből:

$$c_p \cdot dT - R \cdot T \cdot \frac{dp}{p} = 0$$

Másrészt fölhasználjuk a nyomás és a magasság kapcsolatát rögzítő sztatika alapegyenletét:

$$dp = -g \cdot \rho \cdot dz$$

továbbá felhasználjuk az általános gázegyenlet sűrűséges alakját:

$$p = \rho \cdot R \cdot T$$

Osszuk el a két utóbbi egyenlet megfelelő oldalait egymással:

$$\frac{dp}{p} = \frac{-g \cdot \rho \cdot dz}{\rho \cdot R \cdot T}$$

azaz:

$$\frac{dp}{p} = -\frac{g}{R \cdot T} \cdot dz$$

Innen $\frac{dp}{p}$ -t a b. feladat első egyenletébe helyettesítve:

$$c_p \cdot dT - R \cdot T \cdot \frac{dp}{p} = c_p \cdot dT - R \cdot T \cdot \left(-\frac{g}{R \cdot T} \cdot dz \right) = 0$$

majd a következő egyenletet kapjuk:

$$c_p \cdot dT + g \cdot dz = 0$$

Innen egyszerű átrendezéssel a $\frac{dT}{dz}$, azaz a magasságváltozásra jutó hőmérséklet-változás

alábbi formuláját kapjuk: $$\frac{dT}{dz} = -\frac{g}{c_p}$$

Áttérve a véges változásokra, határozzuk meg a Δz = 1 m magasság-változásra jutó ΔT hőmérséklet-változást:

$$\Delta T = -\frac{9,80665}{1005} = -0,00976 \qquad \left[\frac{m \cdot s^{-2}}{m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}}\right] \rightarrow \left[m \cdot s^{-2} \cdot m^{-2} \cdot s^2 \cdot K\right] \rightarrow \left[K \cdot m^{-1}\right]$$

A gyakorlatban ennek az értéknek a százszorosát, azaz a Δz = 100 m-re jutó függőleges menti hőmérséklet-változást tekintjük.

Definíció: Azt az értéket, mely megmutatja, hogy adiabatikus folyamat esetén a vízgőzzel telítetlen levegő a felemelkedése során 100 m-enként mennyivel hűl le, **száraz adiabatikus hőmérsékleti gradiens**nek nevezzük. Jele: γ

γ = -0,976 °C / 100 m ≈ -1 °C / 100 m

Száraz adiabatikus hőmérséklet-változás esetén a hőmérséklet és a magasság összefüggése a következő:

$$T = T_0 + \gamma \cdot \frac{\left|z - z_0\right|}{100}$$

ahol z_0 a kiindulási magasság, z pedig a végállapot magassága méterben kifejezve.

A vízgőzzel telített levegő adiabatikus állapotváltozása

- A vízgőz kondenzálódik;

  A telített levegő felemelkedése során a tágulás miatt lehűl $\Rightarrow$ túltelített lesz $\Rightarrow$ vízgőztartalmának egy része kondenzálódik; a kondenzálódott vízgőz felhő-, illetve csapadékelemeket alkot;

- A kondenzáció során hő szabadul föl;

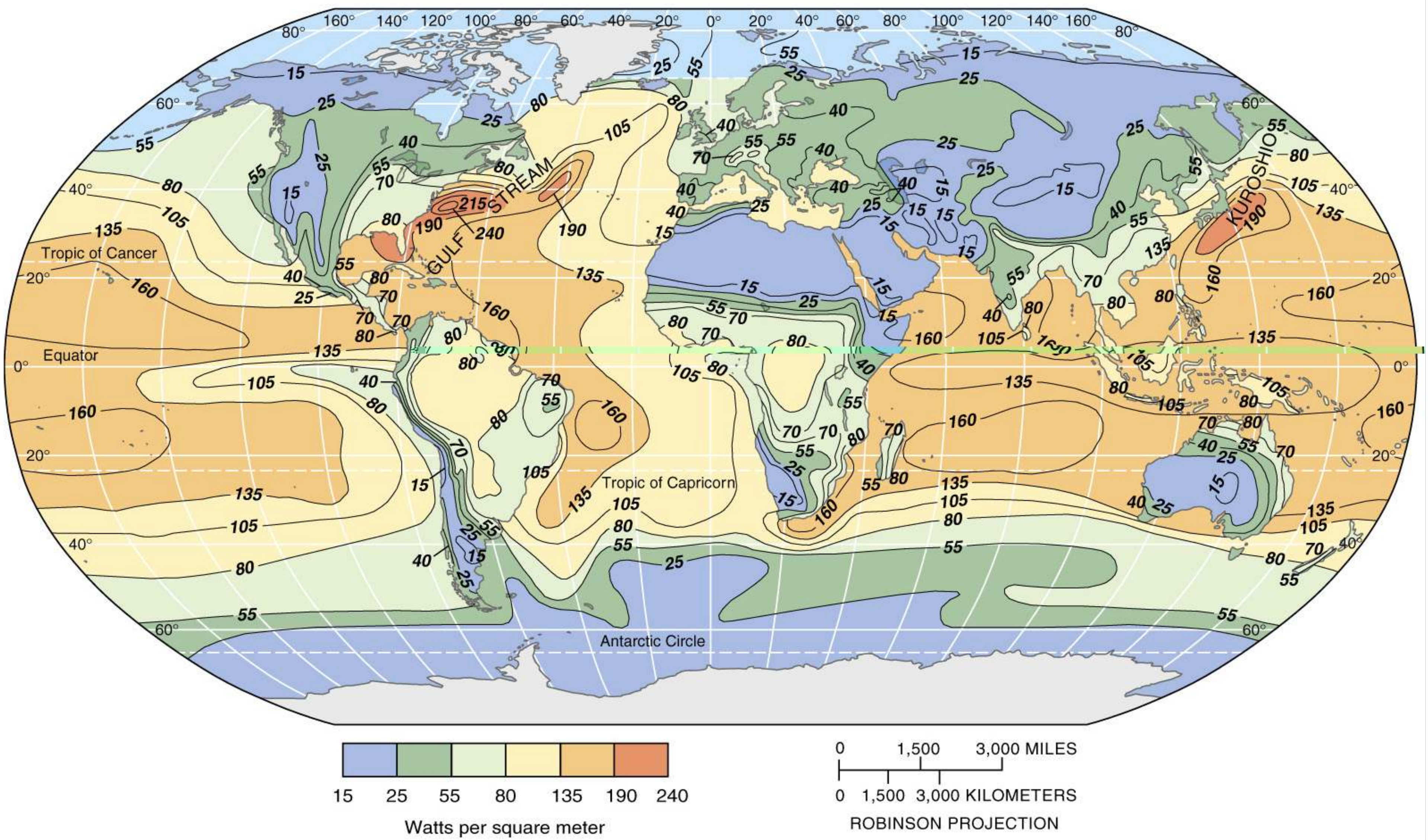
  A felszabaduló hő emeli a levegő hőmérsékletét;

  ha q tömegű vízgőz kondenzálódik $\Rightarrow$ $L \cdot q$ hőenergia szabadul föl;

  L = a tömegegységnyi (m = 1 kg) vízgőz kondenzációjakor felszabaduló ún. **latens hő**; $L \approx 2{,}5 \cdot 10^6 \ m^2 \cdot s^{-2}$;

- A hőfelszabadulás mérsékli a magassági hőmérséklet-csökkenést;

A latens hő globális eloszlása



Definíció: Azt az értéket, mely megmutatja, hogy adiabatikus folyamat esetén a vízgőzzel telített levegő a felemelkedése során 100 m-enként mennyivel hűl le, **nedves adiabatikus hőmérsékleti gradiens**nek nevezzük. Jele: β

Mitől függ β ?

- a telítettségi gőznyomástól (ez határozza meg a kondenzálódó vízgőz mennyiségét);
- a hőmérséklettől [hiszen $E = f(T)$];
- a légnyomástól (ez határozza meg tömegegységnyi nedves levegő térfogatát);

Elméleti úton levezethető egy b tényező, mely adott hőmérséklet és légnyomás esetén megadja, hogy a γ száraz adiabatikus hőmérsékleti gradiens milyen $b < 1$ számmal szorzandó ahhoz, hogy megkapjuk a $\gamma \cdot b = \beta$ nedves adiabatikus hőmérsékleti gradiens értékét.

Eszerint:

$$b = \frac{p + 0,623 \cdot \frac{L}{c_p - c_v} \cdot \frac{E}{T}}{p + 0,623 \cdot \frac{L}{c_p} \cdot \frac{dE}{dT}}$$

Ha $T \to 0$ $\Rightarrow$ $\frac{E}{T} \to 0$ $\wedge$ $\frac{dE}{dT} \to 0$

$\Rightarrow$ $b \to \frac{p}{p} = 1$

Vezessük be a következő jelöléseket:

$$0,623 \cdot \frac{L}{c_p - c_v} \cdot \frac{E}{T} = a_1$$

és

$$0,623 \cdot \frac{L}{c_p} \cdot \frac{dE}{dT} = a_2$$

Fölírhatjuk a következő munkaformulát:

$$\beta = \gamma \cdot \frac{p + a_1}{p + a_2} \qquad \left[{}^{\circ}C / 100 \text{ m} \right]$$

A különböző hőmérsékletekhez tartozó a_1 és a_2 változók táblázatból kiolvashatók (Péczely, Gy., 1979: Éghajlattan, 45. oldal, 2.8. táblázat).

A száraz és a nedves adiabatikus hőmérsékleti gradiensek (γ és β) néhány jellemzője:

- ✓ A vízgőzt tartalmazó nedves levegő emelkedésekor mindaddig a száraz adiabatikus hőmérsékleti gradienssel számolunk, amíg a levegő nem válik telítetté.
- ✓ A száraz adiabatikus hőmérsékleti gradiens állandó.
- ✓ A nedves adiabatikus hőmérsékleti gradiens függ a mindenkori hőmérséklethez tartozó maximális abszolút nedvességtől, azaz:

$$\boxed{\beta = f(s_{\max})} \quad \text{és} \quad \boxed{s_{\max} = f(T)} \quad \boxed{\Rightarrow} \quad \boxed{\beta = f\left[s_{\max} f(T)\right]}$$

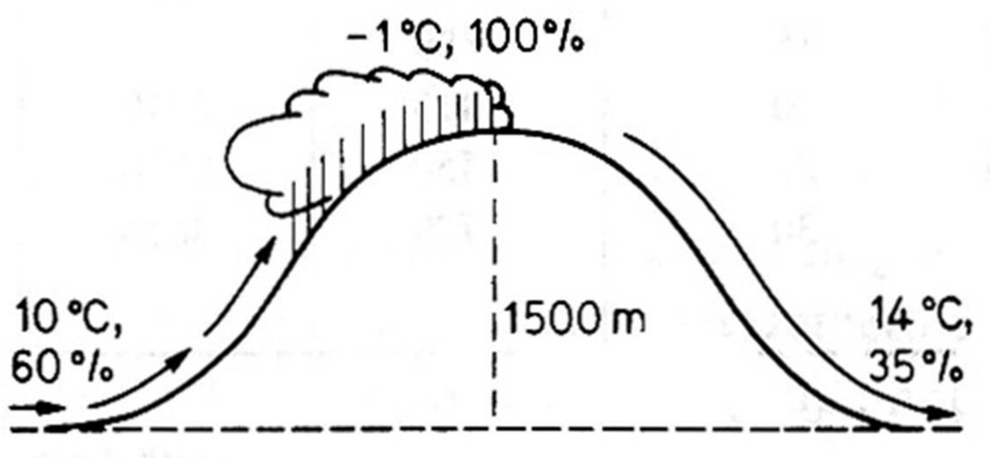
Minél magasabb a telített levegő hőmérséklete $\Rightarrow$ emelkedésekor annál több vízgőz kondenzálódik $\Rightarrow$ annál nagyobb lesz a kondenzációs hő $\Rightarrow$ annál kisebb a nedves adiabatikus hőmérsékleti gradiens.

- ✓ Ha $z \rightarrow \infty \;\Rightarrow\; T \rightarrow 0$ K $\Rightarrow \beta \uparrow \rightarrow \gamma$; mindig érvényes: $\beta < \gamma$;
- ✓ Süllyedő légmozgásoknál a hőmérséklet a száraz adiabatikus hőmérsékleti gradiens szerint változik.

Hegyvidékeken fontos időjárási tényező:

Ha a kondenzációs szint a hegygerinc alatt található, a légtömeg e szint alatt a száraz adiabatikus, fölötte a nedves adiabatikus, majd a hegy túloldalán leszálláskor végig a száraz adiabatikus gradiens szerint változtatja hőmérsékletét.

⇒ a hegy túloldalán azonos szintben a hőmérséklet magasabb lesz, mint az innenső oldalon;



2.11. ábra. Bukószél modellje

Sikongnak a meleg szelek
Messze Délen, messze Délen,
Várnak reánk, várnak reánk
Valahol egy tengerszélen.

Ady Endre: Várnak reánk délen

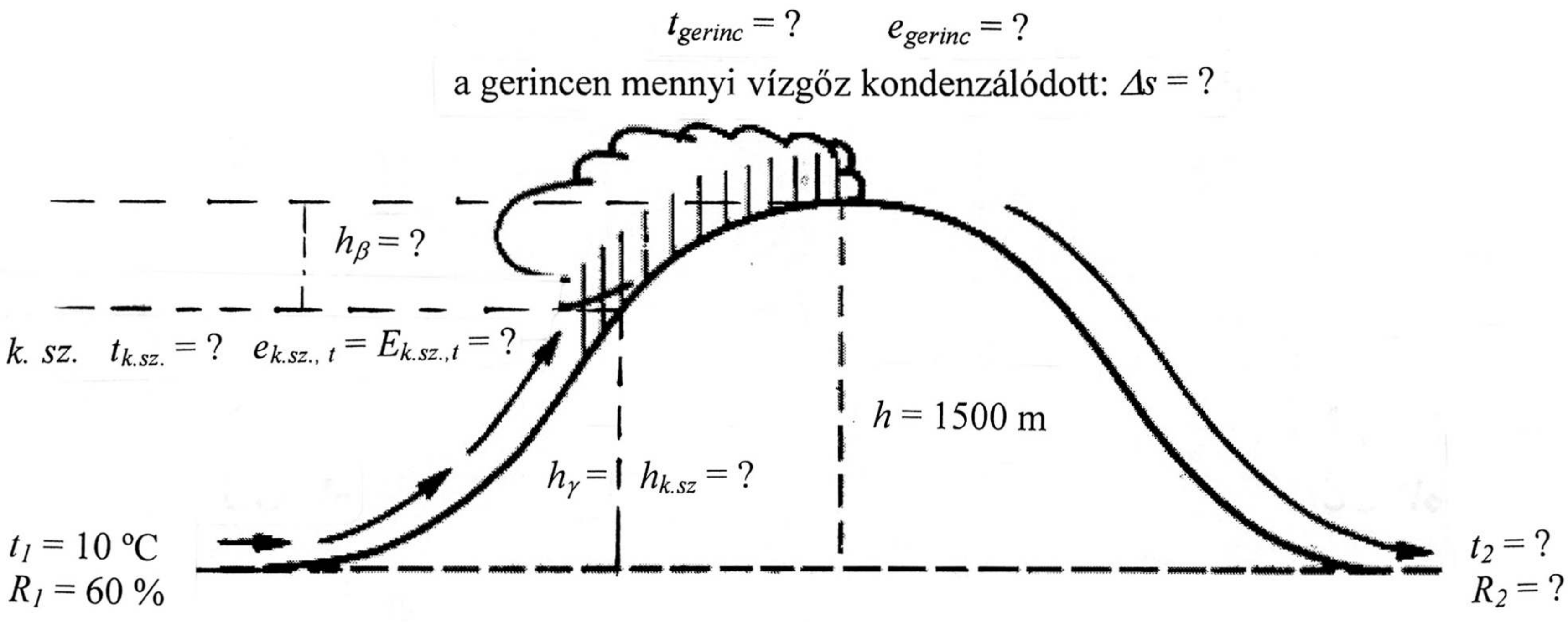
(részlet)

Definíció: az ilyen leszálló, közben felmelegedő $\Rightarrow$ szárazabbá váló légáramlás a bukószél, vagy főn.

A jelenség a szabad légkörben is előfordul $\Rightarrow$ szabad főn.

Feladat:

Egy hegyvonulat áramlásnak kitett oldalán a tengerszintről fölemelkedő levegő a kondenzációs szint elérése után tovább emelkedik, majd átbukik a hegygerincen, s újra leereszkedik a tengerszintre. Határozzuk meg a következő paramétereket:



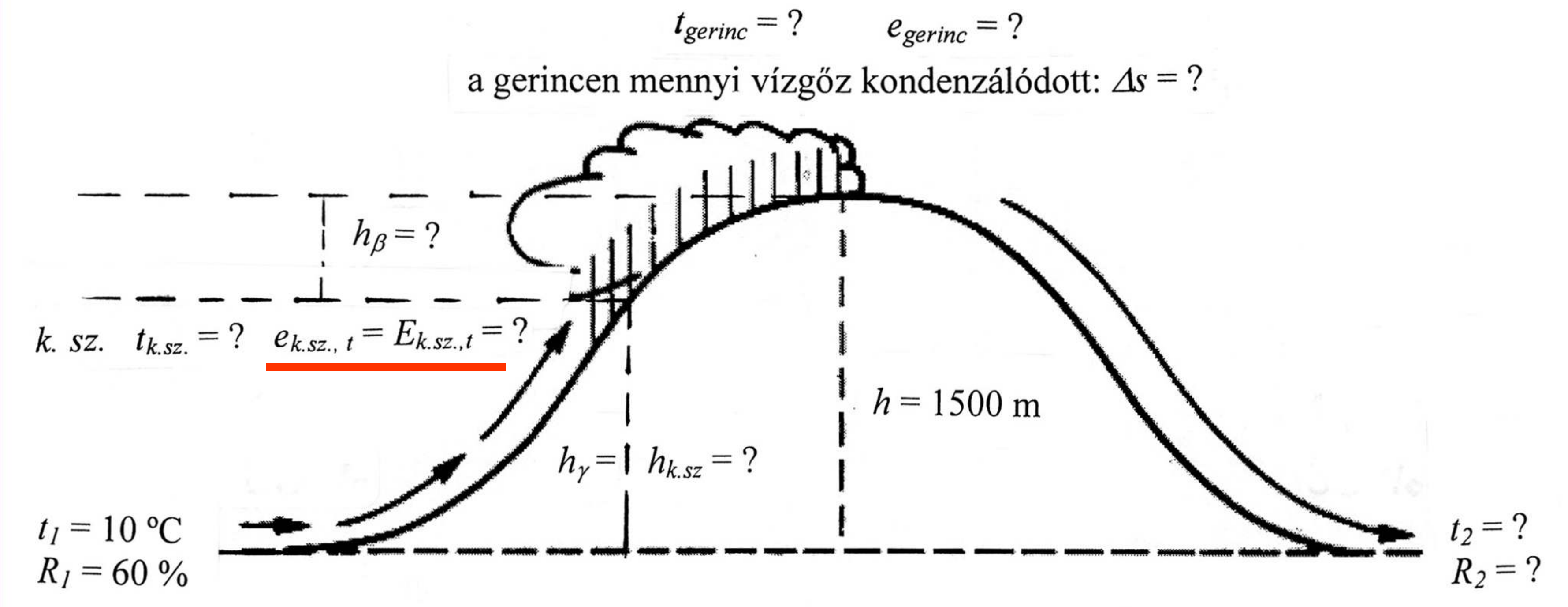
2.11. *ábra*. Bukószél modellje

Adott egy hegy előoldalán a tengerszinti levegő hőmérséklete (t_1 = 10 °C) és relatív nedvessége (R_1 = 60 %). A levegő fölemelkedik, majd a kondenzációs szintet követően átbukik a hegygerincen, s újra leereszkedik a tengerszintre. E folyamat során határozzuk meg az alábbi paramétereket!

1. Határozzuk meg a gőznyomást a kondenzációs szintben ($e_{k.sz.,t}$)!
2. Határozzuk meg a hőmérsékletet a kondenzációs szintben ($t_{k.sz.}$)!
3. Határozzuk meg a kondenzációs szint magasságát ($h_{k.sz.}$)!
4. Határozzuk meg a nedves adiabatikus hőmérsékleti gradienset (β) !
5. Határozzuk meg a hőmérsékletet a hegygerincen (t_{gerinc})!
6. Határozzuk meg a gőznyomást a hegygerincen (e_{gerinc})!
7. Határozzuk meg, hogy mennyi vízgőz kondenzálódott a hegygerincen (Δs)!
8. Határozzuk meg a levegő hőmérsékletét a tengerszinten, miután az a hegy túloldalán leereszkedett (t_2)!
9. Határozzuk meg a levegő relatív nedvességét a tengerszinten, miután az a hegy túloldalán leereszkedett (R_2)!

1. feladat:

Határozzuk meg a gőznyomást a kondenzációs szintben ($e_{k.sz.,t}$)!



2.11. ábra. **Bukószél modellje**

1. feladat:

Határozzuk meg a gőznyomást a kondenzációs szintben ($e_{k.sz.,t}$)!

$t = t_{sz} = 10$ °C

ha $R = 60\% = 100 \cdot \frac{e}{E}$ $\rangle$ $\Rightarrow$

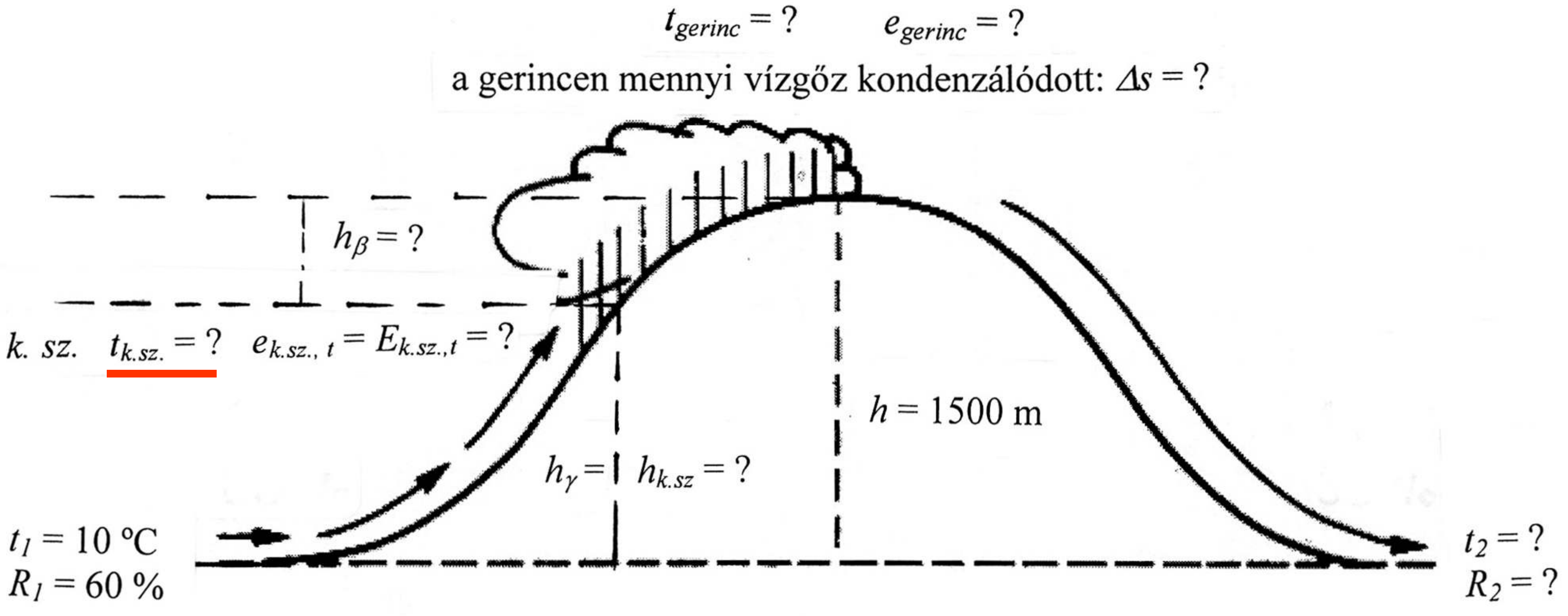
$\xrightarrow{\text{az Assmann-féle aspirációs pszichrométer táblázatból}}$ e = 5,5 Hgmm

A kondenzációs szintben $e_{k.sz.} = E_{k.sz.}$, ugyanis ekkor e-hez 100 % relatív nedvesség tartozik.

$\Rightarrow$ a kondenzációs szintben a gőznyomás: $e_{k.sz.} = E_{k.sz.}$ = 5,5 Hgmm

2. feladat:

Határozzuk meg a hőmérsékletet a kondenzációs szintben ($t_{k.sz.}$)!



2.11. ábra. Bukószél modellje

2. feladat:

Határozzuk meg a hőmérsékletet a kondenzációs szintben ($t_{k.sz.}$)!

A kondenzációs szintben:

$e_{k.sz.} = E_{k.sz.} =$ 5,5 Hgmm = 5,5 · 1,333 = 7,3 mb.

Mivel a kondenzációs szintben R = 100 %,

$\Rightarrow$ $e_{k.sz.} = E_{k.sz.}$ és R ismeretében:

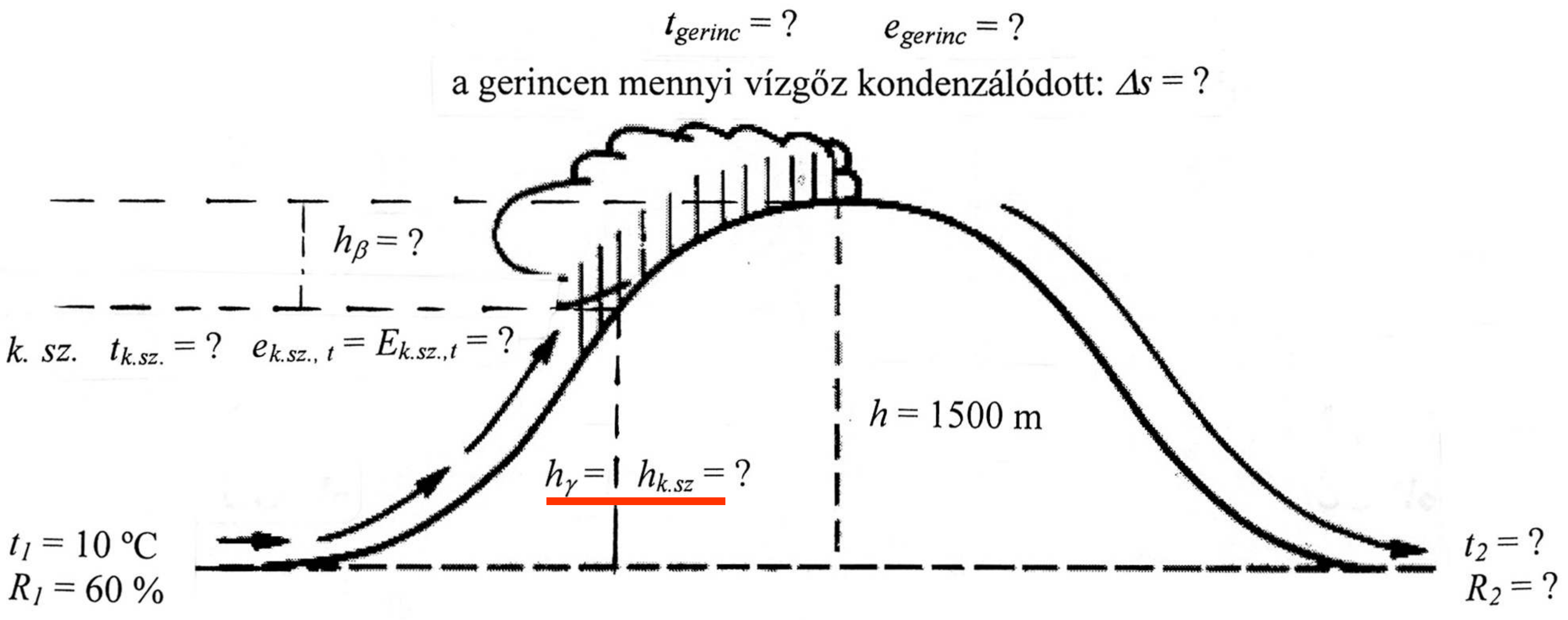
$\xrightarrow{\text{az Assmann-féle aspirációs pszichrométer táblázatból}}$ $t = t_d = 2{,}5$ °C

$\Rightarrow$ a kondenzációs szintben a hőmérséklet: $t = t_d = 2{,}5$ °C

A fönti paraméterek mellett fölvett hőmérséklet a harmatpont (t_d).

3. feladat:

Határozzuk meg a kondenzációs szint magasságát ($h_{k.sz.}$)!



2.11. ábra. **Bukószél modellje**

3. feladat:

Határozzuk meg a kondenzációs szint magasságát ($h_{k.sz.}$)!

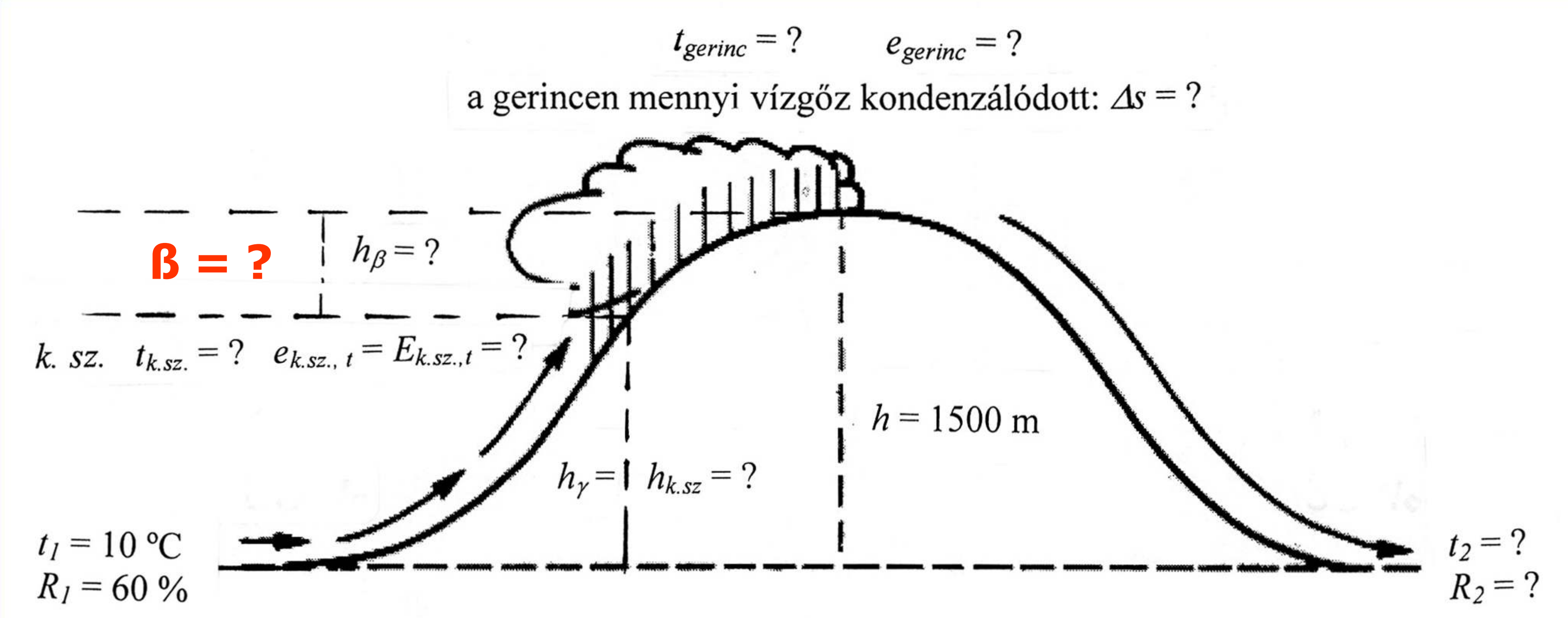
Mivel Δ (10 ºC; 2,5 ºC) = 7,5 ºC

és $\gamma \approx$ 1 ºC / 100 m $\rangle \quad \Longrightarrow$

a kondenzációs szint magassága: $h_{\gamma} = h_{k.sz.}$ = 7,5·100 m = 750 m

4. feladat:

Határozzuk meg a nedves adiabatikus hőmérsékleti gradienset (β)!



2.11. ábra. Bukószél modellje

4. feladat:

Határozzuk meg a nedves adiabatikus hőmérsékleti gradienset (β)!

4.1. feladat:

Határozzuk meg a nyomást a kondenzációs szintben.

p_1 = 1013 mb

T_1 = 10 ºC

T_2 = 2,5 ºC

$\Delta z = h_\gamma = h_{k.sz.}$ = 750 m

p_2 = ?

$$\log p_2 = \log p_1 - 0,01485 \cdot \frac{\Delta z}{T_m}$$

$$\log p_2 = 3,0056 - 0,0399 = 2,9657$$

$$p_2 = 924,1 \quad mb$$

4.2. feladat:

A kondenzációs szintben mért légnyomás ismeretében számítsuk ki a nedves adiabatikus hőmérsékleti gradienset (β)!

$p_2 = p = 924{,}1$ mb

$t = 2{,}5$ °C

$\beta = ?$

$$\beta = \gamma \cdot \frac{p + a_1}{p + a_2} = -0{,}976 \cdot \frac{924{,}1 + 143{,}5}{924{,}1 + 822{,}5} = -0{,}5966 \quad ^\circ C / 100\ \mathrm{m}$$

$a_1 = 143{,}5$

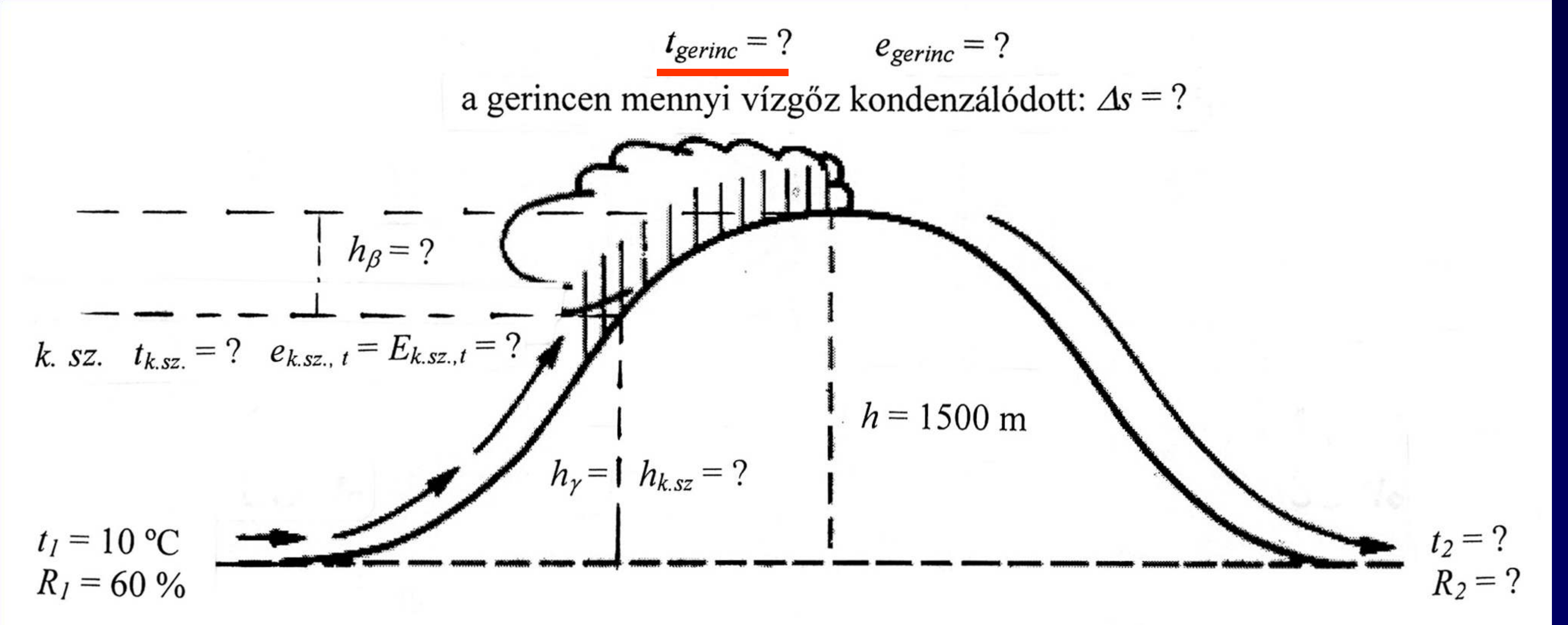
$a_2 = 822{,}5$

(Péczely, Éghajlattan, 2.8. táblázat, 45. oldal)

$\Rightarrow$ a nedves adiabatikus hőmérsékleti gradiens: $\beta \approx 0{,}6$ °C / 100 m

5. feladat:

Határozzuk meg a hőmérsékletet a hegygerincen (t_{gerinc})!



2.11. ábra. Bukószél modellje

5. feladat:

Határozzuk meg a hőmérsékletet a hegygerincen (t_{gerinc})!

Δ (1500 m; 750 m) = 750 m $\Rightarrow$

ekkora emelkedés β figyelembe vételével: 7,50·(-0,5966) = - 4,47 ºC hőmérséklet-változással jár.

$\Rightarrow$ 1500 m magasságban, azaz a hegygerincen a hőmérséklet: t_{gerinc} = 2,5 ºC – 4,5 ºC = -2,0 ºC

FONTOS:

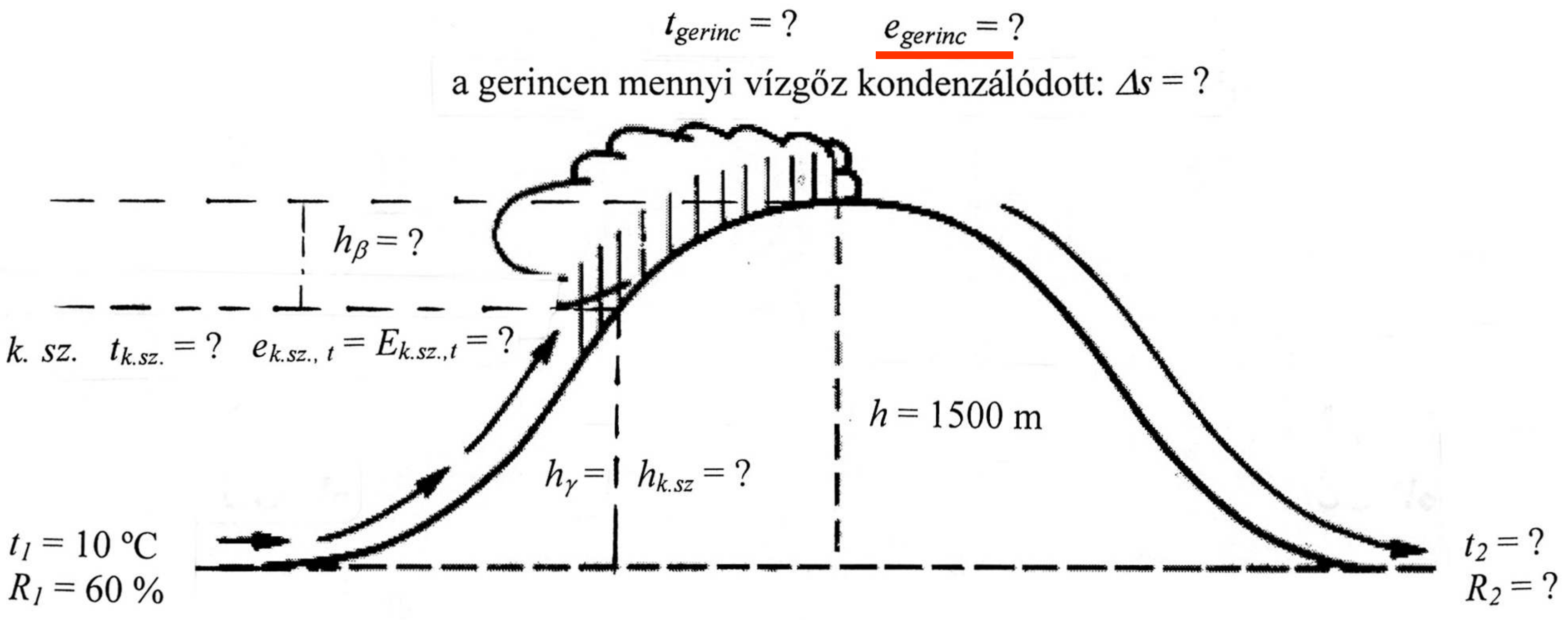
A kapott eredmény csak becslés, mivel a kondenzációs szintben mért β nedves adiabatikus hőmérsékleti gradienst annak legalacsonyabb értékével állandónak vettük az emelkedés során.

$\Rightarrow$ a valódi hőmérséklet-változás a hegygerincig -4,47 ºC és -7,5 ºC közötti. A valódi hőmérséklet a hegygerincen -2,0 ºC és -5 ºC közötti.

$\Rightarrow$ a valóságban a fönt számítottnál nagyobb a lehűlés a hegytetőn.

6. feladat:

Határozzuk meg a gőznyomást a hegygerincen (e_{gerinc})!



2.11. ábra. Bukószél modellje

6. feladat:

Határozzuk meg a gőznyomást a hegygerincen (e_{gerinc})!

t_{gerinc} = -2,0 °C

$$ha \quad R = 100 \cdot \frac{e}{E} = 100\% \quad \rangle \quad \Rightarrow$$

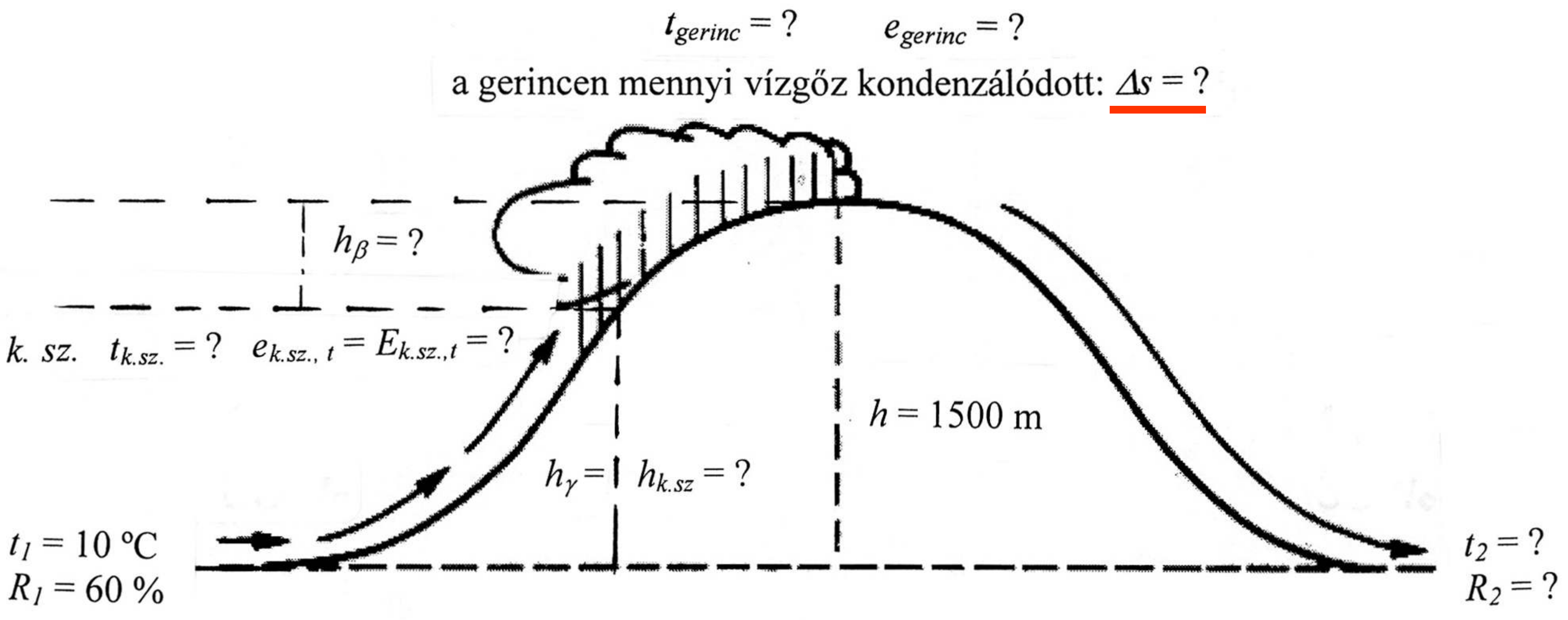
$$\xrightarrow{\text{az Assmann-féle aspirációs pszichrométer táblázatból}} \quad e_{gerinc} = 4{,}0 \text{ Hgmm}$$

A hegygerincen $e_{gerinc} = E_{gerinc}$, ugyanis ekkor e-hez 100 % relatív nedvesség tartozik.

$\Rightarrow$ a hegygerincen a gőznyomás: $e_{gerinc} = E_{gerinc} = 4{,}0$ Hgmm

7. feladat:

Határozzuk meg, hogy mennyi vízgőz kondenzálódott a hegygerincen (Δs)!



2.11. ábra. Bukószél modellje

7. feladat:

Határozzuk meg, hogy mennyi vízgőz kondenzálódott a hegygerincen (Δs)!

Δs = ?

A vízgőz sűrűsége a következő egyenlettel írható föl: $s = \frac{217 \cdot e}{T}$ $\left[g \cdot m^{-3}\right]$

$$s_{2,5^o C} = \frac{5{,}5 \cdot 1{,}33 \cdot 217}{275{,}6} = 5{,}8 \quad \left[g \cdot m^{-3}\right]$$

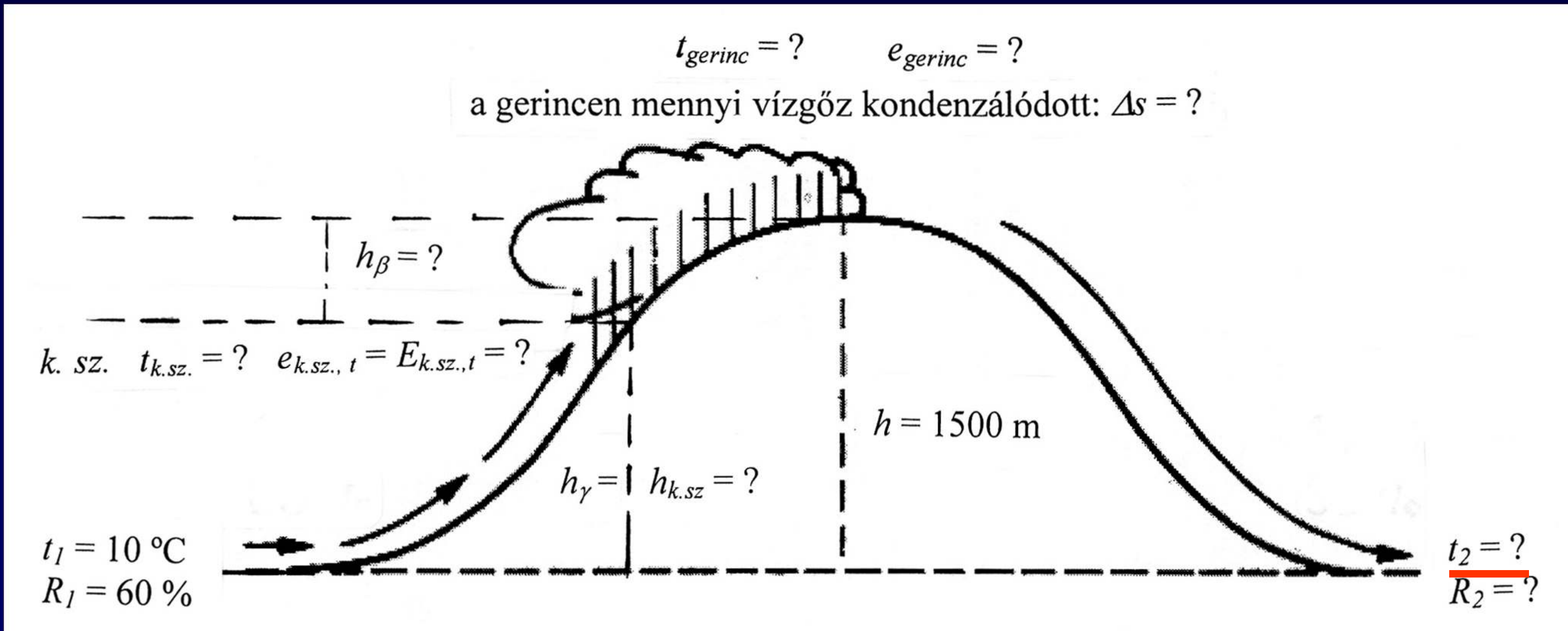
$$s_{-2,0^o C} = \frac{4{,}0 \cdot 1{,}33 \cdot 217}{271{,}1} = 4{,}2 \quad \left[g \cdot m^{-3}\right]$$

Tehát a hegygerincen kondenzálódott vízgőz mennyisége:

$$\Delta s = 5{,}8 - 4{,}2 = 1{,}6 \quad \left[g \cdot m^{-3}\right]$$

8. feladat:

Határozzuk meg a levegő hőmérsékletét a tengerszinten (t_2), miután az a hegy túloldalán leereszkedett!



2.11. ábra. Bukószél modellje

8. feladat:

Határozzuk meg a levegő hőmérsékletét a tengerszinten (t_2), miután az a hegy túloldalán leereszkedett!

t_{gerinc} = -2,0 ºC

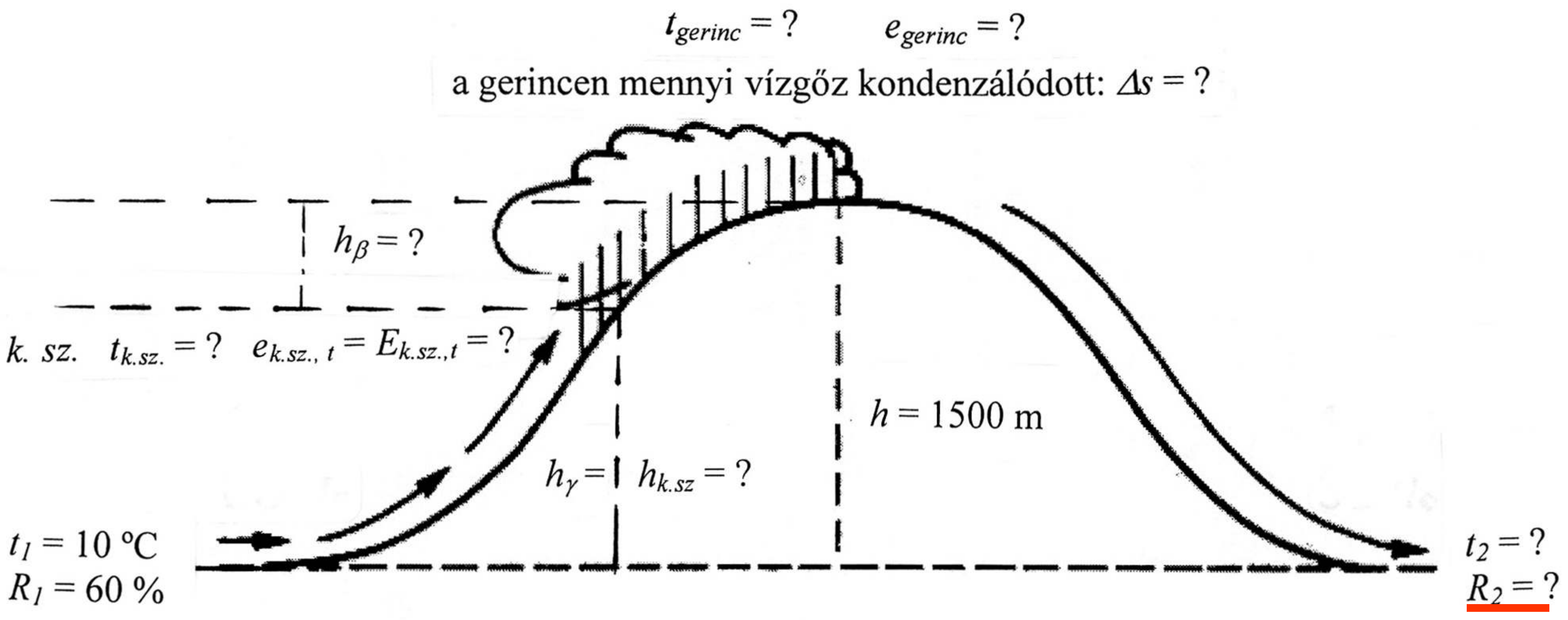
Innen száraz adiabatikusan süllyedve a levegő hőmérséklete a tengerszinten:

t_2 = -2,0 ºC + 15 · 1 ºC = 13,0 ºC

Tehát a hegy túloldalán a tengerszintre érkező levegő hőmérséklete: t_2 = 13,0 ºC

<u>9. feladat</u>:

Határozzuk meg a levegő relatív nedvességét a tengerszinten (R_2), miután az a hegy túloldalán leereszkedett!



2.11. ábra. Bukószél modellje

9. feladat:

Határozzuk meg a levegő relatív nedvességét a tengerszinten (R_2), miután az a hegy túloldalán leereszkedett!

A hegygerincen a gőznyomás: $e_{gerinc} = E_{gerinc} = 4{,}0$ Hgmm. Mivel a levegő telített, ekkor *e*-hez 100 % relatív nedvesség tartozik.

$t_2 = 13{,}0$ °C

$e_2 = 4{,}0$ Hgmm $\rangle \Rightarrow$

$\xrightarrow{\text{az Assmann-féle aspirációs pszichrométer táblázatból}}$ $R_2 = 35$ %

Tehát a hegy túloldalán a tengerszintre érkező levegő relatív nedvessége:

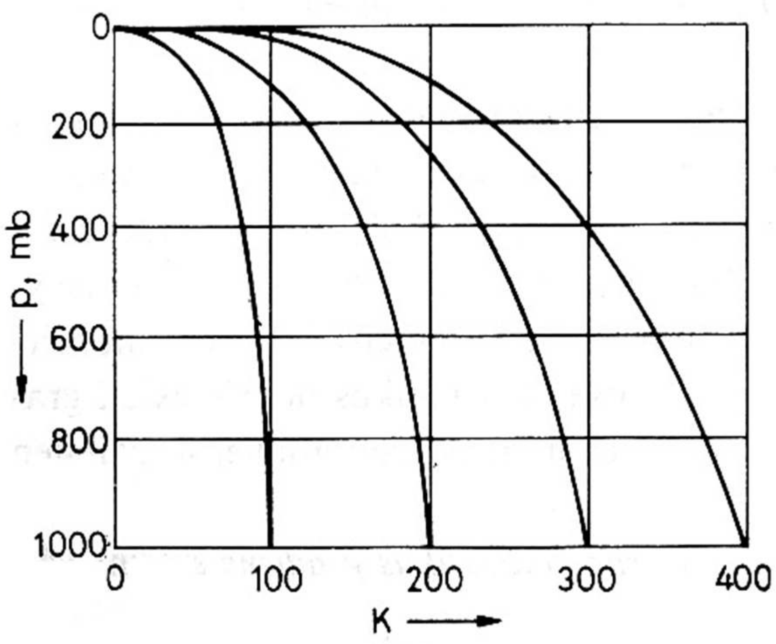
$R_2 = 35$ %

Száraz és nedves adiabaták:

- **<u>Definíció</u>:** ha az adiabatikusan fel, illetve leszálló levegő hőmérséklet-változását a légnyomás, vagy a magasság függvényében grafikusan ábrázoljuk, az adiabatákat kapjuk.

  → száraz adiabaták;

  → nedves adiabaták;



2.12. ábra. Száraz és nedves adiabaták *T, p* koordináta-rendszerben

- Ha a koordináta-rendszer vízszintes tengelye T, függőleges tengelye p $\Rightarrow$ a T_0 hőmérsékletű és p_0 nyomású kezdőállapotban lévő telítetlen levegő száraz adiabatikus hőmérsékletváltozása $\Rightarrow$ **Poisson-egyenlet;**
- Ha a koordináta-rendszer mindkét tengelyének beosztása lineáris $\Rightarrow$ az összetartozó *(T; p)* pontokat görbe vonal köti össze. Ha viszont a T-tengely beosztása lineáris marad, s a p-tengelyre: $p = p^{0,286}$ $\Rightarrow$ a **Poisson-egyenlet** grafikus képe egyenes lesz.
- Végtelen sok száraz-, illetve nedves adiabata létezik, hiszen azokat a p nyomáson felvett bármely T hőmérsékletből kiindulva megszerkeszthetjük.
- A száraz és a nedves adiabaták közötti eltérést legszemléletesebben *(T; z)* koordináta-rendszerben (T = hőmérséklet, vízszintes tengely; z = magasság, függőleges tengely) mutathatjuk be.

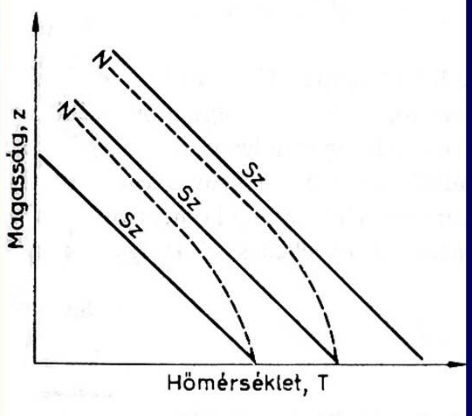
A leggyakoribb eset:

Adiabatikusan emelkedő légrész hőmérséklet-csökkenése

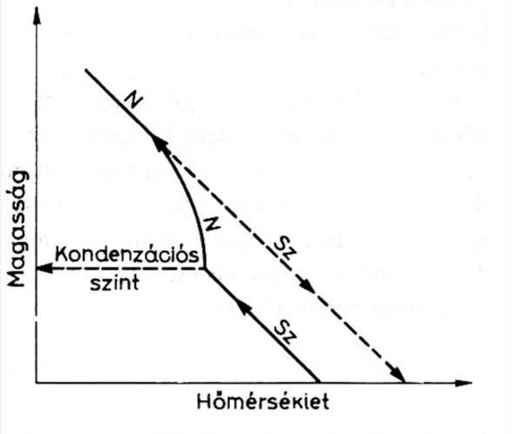
- telítetlen levegőben, a kondenzációs szintig γ szerint (száraz adiabata);
- túltelített levegőben, a kondenzációs szint fölött β szerint (nedves adiabata);

Adiabatikusan süllyedő légrész hőmérséklet-emelkedése

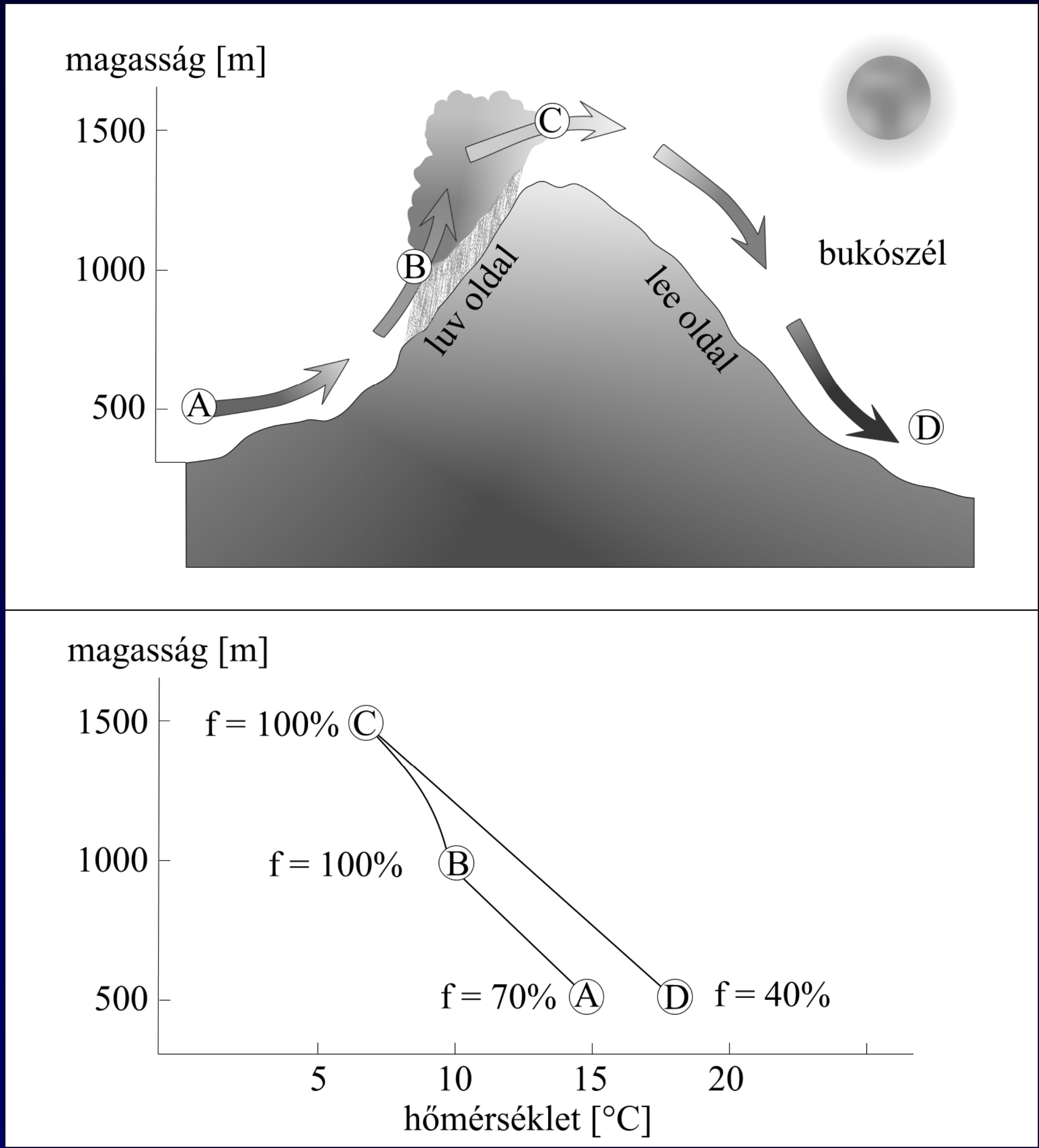
- A mindenkori kondenzációs szinttől ereszkedve, végig γ szerint (száraz adiabata);



2.13. ábra. Száraz és nedves adiabaták *T*, *z* koordináta-rendszerben



2.14. ábra. Adiabatikus hőmérséklet-változások főn esetén



A főn szél kialakulása instabil légkör esetén

Az adiabatikus állapotváltozásokkal kapcsolatos néhány hőmérséklet-fogalom

Potenciális hőmérséklet:

Ha egy légrészt a kezdeti p_0 nyomásról és T_0 hőmérsékletről száraz adiabatikusan 1000 mb nyomásra hozunk, e végállapotban felvett hőmérséklete a potenciális hőmérséklet.

$$T_p = T_0 \cdot \left(\frac{1000}{p_0} \right)^{0,286}$$

A potenciális hőmérséklet a száraz adiabatikus folyamatok alatt nem változik.

$$T_z = T + \frac{z}{100}$$

Ekvivalens hőmérséklet:

Értékét megkapjuk, ha a tényleges hőmérséklethez hozzáadjuk azt a hőmérsékleti többletet, amelyet a levegőben lévő összes vízgőz kondenzálódásakor felszabaduló hőenergia okoz.

Azaz:

$$T_e = T + \Delta T$$

Ha tömegegységnyi nedves levegő ($m = 1$) q tömegű vízgőzt tartalmaz, akkor ennek kondenzációjával $L \cdot q$ hőmennyiség szabadul föl. Határozzuk meg, hogy e felszabaduló hőmennyiség milyen mértékben emeli a tömegegységnyi nedves levegő hőmérsékletét, azaz: $\Delta T = ?$

A hőmennyiség, a tömeg és a hőmérséklet-változás kapcsolatát a már jól ismert összefüggés írja le:

$$\Delta Q = c \cdot m \cdot \Delta T$$

Mivel

$\Delta Q = L \cdot q$

$m = 1$

$c = c_p$ (hiszen a nyomás nem változik, mivel a légrész nincs zárt térfogatban)

A behelyettesítés után fejezzük ki ΔT -t:

$$\Delta T = \frac{L \cdot q}{c_p}$$

Innen tehát:

$$T_e = T + \Delta T = T + \frac{L \cdot q}{c_p}$$

Mivel

L = 2,5 $\cdot 10^6$ $m^2 \cdot s^{-2}$

c_p = 1005 $m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$

$$\frac{L}{c_p} \approx 2,5 \cdot 10^3 \quad [K]$$

továbbá, mivel q [$g \cdot kg^{-1}$] = 10^{-3} q [$kg \cdot kg^{-1}$] , ezért:

$$\frac{L}{c_p} \cdot q \approx 2,5 \cdot 10^3 \cdot 10^{-3} \cdot q \approx 2,5 \cdot q$$

Végül az alábbi egyszerű munkaformulát kapjuk:

$$T_e = T + 2,5 \cdot q$$

A q specifikus nedvesség [g·kg^{-1}] a gőznyomás és a légnyomás ismeretében a következő formulával számítható:

$$q = \frac{s}{s+\rho_l} = \frac{\dfrac{0,623 \cdot e}{R \cdot T}}{\dfrac{0,623 \cdot e}{R \cdot T} + \dfrac{p_l}{R \cdot T}} = \frac{0,623 \cdot e}{0,623 \cdot e + p_l} = \frac{0,623 \cdot e}{0,623 \cdot e + p - e} = \frac{0,623 \cdot e}{p - 0,377 \cdot e}$$

Ekvipotenciális hőmérséklet:

Ha a p_0 nyomású és T_e ekvivalens hőmérsékletű levegőt száraz adiabatikusan 1000 mb nyomásra hozzuk, az ekvipotenciális hőmérsékletet kapjuk.

$$T_{ep} = T_e \cdot \left(\frac{1000}{p_0} \right)^{0,286}$$

Az ekvipotenciális hőmérséklet nemcsak a száraz, hanem a nedves adiabatikus folyamatok alatt is állandó ⇒ adott levegőfajta konzervatív tulajdonsága (fontos szerepet játszik a légtömegelemzésben);

…meghitt mosollyal Mario, kedves pincérünk... aznap is
ő jött elénk, sajnálva: "Szép signorinák szemének árt a scirocco!..."
S emlékszel, hogyan bámultunk? - Scirocco? - De hisz
egy pálmaág sem ing, de hisz vak csöndben a magnoliák,
meredtek a naspolyafák, és terraszokról terraszokra
oly mozdulatlan hullt a lomb mint elvarázsolt vízesés. –
"Épp ez az, signor, ez a mi sciroccónk!... Fojt a levegő,
a gégében homok kapar, s biz aki nincsen ideszokva,
könnyen duzzasztja föl szemhéját a száraz viszketés.
Nem érzi, signor?" –
Óh, alig tudtam már nyelni!

Babits Mihály: A titkos szél (részlet)

A légkör mozgásjelenségeinek biometeorológiai vonatkozásai

Ismeritek a fájó muzsikát,
Mellyel szelíden száll az esti szellő,
A csöndes lombon hold fénye süt át,
S ezüst hajót utánoz fenn a felhő?

Vajjon kitől tanult zenét a szél,
Hogy este tőle oly édes a bánat?
Tán összegyüjtött testvérbúja él
Benne távol világok sóhajának?

Tóth Árpád: A „Letört bimbók” című filmhez
(részlet)

A főn (bukószél)

definíciója:

a hegységek szélárnyékos (lee) oldalán megfigyelhető leszálló légáramlás

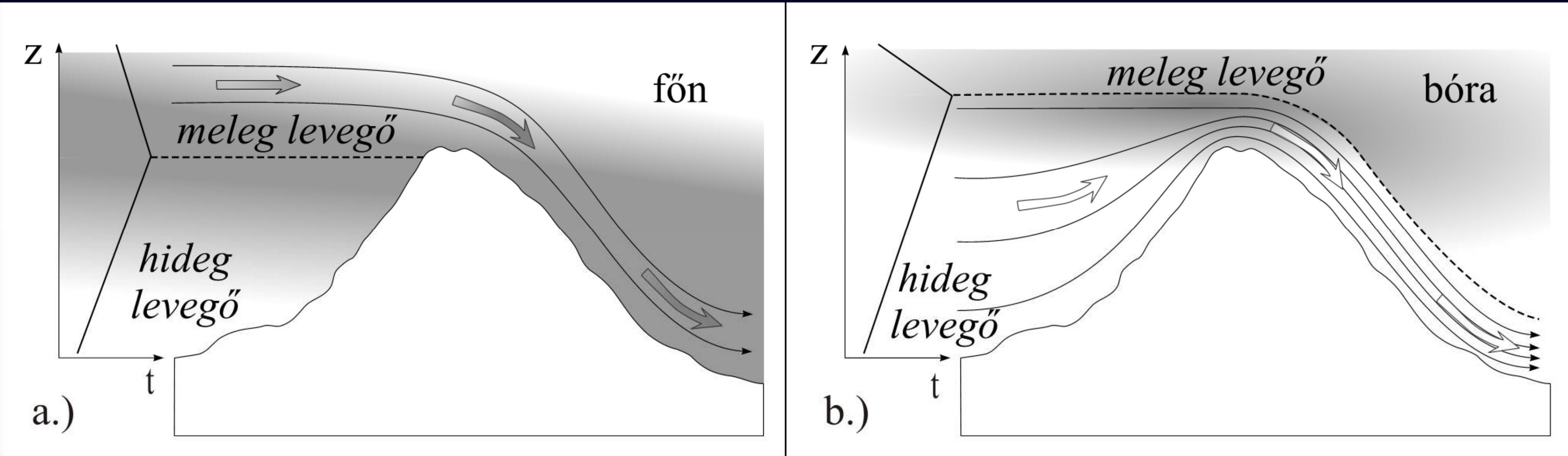
előfordulásai idehaza:

Alpokalja, a Balaton térsége → bakonyi szél;

előfordulásai környezetünkben:

Erdély → nemere;
Adriai-tenger (Isztria, Dalmácia) → bóra (száraz, hideg szél);

Bukószél kialakulása inverziós réteg esetén



Ha az inverziós réteg vastagsága kisebb, mint a hegy magassága (a. ábra) az inverzió miatt a szél felőli oldalon a levegő nem tud felemelkedni. Az átellenes oldalon pedig a nagyobb magasságokban található meleg levegő áramlik lefele. **Ez a jelenség a főn.**

Ha az inverziós réteg magassága csak némileg haladja meg a hegy magasságát, az áramlás irányával átellenes oldalon igen nagy sebességgel áramlik lefelé a hideg levegő (b. ábra). **Ez a jelenség a bóra.**

Ilyenkor az inverzió miatt a szél felőli oldalon feláramló levegőnek csak egy nagyon szűk keresztmetszet áll rendelkezésére a hegyen való átkeléshez.
$\Rightarrow$ az áramlás sebessége jelentősen megnő.

meteorológiai következményei:

felhőoszlató hatás, magas napfénytartam; alacsony relatív nedvesség $\Rightarrow$ rendkívül száraz levegő $\Rightarrow$ tűzveszély (pl. Alpok);

a szervezet reakciója, tünetei:

- ✓ migrénes rohamok (egyoldali erős fejfájás);
- ✓ bágyadtság, álmosság de álmatlanság;
- ✓ a végtagok zsibbadnak;
- ✓ dekoncentráltság

Mára befejeztük, jó éjszakát!