Saša Gaberšek,
Gregor Skok, Rahela Žabkar

REŠENE NALOGE IZ OSNOV METEOROLOGIJE

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za matematiko in fiziko

Saša Gaberšek, Gregor Skok
in Rahela Žabkar

REŠENE NALOGE IZ OSNOV METEOROLOGIJE

FMF
UNIVERZA V LJUBLJANI
Fakulteta za matematiko in fiziko

Ljubljana 2024

Izdaja: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko

Saša Gaberšek, Gregor Skok in Rahela Žabkar

REŠENE NALOGE IZ OSNOV METEOROLOGIJE

Strokovni pregled Jože Rakovec in Mark Žagar
Jezikovni pregled: Maja Nemec
Računalniško stavili avtorji
Tehnični urednik: Matjaž Zaveršnik
Odgovorni urednik: Simon Širca

Kataložni zapis o publikaciji (CIP) pripravili v Narodni in univerzitetni knjižnici v Ljubljani
COBISS.SI-ID 214902275
ISBN 978-961-6619-45-5 (PDF)

Kazalo

Predgovor

Pri predmetu osnove meteorologije je reševanje računskih problemov sestavni del učnega procesa. Privlačnost nalog je predvsem v tem, da so tudi praktično uporabne, saj se z vremenom in njim povezanimi spremenljivkami srečujemo vsak dan.

Avtorji smo pri sestavljanju zbirke izhajali iz nalog, ki so jih leta nazaj v okviru predmeta osnove meteorologije zbirali že prof. Zdravko Petkovšek, prof. dr. Jože Rakovec, doc. dr. Tomaž Vrhovec, mag. Neva Pristov in dr. Gregor Gregorič. Izbrane naloge iz te nenatisnjene zbirke smo uredili in opremili s skicami in rešitvami. Obstoječim smo dodali tudi mnogo novih nalog, tako da zbirka v sedanji obliki lepo pokrije poglavja, s katerimi se študentje seznanijo v okviru uvodnih predavanj meteorologije.

Naloge so združene po sklopih in se vsebinsko navezujejo na učbenik *Osnove meteorologije za naravoslovce in tehnike* (ISBN: 978-961-6619-39-4)[1], ki sta ga pripravila Jože Rakovec in Tomaž Vrhovec. Želeli smo si, da bi bila študentom zbirka v čim večjo pomoč. Vsako od poglavij smo tako začeli z bolj preprostmi nalogami, ki jim sledijo nekoliko zahtevnejše. Pri izbranih nalogah smo postopek reševanja predstavili v celoti, k drugim nalogam pa smo zapisali le rešitve in kakšen namig.

Naloge, iz katerih smo izhajali pri oblikovanju te zbirke, je pred nami vrsto let zbiral tudi naš kolega Tomaž Vrhovec, ki je prekmalu izgubil življenje v objemu snežnega plazu. To zbirko želimo posvetiti njemu; naj bo to obenem tudi zahvala za neusahljiv vir idej in nemalo debat o temah, povezanih z osnovami meteorologije.

Avtorji se želimo zahvaliti prof. Jožetu Rakovcu za pregled tekstov nalog in konstruktivne nasvete v zvezi z njimi, dr. Katarini Kosevelj in študentu meteorologije Žigi Valentiču pa za pomoč pri odkrivanju napak v rezultatih.

Avtorji

[1]prosto dostopen na https://www.dlib.si/details/URN:NBN:SI:DOC-EXG6P2Z0

1 Merske enote

1.1 Pretvori naslednje enote za zračni tlak: [Rešitev]

1000 mbar = Pa,

600 mbar = hPa,

500 mbar = bar.

1.2 Pretvori naslednje enote za temperaturo: [Rešitev]

$12,5$ °C = K,

290 K = °C,

-14 °C = K.

1.3 Pretvori naslednje količine v druge enote: [Rešitev]

3 dni = sekund,

20000 h = let,

900 m^2 = km^2,

3 litri = m^3,

30 m/s = km/h,

100 km/h = m/s,

100 MW = W,

1400 W/m^2 = W/km^2,

0,005 K/s = °C/uro,

1,5 mbar/100 km = Pa/m,

100 MJ = kWh,

5 kWh = MJ.

2 Sestava in plasti ozračja

2.1 Kolikšna je molska masa zraka, če vemo, da je v atmosferi masni delež kisika 24 % in dušika 76 %?

Rešitev:

$$M_{\mathrm{O_2}} = 32 \text{ kg/kmol}, \quad M_{\mathrm{N_2}} = 28 \text{ kg/kmol}\,.$$

$$p = \frac{mR^*T}{VM} = p_{\mathrm{O_2}} + p_{\mathrm{N_2}} = \frac{m_{\mathrm{O_2}}R^*T}{VM_{\mathrm{O_2}}} + \frac{m_{\mathrm{N_2}}R^*T}{VM_{\mathrm{N_2}}}\,.$$

Podana imamo masna deleža: $m_{\mathrm{O_2}} = m \cdot 0{,}24\,, \quad m_{\mathrm{N_2}} = m \cdot 0{,}76.$

Od tod dobimo $\frac{1}{M} = \frac{0{,}24}{M_{\mathrm{O_2}}} + \frac{0{,}76}{M_{\mathrm{N_2}}}$,

$$M = 28{,}866 \text{ kg/kmol}\,.$$

2.2 Kolikšna je masa zraka v prostoru dimenzij 10 m × 10 m × 3 m, če je zračni tlak 1013 mbar, temperatura pa 25 °C? [Rešitev]

2.3 Kolikšna je molska masa vlažnega zraka, v katerem je delni tlak vodne pare 15 mbar, skupni zračni tlak (vsota suhega zraka in vodne pare) pa je 1010 mbar? [Rešitev]

2.4 Kolikšna je gostota suhega zraka, če je zračni tlak 1000 mbar, temperatura pa 30 °C (−16 °C)? [Rešitev]

2.5 Za koliko se spremeni gostota zraka, če se z nadmorske višine 1500 metrov, kjer je temperatura 20 °C in zračni tlak 855 mbar, spustimo na višino 450 m, kjer je tlak 960 mbar, temperatura pa 30 °C? [Rešitev]

2.6 Kolikšna je masa argona v sobi, kjer je temperatura 15 °C, zračni tlak 1000 mbar, soba pa ima volumen 100 m^3? Masni delež argona v zraku je 1,28 %. [Rešitev]

2.7 Oceni maso ozračja. [Rešitev]

3 Hidrostatika

3.1 Na nivoju morja so izmerili zračni tlak 1005 mbar in temperaturo 15 °C. Izračunaj tlak na višini 4000 m v naslednjih dveh primerih:

a) Atmosfera je izotermna (temperatura se z višino ne spreminja),

b) Temperatura z višino linearno pada za 5 K/km.

Rešitev:

a) Ker je atmosfera izotermna, uporabimo enačbo:

$$p = p_0 \cdot \mathrm{e}^{-\frac{g(z-z_0)}{RT}},$$

kjer je p_0 zračni tlak na morskem nivoju (1005 mbar), z_0 pa nadmorska višina morskega nivoja (0 m).

$$p = 625 \text{ mbar}.$$

b) Ker se temperatura z višino spreminja linearno, uporabimo enačbo:

$$p = p_0 \cdot \left[1 + \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right) \frac{z - z_0}{T_0}\right]^{-\frac{g}{R\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)}},$$

kjer za $\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)$ vstavimo $-0,005$ K/m, ker temprature z višino pada. p_0, z_0 in T_0 so zračni tlak, nadmorska višina (0 m) in temperatura na morskem nivoju.

$$p = 614 \text{ mbar}.$$

3.2 Izračunaj višino, na kateri je zračni tlak 10 mbar za spodnje primere. Za vse primere upoštevaj, da je na morskem nivoju zračni tlak 1013 mbar in temperatura 273 K.

a) Homogena atmosfera (gostota zraka je z višino konstantna).

b) Izotermna atmosfera.

c) Atmosfera, kjer temperatura z višino pada za 6,5 K/km.

Rešitev:

a)

$$\Delta z = \frac{\Delta p}{\rho g} = 7908 \text{ m},$$

b)

$$\Delta z = \frac{RT}{g} \ln\frac{p_0}{p} = 36884 \text{ m},$$

c)

$$\Delta z = \frac{T_0}{\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)} \left[\left(\frac{p_1}{p_0}\right)^{-\frac{R\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)}{g}} - 1\right] = 24548 \text{ m}.$$

3.3 Izračunaj razmerje zračnih tlakov na višinah 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 km v primerjavi s tlakom pri tleh v ozračju, kjer pada temperatura z višino linearno z gradientom $-0{,}01$ K/m in je temperatura pri tleh 10 °C? [Rešitev]

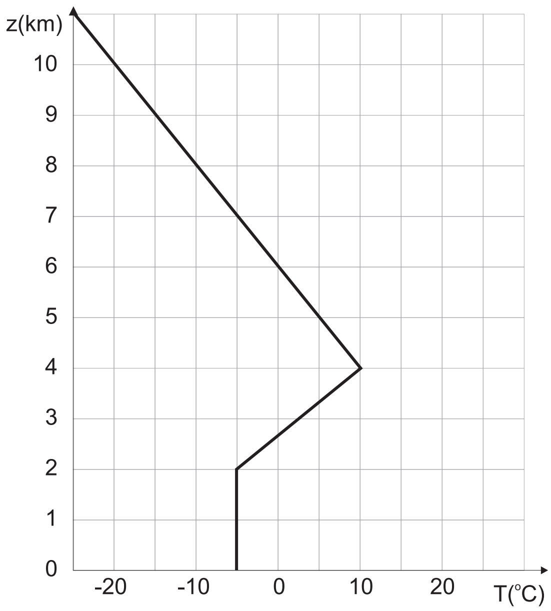
3.4 Izračunaj višino 10 mbar ploskve za atmosfero, kjer je pri tleh temperatura 15 °C in zračni tlak 1013 mbar. Med 0 m in 100 m temperatura naraste za 2 K, od 100 m do 1000 m temperatura pade za 7 K, nad to višino do 3000 m je temperatura stalna, od tod navzgor pa pada za 6,5 K/km do tropopavze na 12 km. Od tu navzgor je temperatura konstantna. [Rešitev]

3.5 Na višini 1500 m je zračni tlak enak 850 mbar. Izračunaj tlak pri tleh v naslednjih dveh primerih: [Rešitev]

a) Temperatura se od tal navgor znižuje za 5 K/km, na višini 1500 m je -7 °C.

b) Do višine 300 m nad tlemi leži hladen zrak s temperaturo -1 °C. Na tej višini temperatura skokovito (nezvezno) naraste na 4 °C in nato z višino pada za 8 K/km.

3.6 Meteorološki balon izmeri vertikalni profil temperature od morskega nivoja navzgor, kot je viden na naslednjem grafu. Neodvisno od tega pa meterološka postaja na nadmorski višini 2 km izmeri temperaturo -5 °C in zračni tlak 850 mbar. [Rešitev]



a) Kolikšen je zračni tlak ob morski gladini?

b) Kolikšen je zračni tlak na višini 4 km? Kakšna je tam gostota zraka?

c) Kolikšen je zračni tlak na višini 9 km?

d) Na kateri nadmorski višini bi bil zračni tlak 850 mbar, če bi veljala standardna atmosfera?

3.7 Določi debelino zračne plasti med tlakom na spodnji meji 779 mbar in tlakom na zgornji meji 545 mbar, če je plast izotermna s temperaturo 273 K. [Rešitev]

3.8 Na kateri višini je zračni tlak 700 mbar, če je pri tleh na nadmorski višini 207 m tlak 1000 mbar in v vmesni plasti temperatura pada z višino z gradientom 6,5 K/km, temperatura pri tleh pa je 22 °C? [Rešitev]

3.9 Kako visoko je ploskev 300 mbar v standardni atmosferi? [Rešitev]

3.10 V letalu je višinomer, ki dela na podlagi merjenja zračnega tlaka. Nastavljen je po standardni atmosferi ICAO ($p_0 = 1013$ mbar, $T_0 = 15$ °C, $\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right) = -6{,}5$ K/km) in kaže 9000 m. Kakšna je prava višina letala nad območjem, kjer je zračni tlak na morskem nivoju 980 mbar, temperatura 0 °C, temperatura pa z višino pada v povprečju za 8 K/km? [Rešitev]

3.11 Ko se je planinec odpravljal iz Aljaževega doma v Vratih (nadmorska višina 1015 m) ob zračnem tlaku 880 mbar, je nastavil svoj višinomer in pogledal na termometer, ki je kazal 15 °C. Ko je prisopihal na Kredarico, je bila tam temperatura 5 °C in opazovalec mu je rekel, da je že ves dan precej stalna. Njegov višinomer je kazal 2500 m. Za koliko se je med tem spremenil zračni tlak na Kredarici, ki je v resnici 2515 m visoko? [Rešitev]

3.12 Kako debela in na kakšni višini je plast zraka med 900 mbar in 800 mbar v ozračju, kjer je na morskem nivoju 1000 mbar in je tam temperatura 10 °C, od tam dalje pa pada za 5 K/1000 m? [Rešitev]

3.13 Letalo kroži nad Portorožem, tam namerijo temperaturo 5 °C in zračni tlak 1020 mbar. Ničelna vrednost višinomera, ki je skonstruiran glede na standardno atmosfero ICAO, je nastavljena na ta tlak in višinomer kaže, da je letalo 3000 m visoko. Ker piha burja, je zrak v spodnji plasti troposfere dobro premešan, tako da temperatura pada z višino za 9 K/km. Kakšna je resnična višina letala? [Rešitev]

3.14 Za koliko se stanjša plast zraka nad tlemi med 1000 mbar in 950 mbar in za koliko se zmanjša temperatura, če čez noč celotna plast zaradi sevanja odda 1 MJ/m^2? [Rešitev]

3.15 Za koliko se dvigne izobarna ploskev 950 mbar, če se plast zraka med tlemi, kjer je zračni tlak 1013 mbar, segreje zaradi sončnega sevanja tako, da se v plasti absorbira 6 kWh energije na vsak kvadratni meter? [Rešitev]

3.16 Koliko nižje je zračni tlak 925 mbar nad Ljubljani kot nad Koprom? V ozračju je standardni padec temperature z višino $-6,5$ K/km, v Kopru je tlak 1009 mbar in temperatura 14 °C, v Ljubljani pa je dejanski tlak 975 mbar in enaka temperatura kot v Kopru. Ljubljana leži 300 m nad morjem. [Rešitev]

3.17 Kolikšen je zračni tlak, če je višina stolpca živega srebra na barometru 732,5 mm, temperatura pa 15 °C? Gostota živega srebra je 13,5 kg/l. [Rešitev]

3.18 Kolikšna je napaka pri preračunu zračnega tlaka na morski nivo na meteorološki merilni postaji, ki je 300 m nad morjem, če je izmerjena temperatura 288 K, povprečna temperatura meteorološke postaje do nivoja morja pa je za 1 K višja? [Rešitev]

3.19 Pri nas zračni tlak preračunavamo na morski nivo tako, da upoštevamo na meteorološki postaji izmerjeno temparaturo. Za visoko ležeče postaje bi tak način preračuna povzročil veliko napako, zato za te postaje zračni tlak preračunavajo drugače. Na Kredarici (nadmorska višina 2515 m) tako določijo višino ploskve 700 mbar. Kakšen je zračni tlak na Kredarici, če je izmerjena temperatura 4 °C, s tem podatkom določena višina ploskve 700 mbar pa je 3000 m? [Rešitev]

3.20 Kako se spreminja temperatura z višino v homogeni atmosferi? [Rešitev]

3.21 V kotlinah je jezero hladnega zraka pozimi pogost pojav. Naj bo pri tleh temperatura -5 °C, v spodnjih 300 m ozračja pa naj bo inverzija z naraščanjem temperature z višino za 0,001 K/m. Nad to višino je v ozračju vertikalni gradient enak kot pri standrdni atmosferi. Koliko vpliva inverzija na preračun zračnega tlaka na morski nivo, če je dno kotline 300 m nad morjem? [Rešitev]

3.22 Kolikšen je geopotencial 500 mbar ploskve pri standardni atmosferi? [Rešitev]

4 Osnovni zakoni

4.1 Izračunaj velikost horizontalne komponente Coriolisovega pospeška na različnih geografskih širinah (10°, 30°, 50° in 80°) za hitrost gibanja 10 m/s.

Rešitev:

Horizontalna komponenta Coriolisovega pospeška se zapiše kot fV, kjer je V velikost hitrosti vetra, f Coriolisov parameter. $f = 2\Omega \sin\varphi$, kjer je Ω kotna hitrost vrtenja Zemlje in φ zemljepisna širina.

$$\begin{aligned}
fV(\varphi = 10°) &= 2,52 \cdot 10^{-4}\ \mathrm{m/s^2},\\
fV(\varphi = 30°) &= 7,27 \cdot 10^{-4}\ \mathrm{m/s^2},\\
fV(\varphi = 50°) &= 1,11 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{m/s^2},\\
fV(\varphi = 80°) &= 1,43 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{m/s^2}.
\end{aligned}$$

4.2 Pri katerem radiju kroženja zraka je pri 30° N in pri hitrosti 15 m/s centrifugalna sistemska sila v naravnem koordinatnem sistemu enaka 10 % Coriolisove sile? [Rešitev]

4.3 Zrak se giblje horizontalno proti severovzhodu s hitrostjo 25 m/s. Kam kaže horizontalna komponenta Coriolisove sile in kako je velika pri 60° N? [Rešitev]

4.4 Za koliko lažjega se počuti planinec, ki se je povzpel na Kilimandžaro, ki je visok 5800 m in je na 2° N, če drugače biva na nadmorski višini 300 m in pri 50° N? [Rešitev]

4.5 Koliko manj pokaže tehtnica, če se človek tehta na vlaku, ki vozi po Sloveniji s hitrostjo 120 m/s proti zahodu? Koliko pa, če se z isto hitrostjo vozi vzdolž ekvatorja? [Rešitev]

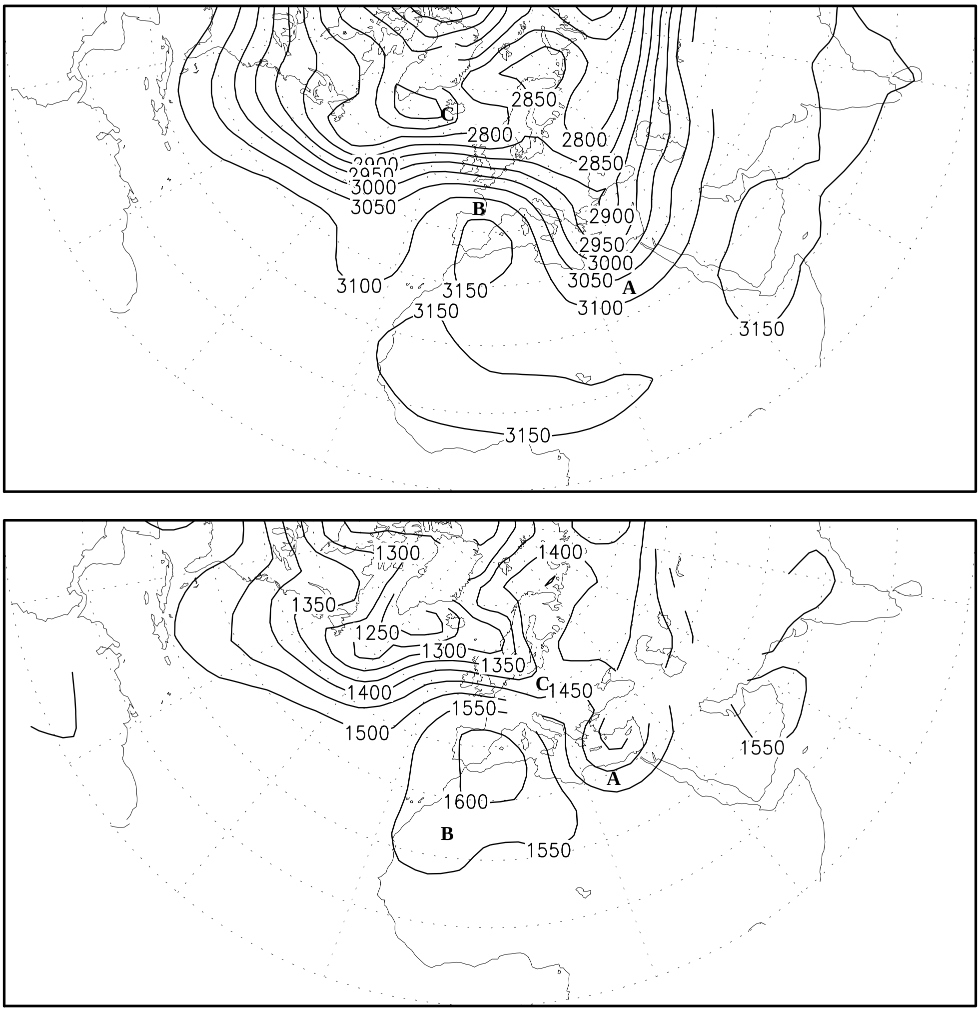
4.6 Kakšno je razmerje vertikalne in horizontalne komponente gradientne sile pri tleh, če je atmosfera standardna, v horizontalni smeri pa se zračni tlak spremeni za 3 mbar na razdalji 180 km? [Rešitev]

4.7 Kolikšen naj bo volumen toplozračnega balona, v katerem je temperatura zraka 50 °C, da vzdigne sebe in košaro s skupno maso 300 kg? Temperatura zraka v okolici je 10 °C, zračni tlak pa 1020 mbar. [Rešitev]

4.8 V treh točkah (A, B in C) na karti 700 mbar in 850 mbar ploskve izračunaj:

a) velikost specifične horizontalne gradientne sile in jo primerjaj z vertikalno,

b) specifično centrifugalno sistemsko silo.



Višina 700 mbar (zgoraj) in 850 mbar (spodaj) ploskev v metrih.

Poldnevniki so razmaknjeni za 20°, vzporedniki pa za 10°. Poznamo tudi temperature v omenjenih točkah:

p [mbar]	T_A [K]	T_B [K]	T_C [K]
700	273	272	255
850	278	290	262

Rešitev:
Izračunamo gostoto zraka:

p [mbar]	ρ_A [kg/m^3]	ρ_B [kg/m^3]	ρ_C [kg/m^3]
700	0,9	0,8	0,96
850	1,06	1,02	1,13

Specifično horizontalno gradientno silo izračunamo z razdaljo med sosednjima izohipsama ploskve konstantnega zračnega tlaka:

$$-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial n} = -\frac{\partial \Phi}{\partial n}\,.$$

Vertikalno komponento izračunamo s hidrostatično enačbo:

$$-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z} = g\,.$$

Specifično centrifugalno silo izračunamo posredno preko gradientnega vetra.

a) 700 mbar

točka	R [km]	f [s^{-1}]	V [m/s]	$-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial n}$ [m/s^2]	$-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z}$ [m/s^2]	$\frac{V^2}{R}$
A	1000	$8{,}3 \cdot 10^{-5}$	12,8	$1{,}22 \cdot 10^{-3}$	9,81	$1{,}6 \cdot 10^{-4}$
B	-900	$1{,}0 \cdot 10^{-4}$	20,7	$1{,}63 \cdot 10^{-3}$	9,81	$4{,}8 \cdot 10^{-4}$
C	500	$1{,}3 \cdot 10^{-4}$	8,4	$1{,}22 \cdot 10^{-3}$	9,81	$1{,}4 \cdot 10^{-4}$

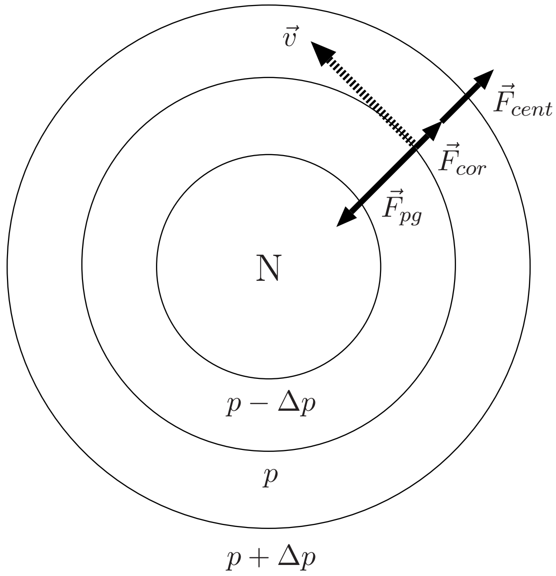
b) 850 mbar

točka	R [km]	f [s^{-1}]	V [m/s]	$-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial n}$ [m/s^2]	$-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z}$ [m/s^2]	$\frac{V^2}{R}$
A	1000	$7,3 \cdot 10^{-5}$	14,1	$1{,}22 \cdot 10^{-3}$	9,81	$2{,}0 \cdot 10^{-4}$
B	-1000	$6{,}2 \cdot 10^{-5}$	6,9	$3{,}7 \cdot 10^{-4}$	9,81	$4{,}8 \cdot 10^{-5}$
C	500	$1{,}2 \cdot 10^{-4}$	7,5	$9{,}8 \cdot 10^{-4}$	9,81	$1{,}1 \cdot 10^{-4}$

5 Vetrovi

5.1 Nariši ravnotežje sil v naravnem koordinatnem sistemu in hitrosti, ki velja nad morjem (zanemari trenje) v krožnem območju nizkega zračnega tlaka. Napiši še enačbo za določitev velikosti hitrosti vetra!

Rešitev:



Iz ravnovesja treh sil dobimo naslednjo enačbo:

$$\begin{aligned} \vec{F}_{cent} + \vec{F}_{cor} + \vec{F}_{pg} &= 0\,, \\ \frac{V^2}{R} + fV - \frac{1}{\rho}\left|\frac{\partial p}{\partial n}\right| &= 0\,. \end{aligned}$$

Od tod izrazimo V (fizikalno smiselna je le pozitivna rešitev):

$$V_{1,2} = \frac{1}{2}\left(-fR + \sqrt{f^2R^2 + 4\frac{R}{\rho}\left|\frac{\partial p}{\partial n}\right|}\right)\,.$$

5.2 Koliko se veter odkloni od izobar v krožnem območju nizkega zračnega tlaka, če ne zanemariš trenja. Koeficient trenja je 0.00001 s^{-1}, radialna komponenta gradienta tlaka 2 mbar/100 km in gostota zraka je 1 kg/m^3. Ciklon je na 45° N. Kolikšna je hitrost vetra na razdalji 300 km od središča?

Rešitev:

V ciklonu se zaradi trenja veter odkloni proti središču. Če izenačimo komponenti sil v dveh smereh, dobimo:

$$\begin{aligned} fV + \frac{V^2}{R} &= \frac{1}{\rho}\left|\frac{\partial p}{\partial n}\right| \cos\beta\,, \\ kV &= \frac{1}{\rho}\left|\frac{\partial p}{\partial n}\right| \sin\beta\,. \end{aligned}$$

Privzamemo, da je β majhen, potem velja: $\cos\beta \approx 1$ in $\sin\beta \approx \beta$. Iz prve enačbe izrazimo hitrost vetra, ki je enaka kot za primer brez trenja. Hitrost je 13,5 m/s. Iz druge enačbe izrazimo odklon:

$$\beta = \frac{kV\rho}{\left|\frac{\partial p}{\partial r}\right|} = 0{,}068 \text{ radian} = 4^\circ.$$

Če kot β ni majhen, pa je treba sistem zgornjih enačb rešiti numerično.

5.3 Po kolikšnem radiju piha v ciklonu veter s hitrostjo 8 m/s, če je gradient zračnega tlaka v radialni smeri 1 mbar/100 km. Trenja ne upoštevaj, gostota zraka pa je 1 kg/m^3. Privzemi geografsko širino 45° N. [Rešitev]

5.4 Izračunaj hitrost vetra v anticiklonu pri 45° N, ko je gradient zračnega tlaka 2 mbar/400 km, radij ukrivljenosti izobar pa 400 km. Gostota je 0,7 kg/m^3. [Rešitev]

5.5 V anticiklonu kroži zrak v standardni atmosferi na 45° N po radiju 1000 km na ploskvi z zračnim tlakom 500 mbar s hitrostjo 20 m/s. Kolikšen horizontalni gradient tlaka določa to gibanje? [Rešitev]

5.6 Kako močan je geostrofski veter, če smo na 30° N, velikost gradienta tlaka je 2 mbar/100 km in gostota 0,5 kg/m^3?

Rešitev:

Geostrofsko ravnovesje velja, ko sta uravnovešeni gradientna sila tlaka in Coriolisova sila.

$$\begin{aligned} fV_g &= \frac{1}{\rho}\left|\frac{\partial p}{\partial n}\right|\,, \\ V_g &= \frac{1}{\rho f}\left|\frac{\partial p}{\partial n}\right| = 55 \text{ m/s}\,. \end{aligned}$$

5.7 V polju ravnih izobar v naših geografskih širinah (46° N, 15° E) piha veter s hitrostjo 30 km/h in je za 15° odklonjen od smeri izobar. Pod vplivom katerih sil piha? Kako so velike? Kolikšen je gradient zračnega tlaka? Gostota zraka je 0,5 kg/m^3. [Rešitev]

5.8 Izračunaj veter v ciklonu pri 70° N, ko je gradient zračnega tlaka 4 mbar/450 km, radij ukrivljenosti izobar pa 400 km. Gostota zraka je 0,7 kg/m^3. [Rešitev]

5.9 Kakšno je razmerje hitrosti med gradientnim vetrom v ciklonu in geostrofskim vetrom, če je gradient 1 mbar/100 km radij pa 1500 km (pri 50° N)? Gostota zraka je 1 kg/m^3. [Rešitev]

5.10 Na vremenski karti, narisani v merilu 1 : 50 000 000 na geografski širini 60 °N, je razdalja med dvema sosednjima izobarama 1 cm. Izobare so narisane na vsakih 4 mbar. Kakšen je gradient tlaka in kakšen geostrofski veter ustreza temu polju? Kakšen bi bil veter ob enakem razmaku med izobarama pri 50° N. Smer vetra pri tej nalogi ni pomembna. Gostota zraka je 1 kg/m^3. [Rešitev]

5.11 V polju ravnih izobar piha veter pri 60° N nad obširno ravnino. Gradient zračnega tlaka je 2 mbar/150 km, tla so enakomerno hrapava, tako da je koeficient linearnega trenja 10^{-4} s^{-1}. Gostota zraka je 1 kg/m^3. Nariši ravnotežje sil, določi velikost specifičnih sil in izračunaj hitrost vetra! [Rešitev]

5.12 Veter je pri tleh zaradi trenja za 30° odklonjen na levo od ravnih izobar. Te so narisane na 5 mbar in so med seboj razmaknjene za 200 km. Koeficient linearnega trenja je 10^{-4} s^{-1}. Kolikšna je hitrost vetra in kako velike so sile, ki drže ravnovesje pri takem vetru? Gostota zraka je 0,7 kg/m^3. [Rešitev]

5.13 Kolikšna je razlika zračnih tlakov med točko na obrobju in središčem tropskega ciklona (hurricane), če na obrobju, 500 km od središča, piha veter s hitrostjo 200 km/h, tlak pa proti središču pada enakomerno. Kolikšne so tlačne razlike, če predpostaviš, da na hitrost vpliva tudi sila trenja, odvisna od kvadrata hitrosti? Koeficient kvadratnega trenja je 10^{-7} m^{-1}. Gostota zraka je v obeh primerih 1 kg/m^3. [Rešitev]

5.14 Kolikšen je zračni tlak v središču tropskega ciklona, če na obrobju, 400 km od središča, piha veter s hitrostjo 150 km/h, tlak pa je 970 mbar. Tlačno polje v ciklonu je parabolično z minimumom v središču. Gostota zraka je 1 kg/m^3. [Rešitev]

5.15 Na višini 5500 m okoli Zemlje piha valoveči zahodni veter. Na 30 °N je dolina, kjer zrak kroži po delu krožnice z radijem 1000 km in piha veter s hitrostjo 20 m/s. Kolikšen mora biti radij kroženja v grebenu, na 60° N, če naj bo tam hitrost enaka? [Rešitev]

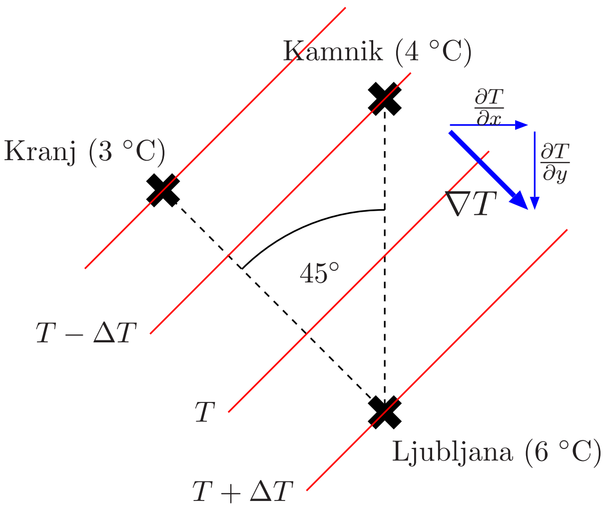
5.16 Tornado naj se togo vrti (kotna hitrost ni odvisna od radija). Kakšno je polje zračnega tlaka okoli središča tornada, če je gostota zraka povsod enaka (horizontalna in vertikalna homogenost)? [Rešitev]

5.17 Os tornada je nagnjena za 30 stopinj glede na vertikalo. Kakšna mora biti hitrost kroženja 100 m stran od osi vrtenja, če se tam zračni tlak z višino nič ne spreminja? [Rešitev]

6 Lokalne, individualne in advektivne spremembe

6.1 V Ljubljani je temperatura 6 °C, v Kranju, ki leži 20 km severozahodno od Ljubljane, pa 3 °C. Kamnik leži 20 km severno od Ljubljane, tam je temperatura 4 °C. Ozračje je mirno, temperaturno polje pa se krajevno povsod spreminja linearno (temperaturno polje lahko zapišemo z enačbo $T = T_0 + ax + by$). Kakšen je in kam kaže temperaturni gradient? Nariši skico polja temperature z izotermami.

Rešitev:



Da bi lahko izračunali gradient, moramo določiti konstante T_0, a in b. Podane imamo tri temperature. Če te vstavimo v enačbo temperaturnega polja ($T = T_0 + ax + by$), dobimo tri linearne enačbe za tri neznanke.

Izhodišče kordinatnega sistema ($x = 0$, $y = 0$) postavimo v Ljubljano in iz znane temperature ($T_{LJ} = 6$ °C) izračunamo $T_0 = 6$ °C. Iz podatkov za Kamnik ($T_{KM} = 4$ °C, $x = 0$, $y = 20$ km) dobimo $b = -0,10$ K/km. Iz podatkov za Kranj ($T_{KR} = 3$ °C, $x = -20$ km $\cos 45$ °, $y = 20$ km $\sin 45$ °) pa $a = 0,11$ K/km.

Gradient je

$$\nabla T = \left(\frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y}\right) = (a, b) = (0,11 \text{ K/km}, -0,1 \text{ K/km})\,.$$

6.2 Polje zračnega tlaka lahko opišemo s funkcijo:

$$p = p_0 + a \cdot y\,,$$

kjer je $p_0 = 1000$ mbar in $a = -2$ mbar/100 km. Izračunaj gradient zračnega tlaka. Nariši polje tlaka z izobarami in vriši v to polje vektorje gradienta. Kolikšen je tlak v točki, ki ima koordinate $x = 100$ km, $y = 200$ km? [Rešitev]

6.3 Nad morjem je polje zračnega tlaka opisano s funkcijo:

$$p = p_0 + ay + bx^2,$$

kjer so $p_0 = 1000$ mbar, $a = -2$ mbar/100 km in $b = 3 \cdot 10^{-4}$ mbar/km^2. Izračunaj gradient zračnega tlaka. Nariši polje tlaka z izobarami in vriši v to polje vektorje gradienta. Kolikšen je tlak v točki, ki ima koordinate $x = 100$ km, $y = 100$ km? [Rešitev]

6.4 Nad morjem polje zračnega tlaka opišemo s funkcijo:

$$p = p_0 + a(y - y_0) + b(x - x_0)\,,$$

kjer so $x_0 = 500$ km, $y_0 = 300$ km, $a = 1$ mbar/100 km, $b = 0{,}5$ mbar/100 km in $p_0 = 1010$ mbar. Nariši polje zračnega tlaka z intervalom med izobarami 2 mbar. Analitično izračunaj gradient tlaka. Nariši vektor gradienta tlaka na sliki polja tlaka. Koliko znaša tlak v točki s koordinatama $x = 300$ km, $y = -100$ km? [Rešitev]

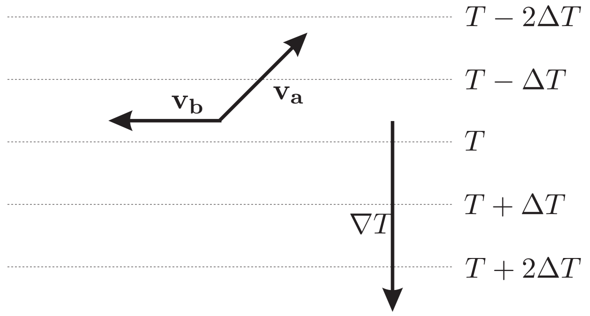
6.5 Nad Slovenijo pada temperatura od juga proti severu za 3 K/100 km. Za koliko se bo spremenila temperatura v treh urah, če:

a) piha jugozahodnik s hitrostjo 10 m/s,

b) piha vzhodnik s hitrostjo 10 m/s.

Rešitev:

Polje temperature, temperaturni gradient (∇T) in vektorja vetra ($\mathbf{v_a}$ in $\mathbf{v_b}$) so videti kot na spodnji skici.



Temperaturni gradient vedno kaže v smeri največjega naraščanja in ima v našem primeu komponento le v smeri y. Zapišemo ga kot $\nabla T = (0, -3\ \ \mathrm{K}/100\ \ \mathrm{km})$.

Podobno sestavimo tudi vektor vetra za primer a:

$$\mathbf{v_a} = (10 \cdot \cos 45^\circ\ \mathrm{m/s}, 10 \cdot \sin 45^\circ\ \mathrm{m/s}) = (5\sqrt{2}\ \mathrm{m/s}, 5\sqrt{2}\ \mathrm{m/s})\,.$$

Sedaj uprabimo enačbo, ki povezuje lokalne, individualne in advektivne spremembe. V našem primeru je individualna sprememba ($\frac{dT}{dt}$) enaka nič, ker se zrak ne segreva oziroma ohlaja.

$$\begin{aligned}
\frac{\partial T}{\partial t} &= \frac{dT}{dt} - \mathbf{v_a}\nabla T = -\mathbf{v_a}\nabla T = \\
&= -(5\sqrt{2}\ \mathrm{m/s}, 5\sqrt{2}\ \mathrm{m/s}) \cdot (0,\ -3\ \ \mathrm{K/100\ \ km}) = \\
&= -5\sqrt{2}\ \mathrm{m/s} \cdot 0 - 5\sqrt{2}\ \mathrm{m/s} \cdot (-3\ \ \mathrm{K/100\ \ km}) = \\
&= 0{,}764\ \mathrm{K/h}
\end{aligned}$$

V treh urah se bo temperatura spremenila za:

$$\Delta T = \frac{\partial T}{\partial t}\Delta t = 0{,}764\ \mathrm{K/h} \cdot 3\ \mathrm{h} = 2{,}3\ \mathrm{K}\,.$$

Za drugi primer (piha vzhodnik) na podoben način sestavimo vektor vetra $\mathbf{v_b} = (-10\ \ \mathrm{m/s}, 0)$. Temperatura se v tem primeru ne bo spreminjala, saj sta $\mathbf{v_b}$ in ∇T medsebojno pravokotna.

6.6 Nad nekim območjem pada temperatura proti severu 1 K/100 km in piha veter iz jugozahodne smeri s hitrostjo 10 m/s. Kako se nad točko sredi tega območja spreminja temperatura, če ni nobenih njenih individualnih sprememb? Kako hitro bi moral pihati veter iz južne smeri, da bi se temperatura v isti točki spreminjala enako? [Rešitev]

6.7 Kako hitro se spreminja temperatura na meteorološki postaji, če je tam oblačno vreme, piha jugozahodnik s hitrostjo 12 km/h, temperatura v ozračju pa pada od juga proti severu: 100 km proti jugu je temperatura 12 °C, 50 km proti severu pa 6 °C? [Rešitev]

6.8 Ladja pluje naravnost z otoka na otok. Prvi otok leži na 14° E in 38° N, drugi pa na 15° E in 39° N. Na ladji izmerijo, da se je v treh urah temperatura zvišala za 1 K. Ladja pluje s hitrostjo 12 vozlov (6 m/s). Kolikšna je temperatura na drugem otoku, če je na prvem otoku temperatura 22 °C, temperatura med otokoma pa se spreminja enakomerno in je ozračje mirno? [Rešitev]

6.9 Nad Slovenijo raste temperatura od severovzhoda proti jugozahodu za 5 K/100 km. Zrak pri tleh se zaradi prejete energije sončnega sevanja segreva za 3 K/h. Kakšna bo temperatura čez 2 uri, če je sedaj 15 °C in piha južni veter s hitrostjo 10 m/s? [Rešitev]

6.10 Nad Evropo je temperaturno polje, ki ga lahko opišemo z enačbo

$$T = T_0(ax^2 + bxy^2 + c).$$

Temperaturo so izmerili na treh krajih: $T(x = 20\text{ km}, y = 100\text{ km}) = 10\text{ °C}$, $T(x = -200\text{ km}, y = 100\text{ km}) = 5\text{ °C}$ in $T(x = 100\text{ km}, y = -150\text{ km}) = -7\text{ °C}$. Kako hitro se spreminja temperatura na lokaciji $x = 100$ km, $y = 100$ km, če tam piha severozahodnik 15 m/s? [Rešitev]

6.11 Letalo leti na višini 12 km in njegova pot seka srednje velik ciklon. Letalo se središču ciklona najbolj približa na 1500 km. Sredi ciklona je hladen zrak, v okolici pa je zrak vse toplejši. Ko je letalo 2000 km stran od središča, nameri temperaturo −55 °C, ko pa je središču najbližje, nameri −58 °C. Kolikšen je gradient temperature v radialni smeri, če predpostaviš, da je ciklon krožno simetričen? [Rešitev]

7 Vlažnost

7.1 Relativna vlaga v prostoru je 70 %, temperatura pa 18 °C. Zračni tlak je 1000 mbar. Kolikšni so a) delni tlak vodne pare, b) absolutna vlaga, c) specifična vlaga, d) razmerje mešanosti in e) temperatura rosišča?

Rešitev:

a) Prvi korak je izračun nasičenega parnega tlaka (ta je odvisen samo od temperature) s Claussius-Clapeyronovo enačbo:

$$e_s(T) = e_{s0} e^{\frac{h_i}{R_v}\left(\frac{1}{T_0}-\frac{1}{T}\right)} = 20{,}84\ \text{mbar}\,,$$

kjer sta $e_{s0} = 6,1$ mbar in $T_0 = 273$ K. h_i in R_v sta izparilna toplota in specifična plinska konstanta za vodno paro (2,5 MJ/kg in 461 J/kgK).

Podano imamo relativno vlago $f = 70$ %, torej je parni tlak 70 % nasičenega parnega tlaka:

$$e = e_s \cdot f = 14,59\ \text{mbar}.$$

b) Absolutna vlaga je gostota vodne pare ρ_v, za kar uporabimo plinsko enačbo:

$$\rho_v = \frac{e}{R_v T} = 0,0108\ \text{kg/m}^3\,.$$

c) Specifična vlaga q je masna koncentracija vodne pare v zraku:

$$q = \frac{m_v}{m} = \frac{\rho_v}{\rho} = \frac{e}{p}\frac{R}{R_v} = 9{,}08\ \text{g/kg}\,.$$

d) Razmerje mešanosti je definirano kot razmerje med maso vodne pare in suhega zraka:

$$r = \frac{m_v}{m_z} = \frac{\rho_v}{\rho_z} = \frac{e}{p-e}\frac{R}{R_v} = 9{,}21\ \text{g/kg}\,.$$

e) Temperatura rosišča T_d je definirana kot temperatura, pri kateri bi trenutni parni tlak ($e = 14,59$ mbar) postal nasičen. Zopet uporabimo Claussius-Clapeyronovo enačbo, le da izrazimo T in za e_s upošteva trenutni parni tlak $e = 14,59$ mbar (T postane T_d, ko $e = e_s$).

$$T_d = \left(\frac{1}{T_0} - \frac{R_v}{h_i}\ln\frac{e}{e_{s0}}\right)^{-1} = 285{,}5\ \text{K}\,.$$

7.2 Določi relativno vlago, če je temperatura 5 °C, temperatura rosišča pa −5 °C! Zračni tlak je 1000 mbar. [Rešitev]

7.3 Izračunaj temperaturo rosišča v naslednjih razmerah: temperatura zraka je 18 °C, zračni tlak je 990 mbar in relativna vlaga je 65 %. [Rešitev]

7.4 Kolikšna je temperatura rosišča, če je relativna vlaga 60 %, temperatura zraka -15 °C, zračni tlak pa 1000 mbar? [Rešitev]

7.5 Za koliko je lažji oziroma težji en kubični meter vlažnega zraka z 90 % relativno vlago od zraka, v katerem je relativna vlaga le 10 %? Temperatura obeh je 20 °C, zračni tlak pa 1000 mbar. [Rešitev]

7.6 Kolikšna je masa vodne pare v prostoru, visokem 3 m, dolgem 6 m, širokem 5 m, kjer je temperatura 22 °C, zračni tlak 990 mbar in parni tlak 13 mbar? [Rešitev]

7.7 Kolikšna je gostota zraka pri tleh, če je tam zračni tlak 1020 mbar, temperatura pa je 13 °C. Kolikšna je gostota, če je v tem zraku 70 % relativna vlaga? [Rešitev]

7.8 Kolikšna je specifična vlažnost, če je parni tlak 5 mbar, gostota zraka 1,1 kg/m^3, temperatura zraka pa 10 °C? [Rešitev]

7.9 Kolikšna je nasičena specifična vlažnost pri 1000 mbar ter temperaturah 30 °C in -15 °C? [Rešitev]

7.10 Za koliko se relativno spremeni relativna vlaga, če se v normalnih razmerah: [Rešitev]

a) spremeni temperatura zraka za 3 K, parni tlak vodne pare pa nič?

b) spremeni parni tlak vodne pare za 1 %, temperatura pa ostane enaka?

7.11 Vlažen zrak, ki ima temperaturo 30 °C in parni tlak 10 mbar, ohlajamo. Pri kateri temperaturi pride do nasičenja? Koliko vode se kondenzira na enoto volumna zraka, ko zrak ohladimo do končne temperature -16 °C? [Rešitev]

7.12 Zrak ima relativno vlago 65 % in temperaturo 15 °C. Kakšna bo relativna vlaga po tem, ko se bo zrak izobarno segrel zaradi prejetja 5000 J sončne energije na vsak kilogram? Proces poteka pri tleh, zrak ima gostoto sprva 1 kg/m^3. [Rešitev]

7.13 Zvečer smo namerili temperaturo zraka 20 °C in 80 % relativno vlago. Predvidevamo, da se bo temperatura tik ob tleh čez noč znižala za 7 K. Ali se bo ponoči na tleh izločila rosa? [Rešitev]

7.14 Temperatura 20 m debele plasti zraka pri tleh je 20 °C in ta zrak ima temperaturo rosišča 10 °C. Tla so mokra in voda izhlapeva v zrak. Kolikšna je masa izhlapele vode z vsakega kvadratnega metra tal, če predpostaviš, da se je prizemni zrak nasitil in se ne meša z okolico? Tlak je 1000 mbar. [Rešitev]

7.15 Pozimi prezračimo stanovanje. V sobo, kjer je temperatura 20 °C in je 50 % relativna vlaga, spustimo zunanji zrak, ki ima temperaturo -5 °C in 90 % relativno vlago. Hladni zrak zamenja polovico prostornine toplega sobnega zraka, zrak se nato premeša in zmes se spet ogreje na 20 °C, zračni tlak pa je ves čas enak 1000 mbar. Kolikšna bo končna relativna vlažnost? [Rešitev]

7.16 Koliko vode mora izhlapeti iz evaporatorja, če želimo v prostoru, velikem 4 m $\times$ 3 m $\times$ 2,5 m, kjer je temperatura 25 °C in relativna vlaga 45 %, doseči 70 % vlago. V sobi je ves čas stalni zračni tlak 1000 mbar. [Rešitev]

7.17 Ob sončnem zahodu je temperatura zraka 15 °C, relativna vlažnost pa 80 %. Zrak se v jasni noči ohlaja za 1 K na uro. Ali se bosta v noči, ki je dolga deset ur, pojavili rosa in megla? [Rešitev]

7.18 Dve zračni gmoti se enakomerno zmešata tako, da je v vsakem kilogramu zraka točno pol kilograma zraka iz ene in pol kilograma zraka iz druge gmote. Mešanje poteka pri konstantnem zračnem tlaku 1000 mbar. Temperatura toplega zraka je 21 °C, hladnega pa 5 °C. Topli zrak je nasičen, v hladnem pa je relativna vlaga 80 %. Določi temperaturo po premešanju! Ali se je voda kondenzirala in če je, koliko vode se kondenzira? [Rešitev]

7.19 Zrak ima temperaturo 10 °C in zračni tlak je 1000 mbar. Koliko vode se kondenzira iz vsakega kubičnega metra nasičeno vlažnega zraka, če se ohladi za 1 K? [Rešitev]

7.21 Kolikšen je pri -12 °C nasičen parni tlak nad vodo in kolikšen nad ledom? [Rešitev]

7.22 Kolikšno je razmerje relativne vlage nad vodo in nad ledom pri temperaturi -5 °C? [Rešitev]

7.23 Kako se spreminja relativna vlažnost, če se temperatura pri tleh spreminja sinusno z amplitudo 10 K, maksimumom ob 14. uri in minimumom ob 8. uri po lokalnem času, povprečna temperatura pa je 15 °C. Specifična vlaga v zraku in zračni tlak sta konstantna, njuni vrednosti sta 3 g/kg in 1020 mbar. Kakšna bo relativna vlažnost ob 10. uri? [Rešitev]

7.24 Izračunaj relativno vlago, če izmeriš temperaturo suhega termometra 12 °C in temperaturo mokrega termometra 10 °C, zračni tlak pa je 960 mbar! [Rešitev]

7.25 Izračunaj temperaturo rosišča, če poznaš temperaturo suhega termometra 20 °C, temperaturo mokrega termometra 12 °C in je zračni tlak 1020 mbar! [Rešitev]

7.26 Izračunaj temperaturo mokrega termometra pri zračnem tlaku 1000 mbar, temperaturi 18 °C in relativni vlagi 65 %! [Rešitev]

7.27 Pri temperaturi 10 °C začne deževati z intenzivnostjo 5 mm/h. Na začetku dežja je most debeline 20 cm podhlajen in ima temperaturo -2 °C, zato na njem nastaja poledica. Specifična toplotna kapaciteta mostu je 800 J/kgK, gostota pa 2500 kg/m^3. Kapljice imajo enako temperaturo kot zrak. [Rešitev]

a) Koliko časa morajo padati kapljice, da se most segreje za 1 °C?

b) Koliko časa morajo padati kapljice, da poledica izgine?

7.28 Kolikšna je masa padavin, ki jo v treh urah preseže dežemer, nad katerim piha veter s hitrostjo 10 m/s, če je hitrost padanja deževnih kapljic 18 m/s, v vsakem kubičnem metru zraka pa je v tekočem stanju 1 g vode. Ploščina odprtine dežemera je 4 dm^2. Kaj pa če namesto kapljic padajo snežinke s hitrostjo 5 m/s? [Rešitev]

7.29 Izračunaj virtualno temperaturo zraka (T_v) pri 30 °C, če je specifična vlažnost 20 g/kg. Virtualna temperatura zraka je temperatura, ki bi jo pri danem pritisku imel suh zrak iste gostote kot obravnavan zrak. [Rešitev]

8 Adiabatne spremembe

8.1 Na kateri višini bo baza oblaka, ki nastane zaradi dviganja zraka, ki ima pri tleh temperaturo 15 °C in temperaturo rosišča 11,6 °C?

Rešitev:

Zrak, ki se dviga, se ohlaja za 10 K/km ($\Gamma_a = 10$ K/km). Γ_a je po definiciji vedno pozitivno predznačen, čeprav temperatura dvigajočega se zraka z višino pada. Pri uporabi Γ_a je torej treba biti pazljiv, saj je drugače predzančen kot $\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)$, da ne nastane napaka zaradi napačnega predznaka.

Poleg temperature se dvigajočemu se zraku spreminja tudi temperatura rosišča. Ta z višino pada približno za $\frac{1}{6}\Gamma_a$.

Baza oblaka je na višini, kjer se temperatura dvigajočega se zraka ohladi do temperature rosišča tega zraka:

$$\begin{aligned} T - \Gamma_a \cdot z_B &= T_d - \frac{1}{6}\Gamma_a \cdot z_B \\ z_B &= 0{,}4 \text{ km} \end{aligned}$$

8.2 Del zraka, ki je pri tleh pregret za 10 K nad temperaturo okolice, se dviga v standardni atmosferi. Kolikšen je 500 m nad tlemi hidrostatično neuravnoteženi del specifičnega vzgona?

Rešitev:

Temperatura zraka pri tleh v standardni atmosferi je $T_{00} = 288{,}15$ K in z višino pada za 6,5 K/km ($\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right) = -0{,}0065$ K/m).

Izračunamo temperaturo dvignjenega in okolišnjega zraka 500 m nad tlemi:

$$\begin{aligned} T_{ok} &= T_{00} + \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)\Delta z = 284,9 \text{ K}\,, \\ T &= T_0 - \Gamma_a \Delta z = 293,15 \text{ K}\,. \end{aligned}$$

Specifični vzgon je:

$$\frac{dw}{dt} = g\frac{T - T_{ok}}{T_{ok}} = 0,28 \text{ m/s}^2.$$

8.3 Zrak, ki ima pri tleh temperaturo 15 °C in specifično vlažnost 1,1 g/kg, se zaradi neuravnoteženega vzgona dviga do višine 6000 m. Na kateri višini postane zrak nasičeno vlažen in kolikšno temperaturo ima zrak na višini 6000 m? Nadmorska višina tal je 0 m, zračni tlak pri tleh pa 1000 mbar. Nagib nasičene adiabate je 7 K/km. [Rešitev]

8.4 Iz Radovljice vidimo, da je na pobočju Stola baza orografskega oblaka na 1700 metrih. Piha rahel južni veter, ki se iz Radovljice vzpenja po pobočju Stola. Kolikšna je relativna vlaga v Radovljici, če je temperatura zraka tam 15 °C? Nadmorska višina Radovljice je 450 m. [Rešitev]

8.5 Veter piha s hitrostjo 8 m/s vzdolž obsežnega pobočja, ki ima nagib 4°. Del dokaj suhega zraka opravi pot od vznožja do vrha hriba v 26 minutah. Kako se spremeni temperatura na vrhu pobočja potem, ko je začel pihati veter, če je bil sprva horizontalni gradient temperature zanemarljiv, vertikalna komponenta gradienta pa je bila 5 K/1000 m? Oceni še, kolikšna bi bila sprememba temperature, če bi bil zrak nasičeno vlažen. Upoštevaj približno vrednost nasičene adiabate $\Gamma_s = 6$ K/km. [Rešitev]

8.6 Veter piha iz doline po hribu navzgor. V dolini je temperatura 15 °C in relativna vlaga 80 %. Kolikšna je relativna vlaga 500 m nad dnom doline? [Rešitev]

8.7 Del zraka s temperaturo 17 °C in absolutno vlago 7 g/m^3 se adiabatno dviga. Za koliko se bo zmanjšala njegova absolutna vlaga, če se zrak dvigne za 1000 m, ne da bi z okolico izmenjal toploto ali vlago? [Rešitev]

8.8 Za koliko se spremeni relativna vlažnost zraka, ki se dvigne za 500 m pri stalni specifični vlagi 5 g/kg. Temperatura pri tleh je 20 °C in zračni tlak 1000 mbar. Izračunaj višino nivoja kondenzacije. [Rešitev]

8.9 Zrak se adiabatno dvigne od 1000 mbar in 28 °C do 850 mbar, kjer nastane kondenzacija. Kakšna je vlažnost zraka pri tleh? V 200 metrih nad nivojem kondenzacije pade temperatura za 1 K, zračni tlak pa za 18 mbar. Koliko gramov vode se kondenzira na enoto mase zraka pri dvigu za teh 200 m? [Rešitev]

8.10 Izračunaj višino proste konvekcije nenasičenega zraka, če je v atmosferi povprečni vertikalni temperaturni gradient 6,5 K/km in se nad nekim predelom zrak pregreje za 5 °C. [Rešitev]

8.11 Zjutraj so z letalom namerili, da je ozračje nad letališčem stabilno, s padcem temperature za 3 K na 1000 m. Temperatura pri tleh je bila 10 °C, rosišče pa 2 °C. Ob jasnem vremenu se je zrak čez dan segreval in ob 11. uri je bila temperatura 18 °C. Do katere višine je segala konvekcija? Ali so se pojavili kumulusni oblaki? Če so se, kje je njihova baza? [Rešitev]

8.12 Suh zrak se dviga od 1000 mbar na 700 mbar, ne da bi se mešal ali izmenjeval toploto z okolico. V začetku ima temperaturo 10 °C. Kakšna je začetna gostota tega zraka? Kolikšni sta njegova končna temperatura in gostota? [Rešitev]

8.13 Proti 800 m visokemu grebenu piha veter, zato se mora zrak, ki ima v dolini 15 °C in 70 % vlago, ob hribu prisilno dvigati. Ali ima ta hrib „kapo“? Na kateri višini bi bila baza oblaka pri 90 % vlagi? [Rešitev]

8.14 Poleti je zjutraj ob morju temperatura zraka 20 °C. Do višine 2 km temperatura z višino pada za 3 K/km. Od tu navzgor je izrazita inverzija, temperatura z višino raste za 2 K/km. Kako visoko se zrak premeša, če se čez dan zrak pri tleh ogreje na 27 °C? Ali se pojavi oblačnost, če zjutraj relativna vlaga pri tleh znaša 60 %? [Rešitev]

8.15 Zrak z začetno temperaturo 294 K in specifično vlago 10 g/kg se ob hribu dvigne od 1000 mb do 700 mb. Kolikšna je temperatura rosišča na 1000 mb? Pri katerem zračnem tlaku je kondenzacijski nivo prisilnega dviga? [Rešitev]

8.16 Zrak s temperaturo 18 °C in relativno vlago 85 % se pretaka čez Alpe. Na južni strani se dvigne z gladine Jadranskega morja do vrha grebena (3000 m), na severni strani pa se spusti na Bavarsko (700 m), ne da bi se pri tem izločile padavine. Kakšno temperaturo in relativno vlago ima severno od Alp? Za nasičeno adiabato privzemi $\Gamma_s \sim 7$ K/km. [Rešitev]

8.17 Prek gorovja piha fen, ki ima pri 1000 mbar temperaturo 38 °C in razmerje mešanosti 4 g/kg. Ali je to lahko isti zrak kot na privetrni strani gorovja, kjer je pri 1000 mbar temperatura 21,5 °C in razmerje mešanosti 10 g/kg? [Rešitev]

8.18 Zrak pri 20 °C in razmerju mešanosti 8 g/kg se dvigne s 1000 mbar na hrib, kjer je tlak 700 mbar. Kolikšna je temperatura rosišča pred dvigom? Kolikšna je temperatura na drugi strani hriba na 900 mbar, če se 80 % kondenzirane vode izloči iz oblaka in nič padavinske vode ne izhlapi v zrak? [Rešitev]

8.19 Zrak se pretaka čez Alpe (višina 3000 m), na južni strani ima v nižinah temperaturo 18 °C in relativno vlago 85 %, na severni strani pa v nižinah piha južni fen s temperaturo 25 °C in relativno vlago 36 %. Koliko padavin se izloči pri prehodu prek Alp? [Rešitev]

8.20 V spodnji troposferi, ob suhem mirnem vremenu, ponoči pri tleh namerimo 16 °C. Temperatura z višino pada za 7 K na km do višine 3 km, zatem pa za 5 K na km do višine 5 km. Čez dan se zrak pri tleh segreje do 28 °C. Do katere višine se premeša zrak? [Rešitev]

8.21 S kakšno frekvenco zaniha nenasičen del zraka v stabilni atmosferi ($\partial T/\partial z = -5$ K/km, temperatura 15 °C), če se zaradi motnje premakne iz ravnovesne lege? Kaj se zgodi, če je $\partial T/\partial z = -11$ K/km? [Rešitev]

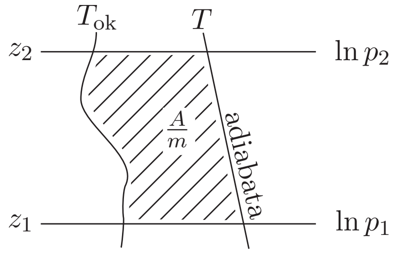
8.22 Nasičeno vlažen zrak s temperaturo 20 °C in zračnim tlakom 1000 mbar piha s hitrostjo 10 m/s proti pobočju z nagibom 20°. Kolikšna je največja možna intenziteta padavin, ki se izloči iz dvigajočega se zraka, če je vrh oblaka pri tlaku 500 mbar? Upoštevaj spreminjanje nagiba nasičene adiabate $\Gamma_s = \beta(p)\Gamma_a$: [Rešitev]

zračni tlak [mbar]	β
1000	0,38
850	0,45
700	0,50
500	0,62

9 Emagrami

9.1 Pokaži, da kjerkoli na diagramu z absciso T in ordinato $\ln p$ ista ploščina pomeni enako energijo oziroma opravljeno delo, ki v primeru $T > T_{\text{ok}}$ (ko je temperatura dvigajočega se zraka T višja od temperature okolice T_{ok}) omogoča prosto konvekcijo oziroma ki jo je v primeru $T < T_{\text{ok}}$ treba zraku dovesti, če naj se prisilno dviga!

Rešitev:



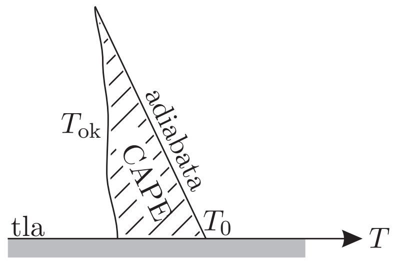
Sila čistega vzgona (vzgon minus teža) na enoto mase je $\frac{F}{m} = g\frac{T-T_{\text{ok}}}{T_{\text{ok}}}$ in je pozitivna („kaže navzgor“), ko je $T > T_{\text{ok}}$, in negativna („navzdol“) v nasprotnem primeru. Delo te sile ob dviganju je $\frac{\mathrm{d}A}{m} = \frac{F}{m}\,\mathrm{d}z$. Če nadomestimo integracijo po višini z z integracijo po zračnem tlaku p s hidrostatično povezavo in z uporabo plinske enačbe, $\mathrm{d}z = -\frac{\mathrm{d}p}{\rho g} = -\frac{RT\,\mathrm{d}p}{pg}$, lahko zapišemo količino opravljenega dela ob dvigu od višine z_1 do višine z_2 kot:

$$\frac{A}{m} = \int_{z_1}^{z_2} \frac{F}{m}\,\mathrm{d}z = \int_{p_2}^{p_1} g\frac{T-T_{\text{ok}}}{T_{\text{ok}}}\frac{\mathrm{d}p}{p}\,.$$

Ko še „pokrajšamo“ težnosti pospešek in „približno pokrajšamo“ T v števcu s T_{ok} v imenovalcu, ostane:

$$\frac{A}{m} = R\int_{p_2}^{p_1} (T-T_{\text{ok}})\frac{\mathrm{d}p}{p} = R(T-T_{\text{ok}})\ln\frac{p_1}{p_2}\,.$$

Torej ploščina med krivuljama $T(p)$ za dvigajoči se zrak in $T_{\text{ok}}(p)$ na območju med $\ln p_1$ in $\ln p_2$ pomeni delo ob dviganju. To delo je pozitivno ob prosti konvekciji, ko se toplejši zrak sam od sebe dviga skozi hladnejšo okolico (ko je $T > T_{\text{ok}}$). To delo je pozitivno tudi takrat, kadar hladnejši zrak sam od sebe tone navzdol (ob „obrnjeni smeri“ integracije) skozi toplejšo okolico. To delo pa je negativno, če naj se hladnejši prisilno dviga skozi toplejšo okolico, torej ob prisilnem dvigu, kar pomeni, da mora hladen zrak energijo za opravljanje tega dela „dobiti od drugod“, če naj se dviga skozi toplejšo okolico.

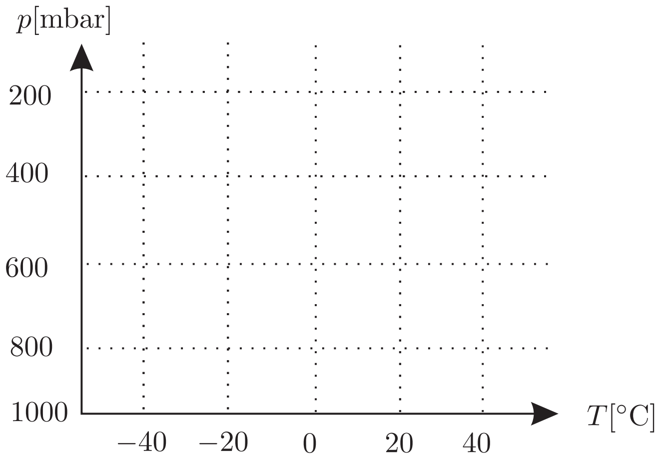


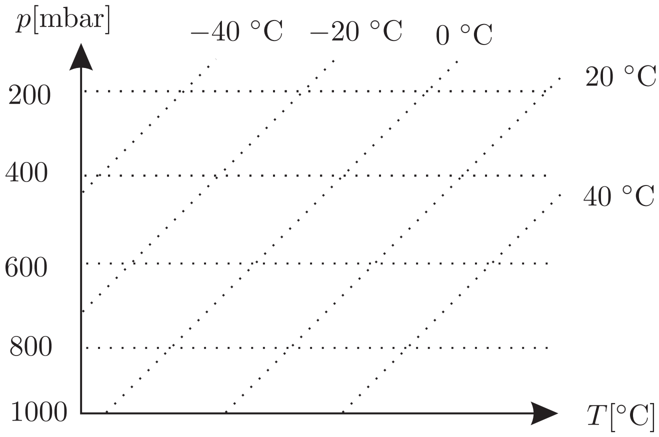
Kadar z radiosondo izmerimo sorazmerno nizke temperature v višinah in sorazmerno visoke pri tleh in krivuljo izmerjene $T(z)$ primerjamo s primerno adiabato (tisto, izhajajočo iz tiste temperature T_0 pri tleh, za katero pričakujemo, da se utegne do nje čez dan segreti zrak pri tleh segreti), dobimo sorazmerno velike pozitivne ploščine. Tej ploščini oziroma energiji, ki jo ploščina predstavlja, rečemo *za konvekcijo razpoložljiva potencialna energija* in ima angleško kratico CAPE (Convective Available Potential Energy). Čim večje so ploščine oziroma CAPE, tem močnejša bo ta dan prosta konvekcija – dviganja zraka, plohe, nevihte ...

9.2 Z meteorološkim balonom so na različnih višinah izmerili naslednje temperature:

Zračni tlak	Temperatura	Temperatura rosišča
1000 mbar	25 °C	10 °C
900 mbar	25 °C	10 °C
500 mbar	−5 °C	−10 °C
400 mbar	−15 °C	−30 °C
350 mbar	−25 °C	−40 °C
nad 350 mbar	−35 °C	ni podatka

Nariši izmerjene podatke v pravokotni in v poševni emagram. Zato, da na diagramih T, $\ln p$ krivulje po „širini“ niso preveč razpotegnjene, namesto pravokotnega diagrama T, $\ln p$ v praksi uporabljamo poševnega.





9.3 Z meteorološkim balonom so na različnih višinah izmerili naslednje temperature:

Zračni tlak	Temperatura	Temperatura rosišča
1000 mbar	20 °C	10 °C
950 mbar	20 °C	10 °C
600 mbar	−14 °C	−40 °C
300 mbar	−45 °C	−60 °C
nad 300 mbar	−45 °C	ni podatka

a) Nariši potek temperature z višino na emagram (med meritvami lahko potegneš ravne črte).

b) Nariši potek temperature rosišča z višino na emagram.

c) Koliko sta temperatura in temperatura rosišča na višini, kjer je zračni tlak 450 mbar?

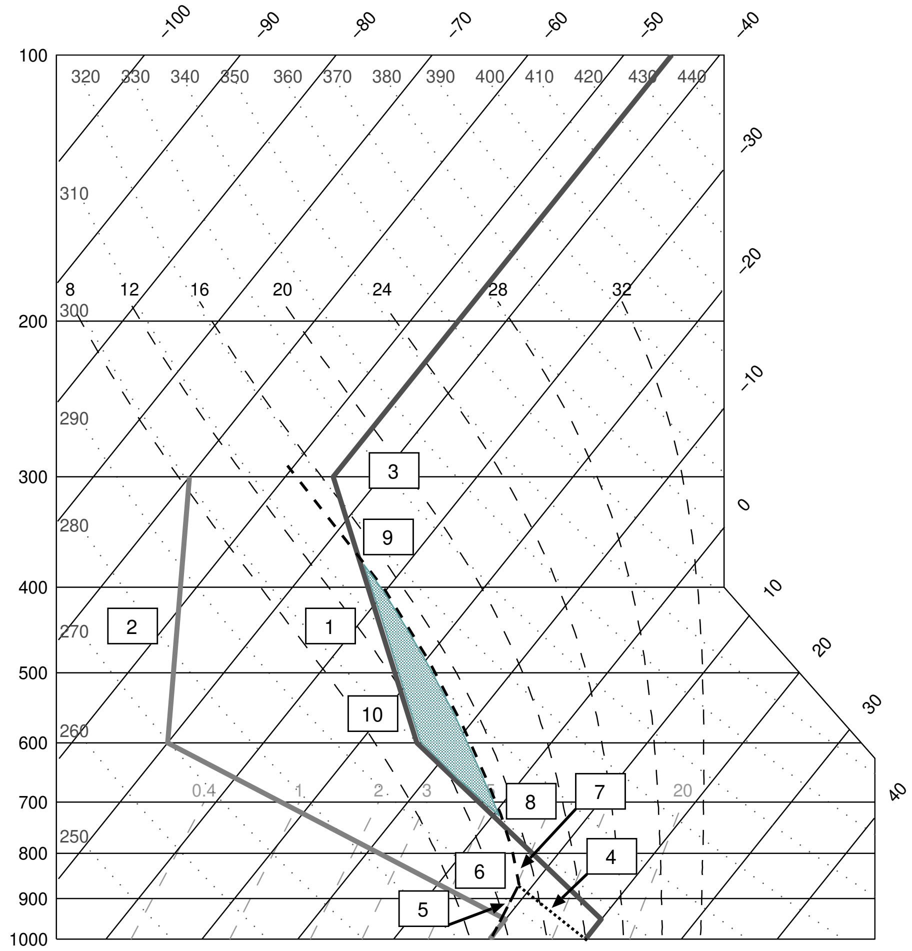
d) Določi spodnjo mejo tropopavze.

e) Na kakšni višini se bo pojavila oblačnost, če se zrak prisiljeno dviga ob pobočju? Nariši potek temperature pri dviganju na emagram.

f) Do katere višine bi bilo v tem primeru treba še dodatno dvigniti zrak, da bi nastala prosta konvekcija? Kje bi bil v tem primeru vrh oblaka? (označi na emagramu!)

g) Označi CAPE (razpoložljivo konvektivno potencialno energijo).

Rešitev:



a), b) Na emagramu je na ordinatni osi zračni tlak (označen na desni strani in gre od 1000 mbar do 100 mbar). Abcisna os pa je za 45 °C zarotirana v desno (poševne neprekinjene črne črte nagnjene v desno). Na abcisni osi je temperatura (izoterme so vrednosti, označene ob straneh, in gredo od 40 °C do −100 °C). Poteka temperatur z višino (zračnim tlakom) podana v nalogi sta označena z debelimi črtami. Desna črta pomeni temperaturo zraka, leva pa temperaturo rosišča.

c) Z grafa je treba odčitati temperaturi (točki 1 in 2). Temperaturi sta približno −27 °C (zrak) in −48 °C (rosišče).

d) Tropopavza je izotermna plast, ki je nad troposfero približno 10 km visoko. Da se natančno določi njena spodnja meja, je treba z grafa odčitati, kje se v višinah začne debela plast zraka s konstantno temperaturo. V našem primeru je to pri točki 3 (300 mbar). V tej točki potek temperature zraka postane vzporeden s poševnimi izotermami, kar pomeni, da je plast zraka z višino izotermna.

e) Če se del zraka dviga, se mu spreminjata temperatura in temperatura rosišča. Temperatura dvigajočega se zraka z višino do nivoja kondenzacije pada vzporedno s pikčastimi črtami, ki so nagnjene v levo. Ko se zrak dviga s tal, temperatura vzporedno sledi tem črtam (označeno s 4). Hkrati pada tudi temperatura rosišča. Ta pada vzporedno s krajšimi sivimi črtkanimi črtami, nagnjenimi v desno. Temperatura rosišča v dvigajočem se zraku vzporedno sledi tem črtam (označeno s 5). Ko se temperatura zraka in temperatura rosišča izenačita, postane zrak nasičeno vlažen (relativna vlažnost postane 100 %). To je označeno s 6. Na tej višini se bodo iz vodne pare začele tvoriti oblačne kapljice. Tukaj se pojavi oblačnost. To višino imenujemo tudi kondenzacijski nivo prisilnega dviga.

f) Od kondenzacijskega nivoja prisilnega dviga se zrak dviga ob ukrivljeni črni črtkani krivulji, ki je nagnjena v levo (označeno s 7). Temperatura rosišča je ves čas enaka temperaturi zraka (relativna vlažnost je ves čas 100 %). Ob dviganju se zrak še vedno ohlaja, vendar nekoliko počasneje kot pod kondenzacijskim nivojem prisilnega dviga. Če ob nekem trenutku temperatura dvigajočega se zraka postane višja kot temperatura okoliškega zraka na trenutni višini, začne vzgonska sila na del zrka delovati navzgor in pojavi se prosta konvekcija. V našem primeru se to zgodi pri zračnem tlaku okoli 750 mbar (označeno z 8). Od tu naprej se bo zrak zaradi vzgona sam od sebe dvigal (ne več prisiljeno ob hribu), dokler ne bo postal hladnejši od okolice. Hladnejši od okolice bo postal ob zračnem tlaku okoli 360 mbar (označeno z 9). V tem primeru bi oblak segal od kondenzacijskega nivoja prisilnega dviga (točka 6) do zgornje meje proste konvekcije (točka 9).

g) CAPE (Convective Available Potential Energy) ali za konvekcijo razpoložljiva potencialna energija je definirana kot ploščina med krivuljama temperatur dvigajočega se in okoliškega zraka, tam kjer je prvi toplejši od drugega (sivina ozanačena z 10). CAPE je iz emagrama težko kvantitativno določiti, v splošnem pa velja, da čim večja je ploščina, tem bolj bo konvekcija intenzivna (če seveda konvekcija nastane – ne pozabi, da se mora zrak najprej ob pobočju hriba prisilno dvigniti do višine 750 mbar. Če ni prisilnega dviga, tudi konvekcije ne bo).

9.4 Z meteorološkim balonom so na različnih višinah izmerili temperature, podane v spodnji tabeli: [Rešitev]

Zračni tlak	Temperatura	Temperatura rosišča
1000 mbar	34 °C	23 °C
950 mbar	30 °C	22 °C
900 mbar	25 °C	20 °C
850 mbar	22 °C	17 °C
800 mbar	21 °C	13 °C
750 mbar	18 °C	5 °C
700 mbar	12 °C	−1 °C
650 mbar	6 °C	−10 °C
600 mbar	2 °C	−12 °C
550 mbar	−3 °C	−21 °C
500 mbar	−7 °C	−25 °C
450 mbar	−12 °C	−30 °C
400 mbar	−17 °C	−36 °C
350 mbar	−25 °C	−39 °C
300 mbar	−32 °C	−42 °C
250 mbar	−42 °C	−51 °C
200 mbar	−52 °C	−60 °C
150 mbar	−51 °C	ni podatka
100 mbar	−46 °C	ni podatka

a) Nariši potek temperatur na prazen emagram.

b) Kakšna je relativna vlažnost okolišnega zraka pri tleh in na 700 mbar?

c) Določi spodnjo mejo tropopavze.

d) Ali so ob času merjenja že kje obstajale oblačne plasti?

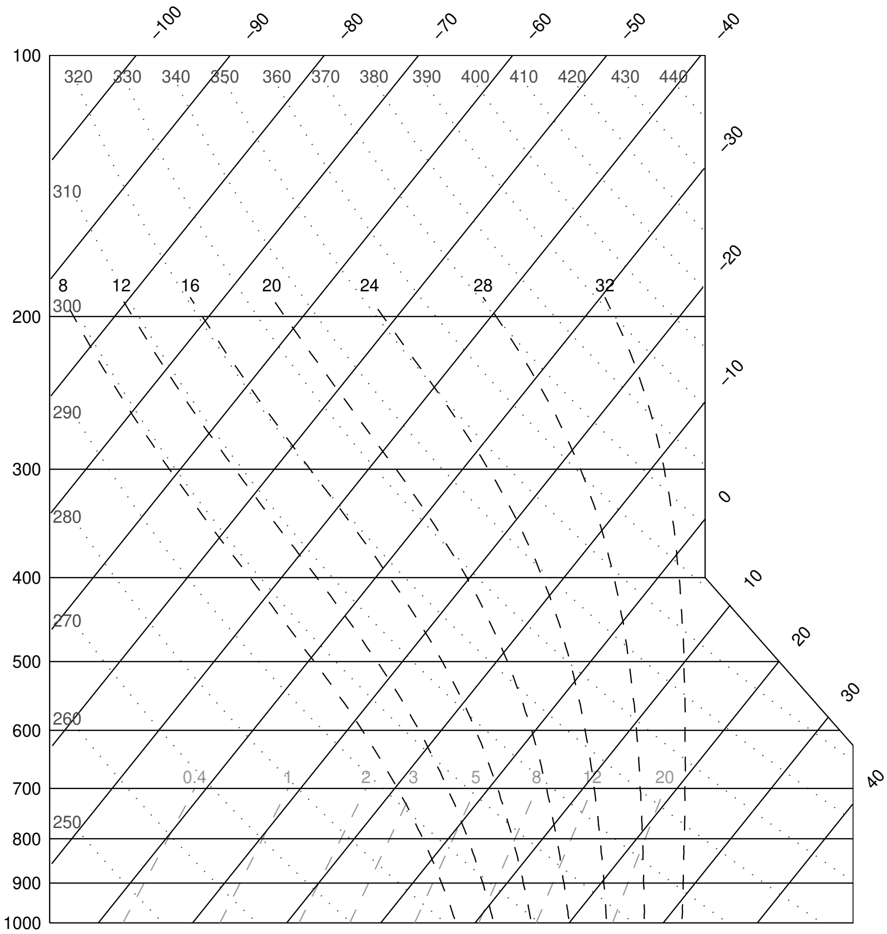
e) Določi kondenzacijski nivo prisilnega dviga.

f) Določi bazo oblaka.

g) Do katere višine se mora zrak dvigniti, da bo nastala prosta konvekcija?

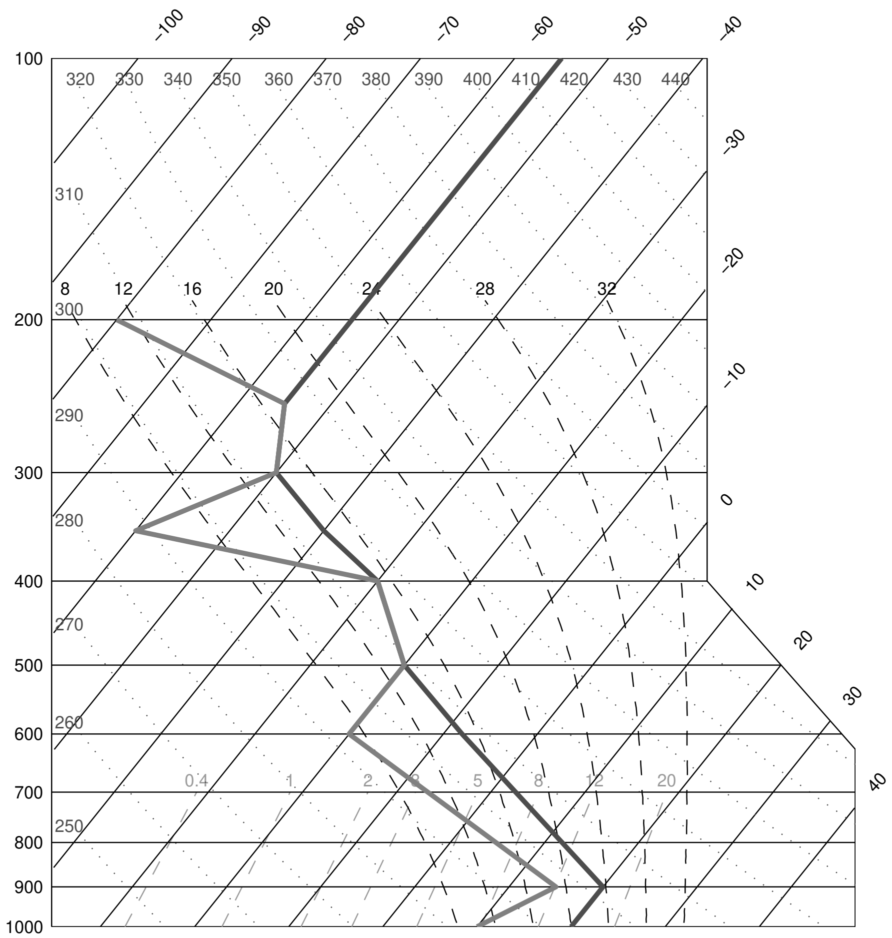
h) Kako visoko bo v tem primeru segal oblak?

i) Koliko bi se pri tleh moral segreti zrak, da bi nastala prosta konvekcija s kondezacijo?



–100
–90
–80
–70
–60
–50
–40
–30
–20
–10
0
10
20
30
40
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
320
330
340
350
360
370
380
390
400
410
420
430
440
310
300
290
280
270
260
250
8
12
16
20
24
28
32
0.4
1.
2.
3
5
8
12
20

9.5 S spodnjim emagramom določi naslednje stvari: [Rešitev]



a) Za koliko stopinj je temperatura pri 500 mbar nižja od temperature na 800 mbar ploskvi?

b) Na emagramu označi, kje so bile med merjenjem oblačne plasti.

c) Na emagramu označi spodnjo mejo tropopavze.

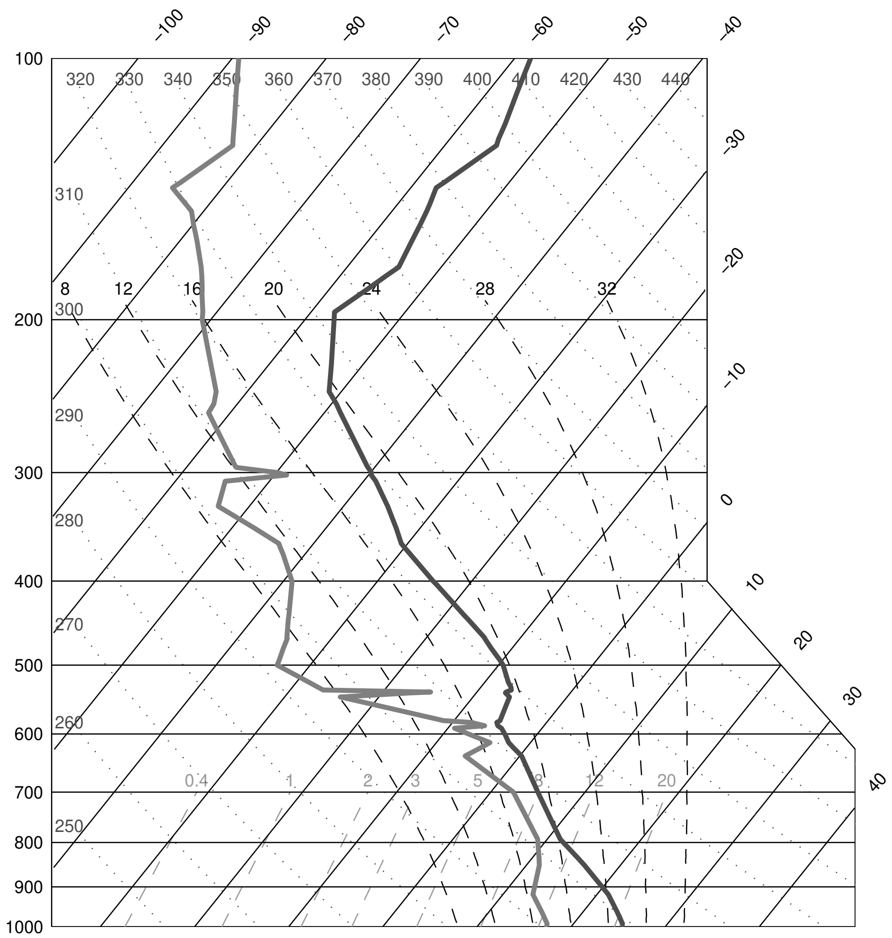
d) Na emagramu označi in oceni kondenzacijski nivo prisilnega dviga.

e) Na emagramu označi, do katere višine bi bilo v tem primeru treba še dodatno dvigniti zrak, da bi nastala prosta konvekcija?

f) Najmanj za koliko stopinj bi se moral segreti zrak pri tleh, da bi nastala prosta konvekcija s kondenzacijo?

g) Na emagramu označi, do katere višine bi v tem primeru segal oblak.

9.6 S spodnjim emagramom določi naslednje stvari: [Rešitev]



a) Kolikšna je temperatura na višini 700 mbar?

b) Ali so med merjenjem že kje obstajale oblačne plasti?

c) Na emagramu označi in oceni kondenzacijski nivo prisilnega dviga.

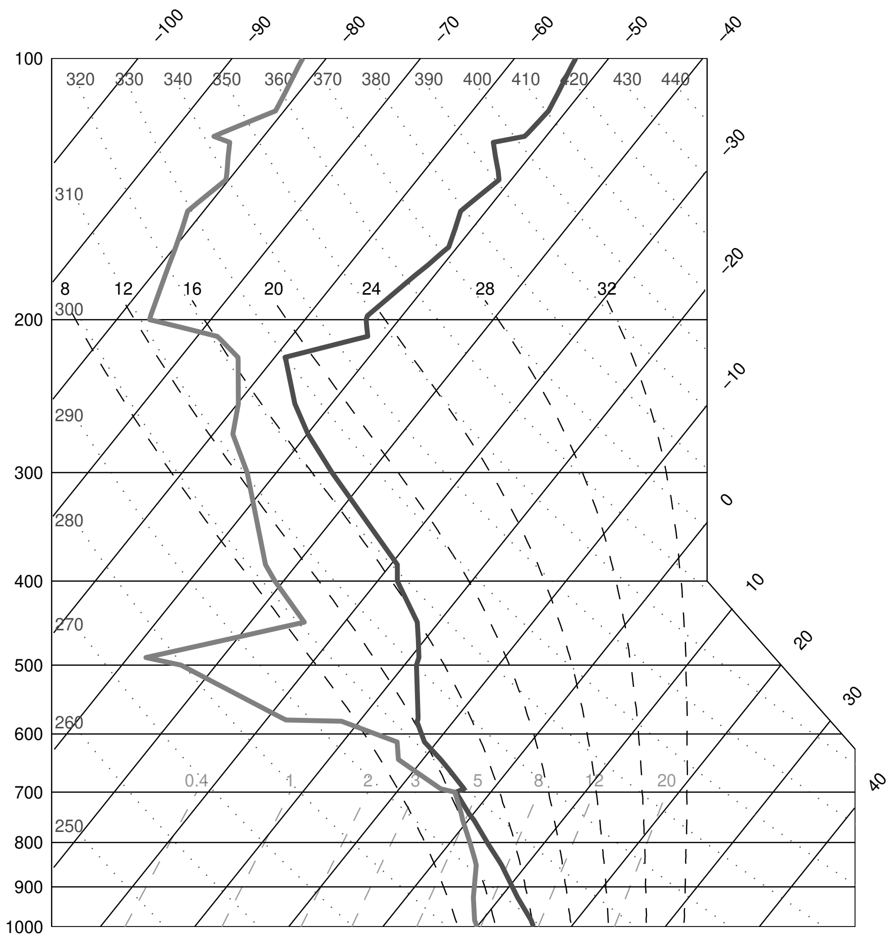
d) Zrak se prisilno dviga od pobočju hriba, ki ima vrh pri 850 mbar. Ali nastane prosta konvekcija?

e) Do katere višine bo segal oblak?

f) Najmanj za koliko stopinj bi se moral segreti zrak pri tleh, da bi nastala prosta konvekcija s kondenzacijo?

g) Do katere višine bi v tem primeru segal oblak.

9.7 S spodnjim emagramom določi naslednje stvari: [Rešitev]



a) Kolikšna je temperatura na višini 450 mbar?

b) Ali so med merjenjem že kje obstajale oblačne plasti?

c) Na emagramu označi in oceni kondenzacijski nivo prisilnega dviga.

d) Na emagramu označi, do katere višine bi bilo v tem primeru treba še dodatno dvigniti zrak, da bi nastala prosta konvekcija?

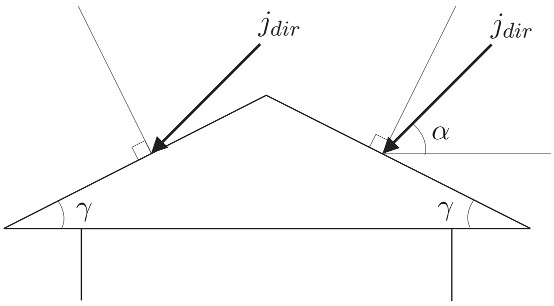
e) Najmanj za koliko stopinj bi se moral segreti zrak pri tleh, da bi nastala prosta konvekcija, ki bi potekala do višine 200 mbar?

f) Na emagramu označi, do katere višine bi v tem primeru segal oblak.

10 Sevanje

10.1 Izračunaj razmerje sončnega obsevanja prisojne in osojne strehe z nagibom 30°, ki ima sleme postavljeno v smeri vzhod–zahod, pri višini sonca 40° nad obzorjem. Gostota energijskega toka neposrednega sončnega sevanja je 800 W/m^2, difuznega pa 44 W/m^2.

Rešitev:



Označimo višino sonca z α, nagib strehe pa z γ. Energijski tok, ki ga prejme prisojna oziroma osojna stran strehe, je:

$$P_{pris} = j_{dir} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - (\alpha + \gamma)\right) \cdot S + j_{dif} \cdot S$$
$$P_{osoj} = j_{dir} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - (\alpha - \gamma)\right) \cdot S + j_{dif} \cdot S$$

Razmerje energijskih tokov je: $P_{pris}/P_{osoj} = 4,4$.

10.2 Kruti režimi so zapirali gole zapornike v samice. V celico, katere stene imajo temperaturo 10 °C, je zaprt gol zapornik, temperatura njegove kože je 30 °C. Kolikšne so energijske izgube zapornika, če vzameš, da je površina človeškega telesa 1 m^2, stene in človek pa sevajo kot črno telo? [Rešitev]

10.3 Nekaj 10 m nad tlemi je nad opazovanim območjem dvignjena megla, emisivnost njene baze je 0,8 in temperatura 282 K. Kolikšna je moč sevanja, ki jo prejme ravna ploskev, velika 1 m^2, ki leži na tleh pod središčem območja z dvignjeno meglo? Upoštevaj, da se v zraku med tlemi in meglo ne absorbira nič IR-sevanja. [Rešitev]

10.4 Ocena povprečnega izhlapevanja vode za celo Zemljo je 2,7 mm/dan. Takšne so v povprečju tudi padavine. Kolikšen delež povprečnega sončnega sevanja, ki ga prejme Zemlja, je energija, potrebna za izhlapevanje vode? Upoštevaj, da ima Zemlja povprečni albedo $a = 0{,}35$. [Rešitev]

10.5 Koliko dni bi moralo sonce obsevati horizontalno ploskev na zemeljskem površju, da bi z nje izhlapelo 1200 mm padavin? Upoštevaj povprečno dolžino dneva 12 h in višino Sonca opoldne 60° nad obzorjem. Zaradi enostavnejšega računanja vzemi namesto sinusoidnega kar linearen potek višine sonca čez dan. [Rešitev]

10.7 Jedrska elektrarna spušča v jezero odpadno toploto z močjo 500 MW. Jezero ima površino 100 km^2 in povprečno globino 10 m. Upoštevaj, da se toplota enakomerno razporeja po vsem jezeru. [Rešitev]

a) Kako bi se jezero segrevalo, če ne bi oddajalo energije okolici?

b) Če ima jezero naravno temperaturo 10 °C, kako bi se mu spremenila temperatura, če bi presežek toplote oddajalo samo s sevanjem?

c) Kolikšno bi moralo biti izhlapevanje iz jezera, če naj bi samo odneslo s seboj vso dodatno toploto iz elektrarne, pri čemer se temperatura jezera ne bi spremenila?

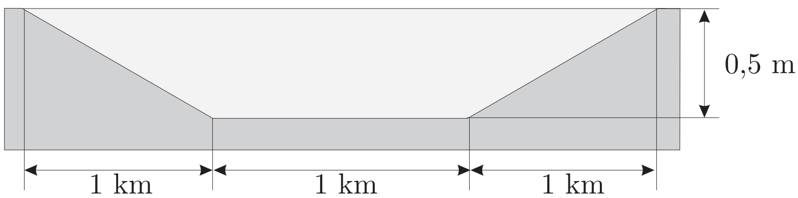
10.8 Na travnik s površino 1,2 ha v eni uri s sončnim obsevanjem pride in se absorbira 18 000 MJ energije, s tal pa skupaj izhlapi 1000 kg vode. Emisivnost travnika je 0,95, kolikšna je temperatura tal na travniku? [Rešitev]

10.9 Na Grenlandiji je krožno jezero s polmerom 1 km in globino 0,5 m. Sonce ob polarnem dnevu ves čas sije pod kotom 25° glede na površje, gostota energije pa je 800 W/m^2. V vodi se absorbira 80 % sončnega sevanja. Vsa absorbirana energija se porabi le za izhlapevanje vode. [Rešitev]

a) V kolikšnem času bi se jezero izsušilo, če bi ostale razmere nespremenjene in ne bi bilo padavin?

b) Koliko dni bi minilo, preden bi se jezero izsušilo, če bi imelo konstanten rečni pritok s kapaciteto 500 m^3/h.

10.10 Na Grenlandiji je krožno jezero s prečnim profilom, kot je narisano na spodnji sliki. Sonce ob polarnem dnevu ves čas sije pod kotom 25° glede na površje, gostota energije pa je 800 W/m^2. V vodi se absorbira 80 % sončnega sevanja. Vsa absorbirana energija se porabi le za izhlapevanje vode. [Rešitev]

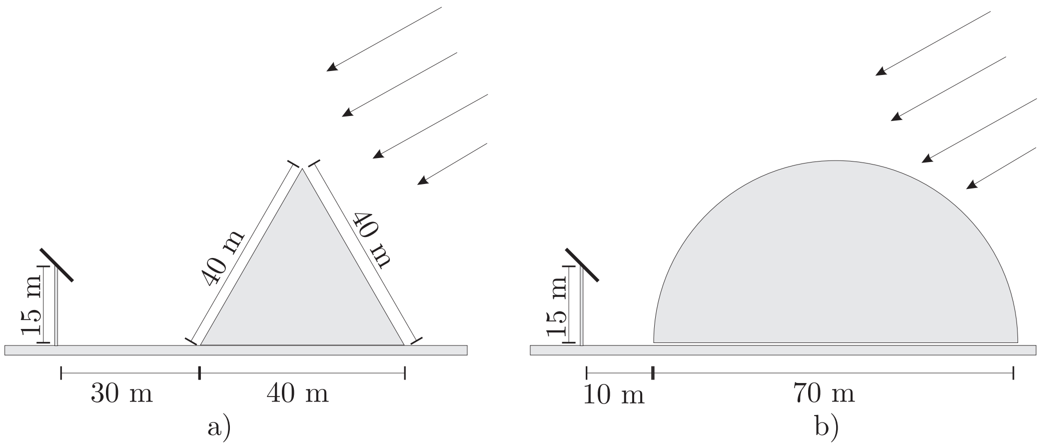


a) V kolikšnem času bi se jezero izsušilo?

b) Kakšna bi bila ravnovesna globina jezera, če bi jezero imelo konstanten rečni pritok s kapaciteto 1000 m^3/h?

c) V kolikšnem času bi se jezero izsušilo, če bi jezero imelo konstanten rečni pritok s kapaciteto 200 m^3/h?

10.11 Na 15 m visoki palici imamo zaradi griča na južni strani dvignjen solarni kolektor s površino 1 m^2. Kolektor je nagnjen za 45° glede na obzorje. Med kolektorjem in soncem je trikotni ali polkrožni grič (glej sliko). Kolikšna je moč sončnega sevanja na kolektorju, ko ga zjutraj prvič obsije sonce, če je takrat gostota sončnega sevanja 800 W/m^2. [Rešitev]



10.12 Temperatura površja tal se spreminja sinusno z amplitudo 10 K, z maksimumom ob 14. in minimumom ob 8. uri po lokalnem času. Povprečna temperatura površja tal je 15 °C. Kolikšna je amplituda temperature na globini 15 cm v prsti, za katero poznaš toplotno prevodnost $\lambda = 100$ W/m^2, gostoto 2000 kg/m^3 in specifično toplotno kapaciteto 2000 J/kgK? [Rešitev]

10.13 Zemlja ima skupaj z ozračjem albedo 0,3, atmosfera absorbtivnost 0,1 za kratkovalovno in 0,7 za dolgovalovno sevanje. Kakšni sta ravnovesni temperaturi tal in ozračja, če poznamo solarno konstanto j_o? [Rešitev]

10.14 Predpostavi, da je neko območje na Zemlji od okolice izolirano, torej da zanemarimo energijske tokove (z vetrovi, morskimi tokovi ipd.) med tem območjem in okolico. To območje obseva Sonce; in sicer pride do tal gostota energijskega toka 600 W/m^2. Albedo tal je 0,36. Ozračje je sestavljeno iz treh plasti, ki se med seboj ne mešajo, prenos energije med plastmi s kondukcijo pa zanemarimo. Transmisivnost teh treh plasti je 0,70 in reflektivnost 0. Kolikšna bi bila temperatura tal, če bi bile plasti in tla v sevalnem ravnovesju? Predpostavi, da plasti in tla s sevanjem vplivajo samo na soseda. [Rešitev]

10.15 Kolikšna je energija sončnega obsevanja, ki jo prejme črna in vodoravna ploščica radiometra, velika 6 cm^2 med 11.30 in 12.30 po lokalnem sončnem času, če je sonce v tem času 60° nad obzorjem? Kolikšna je njena ravnovesna temperatura opoldne? Kolikšna je celotna dnevna energija, ki jo prejme, če je sonce vzšlo ob 5.45, višinski kot sonca pa se spreminja linearno s časom od 0° do 60° nad obzorjem in potem nazaj do 0°? Privzemi, da je gostotota toka energije sončnega sevanja pri tleh 800 W/m^2. [Rešitev]

10.16 Termometer je postavljen na sonce in zato kaže temperaturo 39 °C. Temperatura zraka je 25 °C, emisivnost zraka je 0,7, termometer pa seva kot črno telo. Kolikšen je albedo termometrove bučke za sončno sevanje, če nanjo vpada gostota energijskega toka sončnega sevanja 1000 W/m^2. Privzemi, da je bučka okrogle oblike. [Rešitev]

11 Fronte

11.1 Kolikšen je nagib hladne fronte, če je razlika v temperaturi med zračnima masama 3 K in piha pred fronto jugozahodnik s hitrostjo 13 m/s, za fronto pa severozahodnik s hitrostjo 10 m/s? Fronta poteka v smeri sever–jug. Temperatura toplega zraka je 16,5 °C. Fronta je na 45 °N.

Rešitev:

Uporabimo enačbo za nagib fronte:

$$\mathrm{tg}\,\alpha = \frac{f\overline{T}}{g}\left(\frac{v_T - v_H}{T_H - T_T}\right),$$

kjer sta v_T in v_H tangencialni komponenti vetra, ki pihata vzdolž fronte. $\mathrm{tg}\,\alpha$ je definiran tako, da je pri hladni fronti pozitiven, pri topli pa negativen. V nalogi je treba najprej določiti tangencialni komponenti vetra, ki sta $v_T = -13\ \mathrm{m/s} \cdot \sin 45°$ in $v_H = 10\ \mathrm{m/s} \cdot \sin 45°$.

$$\mathrm{tg}\,\alpha = 0{,}0164\,.$$

11.2 Kako hitro se bo premaknila hladna fronta iznad Kopra nad osrednjo Slovenijo, če v toplem zraku pred njo piha veter iz smeri 210° s hitrostjo 25 m/s, v hladnem zraku pa zračni tlak narašča proti jugozahodu za 1,3 mbar/100 km? Gostota zraka je 1 kg/m^3. [Rešitev]

11.3 Fronta leži na severni hemisferi v smeri vzhod–zahod in je v vertikalni smeri nagnjena za 1°. V toplem zraku je temperatura 6 °C, v hladnem pa −2 °C. V hladnem zraku piha veter od severovzhoda s hitrostjo 40 m/s. Kakšen veter piha v toplem zraku? [Rešitev]

11.4 Kako leži fronta in kam ter kako hitro se premika pri severnem vetru s hitrostjo 10 m/s v hladnem zraku in pri severozahodniku s hitrostjo 7,1 m/s v toplem zraku? [Rešitev]

11.5 Ob hladni fronti, ki ima nagib 1/200 in smer JZ–SV, napreduje hladni zrak s hitrostjo 50 km/h. Hladni zrak je za 5 K hladnejši od toplega. V toplem zraku, kjer je temperatura 15 °C, piha zahodni veter. Kolikšni sta hitrost in smer vetra v hladnem zraku? [Rešitev]

11.7 V kotlini leži izotermno jezero hladnega zraka ($T_1 = 5$ °C) in vlada brezvetrje. Nad inverzijo, ki loči spodnjo zračno maso od zgornje, pa je topleje ($T_2 = 15$ °C) in piha zahodni geostrofski veter s hitrostjo 15 m/s. Če je na tisti strani kotline, kjer je nivo inverzije najnižji, ta 100 m visoko, kako visoko seže na nasprotni strani, ki je 40 km daleč. V katero smer je to? [Rešitev]

11.8 Kakšen je nagib zgornje meje mirnega jezera hladnega zraka, v katerem je temperatura −8 °C, če nad njim piha veter 10 m/s in je tam temperatura 5 °C? [Rešitev]

11.9 Določi nagib stacionarne mejne površine, ki na geografski širini 45° deli dve zračni masi. Značilnosti zračnih mas: zračni tlak pri tleh je 1000 mbar, v hladnem zraku je temperatura 263 K, v toplem 273 K. Horizontalni gradient zračnega tlaka, pravokoten na fronto v hladnem zraku, je 1 hpa/100 km. V toplem zraku pihajo geostrofski vetrovi s hitrostjo 15 m/s. Za koliko bi se spremenil nagib mejne površine, če bi se vetrovi umirili v toplem zraku? [Rešitev]

11.10 Kako daleč pred toplo fronto pri tleh bo fronta na višini 8 km (ponavadi jo opazimo po cirusnih oblakih), če je prihajajoči zrak za 10 K toplejši od hladnega, ki ima temperaturo 5 °C, in če se ob prehodu fronte veter obrne za 45° in okrepi za 5 m/s? Kako daleč stran na obzorju lahko opazimo to oblačnost, če stojimo na 1000 metrov visokem hribu? Pred fronto piha veter s hitrostjo 10 m/s pravokotno na smer potovanja fronte. [Rešitev]

12 Rešitve

Rešitve: Merske enote

1.1: 100000 Pa, 600 mbar, 0,5 bar.

1.2: 285,5 K, 17 °C, 259 K.

1.3: 259200 s, 2,3 let, 0,0009 km^2, 0,003 m^3, 108 km/h, 27,7 m/s, 10^8 W, $1,4 \cdot 10^9$ W/km^2, 18 °C/uro, 0,0015 Pa/m, 27,8 kWh, 18 MJ.

Rešitve: Sestava in plasti ozračja

2.2: 355 kg.

2.3:

$$M = \frac{\Sigma m_i}{\Sigma n_i} = \frac{\Sigma m_i}{\Sigma \frac{m_i}{M_i}} = \frac{\Sigma \frac{V}{R^* T} p_i M_i}{\Sigma \frac{V}{R^* T} p_i} = \frac{\Sigma p_i M_i}{\Sigma p_i} = 28,8 \text{ g/mol}\,.$$

2.4: a) 1,1 kg/m^3, b) 1,4 kg/m^3.

2.5: Gostota zraka se poveča od 1,02 kg/m^3 na 1,10 kg/m^3.

2.6: Iz plinske enačbe za zrak izračunamo maso zraka v sobi, ki je 121 kg. Z upoštevanjem masnega deleža argona dobimo maso argona 1,6 kg.

2.7: Povprečni zračni tlak na morski gladini je 1013 mbar. Radij Zemlje je 6370 km.

$$\begin{aligned} p &= \frac{F}{S} = \frac{mg}{4\pi R_z^2}\,, \\ m &= 5,3 \cdot 10^{18} \text{ kg}\,. \end{aligned}$$

Rešitve: Hidrostatika

3.3:

z	1 km	2 km	3 km	4 km	5 km	6 km	7 km	8 km	9 km	10 km
$p(z)/p_0$	0,88	0,78	0,68	0,59	0,51	0,44	0,38	0,32	0,27	0,22

3.4: Nalogo rešimo postopoma od spodnje plasti navzgor.

višina [m]	zračni tlak [mbar]	temperatura [K]
0	1013	288
100	1001,1	290
1000	899,2	283
3000	706,2	283
12000	208,0	224,5
31964	10	224,5

3.5: a) 1028,0 mbar, b) 1026,2 mbar.

3.6: a) 1097,0 mbar, b) 663,2 mbar, 0,82 kg/m^3 c) 352,4 mbar, d) 1454 m.

3.7: 2853 m.

3.8: 3187 m.

3.9: 9153 m.

3.10: Iz podatkov o standardni atmosferi izračunamo zračni tlak na višini letala (306,8 mbar). Potem uporabimo dejanske podatke in izračunamo resnično višino letala (8119 m).

3.11: Tlak na Kredarici izračunamo na dva načina, prvič z $\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)$ za standardno atmosfero, kjer za višino Kredarice uporabimo vrednost višinomera, drugič pa dejanski potek temperature s pravo nadmorsko višino. Tlak se je povečal za 1,5 mbar.

3.12: Plast je med višinama 866 m in 1818 m.

3.13: 2863 m.

3.14:

$$\begin{aligned}
\mathrm{d}Q &= mc_p dT = \rho S h c_p \,\mathrm{d}T\,, \\
\Delta z &= z_1 - z_0 = \frac{R}{g}\overline{T}\int \mathrm{d}\ln p\,, \\
\mathrm{d}\Delta z &= \frac{R}{g}\ln\frac{p_0}{p_1}\,\mathrm{d}\overline{T} = \frac{R}{g}\ln\frac{p_0}{p_1}\frac{1}{\rho h c_p}\frac{\mathrm{d}Q}{S} = \frac{R}{\Delta p}\ln\frac{p_0}{p_1}\frac{1}{c_p}\frac{\mathrm{d}Q}{S} = 2{,}9\ \mathrm{m}\,.
\end{aligned}$$

3.15:

$$\mathrm{d}\Delta z = \frac{R}{\Delta p}\ln\frac{p_0}{p_1}\frac{1}{c_p}\frac{\mathrm{d}Q}{S} = 63\ \mathrm{m}\,.$$

3.16: 16 m.

3.17:

$$p = \rho_{Hg}\cdot g\cdot h = 970{,}1\ \mathrm{mbar}\,.$$

3.18: Pri preračunu na morski nivo se upošteva, da je atmosfera izotermna s temperaturo, izmerjeno na postaji:

$$\frac{\Delta p}{p_0} = \mathrm{e}^{\frac{g\Delta z}{RT}} - \mathrm{e}^{\frac{g\Delta z}{R(T+1\ \mathrm{K})}} = 1{,}2\cdot 10^{-4}.$$

3.19: 743,4 mbar.

3.20: V homogeni atmosferi je gostota konstantna. Uporabimo hidrostatično enačbo ($dp = \rho R dT$) in iz nje izrazimo spremembo temperature z višino:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial z} &= -\rho g\,, \\ \frac{\partial T}{\partial z} &= -\frac{g}{R} = -0{,}03\ \mathrm{K/m}\,. \end{aligned}$$

3.21: Če v plasti nad tlemi ne bi bilo inverzije, bi bila temperatura pri tleh $-2{,}8$ °C. Razmerje preračunanih vrednosti zračnega tlaka je

$$\frac{p_0}{p_0'} = \mathrm{e}^{\frac{gh}{R}\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{\overline{T}}\right)} = 1{,}0003\,.$$

3.22: Najprej izračunamo višino 500 mbar ploskve, z upoštevanjem podatkov o standardni atmosferi: $p_0 = 1013$ mbar, $T_0 = 288$ K, $\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right) = -6{,}5$ K/km.

$$z = \frac{T_0}{\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)}\left[\left(\frac{p_1}{p_0}\right)^{-\frac{R\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)}{g}} - 1\right] = 5567\ \mathrm{m}.$$

Pri izračunu geopotenciala upoštevamo, da se g ne spreminja

$$\Phi = \int_0^H g\,\mathrm{d}z = 54612\ \mathrm{m^2/s^2}.$$

Rešitve: Osnovni zakoni

4.2:

$$\begin{aligned} \omega^2 R &= 0{,}1 f u\,, \\ R &= 20{,}7\ \mathrm{km}\,. \end{aligned}$$

4.3: Kaže proti jugovzhodu. Velika je $3{,}1 \cdot 10^{-3}$ m/s^2.

4.4: Upoštevati je treba razliko v težnem pospešku, ki je posledica spremembe gravitacijskega pospeška z višino ($g(z) = g_0\left(\frac{r_0}{r_0+z}\right)^2$, kjer je g_0 gravitacijski pospešek na nivoju morja in r_0 radij Zemlje in z nadmorska višina) in spremembe radialne komponente centrifugalne sile ($f_{cent} = \omega^2(r_0+z)\cos\varphi$, kjer je ω kotna hitrost vrtenja Zemlje, φ pa zemljepisna širina). Težni pospešek na Kilimandžaru je 9,76 m/s^2 na drugi lokaciji pa 9,79 m/s^2. Planinec se počuti lažjega za približno 0,3 %.

4.5: Za razliko je kriva radialna komponenta Coriolisovega pospeška, ki kaže v nasprotni smeri kot gravitacijski pospešek. V Sloveniji ($\varphi = 45°$) je to 0,0123 m/s^2, na ekvatorju pa 0,017 m/s^2. Za človeka z maso 75 kg to pomeni 0,92 kg ali 1,3 kg manj.

4.6:

$$\frac{|-\rho g|}{|\frac{\partial p}{\partial n}|} = 7240\,.$$

4.7: Balon se ne bo premikal v vertikalni smeri, če je vsota sil, ki nanj delujejo v vertikalni smeri, enaka nič. Sila teže balona, sila teže košare in vzgonska sila so uravnovešene:

$$\begin{aligned} 0 &= -m_b g - m_k g + V_b \rho_{ok} g = (\frac{\rho_{ok}}{\rho_{zr}} - 1) - \frac{m_k}{\rho_{zr} V_b}\,. \\ V_b &= \frac{R_s m_k}{p(T_{ok}^{-1} - T_{zr}^{-1})} = 1928 \text{ m}^3\,. \end{aligned}$$

Rešitve: Vetrovi

5.3: 320 km.

5.4: 8,9 m/s.

5.5: Najprej je treba izračunati gostoto pri standardni atmosferi na 500 mbar (0,7 kg/m^3). Horizontalni gradient tlaka je 1,15 mbar/100 km.

5.7: Piha pod vplivom Coriolisove sile ($8{,}7 \cdot 10^{-4}$ m/s^2), sila trenja ($2{,}3 \cdot 10^{-4}$ m/s^2) in sile gradienta tlaka ($9{,}0 \cdot 10^{-4}$ m/s^2).
$k = \tan\beta$, $f = 10^{-5}$ s^{-1}, $\left|\frac{\partial p}{\partial n}\right| = 0{,}45$ mbar/100 km.

5.8: 8,1 m/s.

5.9: $\frac{v_{\text{grad}}}{v_{\text{geo}}} = 0{,}95$.

5.10: a) $\left|\frac{\partial p}{\partial n}\right| = 4$ mbar/500 km. $v_g = 6{,}4$ m/s. b) $v_g = 7{,}2$ m/s.

5.11: $v_g = 8{,}3$ m/s, $F_{\text{cor}} = 1{,}0 \cdot 10^{-3}$ m/s^2, $F_{\text{tr}} = 0{,}83 \cdot 10^{-3}$ m/s^2, $F_{\text{gra}} = 1{,}3 \cdot 10^{-3}$ m/s^2.

5.12: $v_g = 17{,}9$ m/s, $F_{\text{cor}} = 3{,}1 \cdot 10^{-3}$ m/s^2, $F_{\text{tr}} = 1{,}7 \cdot 10^{-3}$ m/s^2, $F_{\text{gra}} = 3{,}6 \cdot 10^{-3}$ m/s^2.

5.13: a) Privzamemo, da sta v tropskem ciklonu izenačeni centrifugalna in sila gradienta tlaka (Coriolisovo silo zanemarimo). $\Delta p = 30{,}86$ mbar. b) $\Delta p = 30{,}90$ mbar.

5.14: Parabolično polje tlaka lahko zapišemo kot $p(r) = p_0 + kr^2$, kjer je r oddaljenost od središča ciklona, kjer je tlak enak p_0. Koeficient k dobimo iz ravnovesja sil na obrobju ciklona, kjer velja $\frac{\partial p}{\partial n} = \frac{\partial p(r)}{\partial r} = 2kr$, pri čemer dobimo $k = 5,43 \cdot 10^{-9}$ Pa/m^2, preko katerega določimo tlak v središču $p_0 = 961$ mbar.

5.15: 602 km.

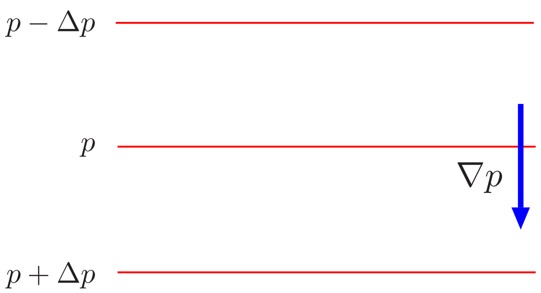
5.16: Ob predpostavki, da sta v tornadu izenačeni centrifugalna in gradientna sila dobimo $p(r) = p_0 + \frac{\rho\omega^2 r^2}{2}$.

5.17: Pritisk se ohranja, če se pomaknemo stran od izhodišča in navzgor po poševnici, ki je nagnjena za 30 stopinj:

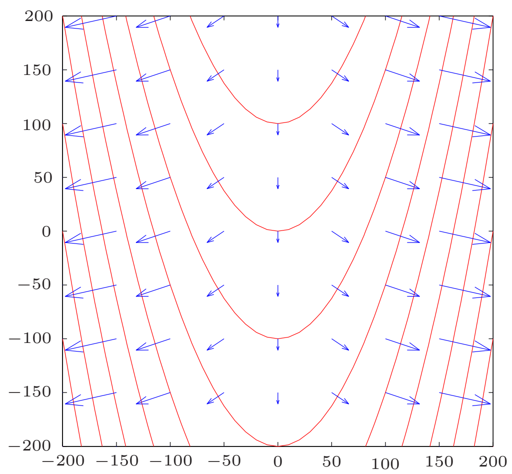
$$\begin{aligned}
\Delta p &= \left(\frac{\partial p}{\partial r}\right) R - \rho g \Delta z = 0\,, \\
\left(\frac{\partial p}{\partial r}\right) &= \frac{\rho g \Delta z}{R} = \frac{\rho g}{\tan\alpha}\,, \\
v &= \sqrt{\frac{R}{\rho}\left(\frac{\partial p}{\partial r}\right)} = \sqrt{\frac{Rg}{\tan\alpha}} = 41{,}2\ \mathrm{m/s}\,.
\end{aligned}$$

Rešitve: Lokalne, individualne in advektivne spremembe

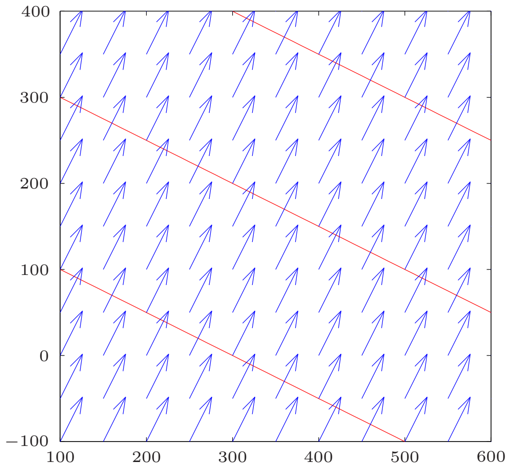
6.2: a) $\nabla p = (0, a)$, b) 996 mbar.



6.3: a) $\nabla p = (2bx, a)$, b) 1001 mbar.



6.4: a) $\nabla p = (b, a)$, b) 1005 mbar.



6.6: a) 0,25 °C/h, b) 7,1 m/s.

6.7: 0,34 °C/h.

6.8: 24,4 °C.

6.9: 23,6 °C.

6.10: 1,2 °C/h.

6.11: $\frac{\partial T}{\partial r} = \frac{3\ \mathrm{K}}{500\ \mathrm{km}}$.

Rešitve: Vlažnost

7.2:

$$f = e/e_s = 0{,}48\,.$$

7.3: 284,4 K.

7.4: 255,3 K (če upoštevamo izparilno toploto namesto sublimacijske).

7.5:

$$e(f = 90\ \%) = 21,3\ \mathrm{mbar}, \quad e(f = 10\ \%) = 2{,}4\ \mathrm{mbar}\,,$$

$$\Delta m = m(f = 90\ \%) - m(f = 10\ \%) = -8{,}5\ \mathrm{g}\,.$$

7.6:

$$m_v = \rho_v \cdot V = \frac{eV}{R_v T} = 0{,}86\ \mathrm{kg}.$$

7.7: a) 1,242 $\mathrm{kg/m^3}$, b) 1,238 $\mathrm{kg/m^3}$.

7.8: Lahko najprej izračunamo zračni tlak in nato specifično vlažnost, ki je $3{,}5 \cdot 10^{-3}$.

7.9: a) $e_s(T = 30\ °\mathrm{C}) = 43{,}6$ mbar, $q_s = 0{,}027$,

b) $e_s(T = -15\ °\mathrm{C}) = 1{,}9$ mbar, $q_s = 0{,}0012$ (če upoštevamo izparilno toploto namesto sublimacijske).

7.10:

$$f = \frac{e}{e_s}\,, \qquad \frac{df}{f} = \frac{de}{e} - \frac{de_s}{e_s} = \frac{de}{e} - \frac{h_i}{R_v}\frac{dT}{T^2}\,.$$

a) Povečanje (zmanjšanje) temperature za 3 K povzroči relativno zmanjšanje (povečanje) relativne vlažnosti za 0,22.

b) Povečanje (zmanjšanje) parnega tlaka za 1 % povzroči relativno povečanje (zmanjšanje) relativne vlažnosti za 0,01.

7.11: a) 279,9 K.

b) Pri nasičenju je absolutna vlažnost $\rho(T_d) = \frac{e_s(T_d)}{R_v T_d} = 7{,}7\ \mathrm{g/m^3}$. Končna absolutna vlažnost je $\rho_2 = \frac{e_s(T_2)}{R_v T_2} = 1{,}5\ \mathrm{g/m^3}$. Na enoto volumna zraka se kondenzira razlika, ali 6,2 g (če upoštevamo izparilno toploto namesto sublimacijske).

7.12: Upoštevamo, da vodna para ne vpliva na energijsko bilanco. Prejeta energija se porabi za dve stvari: razpenjanje zraka ($p\Delta V$) in segrevanje zraka ($mc_v\Delta T$). Z uporabo plinske enačbe in malo preurejanja se pride do enačbe $A = m(c_v{+}R)\Delta T = mc_p\Delta T$. Iz te enačbe se dobi sprememba temperature $\Delta T = 5$ K. Da dobimo relativno vlažnost, izračunamo začetni in novi nasičen parni tlak. Nova relativna vlažnost je 47 %.

7.13: Dejanski delni tlak vodne pare je $e = 18,9$ mbar, iz česar dobimo, da je temperatura rosišča enaka 16,5 °C. Ker bo jutranja temperatura nižja od temperature rosišča, bo nastala rosa.

7.14: Količina izhlapele vode na kvadratni meter površine tal je sorazmerna z razliko med dejanskim in nasičenim parnim tlakom v plasti zraka pri tleh:

$$m/S = \frac{\Delta e \cdot h}{R_v T} = 0{,}17\ \mathrm{kg/m^2}.$$

7.15: V toplem zraku (T_2) je dejanski parni tlak 11,8 mbar, v hladnem (T_1) pa 3,8 mbar. Od tu najprej izračunamo absolutno vlažnost zmesi:

$$\rho(\text{zmes}) = \frac{1}{2}\left(\frac{e_1}{R_v T_1} + \frac{e_2}{R_v T_2}\right),$$

potem delni tlak vodne pare zmesi:

$$e(\text{zmes}) = \rho(\text{zmes}) R_v T_2\,,$$

in nazadnje novo relativno vlažnost:

$$f = 0,34\,.$$

7.16:

$$m = \frac{\Delta e V}{R_v T} = 0,176\ \text{kg}\,.$$

7.17: Ob sončnem zahodu je delni tlak vodne pare $e = 13,7$ mbar, iz česar dobimo, da je temperatura rosišča enaka 11,6 °C. Ker bo jutranja temperatura nižja od temperature rosišča, bosta nastali rosa in megla.

7.18: Najprej se določi specifična vlažnost mešanice, ki je 0,0100. Če ne bo nasičenja, bo zato, ker se zračni masi mešata v enakih deležih, končna temperatura kar povprečna temperatura med 21 °C in 5 °C, kar je 13 °C. Ker je nasičen parni tlak pri tej temperaturi nižji od parnega tlaka, ki bi ga dobili iz mešanice, nastane kondenzacija. Zapišemo lahko energijsko enačbo

$$mc_{pz}(T - T_H) = m_a h_i + mc_{pz}(T_T - T)\,,$$

kjer indeksa H in T pomenita toplo in hladno temperaturo, m_a pa maso vode, ki se kondenzira. To lahko zapišemo kot razliko mas vodne pare pred kondenzacijo in po njej

$$m_a = m_{v1} - m_{v2} = mq - mq_s(T) = mq - \frac{mR}{pR_v} e_s(T)\,,$$

kjer je q specifična vlažnost mešanice. Od tod dobimo

$$c_{pz}(T - T_H) = qh_i - \frac{Rh_i}{pR_v} e_s(T) + c_{pz}(T_T - T)\,.$$

Ker temperature iz te enačbe ne moremo analitično izraziti (v $e_s(T)$ nastopa v eksponentu), je treba enačbo rešiti numerično. Rezultat je 286,4 K. Od tod dobimo, da se kondenzira $m_a =$ 0,35 g vode na kilogram zraka.

7.19: Nasičena parna tlaka sta 12,3 mbar in 11,5 mbar. Iz vsakega kubičnega metra se izloči 0,59 g vode.

7.21: Nad vodo je 2,4 mbar. Nad ledom uporabimo enako Claussius-Clapeyronovo enačbo, le da specifično izparilno toploto h_i zamenjamo s specifično sublimacijsko toploto h_s. Rezultat je 2,2 mbar.

7.22:

$$\frac{f_{\text{voda}}}{f_{\text{led}}} = \frac{e_{s,\text{led}}}{e_{s,\text{voda}}} = 1{,}05\,.$$

7.23: Potek temperature s časom hočemo zapisati kot sinusno funkcijo časa (t). Torej

$$T(t) = T_A + T' \cdot \sin[a \cdot t + b]\,,$$

kjer sta $T_A = 288$ K in $T' = 10$ K. Določiti je treba še konstanti a in b tako, da bo temperatura ob 14.00 maksimalna, ob 8.00 pa minimalna. Da se to izpolni, mora biti argument v sinusu ob 14.00 enak $\pi/2$, ob 8.00 pa $-\pi/2$. Za a, b se tako dobi sistem dveh enačb, od koder sledi $a = \frac{\pi}{6}\ \text{h}^{-1}$ in $b = -\frac{11\pi}{6}$.

Relativna vlažnost je odvisna od temperature:

$$\begin{aligned} f &= \frac{e}{e_s(T)} = \frac{qpR_v}{R}\frac{1}{e_s(T)} = \frac{qpR_v}{Re_{s0}}\mathrm{e}^{-\frac{h_i}{R_v}\left(\frac{1}{T_0}-\frac{1}{T}\right)} = \\ &= \frac{qpR_v}{Re_{s0}}\mathrm{e}^{-\frac{h_i}{R_v}\left(\frac{1}{T_0}-\frac{1}{T_A+T'\cdot\sin[a\cdot t+b]}\right)}. \end{aligned}$$

Ob 10.00 bo relativna vlažnost 40 %.

7.24: Nasičena parna tlaka pri temperaturi suhega in mokrega termometra sta $e_s(T) = 14{,}08$ mbar in $e_s(T_m) = 12,13$ mbar. Dejanski parni tlak izračunamo s psihrometrsko enačbo:

$$e = e_s(T_m) - \frac{c_{pz}pR_v}{h_iR}(T - T_m) = 11,1\ \text{mbar}\,.$$

Relativna vlažnost je 79 %.

7.25: Iz psihrometrske enačbe izračunamo delni tlak vodne pare 8,8 mbar. Temperatura rosišča je 278,1 K.

7.26: Z uporabo psihrometrske enačbe pridemo do naslednjega izraza:

$$f \cdot e_s(T) = e_s(T_m) - \frac{c_{pz}pR_v}{h_iR}(T - T_m)\,.$$

Enačba je implicitna, saj T_m ne moremo izraziti analitično. Rešitev poiščemo z računskimi iteracijami; $T_m = 14$ °C.

7.27: a) Privzamemo, da se vse kapljice, ki padejo na most, takoj ohladijo in zamrznejo na temperaturo mosta. Energija, ki se sprosti pri ohlajanju, zmrzovanju vodnih kapljic in ohlajanju zaledenelih kapljic, se porabi, da se most greje. Energijo ob segrevanju mosta lahko zapišemo kot $m_M c_M \Delta T' = \rho_M S d c_M \Delta T'$. Kjer sta S, d površina in debelina mosta, c_M specifična toplotna kapaciteta mostu, $\Delta T'$ pa 1 K.

Energijo, ki se sprosti z ohlajanjem kapljic do ledišča, lahko podobno zapišemo kot $\rho_a S RR t c_a \Delta T''$, kjer je RR intenziteta padanja padavin (5 mm/h), t čas, c_a specifična toplota vode, $\Delta T''$ pa 10 K. Podobno tudi za ohlajanje zaledenelih kapljic za eno stopinjo, le da namesto c_a uporabimo specifično toploto za led c_l. Energijo, ki se porabi za zmrzovanje kapljic, pa $\rho_a S RR t h_t$, kjer je ρ_a gostota vode h_t pa specifična talilna toplota vode. Rezultat je približno 0,2 h.

b) Energijo ob segrevanju mosta zapišemo na enak način kot prej, a za kapljice upoštevamo le toploto, ki se sprošča ob ohlajanju do ledišča (toplote, ki se sprošča ob zmrzovanju in ohlajanju kapljic pod temperaturo ledišča, nam ni treba upoštevati, saj se bo enaka količina toplote pozneje porabila tudi za njihovo segrevanje nazaj do ledišča in taljenje). Rezultat je 3,8 h.

7.28: Skupna količina padavin, akumuliranih v dežemeru, ni odvisna od horizontalnega vetra (če je dežemer res postavljen vodoravno). Odvisna je le od vertikalne hitrosti padanja kapljic. V treh urah je:

$$m = \rho_k \Delta t w S_0 = 7{,}8 \text{ kg}\,.$$

Če padajo snežinke, se nabere le 2,2 kg.

7.29: Virtualna temperatura je temperatura suhega zraka z dodatkom, ki nam pove, kako vlažnost zraka q vpliva na skupno gostoto zraka (H_2O je lažji od mešanice N_2 + O_2 + $\cdots$).

$$T_v = T(1 + \frac{R_v - R}{R} q) = 306{,}7 \text{ K}\,.$$

Rešitve: Adiabatne spremembe

8.3: Izračunamo temperaturo rosišča pri tleh. Izhajamo iz enačbe za specifično vlago $q = \frac{e}{p}\frac{R}{R_v}$, s katero izračunamo parni tlak $e = 176,7$ Pa, ki določa temperaturo rosišča $T_d = -16$ °C. Zrak se od tal dviguje najprej po suhi adiabati, dokler na višini $z_B = 3,72$ km ne postane nasičeno vlažen. Naprej se dviguje po mokri adiabati do končne višine 6 km, kjer ima temperaturo $T = -38,2$ °C.

8.4: Iz višine baze oblaka izračunamo temperaturo rosišča zraka pri tleh: $T_d = 4,6$ °C. Relativna vlaga je razmerje nasičenega tlaka vodne pare pri temperaturi rosišča (e_s (4,6 °C) = 848,1 Pa) z nasičenim tlakom vodne pare pri temperaturi 15 °C, (e_s (15 °C) = 1704,1 Pa), torej $f = 50$ %.

8.5: Višina pobočja je $h = vt \cdot \sin\alpha = 870$ m. a) $\Delta T = -\Gamma_a h - \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right) h = -4,4$ K. b) $\Delta T = -\Gamma_s h - \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right) h = 0,9$ K.

8.6: Temperatura rosišča zraka pri tleh je $T_d = 11,6$ °C. Višina baze oblaka je $h = 0,4$ km, nad to višino je zrak nasičeno vlažen. Relativna vlaga na 500 m je torej 100 %.

8.7: Pri dvigu se temperatura zraka zniža na $T_2 = 7$ °C. Delni tlak vodne pare pred dvigom je $e_1 = \rho_{v1} R_v T_1 = 935,8$ Pa, na višini 1000 m pa sta delni tlak vodne pare in absolutna vlaga:

$$e_2 = e_1 \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{c_p}{R}} = 827{,}7 \text{ Pa}\,.$$

$$\rho_{v2} = \frac{e_2}{R_v T_2} = 6{,}4 \text{ g/m}^3\,.$$

8.8: Iz specifične vlage izračunamo delni tlak vodne pare pri tleh $e_1 = 803$ Pa in nato relativno vlago zraka pri tleh $f_1 = 33,9$ %. Na višini 500 m ima dvigajoči se zrak temperaturo 15 °C, delni tlak vodne pare se med dviganjem spreminja v odvisnosti od temperature:

$$e_2 = e_1 \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{c_p}{R}} = 756 \text{ Pa}$$

Relativna vlaga na višini 500 m je $f_2 = e_2/e_{s2} = 44,0$ %. Nivo kondenzacije je na višini 1,94 km.

8.9: a) Izračunamo temperaturo zraka (T_2) in nasičen parni tlak (e_2) pri tej temperaturi. Nato izračunamo delni tlak vodne pare na višini 1000 mbar in končno relativno vlago f_1 pri tleh:

$$\begin{aligned} T_2 &= T_1 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{R}{c_p}} = 287{,}3 \text{ K}\,, \\ e_2 &= e_s(T_2) = 1628{,}8 \text{ Pa}\,, \\ e_1 &= e_2 \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{c_p}{R}} = 1917{,}0 \text{ Pa}\,, \\ f_1 &= \frac{e_1}{e_s(T_1)} = 50{,}7\ \%. \end{aligned}$$

b) Spremembe so majhne in hitre, zato uporabimo diferencialno obliko energijske enačbe:

$$\begin{aligned} mc_p\Delta T - V\Delta p + h_i\Delta m_v &= 0\,, \\ c_p\Delta T - \frac{\Delta p}{\rho} + h_i\Delta q &= 0\,. \end{aligned}$$

Količina kondenzirane vodne pare, izražena kot sprememba specifične vlage:

$$\Delta q = \frac{\Delta p}{\rho h_i} - \frac{c_p}{h_i}\Delta T = 0{,}3 \text{ g/kg}\,.$$

8.10: $z = 1{,}4$ km.

8.11: Višina, na kateri bi se pojavili kumulusni oblaki (če bi konvekcija segala do te višine) je $z = 2$ km. V resnici pa prosta konvekcija sega le do višine 1,1 km, oblaki torej niso nastali.

8.12: $\rho_1 = 1{,}2$ kg/m^3, $T_2 = 255{,}6$ K, $\rho = 0{,}95$ kg/m^3.

8.13: a) Temperatura rosišča pri tleh je $T_d = 9,6$ °C. Baza oblaka je na višini $z_B = 648$ m. Da, hrib ima oblačno kapo.

b) $T_d = 13{,}4$ °C, $z_B = 192$ m.

8.14: a) Zrak se premeša do višine 1 km.

b) Ne, oblačnost se ne pojavi.

8.15: a) $T_d = 14{,}1$ °C.

b) Kondenzacijski nivo je na višini $z = 846$ m, kjer je temperatura zraka $T = T_0 - \Gamma_a\Delta z = 12{,}5$ °C in zračni tlak:

$$p_2 = p_1 \cdot \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{c_p}{R}} = 903 \text{ mbar}\,.$$

8.16: Temperatura rosišča pri tleh je T_d = 15,45 °C. Kondenzacija nastane na višini z_1 = 300 m nad nivojem morja. z = 700 m nad morjem je torej relativna vlaga 100 %, temperatura zraka pa $T = T_0 - \Gamma_a z_1 - \Gamma_s(z - z_1)$ = 12,2 °C.

8.17: Da. Reši z rotiranim (T, $\ln p$) diagramom.

8.18: a) e = 1274,8 Pa, T_d = 10,6 °C.
b) Pomagaj si z rotiranim (T, $\ln p$) diagramom. T = 18 °C.

8.19: Izračunamo najprej delni tlak vodne pare na obeh straneh hriba. Predpostavimo npr. zračni tlak 1000 mbar in izračunamo specifično vlago na obeh straneh. Izloči se Δq = 4 g/kg padavin.

8.20: Zrak se premeša do višine 3,6 km. Nalogo lahko rešiš računsko ali z (T, z) diagramom.

8.21:

$$\omega = \sqrt{g \frac{\Gamma_a + \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)}{T_{ok}}} = 0,01 \text{ s}^{-1}.$$

V labilni atmosferi ne nastane nihanje, ampak odmiku dela zraka od ravnovesja sledi nadaljnje pospešeno gibanje v smeri odmika.

8.22: Predpostavimo, da se vertikalna hitrost vetra $w = v \cdot \sin\alpha = 3,4$ m/s z višino ne spreminja. Maksimalna količina padavin je enaka celotni količini kondenzirane vodne pare:

$$\begin{aligned} RR &= \int_{\text{baza}}^{\text{vrh}} \frac{c_p}{h_i}(\Gamma_a - \Gamma_s(z))w(z)\rho(z)\mathrm{d}z = \frac{c_p}{g h_i} \int_{1000 \text{ mbar}}^{500 \text{ mbar}} (\Gamma_a - \Gamma_s(p))w(p)\mathrm{d}p \\ &\doteq \frac{w c_p}{g h_i} \sum_i (\Gamma_a - \Gamma_s(p))\Delta p_i \doteq 347,5 \text{ mm}. \end{aligned}$$

Rešitve: Emagrami

9.2: Rešitev ni narisana.

9.4: a) Rešitev ni narisana, b) naloga se reši podobno kot naloge iz poglavja o vlažosti: 52 % (1000 mb) in 40 % (700 mbar), c) 200 mbar, d) nikjer. Temperatura rosišča ni nikjer enaka temperaturi zraka e) okoli 890 mbar, f) okoli 890 mbar, g) okoli 770 mbar, h) okoli 170 mbar. i) Ko sonce sredi dneva sije na tla, se ta segrejejo. Hkrati s tlemi se segreje tudi zrak pri tleh, zraku višje nad tlemi pa se temperatura ne spremeni. To segrevanje pri tleh lahko povzroči, da zrak pri tleh postane toplejši od okolice (začne se konvekcija). Kdaj se zrak pri tleh tako segreje, da brez pomoči prisilnega dviga doseže kondenzacijski nivo, in tako se ustvari prosta konvekcija s kondenzacijo. Medtem ko se zrak v stiku s tlemi segreva, ostane količina vodne pare v zraku konstantna (seveda ob predpostavki, da iz tal ni izhlapevanja). To pomeni, da se temperatura rosišča med segrevanjem ohranja. Naloga sprašuje, do katere temperature bi se zrak pri tleh moral segreti, da bi bil v trenutku, ko bi dosegel kondenzacijski nivo prisilnega dviga, toplejši od okoliškega zraka. To se ugotovi s spremljanjem krivulje spreminjanja temperature rosišča do točke, kjer seka temperaturo okoliškega zraka (okoli višine 750 mbar). Na tej višini (ali višje) mora biti kondenzacijski nivo. Od te višine se preprosto sledi navzdol po črti, ki opisuje temperaturo dvigajočega se zraka, do tal. Kjer črta seka tla, lahko preberemo temperaturo (okoli 43 °C). Zrak pri tleh bi se torej moral segreti za 9 °C (od 34 °C na 43 °C).

9.5: a) pade od 12 °C (800 mbar) na −20 °C (500 mbar), torej temperatura pade približno za 32 °C, b) dve oblačni plasti: 500–400 mbar in 300–250 mbar, c) 250 mbar, d) okoli 850 mbar, e) okoli 610 mbar, f) za približno 12 °C (na približno 32 °C), g) do višine okoli 240 mbar.

9.6: a) okoli 5 °C (700 mbar) in −40 °C (500 mbar), b) ni oblačnih plasti, c) 900 mbar, d) Ne. Hrib bi moral biti visok vsaj do 800 mbar, da bi nastala prosta konvekcija, e) do vrha hriba (850 mbar), saj se naprej zrak ne bo več dvigal f) za približno 6 °C (na približno 31 °C), g) do višine okoli 200 mbar.

9.7: a) okoli −23 °C, b) ena oblačna plast pri okoli 700 mbar, c) 930 mbar, d) prosta konvekcija skorajda ne nastane. Imamo le majhno prosto konvekcijo pod višino 700 mbar, e) Naloga je malo obrnjena od prejšnjih primerov, razmišljanje pa podobno. Iz temperature okoliškega zraka na višini 200 mbar se spustimo po črti, ki nam opisuje segrevanje, nasičeno vlažnega zraka do višine, kjer seka črto, ki opisuje spremembo temperature rošišca od dviganju. Na tej višini (okoli 580 mbar) mora biti kondenzacijski nivo prisilnega dviga. Od te višine se preprosto sledi navzdol po črti, ki opisuje temperaturo dvigajočega se zraka, do tal. V našem primeru črta seka tla okoli temperature 50 °C. Zrak pri tleh bi se torej moral segreti za 35 °C (iz 15 °C na 50 °C), f) oblak bi segal od kondenzacijskega nivoja prisilnega dviga (okoli 580 mbar) do višine 200 mbar.

Rešitve: Sevanje

10.2: $P = \epsilon\sigma S(T^4_{\text{sten}} - T^4_{\text{koze}}) = 114$ J/s.

10.3: $P = \epsilon\sigma T^4 S = 286,9$ W.

10.4: Energija, ki jo Zemlja prejme od Sonca v enem dnevu, je: $E_s = (1-a)j_o t \cdot \pi R_z^2$. Energija, ki se porabi za izhlapevanje: $E_i = mh_i = RR \cdot t\rho_v h_i \cdot 4\pi R_z^2$, kjer je $RR = 2,7$ mm/dan. Delež energije, ki se porabi za izhlapevanje: $E_i/E_s = 0,34$.

10.5: Privzamemo linearen potek višine sonca čez dan, torej sinusno spreminjanje gostote energijskega toka, ki ogreva našo ploskev. Energija, ki jo ploskev prejme v enem dnevu, je:

$$E_d = \int_0^{t_0} j_o S \sin\left(\frac{\pi}{3}\frac{t}{t_o}\right) \mathrm{d}t + \int_{t_0}^{2t_0} j_o S \sin\left(\frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{3}\frac{t}{t_o}\right) \mathrm{d}t = j_o S \frac{3t_o}{\pi} \,,$$

pri čemer je t_o polovica dneva, torej 6 h. Za izhlapitev $h = 1200$ mm padavin potrebujemo energijo $E_i = qm_v = qSh\rho_v$. Število dni, potrebnih za izhlapitev vse vode, je potem: $N = E_i/E_d = 106$.

10.7: a) Ves prejeti toplotni tok se porabi za segrevanje jezera: $P_e t = mc_v \Delta T$. Izračunamo, da je $\frac{\Delta T}{t} = \frac{P_e}{mc_v} = 0{,}01$ K/dan.
b) Ko se vzpostavi novo ravnovesje, je energijski tok, ki ga jezero oddaja s sevanjem, povečan za toplotni tok, ki ga jezero prejema od elektrarne: $\epsilon T^4_{\text{nova}} S = \epsilon T^4 S + P_e$. Nova ravnovesna temperatura je:

$$T_{\text{nova}} = \sqrt[4]{T^4 + \frac{P_e}{\epsilon\sigma S}} = 284 \text{ K} \,.$$

Jezero se je torej segrelo za 1 K.
c) V tem primeru mora biti toplota porabljena za izhlapevanje enaka odpadni toploti iz elektrarne in dobimo za hitrost izhlapevanja (sprememba višine vode jezera v času) $\frac{dh}{dt} = \frac{P_e}{h_i \rho_a S} = 0{,}17$ mm/dan.

10.8: Iz enačbe za ravnovesje energije: $E = m_v q_i + \epsilon\sigma T^4 S t$, izračunamo temperaturo $T = 12,7$ °C.

10.9: a) 53,5 dni, b) 90,5 dni.

10.10: a) Ob upoštevanju, da se absorbirana energija sončnega sevanja porablja le za izhlapevanje vode, lahko zapišemo hitrost spremembe višine stoplca vode zaradi izhlapevanja kot $\frac{dz_i}{dt} = k_i = \frac{j_t \sin 25° \beta}{\rho_a h_i}$, kjer je j_t gostota energijskega toka sončnega sevanja, β delež sevanja, ki se absorbira, ρ_a gostota vode in h_i specifična izparilna toplota vode. Dobimo $k_i = 1,08 \cdot 10^{-7}$ m/s, kar pomeni, da bi stolpec vode visok 0.5 m vode izhlapel v 53,5 dneh.

b) V ravnovesnem stanju bo volumen vode, ki izhlapeva, enak volumnu vode, ki priteka v jezero. Glede na to, da je hitrost izhlapevanja k_i konstantna, je celoten volumen vode, ki izhlapeva, odvisen le do trenutne povšine jezera S, kar lahko zapišemo kot $\frac{dV_i}{dt} = k_i S$. V ravnovesnem stanju mora izhlapevanje biti enako volumskemu pritoku 1000 m^3/h, od koder se dobi $S = 2,57 \cdot 10^6$ m^2. Površina jezera je zaradi oblike kotanje jezera odvisna od njegove globine h in jo lahko izrazimo kot $S = \pi \left(\frac{r_0}{2} + \frac{h}{h_0} r_0\right)^2$, kjer je $r_0 = 1000$ m in $h_0 = 0,5$ m. Od tod dobimo dobimo, da bi prej izračunani velikosti površine jezera ustrezala globina $h = 0,20$ m.

c) Spremembo volumna jezera lahko izrazimo kot razliko med volumskim pritokom ϕ in izhlapevanjem: $\frac{dV}{dt} = \phi - k_i S(h)$. Ob upoštevanju $dV = S(h)dh$ dobimo diferencialno enačbo $\frac{dh}{dt} = \frac{\phi}{S(h)} - k_i$ v kateri kot neodvisni spremenljivki nastopata h in t. V enačbo vstavimo izraz za $S(h)$ in jo rešimo z integracijo, ter izrazimo čas, ki je potreben, da izhlapi celotno jezero, kar nam da rezultat 71,8 dni.

10.11: a) 733 W, b) 769 W.

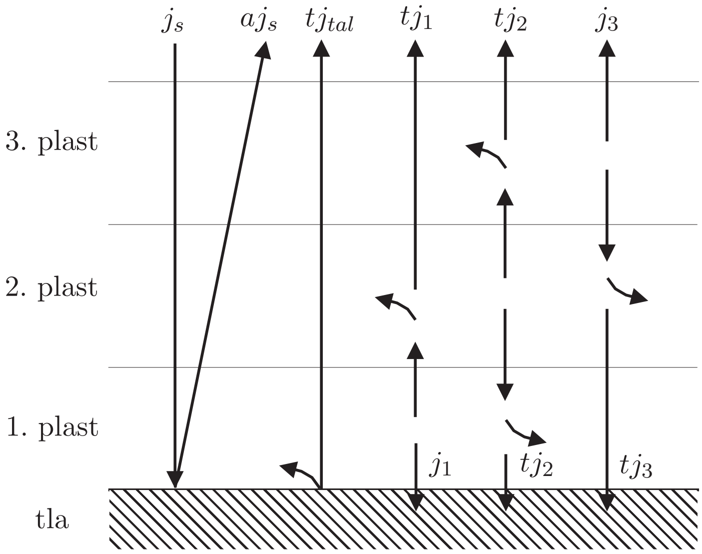
10.12: Rešujemo difuzijsko enačbo:

$$\frac{\lambda}{\rho c_p} \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} = \frac{\partial T}{\partial t}$$

z začetnim pogojem $T = T_o + (T_{max} - T_o) \sin((t - t_o)\frac{\pi}{12\text{ h}})$. Rešimo in dobimo enačbo, ki opisuje spreminjanje temperature s časom na različnih višinah: $T = T_o + (T_{max} - T_o) \mathrm{e}^{-k_1 z} \sin\left((t - t_o)\frac{\pi}{12\mathrm{h}} k_1 z\right)$, kjer je $k_1 = \pi/(2D \cdot 12\text{ h})$. Označili smo $D = \lambda/\rho c_p$. Na globini 15 cm je amplituda nihanja temperature 8 K.

10.13: $T_{\text{tal}} = 276$ K.

10.14: Za tla in vsako od plasti ozračja velja, da je vsota energijskih tokov 0.



$$\begin{aligned} \text{tla:} \quad & j_{tal} = (1-a)j_s + j_1 + tj_2 + tj_3 \\ \text{1. plast:} \quad & 2j_1 = (1-t)j_{tal} + (1-t)j_2 \\ \text{2. plast:} \quad & 2j_2 = (1-t)j_1 + (1-t)j_3 \\ \text{3. plast:} \quad & 2j_3 = (1-t)j_2 \end{aligned}$$

Temperatura tal je 300 K.

10.15: a) Predpostavimo, da se kot sonca od 11.30 do 12.30 ne spreminja:

$$Q = j_t S_0 \sin\varphi_0 t = 1497 \text{ J}\,.$$

b) Ravnovesno temperaturo opoldne izračunamo s sevalno bilanco za črno telo, kjer predpostavimo, da ploščica seva le v polprostor navzgor:

$$T = \sqrt[4]{\frac{j_0 \sin\varphi_0}{\sigma}} = 332{,}5 \text{ K}\,.$$

c) Spreminjanje kota višine sonca s časom od sončnega vzhoda ($t = 0$) do opoldneva ($t = t_0$) lahko opišemo z enačbo:

$$\varphi(t) = \varphi_0 \frac{t}{t_0}$$

Ker bo ploščica popoldne prejela enako energijo kot dopoldne lahko skupno prejeto energijo dobimo kot:

$$Q_s = 2\int_0^{t_0} P(t)\mathrm{d}t = 2\int_0^{t_0} j_t S_0 \sin\left(\varphi(t)\right)\mathrm{d}t = \frac{2j_t S_0 t_0 (1-\cos\varphi_0)}{\varphi_0} = 10313 \text{ J}$$

10.16: Prejeta moč sončnega obsevanja in sevanja okoliškega zraka je enaka izsevani moči bučke:

$$(1 - a_{ter}) j_s S_0 + \varepsilon_z \sigma T_z^4 4 S_0 = \varepsilon_{ter} \sigma T_{ter}^4 4 S_0,$$

kjer je S_0 površina okrogle bučke. Od tod dobimo

$$a_{ter} = 1 - \frac{4\sigma(\varepsilon_{ter} T_{ter}^4 - \varepsilon_z T_z^4)}{j_s} = 0{,}1\,.$$

Rešitve: Fronte

11.2: Hitrost potovanja fronte določa komponenta vetra, pravokotna na fronto. Ta komponenta mora biti enaka v toplem in v hladnem sektorju. Če je β kot med fronto in vetrom v toplem sektorju, mora torej veljati enačba: $v_t \sin\beta = v_h \sin(\pi/4 + \pi/6 - \beta)$. Izračunamo kot $\beta = 29{,}2°$. Hitrost potovanj fronte je potem $u = v_t \sin\beta = 12{,}5$ m/s.

11.3: Iz nagiba fronte izračunamo striženje vetra ob fronti, nato pa še veter v toplem zraku. Ta piha s hitrostjo 35 m/s iz smeri 129,2°.

11.4: Fronta leži v smeri JZ–SV in potuje s hitrostjo 7,1 m/s.

11.5: Hitrost: 14,9 m/s, smer: 294,1°.

11.7: Uporabimo enačbe, ki veljajo za fronto. Nagib zgornje meje jezera hladnega zraka je $\mathrm{tg}\,\alpha = 1/231$. Nivo inverzije na drugi strani kotline je 273 m, to je skrajni južni del kotline.

11.8: $\mathrm{tg}\,\alpha = 1/456$.

11.9: Nagib stacionarne površine je $\mathrm{tg}\,\alpha = 1/159$. Po umiritvi vetrov v toplem zraku bi bil nagib ploskve $\mathrm{tg}\,\alpha = 1/484$.

11.10: Nagib fronte je 1/326. Cirusni oblaki se pojavijo približno 2600 km pred fronto. S 1000 m visokega hriba opazimo cirusne oblake, ko so oddaljeni približno 400 km (upoštevan R_z = 6378 km).

Dodatki

Seznam uporabljenih simbolov in oznak

c_{pa}	specifična toplota vode pri stalnem tlaku, $c_{\mathrm{pa}} = 4181$ J/kgK.
c_{pl}	specifična toplota ledu pri stalnem tlaku, $c_{\mathrm{pl}} = 2114$ J/kgK.
c_{pv}	specifična toplota vodne pare pri stalnem tlaku, $c_{\mathrm{pv}} = 1847$ J/kgK.
c_{pz}	specifična toplota suhega zraka pri stalnem tlaku, $c_{\mathrm{pz}} = 1004$ J/kgK.
g_0	standardna vrednost težnostnega pospeška, $g_0 = 9{,}81$ m/s^2.
h_i	specifična izparilna toplota (voda-para), $h_i = 2{,}50$ MJ/kg.
h_s	specifična sublimacijska toplota (led-para), $h_s = 2{,}83$ MJ/kg.
h_t	specifična talilna toplota (led-voda), $h_i = 0{,}33$ MJ/kg.
j_0	solarna konstanta, obsevanost, to je gostota energijskega toka sončnega obsevanja Zemlje na vrhu ozračja, $j_0 \approx 1400$ W/m^2.
R^*	splošna plinska konstanta, $R^* = 8317$ J/kmolK.
R	specifična plinska konstanta za zrak, $R = 287$ J/kgK.
R_v	specifična plinska konstanta za vodno paro, $R_v = 461{,}5$ J/kgK.
Γ_a	(negativna) individualna sprememba temperature pri adiabatnem pomiku nenasičenega zraka v vertikalni smeri, $\Gamma_a = -\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}z} = 10$ K/km.
Γ_s	(negativna) individualna sprememba temperature pri adiabatnem pomiku nasičenega zraka v vertikalni smeri, $\Gamma_s = -\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}z}$.

Tabela nasičenega parnega tlaka

V naslednji tabeli imamo podatke o nasičenem parnem tlaku v Pascalih, izračunane po Clausius-Clapeyronovi enačbi. Uporabljena je oblika enačbe, ki jo predlagata R. R. Rogers in M. K. Yau na strani 16 v knjigi *A Short Course in Cloud Physics* (Pergamon Press):

$$e_s(T) = 611{,}2\ \mathrm{Pa} \cdot \exp\left(\frac{17{,}67\,T}{T + 243{,}5}\right) ,$$

kjer je temperatura T podana v stopinjah Celzija.

T [°C]	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
−20	125,74	124,66	123,59	122,53	121,47	120,43	119,39	118,36	117,34	116,32
−19	137,00	135,83	134,68	133,53	132,39	131,26	130,14	129,03	127,92	126,83
−18	149,15	147,89	146,65	145,41	144,18	142,96	141,75	140,55	139,36	138,17
−17	162,26	160,90	159,56	158,22	156,90	155,58	154,28	152,98	151,69	150,42
−16	176,39	174,93	173,48	172,04	170,61	169,19	167,79	166,39	165,00	163,63
−15	191,61	190,04	188,48	186,93	185,39	183,86	182,34	180,84	179,34	177,86
−14	208,00	206,30	204,62	202,95	201,30	199,65	198,02	196,40	194,79	193,20
−13	225,62	223,80	221,99	220,20	218,42	216,65	214,89	213,15	211,42	209,70
−12	244,57	242,61	240,67	238,74	236,82	234,92	233,03	231,16	229,30	227,45
−11	264,92	262,82	260,73	258,66	256,60	254,56	252,53	250,52	248,52	246,54
−10	286,77	284,51	282,28	280,05	277,84	275,65	273,47	271,31	269,17	267,04
−9	310,21	307,79	305,39	303,01	300,64	298,29	295,95	293,63	291,33	289,04
−8	335,35	332,76	330,18	327,62	325,08	322,56	320,06	317,57	315,10	312,65
−7	362,28	359,50	356,75	354,01	351,29	348,58	345,90	343,23	340,59	337,96
−6	391,12	388,15	385,20	382,26	379,35	376,46	373,58	370,73	367,89	365,08
−5	421,99	418,81	415,65	412,51	409,39	406,30	403,22	400,17	397,13	394,12
−4	455,01	451,60	448,22	444,87	441,53	438,22	434,93	431,66	428,42	425,19
−3	490,30	486,66	483,05	479,46	475,90	472,36	468,84	465,35	461,88	458,43
−2	528,00	524,11	520,26	516,42	512,62	508,84	505,08	501,35	497,64	493,95
−1	568,25	564,10	559,99	555,90	551,83	547,79	543,78	539,80	535,84	531,90
−0	611,20	606,78	602,39	598,02	593,69	589,38	585,10	580,84	576,62	572,42
0	611,20	615,65	620,13	624,64	629,17	633,74	638,33	642,96	647,61	652,29
1	657,01	661,75	666,52	671,33	676,16	681,03	685,93	690,86	695,82	700,81
2	705,83	710,89	715,97	721,09	726,24	731,43	736,64	741,89	747,18	752,49
3	757,84	763,23	768,64	774,09	779,58	785,10	790,65	796,24	801,87	807,52
4	813,22	818,95	824,71	830,52	836,35	842,23	848,14	854,08	860,07	866,09
5	872,15	878,24	884,38	890,55	896,76	903,00	909,29	915,61	921,98	928,38
6	934,82	941,30	947,82	954,38	960,98	967,62	974,31	981,03	987,79	994,60
7	1001,44	1008,33	1015,26	1022,23	1029,24	1036,30	1043,40	1050,54	1057,73	1064,95
8	1072,23	1079,54	1086,90	1094,30	1101,75	1109,25	1116,78	1124,37	1132,00	1139,67
9	1147,39	1155,16	1162,97	1170,83	1178,74	1186,69	1194,69	1202,74	1210,83	1218,98
10	1227,17	1235,41	1243,70	1252,04	1260,43	1268,86	1277,35	1285,89	1294,48	1303,11
11	1311,80	1320,54	1329,33	1338,18	1347,07	1356,02	1365,02	1374,07	1383,17	1392,33
12	1401,54	1410,80	1420,12	1429,49	1438,92	1448,40	1457,94	1467,53	1477,18	1486,88
13	1496,64	1506,46	1516,33	1526,26	1536,25	1546,29	1556,39	1566,55	1576,77	1587,05
14	1597,39	1607,78	1618,23	1628,75	1639,32	1649,96	1660,65	1671,41	1682,23	1693,11
15	1704,05	1715,05	1726,12	1737,25	1748,44	1759,69	1771,01	1782,40	1793,84	1805,35
16	1816,93	1828,57	1840,28	1852,05	1863,89	1875,80	1887,77	1899,81	1911,92	1924,09
17	1936,34	1948,65	1961,03	1973,48	1986,00	1998,58	2011,24	2023,97	2036,77	2049,64
18	2062,58	2075,60	2088,68	2101,84	2115,07	2128,38	2141,75	2155,21	2168,73	2182,33
19	2196,01	2209,76	2223,58	2237,48	2251,46	2265,51	2279,65	2293,85	2308,14	2322,50
20	2336,95	2351,47	2366,07	2380,75	2395,51	2410,35	2425,27	2440,27	2455,35	2470,52
21	2485,76	2501,09	2516,51	2532,00	2547,58	2563,24	2578,99	2594,82	2610,74	2626,74
22	2642,83	2659,00	2675,26	2691,61	2708,05	2724,57	2741,19	2757,89	2774,68	2791,56
23	2808,53	2825,59	2842,74	2859,98	2877,31	2894,74	2912,25	2929,86	2947,57	2965,36
24	2983,25	3001,24	3019,32	3037,50	3055,77	3074,13	3092,60	3111,16	3129,82	3148,57
25	3167,43	3186,38	3205,44	3224,59	3243,84	3263,19	3282,65	3302,20	3321,86	3341,62
26	3361,48	3381,45	3401,51	3421,69	3441,96	3462,35	3482,84	3503,43	3524,13	3544,94
27	3565,85	3586,87	3608,00	3629,24	3650,59	3672,05	3693,62	3715,30	3737,09	3758,99
28	3781,00	3803,13	3825,37	3847,72	3870,19	3892,77	3915,47	3938,28	3961,21	3984,25
29	4007,41	4030,69	4054,09	4077,61	4101,24	4124,99	4148,87	4172,86	4196,98	4221,22
30	4245,58	4270,06	4294,66	4319,39	4344,24	4369,22	4394,33	4419,55	4444,91	4470,39

Prazen Emagram