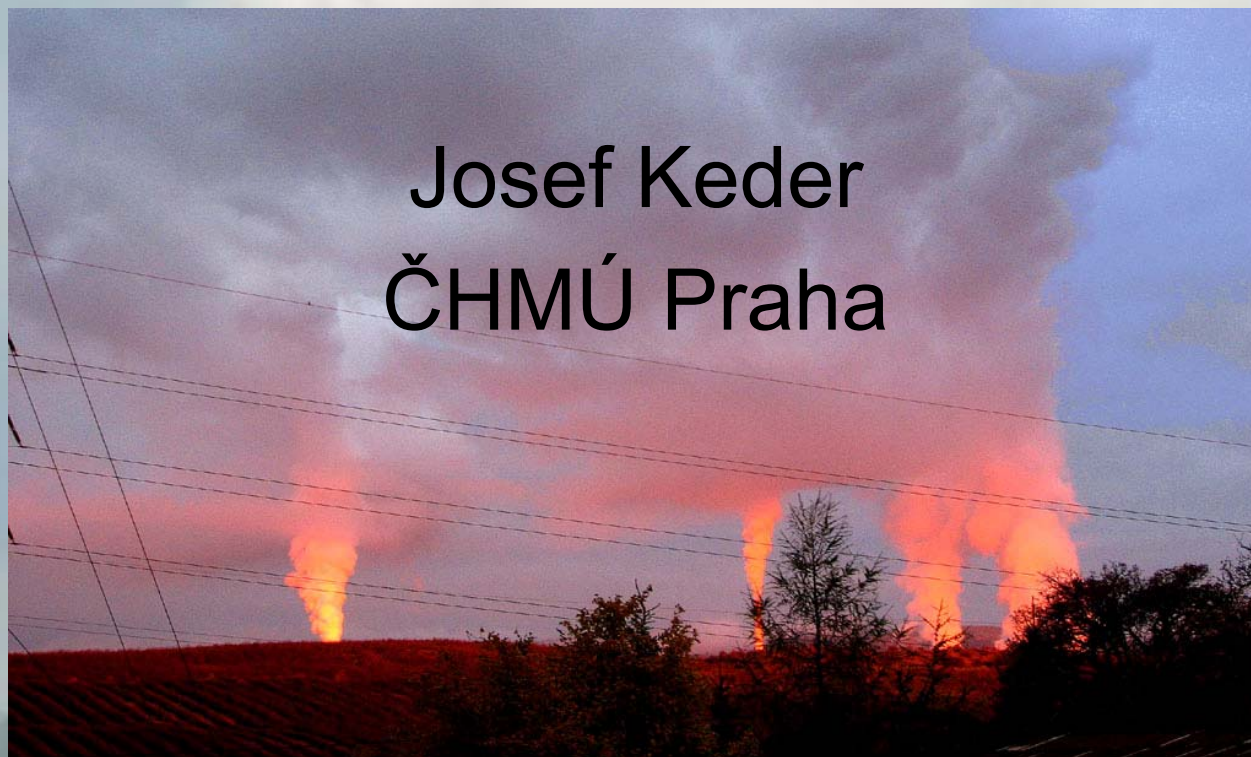


Základy meteorologie pro aplikaci při řešení problému rozptylu znečišťujících látek v ovzduší

Josef Keder
ČHMÚ Praha



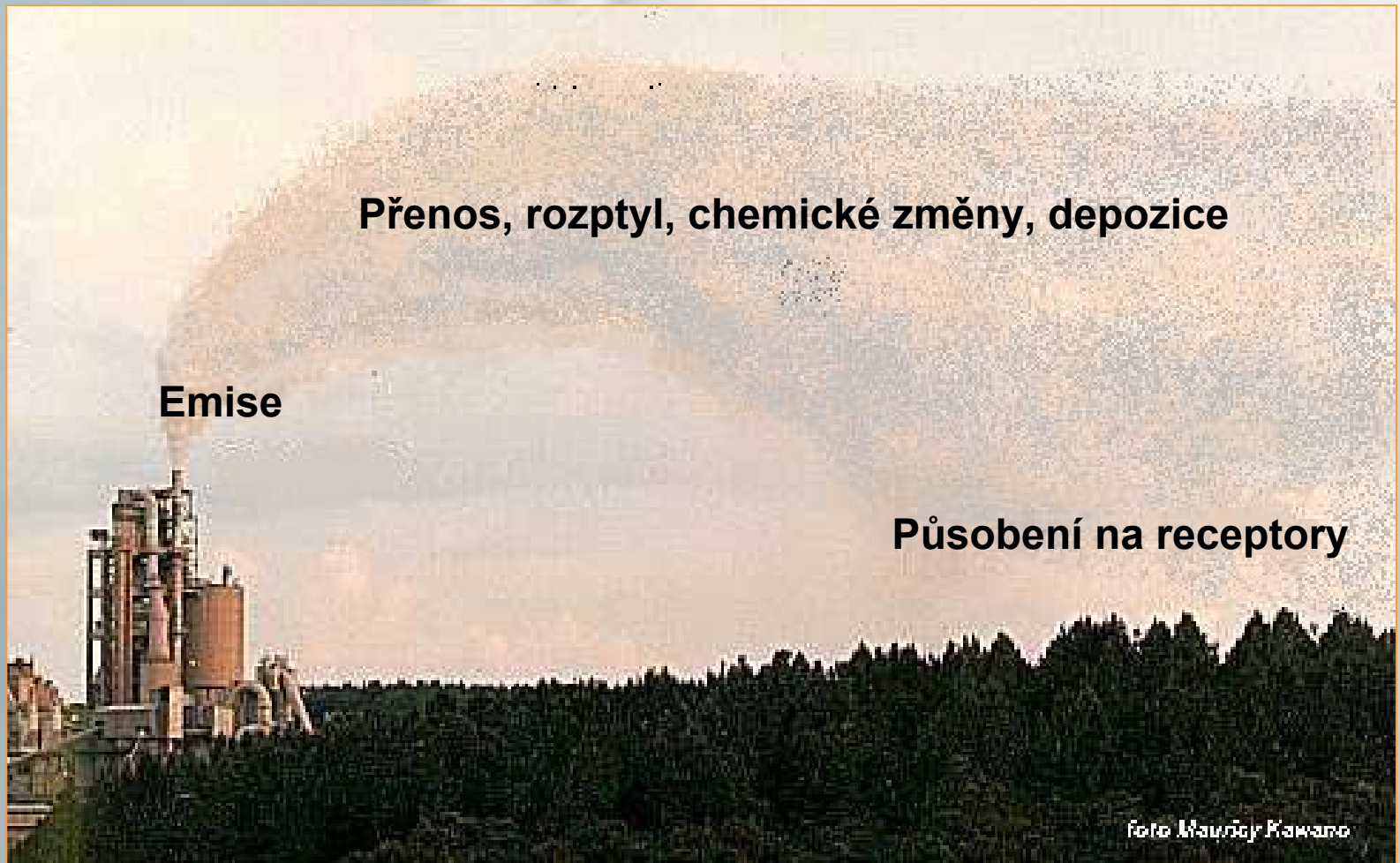
Přehled

- Atmosféra a meteorologie, složení atmosféry
- Meteorologické prvky a atmosférické jevy
- Dynamika atmosféry, proudění, fronty
- Vertikální pohyby a stabilita, vliv na přenos znečišťujících látek



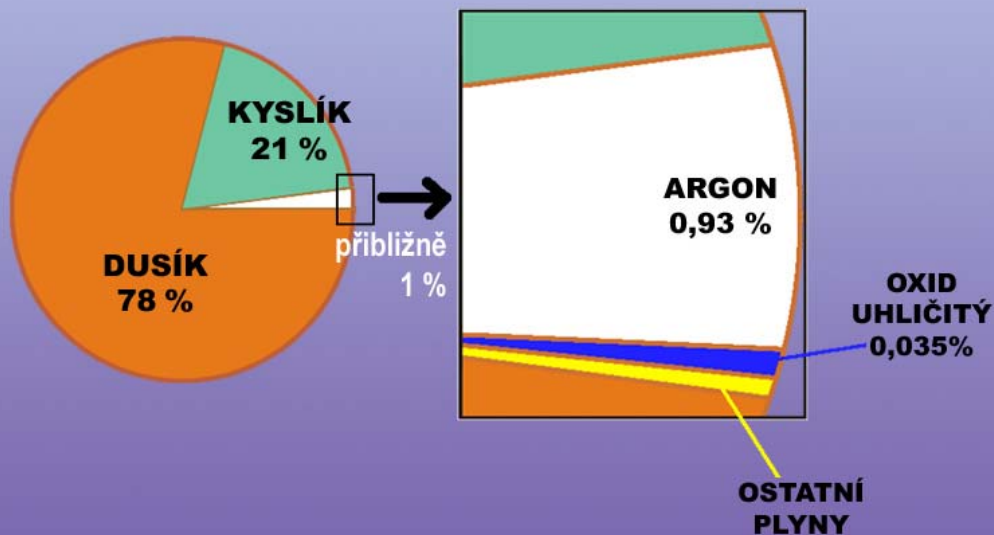
Proč se zabývat meteorologií

- Atmosféra – přenosové medium



Složení atmosféry

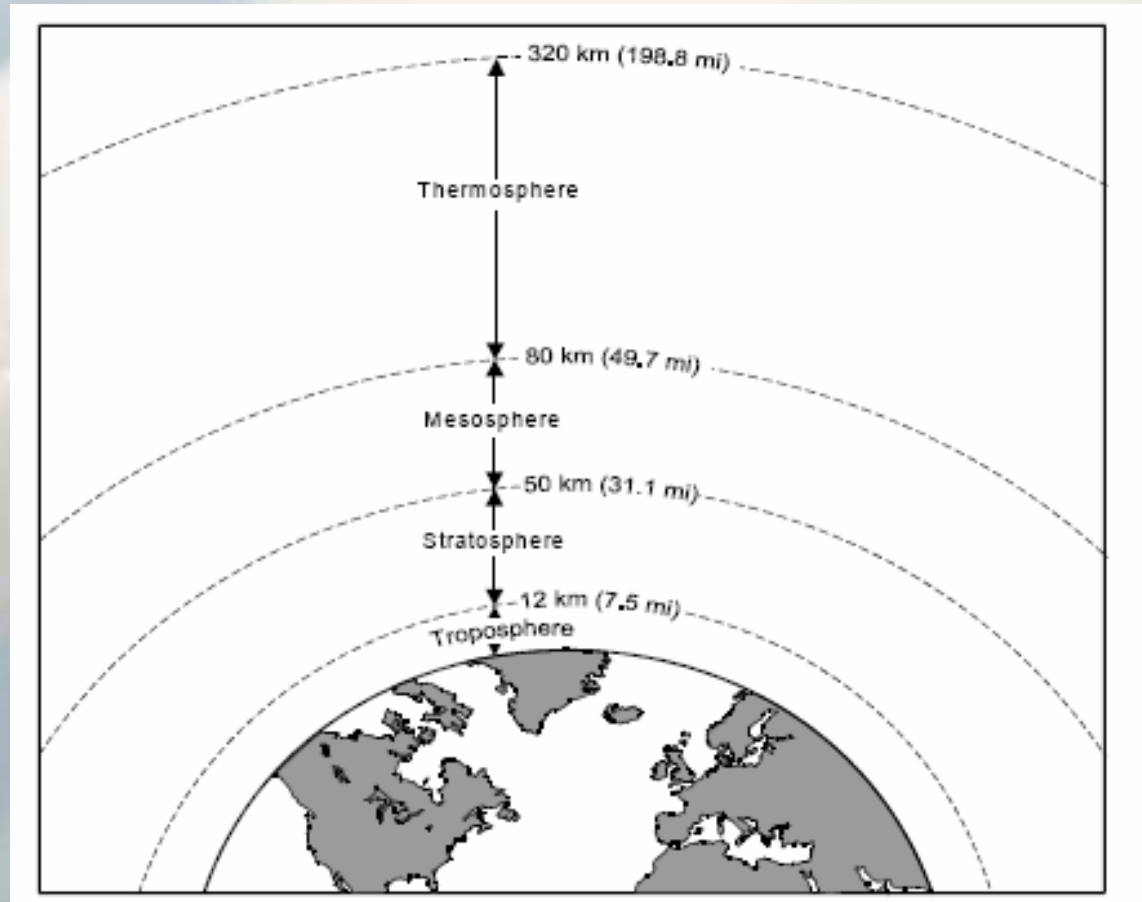
Chemické složení suché a čisté atmosféry
(objemová procenta)



plyn	chemická značka	objemová procenta
dusík	N ₂	78,1
kyslík	O ₂	20,9
argon	Ar	0,934
oxid uhličitý	CO ₂	0,031 4
neon	Ne	0,001 818
hélium	He	0,000 524
metan	CH ₄	0,000 2
krypton	Kr	0,000 114
vodík	H ₂	0,000 05
oxid dusný	N ₂ O	0,000 05
xenon	Xe	0,000 008 7
oxid siřičitý	SO ₂	0 až 0,000 1
ozón	O ₃	0 až 0,000 007 (léto) 0 až 0,000 002 (zima)
oxid dusičitý	NO ₂	0 až 0,000 002
čpavek	NH ₃	stopy
oxid uhelnatý	CO	stopy
jód (páry)	J ₂	stopy

Vertikální členění atmosféry

- Podle průběhu teploty s výškou
 - Troposféra
 - Stratosféra
 - Mezosféra
 - Termosféra
 - Exosféra

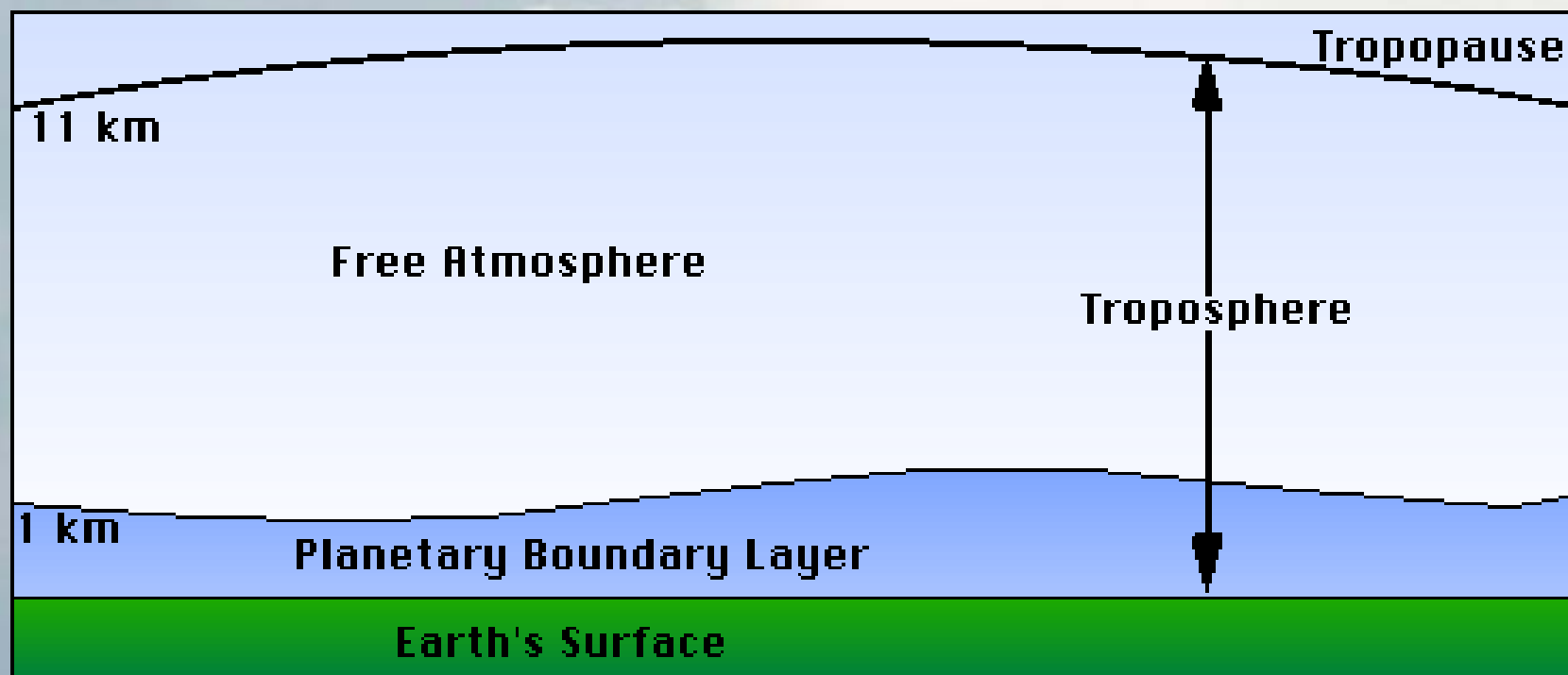


Vertikální členění troposféry (1)

Se zahrnutím interakce s povrchem, zavádí se pojem mezní vrstvy a volné atmosféry

Název vrstvy nebo její části	Přibližná výška nad zemským povrchem v km
troposféra	0 až 11
přízemní vrstva troposféry	0 až 0,1
vrstva tření	0,1 až 1,5
volná atmosféra	1,5 až 8

Vertikální členění troposféry (2)



Prvky a jevy

- Rozeznáváme meteorologické **prvky** a atmosférické **jevy**
- **Prvky** - fyzikální charakteristiky stavu atmosféry (teplota, vlhkost, tlak vzduchu)
- **Jevy** - označení pro všechny pozorované úkazy v atmosféře nebo na povrchu země (mlhy, déšť, bouřky, sněhová pokrývka, oblaka, nárazový vítr apod.)
- Některé jevy mají podstatný vliv na šíření a rozptyl znečišťujících látek v ovzduší
 - především proudění vzduchu a vertikální teplotní zvrstvení a jejich projevy

Meteorologické prvky - teplota

- Teplota vzduchu je meteorologický prvek, který udává tepelný stav ovzduší.
- Je mírou střední kinetické energie termického pohybu molekul.
- Není-li jinak uvedeno, rozumí se teplotou vzduchu teplotu ve výšce 2 m nad povrchem země měřená v meteorologické budce s přesností na jednu desetinu stupně.
- Jednotka v soustavě SI je Kelvin [K].
- V meteorologické praxi se teplota udává ve stupních Celsia.
- V anglosaských zemích stupnice Fahrenheitova

$$^{\circ}C = 5/9 \cdot (^{\circ}F - 32)$$

$$^{\circ}F = 9/5 \cdot (^{\circ}C + 32)$$

Meteorologické prvky - hustota

- Hustota vzduchu je podíl hmotnosti vzduchu a objemu, který vzduch zaujímá. Vyjadřuje se obvykle v $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$.
- Hustota vzduchu při teplotě 0°C s tlaku $1013,27 \text{ hPa}$ je $1,293 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.
- Za stejných podmínek je hustota vlhkého vzduchu vždy menší než hustota suchého vzduchu.
- S výškou se hustota vzduchu zmenšuje (exponenciální závislost)
- Hustota vzduchu roste se zvyšováním tlaku a snižováním teploty (stavová rovnice).
- Nejspodnější vrstvy vzduchu, které jsou pod tlakem celé tloušťky atmosféry, mají největší hustotu.
- Ve studeném vzduchu tlak s výškou klesá rychleji než v teplém vzduchu. Proto v určité výšce nad touto spodní vrstvou v oblasti teplého vzduchu je tlak vyšší než ve studeném vzduchu.
- Hustota vzduchu je při stejném tlaku nepřímo úměrná teplotě vzduchu. Proto v troposféře je všeobecně v zimě větší hustota vzduchu než v letě.

Meteorologické prvky – vlhkost (1)

- Popisuje množství vodní páry ve vzduchu.
- S její přítomností spojeny tvoření oblačnosti, srážky, mlhy apod.
- Vodní pára se dostává do atmosféry vypařováním vody z vodních ploch, z povrchu země a rostlinného pokryvu.
- Největší množství vodní páry je při zemi, s výškou vodní páry rychle ubývá.
- Například ve výšce kolem 5500 m nad zemí je tlak vzduchu poloviční než při zemi, ale tlak vodních par tvoří pouze 1/10 tlaku vodních par při zemi.

Meteorologické prvky – vlhkost (2)

- Množství vypařené vody je tím větší, čím je vyšší teplota vypařujícího se povrchu, čím je sušší vzduch a čím je rychlejší proudění, které způsobuje turbulentní promíchávání vzduchu.
- Proto má vypařování výrazný denní chod; největší je v poledne a nejmenší v noci.
- Určitý objem vzduchu může přijmout jen určité množství vodní páry, závisí na teplotě.
- S rostoucí teplotou roste i maximální množství vodní páry, které daný objem vzduchu může přijmout.
- Jestliže vzduch obsahuje maximální množství vodní páry, které může při dané teplotě pohltit, je touto vodní parou nasycen.

Vlhkostní charakteristiky (1)

- **Absolutní vlhkost** je množství vodní páry v g/m^3 vzduchu. Maximální absolutní vlhkost udává největší možný obsah vodních par v 1 m^3 nasyceného vzduchu. Hodnota se nedá přímo měřit.
- **Tlak vodní páry** je parciální tlak, kterým působí vodní pára obsažená ve vzduchu.
 - S rostoucím množstvím vodních par ve vzduchu tlak vodní páry roste.
 - Jednotky (hPa) a způsob měření jsou stejné jako u celkového tlaku vzduchu.
 - Tlak vodní páry při nasycení se nazývá tlak nasycení.
 - Tlak vodních par nenasyceného vzduchu je vždy menší než tlak nasycení.
 - Tlak nasycení je závislý na teplotě, s rostoucí teplotou roste.

Vlhkostní charakteristiky (2)

- **Relativní vlhkost** je poměr množství vodní páry obsažené ve vzduchu k množství vodní páry, které je potřeba k nasycení vzduchu při dané teplotě.
 - Vyjadřuje se v % a umožňuje posoudit stupeň nasycení. Je-li relativní vlhkost 100 %, je vzduch vodní parou nasycen.
- **Teplota rosného bodu (rosný bod)** je teplota, na kterou se musí vzduch *izobaricky* ochladit, aby dosáhl stavu nasycení.
 - Používá se v běžné praxi současně s údajem teploty vzduchu. Z rozdílu obou teplot (deficitu rosného bodu) je patrný stupeň nasycení.
 - Je-li vzduch nasycen, pak teplota rosného bodu je rovna teplotě vzduchu (např. v mlze).

Vlhkostní charakteristiky (3)

- **Měrná vlhkost** je hmotnost vodní páry v g obsažené v 1 kg **vlhkého** vzduchu.
- Podobnou charakteristikou je i **směšovací poměr**. Je to podíl hmotnosti vodní páry k hmotnosti **suchého** vzduchu.



Meteorologické prvky – tlak (1)

- Síla vyvolaná tíhou vzduchového sloupce působící v daném místě atmosféry kolmo na libovolně orientovanou jednotkovou plochu. Sloupec sahá od výšky měření až po horní hranici atmosféry.
- Je-li vzduch v klidu, je tlak ve všech směrech stejný – tlak statický.
- Je-li vzduch v pohybu, působí na jednotkovou plochu umístěnou proti směru proudění přídatný tlak - tlakem dynamický.
- V meteorologii se převážně používá statický neboli barometrický tlak.

Meteorologické prvky – tlak (2)

- Jednotkou tlaku 1 Pa (Pascal) - síla o velikosti 1N (Newton), působící na plochu 1 m².
- Jednotka je velmi malá, v meteorologii proto uzákoněno používání jejího stonásobku hektopascalu (hPa).
- Dříve používány i jiné jednotky:
- $1 \text{ hPa} = 100 \text{ N.m}^{-2} = 1 \text{ mb (milibar)} = 0,75 \text{ torr} = 0,75 \text{ mm rtuťového sloupce}$.
- Průměrná hodnota tlaku vzduchu na hladině moře na 45° severní šířky při teplotě 15°C je 1013,27hPa (760 torrů)

Meteorologické prvky – oblaka (1)

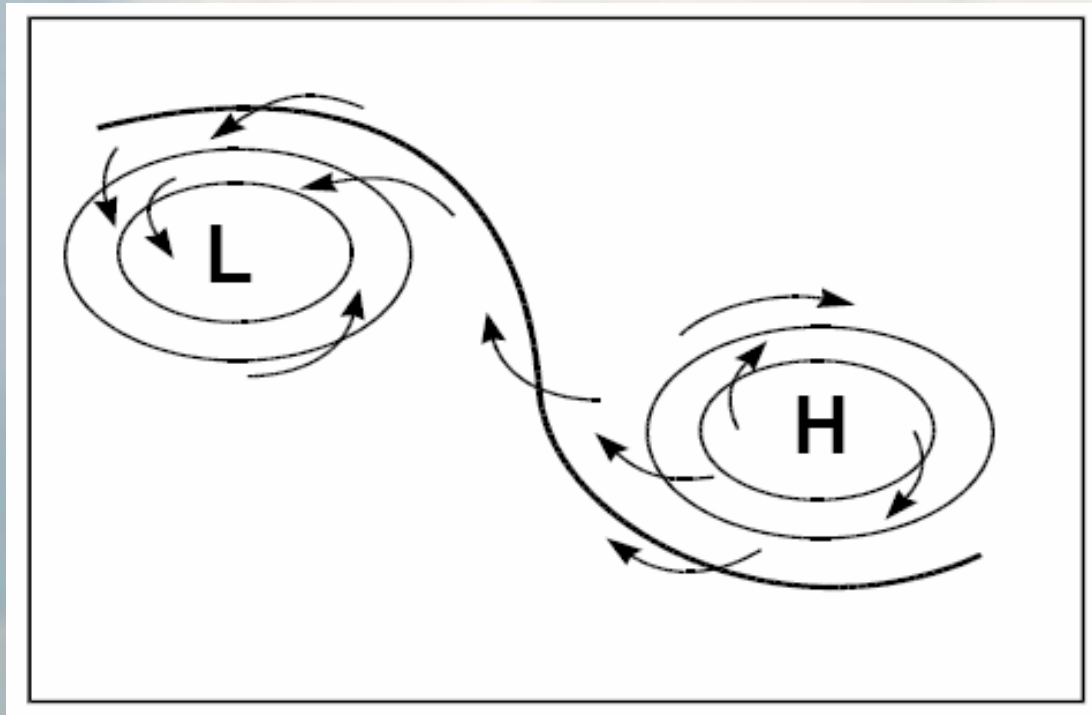
- Oblaka jsou viditelná soustava částic vody nebo ledu v atmosféře.
- Tato soustava může obsahovat zároveň i částice pocházející z prachu, průmyslových exhalací apod.
- Za oblaka lze považovat i mlhu, která je v podstatě oblakem dotýkajícím se zemského povrchu.
- Všechny druhy oblačnosti jsou produktem kondenzace nebo sublimace vodních par v ovzduší.
- Hlavní počáteční podmínkou pro počátek kondenzace je dosažení stavu nasycení ovzduší vodní parou.

Meteorologické prvky – oblaka (2)

- Podle výškového rozvrstvení rozlišujeme oblaka
 - nízkého patra (Cu, Sc, St, Ns)
 - středního patra (Ac, As, Ns)
 - vysokého patra (Ci, Cc, Cs)
 - oblaka se silným vertikálním vývojem (Cb)
- Podle tvaru rozlišujeme oblaka kupovitá a vrstevnatá.
 - Kupovitá oblaka vznikají vlivem intenzivních, ale lokálně omezených, stoupavých proudů, charakteristických pro termickou konvekci vývoj má zřetelný denní chod.
 - Vrstevnatá oblaka vznikají vlivem slabých uspořádaných, ale rozsáhlých výstupních pohybů, obvykle na frontálních plochách nebo jsou spojena se zádržnými vrstvami inverze teploty

Meteorologické prvky – vítr (1)

- Vítr je projevem proudění vzduchu
- Důsledek nerovnoměrného rozložení atmosférického tlaku – vzniká síla tlakového gradientu



Meteorologické prvky – vítr (2)

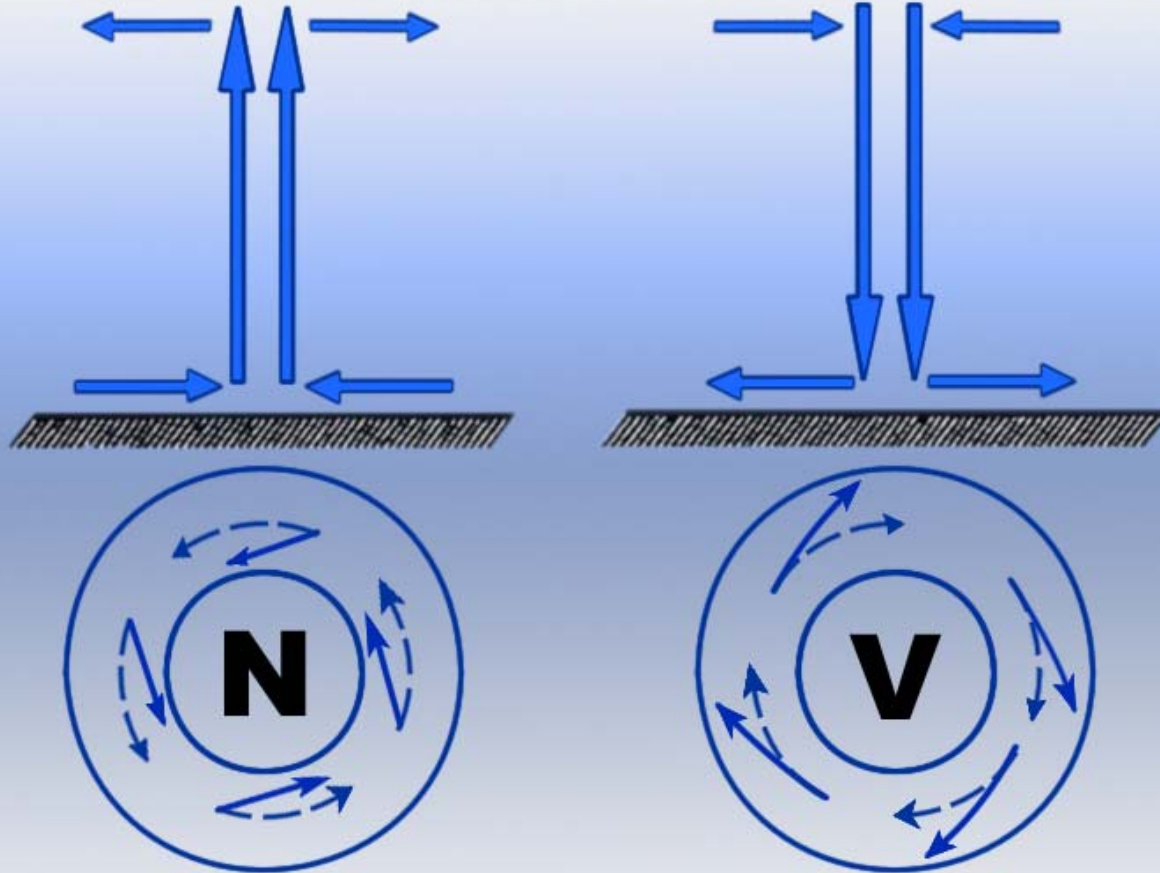


Proudění nad mezní vrstvou (bez tření)



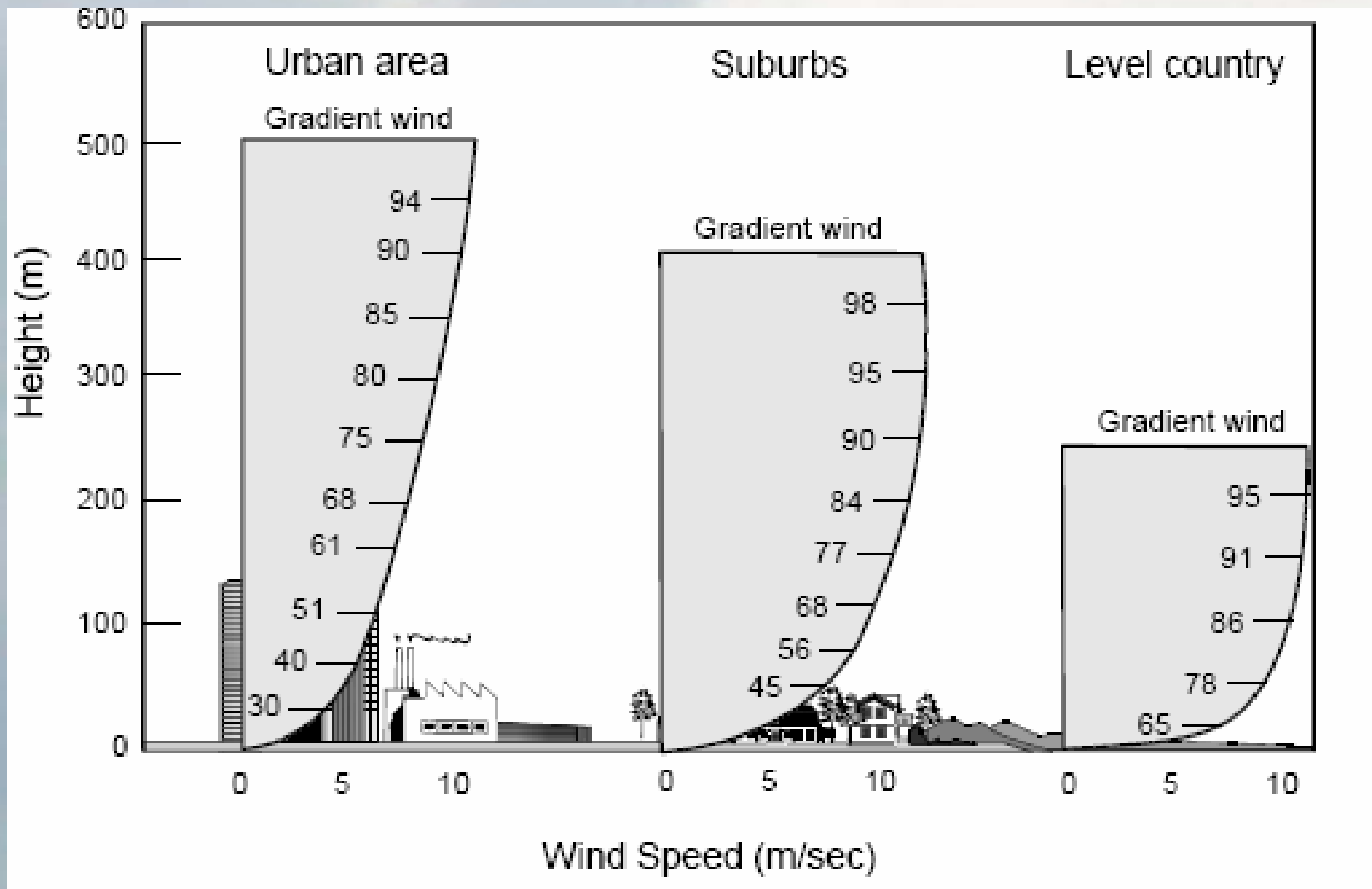
Proudění v blízkosti zemského povrchu (s vlivem tření)

Meteorologické prvky – vítr (3)



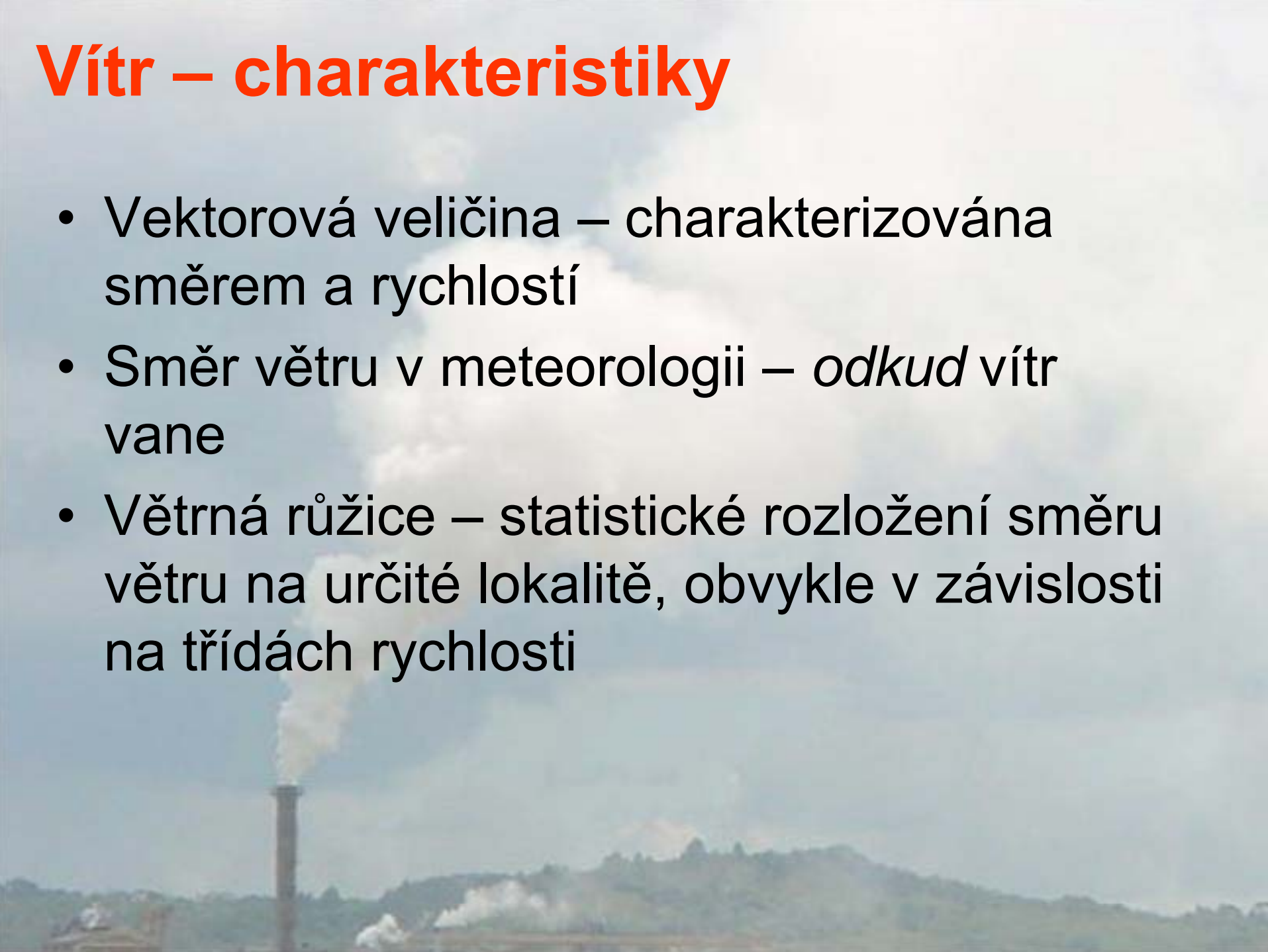
Proudění v cykloně (N) a anticykloně (V)

Vítr – vertikální profil, vliv podkladu

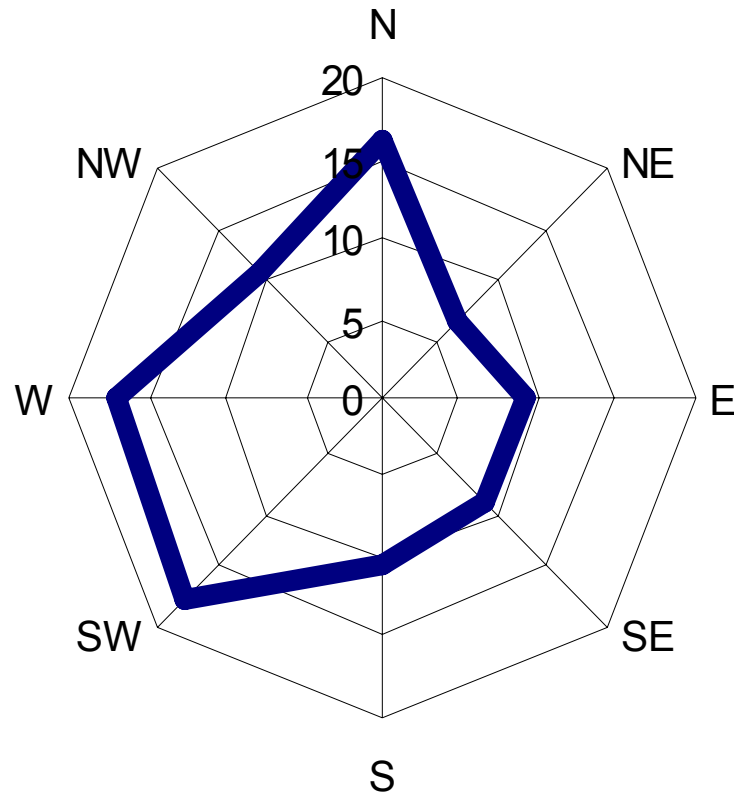


Vítr – charakteristiky

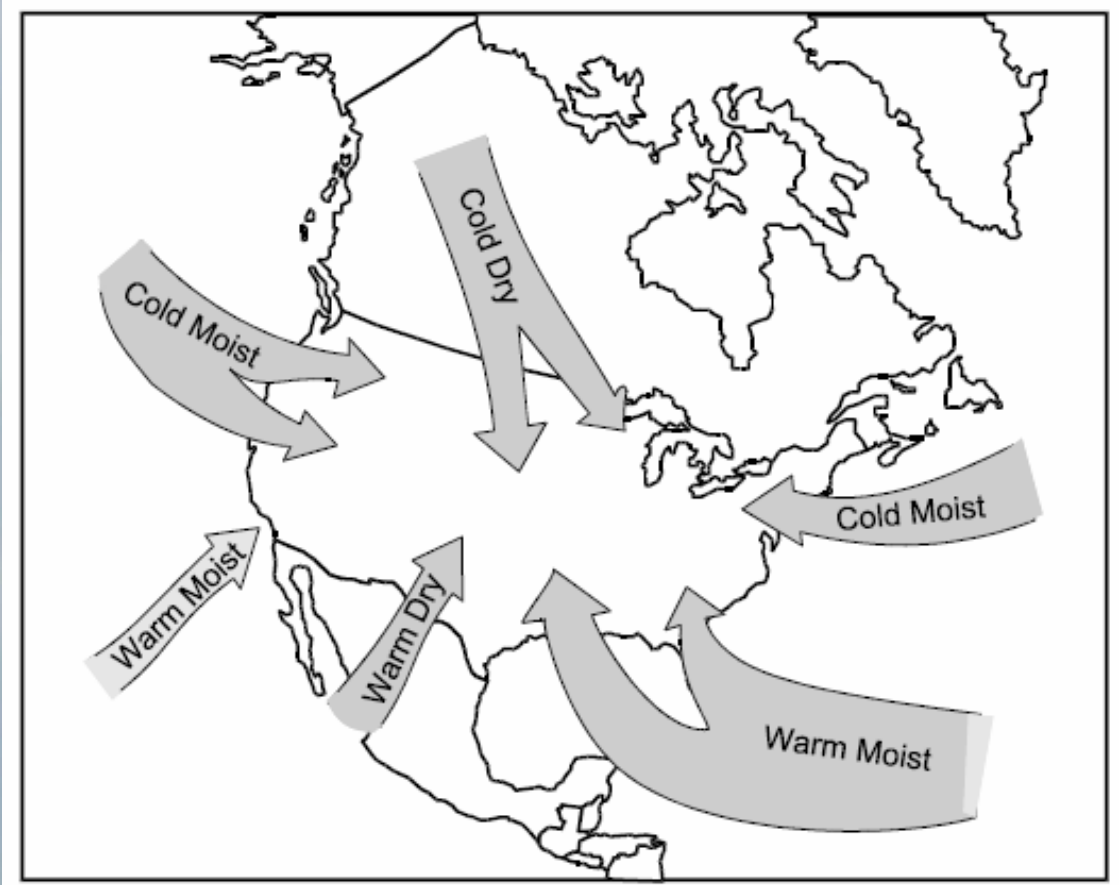
- Vektorová veličina – charakterizována směrem a rychlostí
- Směr větru v meteorologii – *odkud* vítr vane
- Větrná růžice – statistické rozložení směru větru na určité lokalitě, obvykle v závislosti na třídách rychlosti



Větrná růžice



Vzduchové hmoty



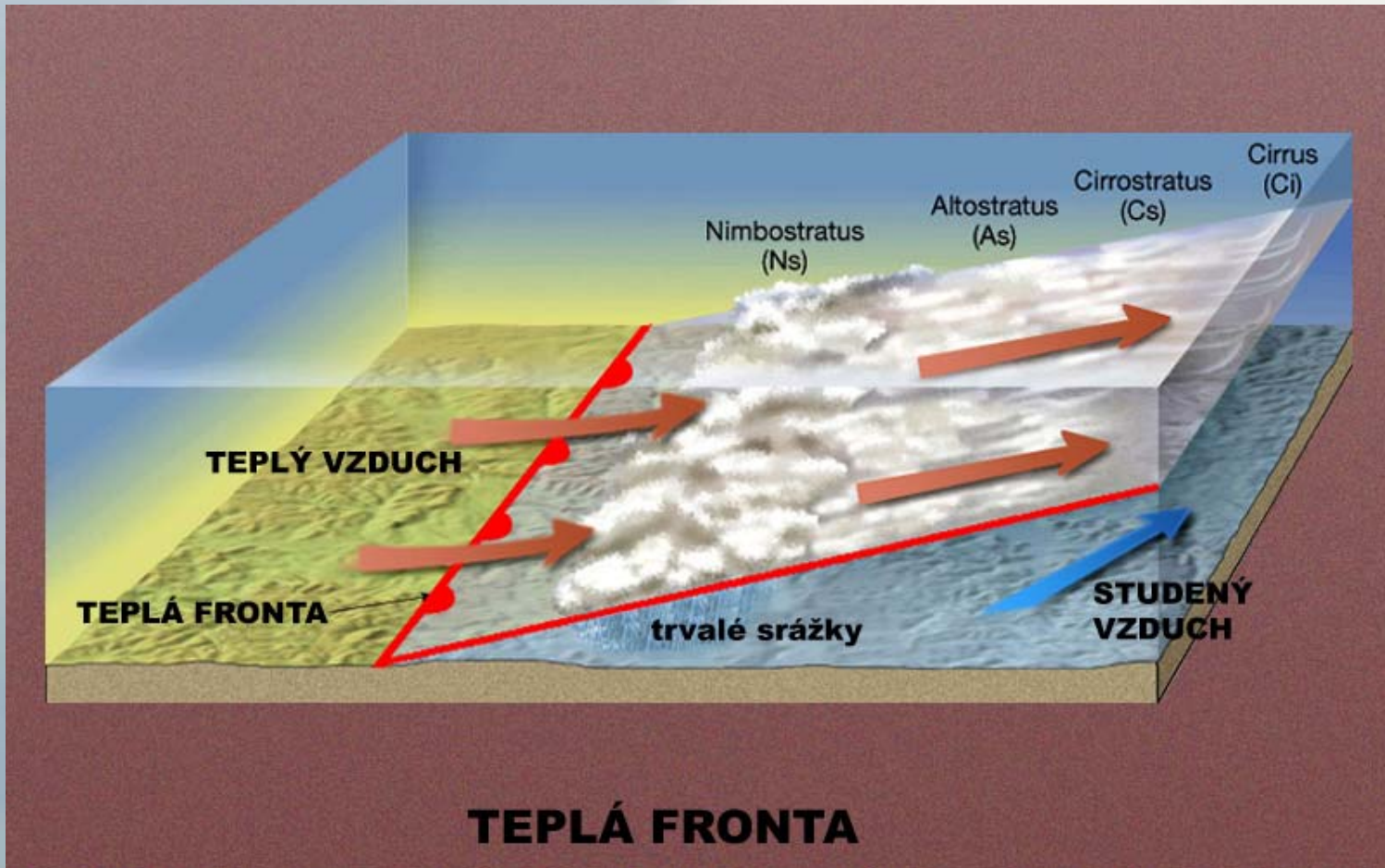
- Pokud vzduch stagnuje nad určitou oblastí, přijme její charakteristiky (teplotu, vlhkost)
- Formuje se vzduchová hmota

Atmosférické fronty (1)

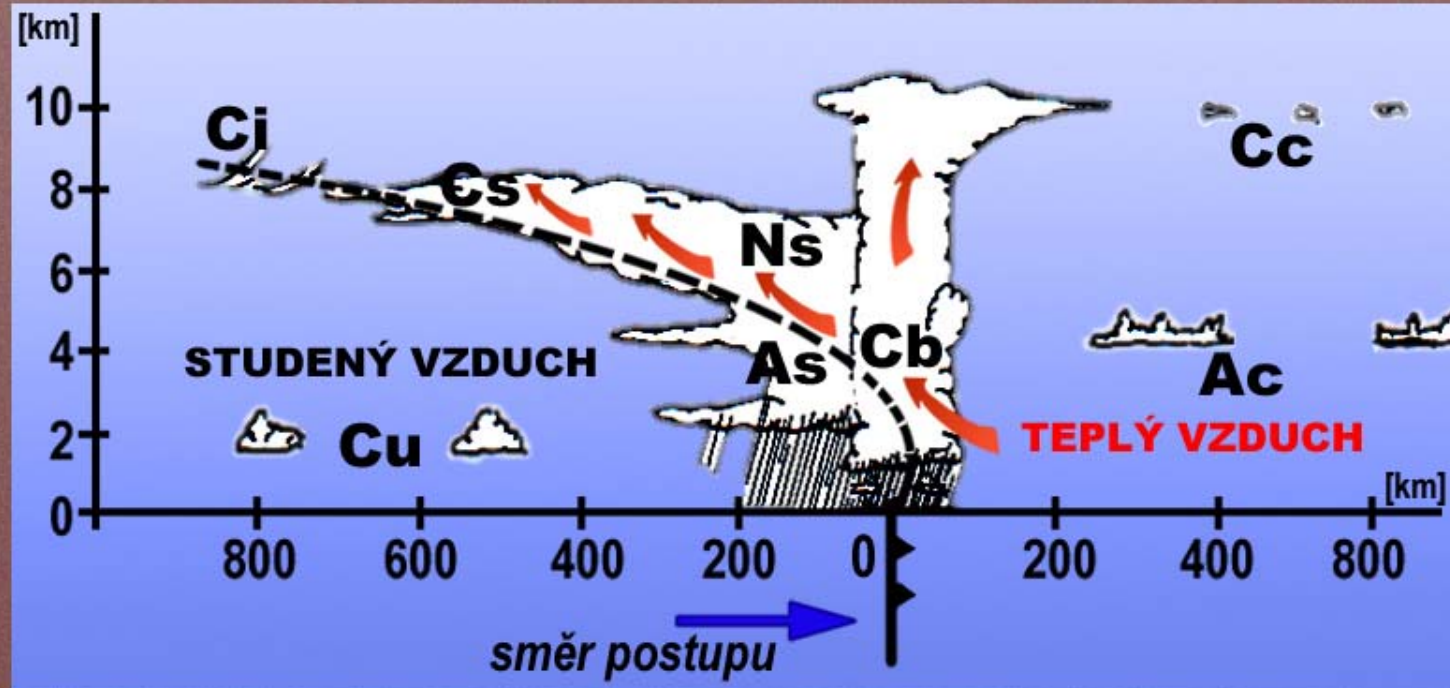
- Vzduchové hmoty se dostávají do pohybu v důsledku gradientů v tlakovém poli, dochází k výměně vzduchových hmot
- Plocha styku dvou hmot různých vlastností – frontální plocha
- Atmosférická fronta – průsečnice frontální plochy se zemským povrchem



Atmosférické fronty – TF

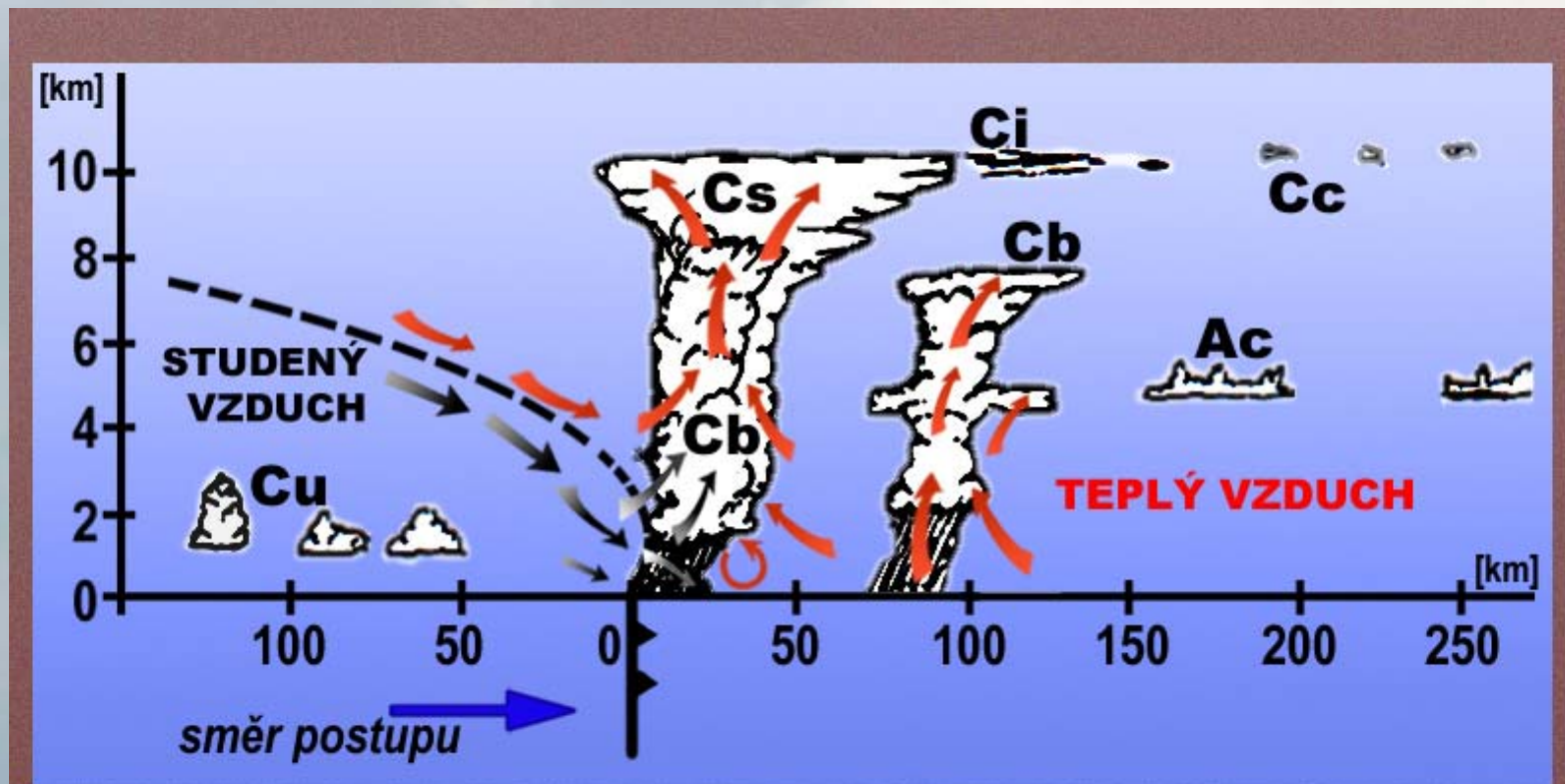


Atmosférické fronty – SF I



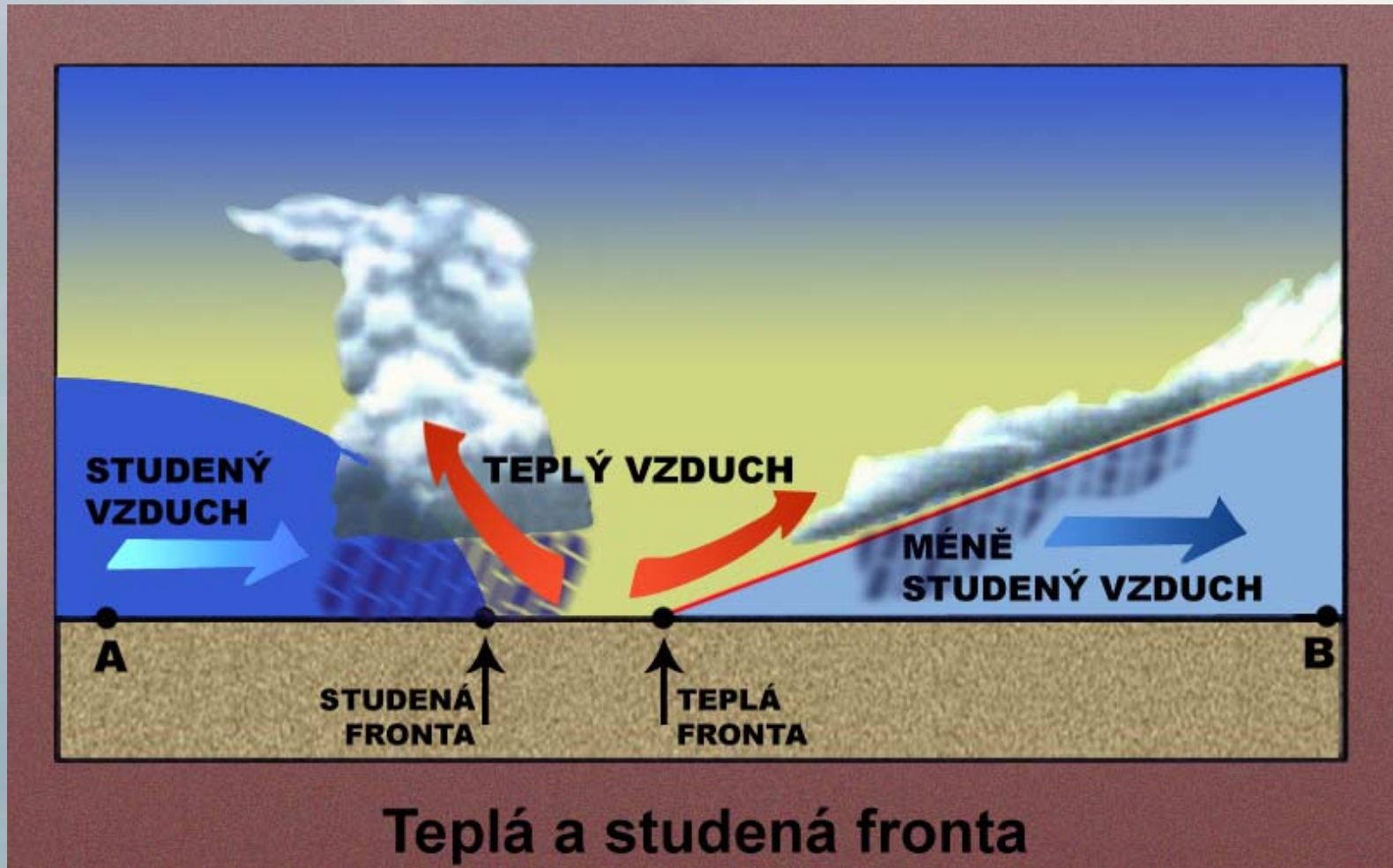
Studená fronta 1.druhu

Atmosférické fronty – SF II

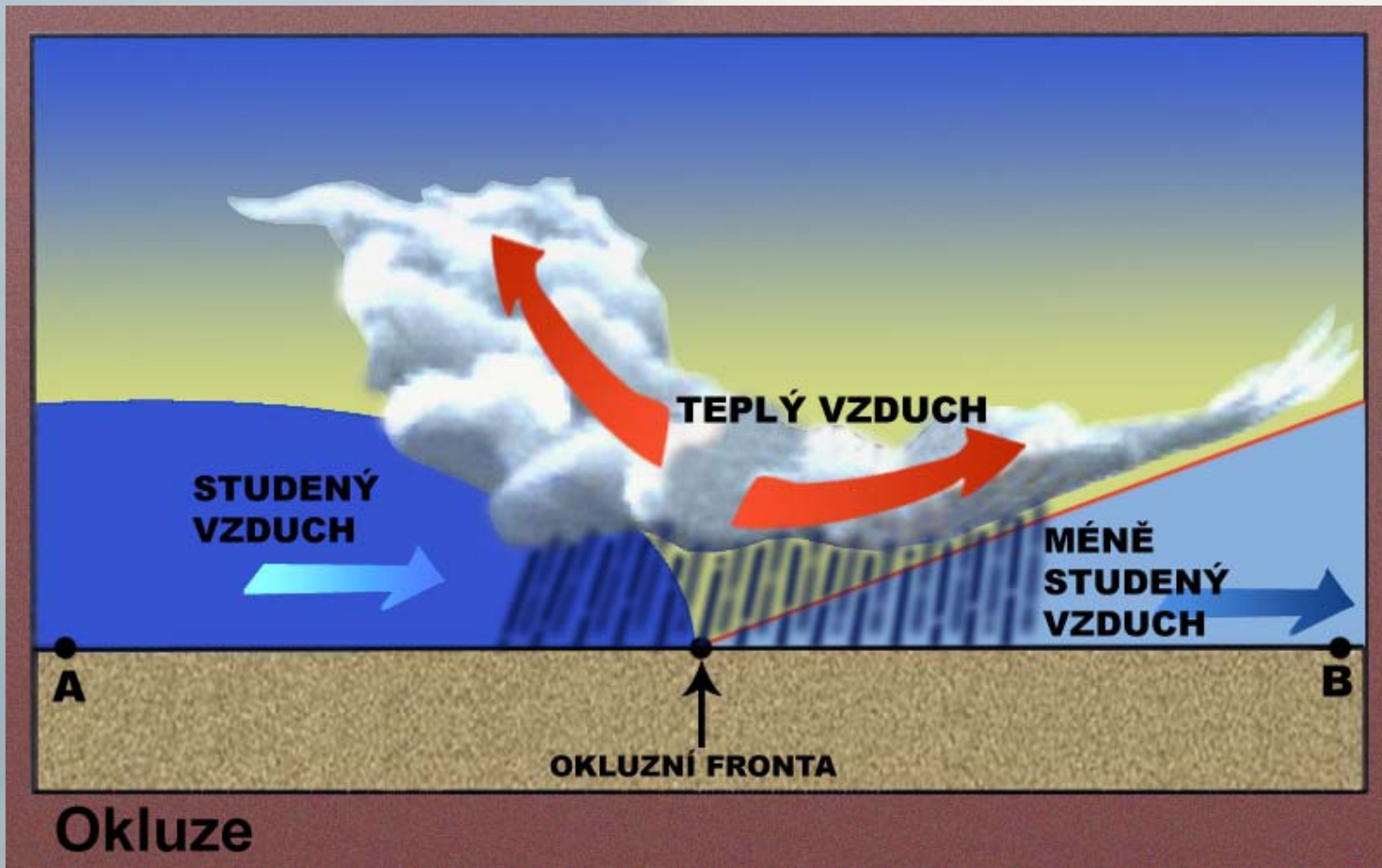


Studená fronta 2.druhu

Atmosférické fronty – vznik okluze



Atmosférické fronty – OF



Atmosférické fronty

- Podél frontálních ploch rozložena oblačnost, výskyt srážek
- Fronty určují charakter počasí a formují rozptylové podmínky
- Správná předpověď pohybu a vývoje front podstatná pro předpověď počasí



Stabilita atmosféry – změny teploty s výškou

- Teplota může v ovzduší s výškou klesat, vzrůstat nebo zůstat stálá.

$$\gamma = -\frac{\partial T}{\partial z}$$

- Veličinu vyjadřující záporně vzatou změnu teploty T připadající na jednotkovou vzdálenost ve vertikálním směru (z je vertikální souřadnice) v klidném vzduchu nazýváme vertikálním gradientem teploty.
- Za předpokladu, že vertikální gradient teploty ve vrstvě ovzduší mezi výškovými hladinami z_0 a z je konstantní, můžeme teplotu v hladině z určit jako
- $T(z) = T_0 - \gamma (z - z_0)$ kde T_0 je teplota ve výchozí hladině z_0 .

Vertikální gradient teploty

- Vertikální teplotní gradient nikdy není s výškou stálý a kolísá v širokém rozmezí hodnot od kladných po záporné.
- Je-li nulový, teplota se s výškou nemění a tento stav nazýváme **izotermie**.
- V případě vzrůstu teploty s výškou ($\gamma < 0$) mluvíme o **inverzi** teploty.
- V oboru hodnot vertikálních gradientů teploty existují dvě význačné hodnoty vertikálního gradientu:
 - gradient suchoadiabatický (přibližně 1°C na 100 m výšky)
 - gradient nasyceně adiabatický (přibližně 0.6°C na 100 m výšky)

Stabilita atmosféry (1)

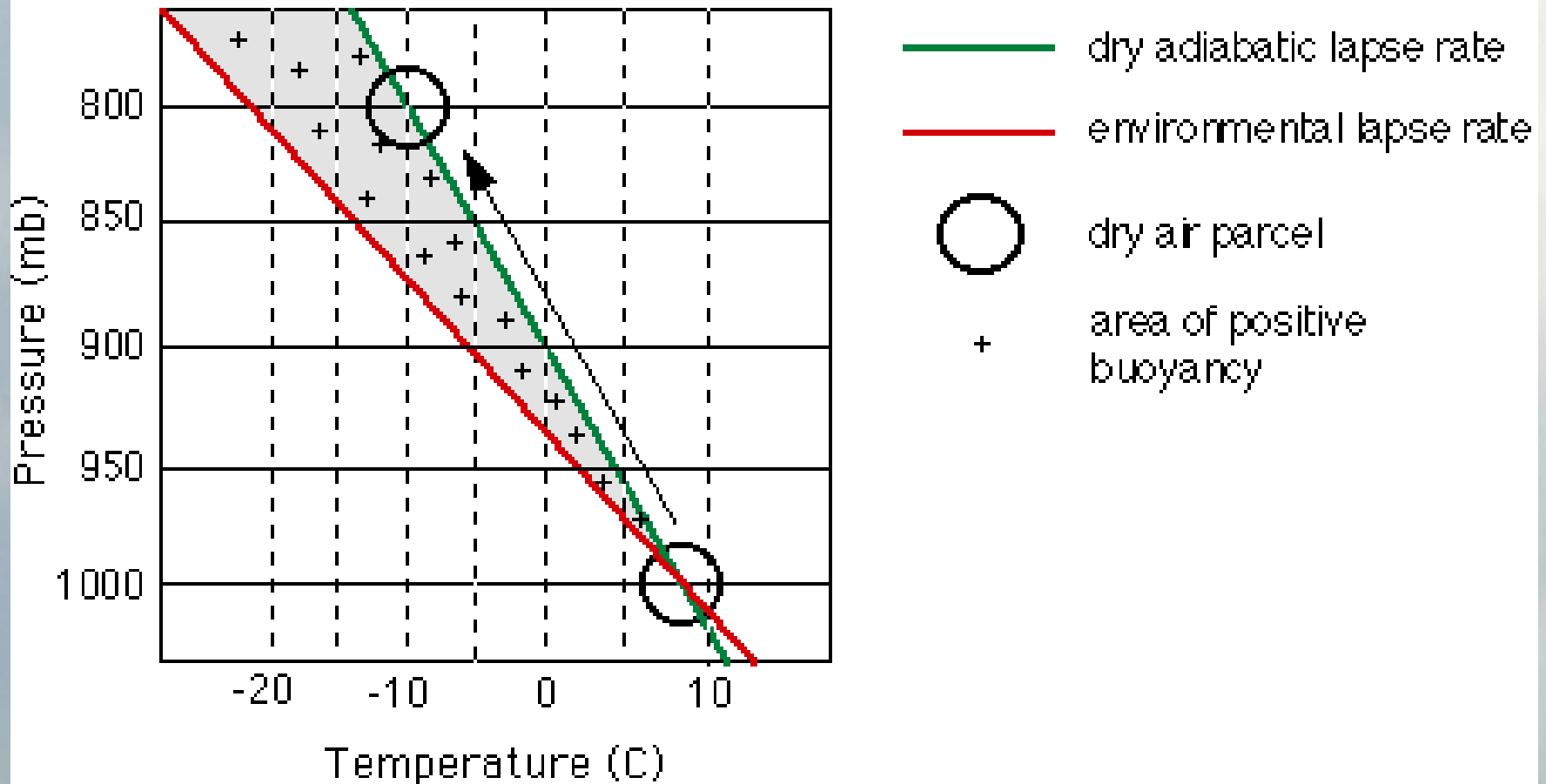
- Významně ovlivňuje dynamiku atmosféry a přenos různých příměsí
- Čím je stabilita atmosféry větší, tím horší jsou podmínky pro vertikální pohyby a vertikální výměnu v atmosféře.
- Zvolme v atmosféře referenční hladinu, v níž má vzduchová částice určitou výchozí teplotu a hustotu.
- Vychylme tuto částici z její výchozí polohy pomocí nějakého vnějšího impulsu ve vertikálním směru.
- Pokud má vychýlená částice tendenci vrátit se zpět do výchozí hladiny, označujeme stav atmosféry jako **stabilní**.
- V opačném případě, kdy impulsem vychýlená částice pokračuje ve vertikálním pohybu a vzdaluje se od výchozí hladiny již bez působení vnějšího impulsu, mluvíme o **labilním** stavu atmosféry.
- Mezním případem mezi těmito stavy je stav **normální** (neutrální, indiferentní), kdy se vychýlená částice ani nevrací zpět do výchozí hladiny, ani nejeví tendenci počáteční výchylku zvětšovat.

Stabilita atmosféry (2)

- Udělíme-li počáteční vertikální impuls částici nenasyceného vzduchu, snižuje se její teplota, (o 0.0098 K při výstupu o 1 metr výšky).
- Další chování částice je určeno vzájemným vztahem její teploty a teploty vzduchu v jejím okolí.
- Pokud teplota okolního vzduchu klesá s výškou rychleji, než odpovídá hodnotě suchoadiabatického gradientu, tedy jestliže vertikální gradient teploty $\gamma > \gamma_a$, je částice teplejší než okolní vzduch (a má tudíž nižší hustotu).
- Na částici působí podle Archimedova zákona vztlaková síla, která působí proti zemské tíži.
- Výslednice těchto sil urychluje vertikální pohyb vzduchové částice a tato se vzdaluje od své výchozí hladiny.
- Jedná se tudíž o případ **labilního** zvrstvení v nenasyceném vzduchu.

Labilní zvrstvení

An Unstable Layer in the Atmosphere

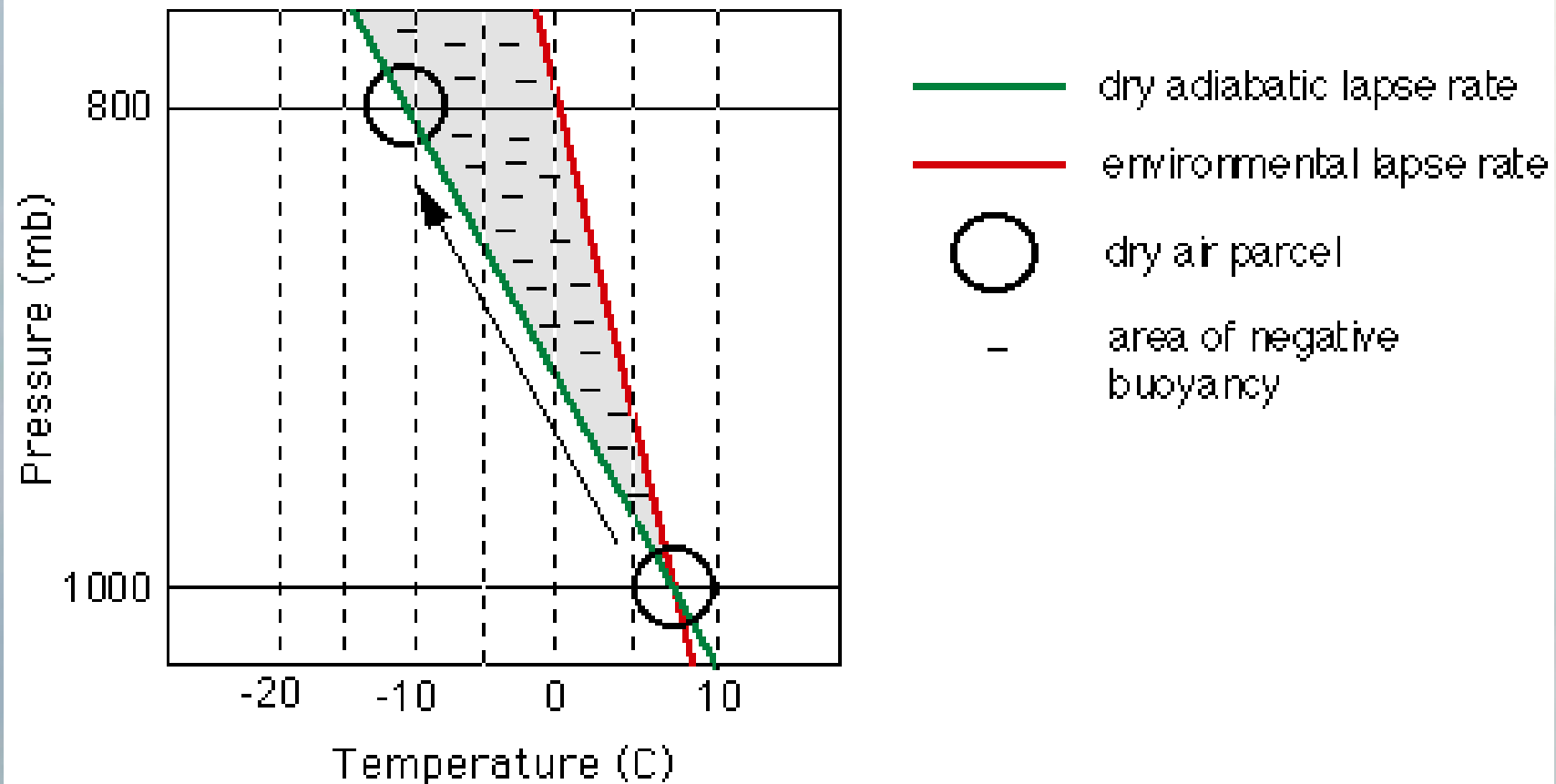


Stabilita atmosféry (3)

- V opačném případě, kdy pokles teploty s výškou v okolním ovzduší je pomalejší než odpovídá suchoadiabatickému gradientu ($\gamma < \gamma_a$), má částice vychýlená z výchozí hladiny nižší teplotu než okolí
- vztlková síla má opačný směr a vrací částici do výchozí hladiny.
- V souladu s předchozími definicemi se tedy jedná o **stabilní** zvrstvení pro nenasycený vzduch.
- V mezním případě, kdy vertikální gradient teploty v okolním vzduchu je roven (nebo blízký) adiabatickému, je teplota vychýlené částice stejná jako teplota okolního vzduchu, vztlková síla je nulová a částice se nalézá ve stavu rovnováhy s okolím.
- Tento stav, kdy $\gamma = \gamma_a$, reprezentuje **normální** (neutrální, indiferentní) zvrstvení atmosféry pro nenasycený vzduch.
- Podobné úvahy je možné provést pro nasycený vzduch s tím, že místo hodnoty suchoadiabatického gradientu γ_a použijeme hodnotu nasyceně adiabatického gradientu γ_s .
- Mluvíme potom o stabilitě v **nasyceném** vzduchu.

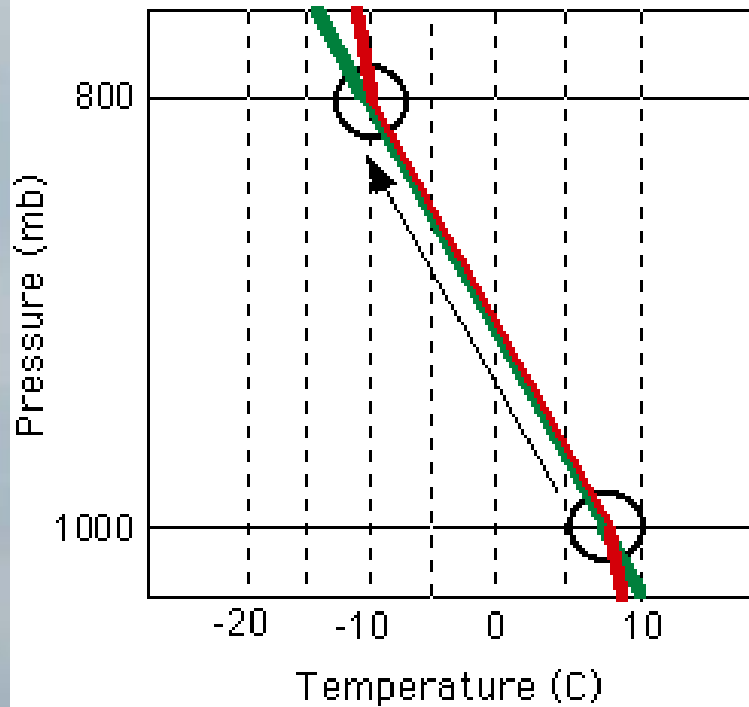
Stabilní zvrstvení

A Stable Layer in the Atmosphere

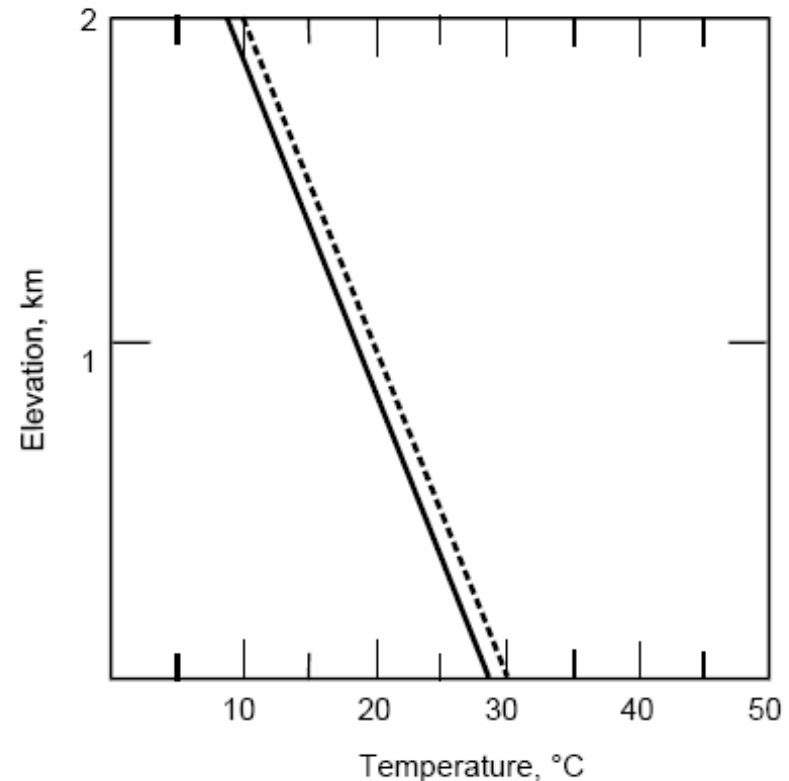


Stabilita atmosféry – normální zvrstvení

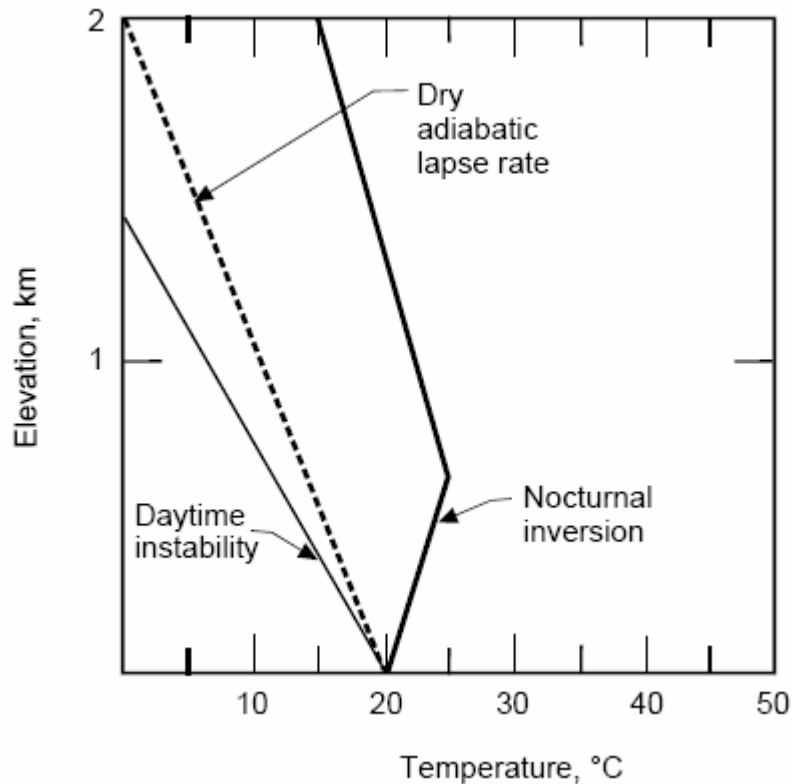
A Neutral Layer in the Atmosphere



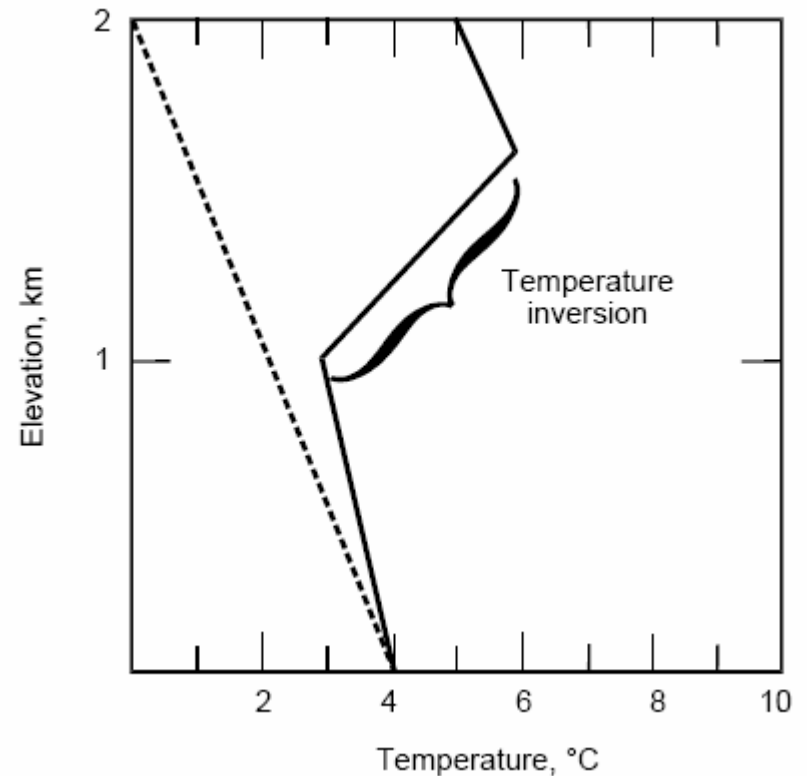
- dry adiabatic lapse rate
- environmental lapse rate
- dry air parcel



Inverze – přízemní, výšková



Největší stabilita, nejhorší podmínky rozptylu



Inverze – zádržná vrstva



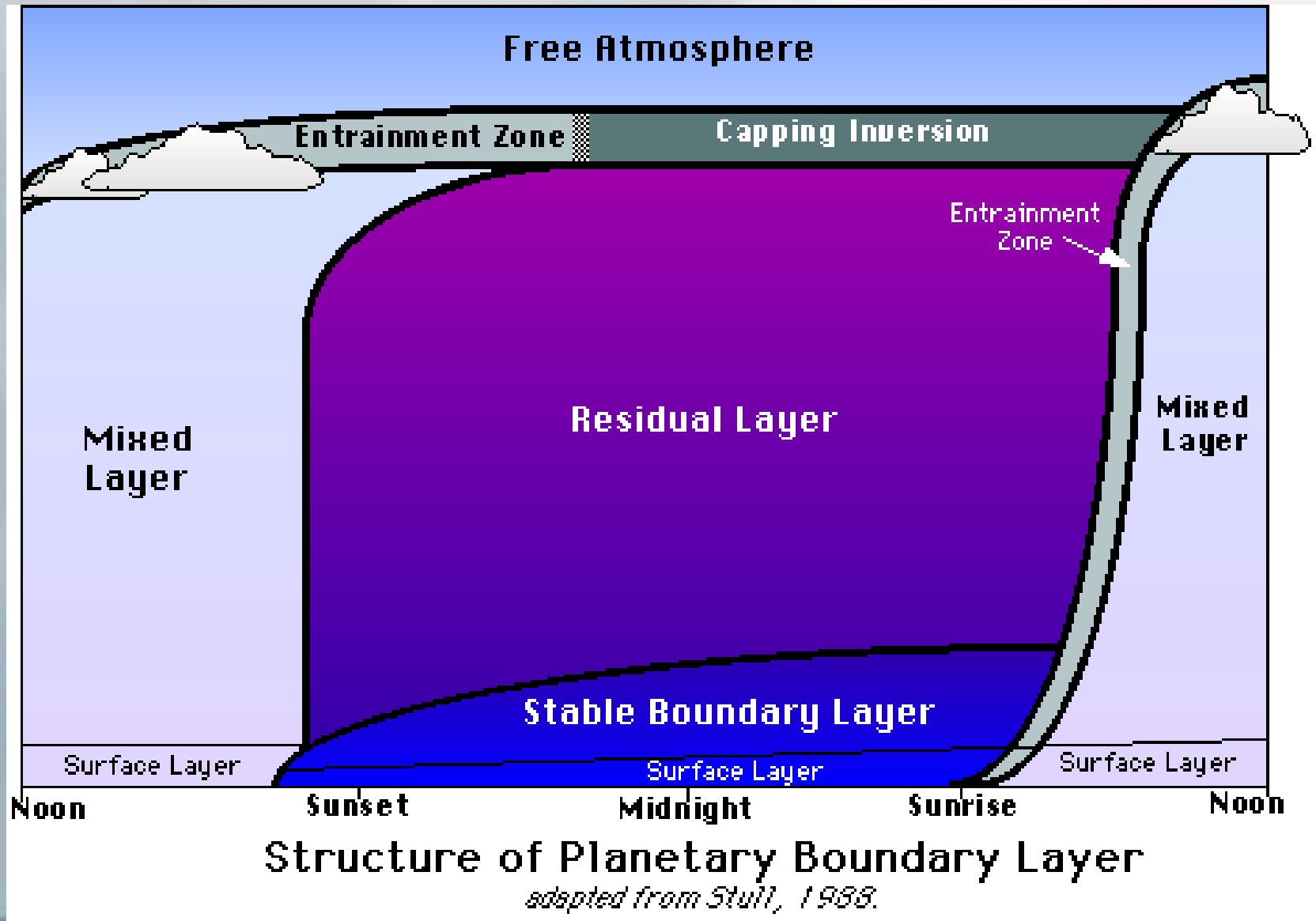
Inverze viděná z letadla



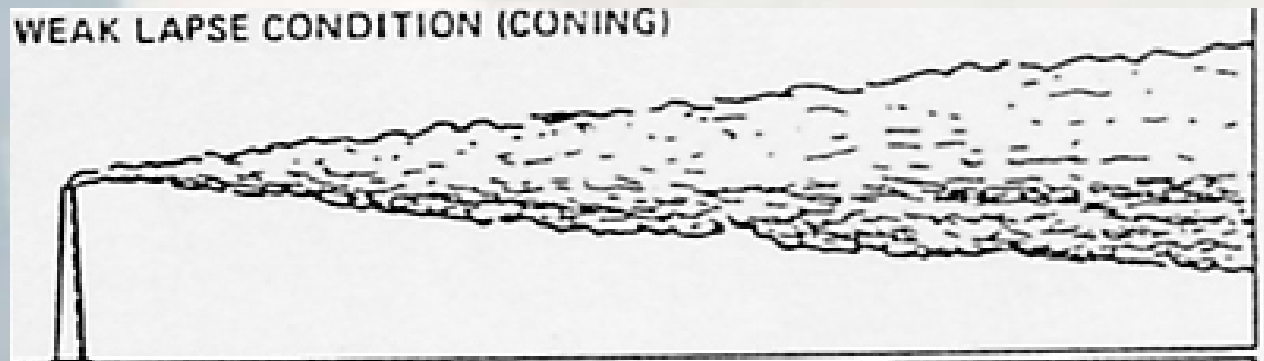
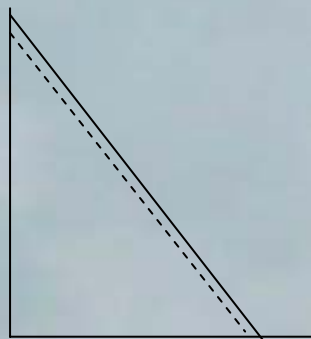
Inverze – vznik

- **Radiační** – v důsledku vyzařování zemského povrchu a ochlazování přilehlého vzduchu
- **Advekční** – přenos teplého vzduchu do chladnější oblasti (např. zimní oblevy).
- **Frontální** – spojena s plochami styku vzduchových hmot různých teplot. Teplý vzduch stoupá po klínu vzduchu studenějšího nebo se klín studeného podsouvá pod ustupující teplou vzduchovou hmotu
- **Subsidenční** – v anticyklonách dochází k pozvolným sestupným pohybům vzduchových hmot. Klesající vzduchová vrstva se stlačuje, adiabaticky se ohřívá a vytváří výškovou inverzní vrstvu nad vrstvou chladnějšího vzduchu pod ní.
- **Inverze za turbulence** – důsledek turbulentního promíchávání

Změny stability mezní vrstvy během dne



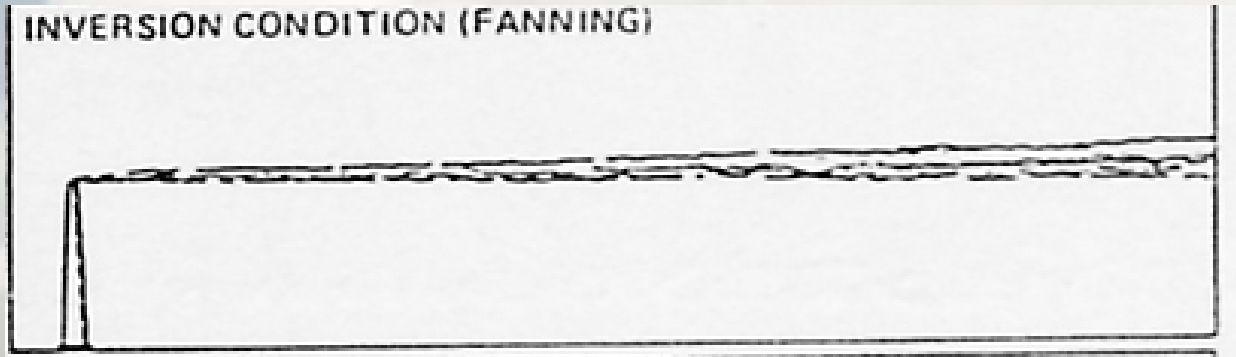
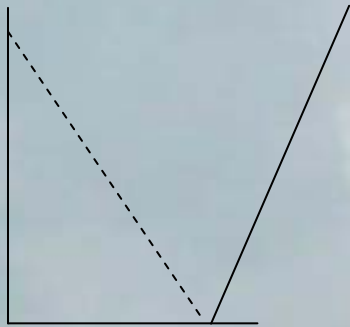
Vliv zvrstvení na šíření vleček (1)



Vlnění (coning), normální zvrstvení

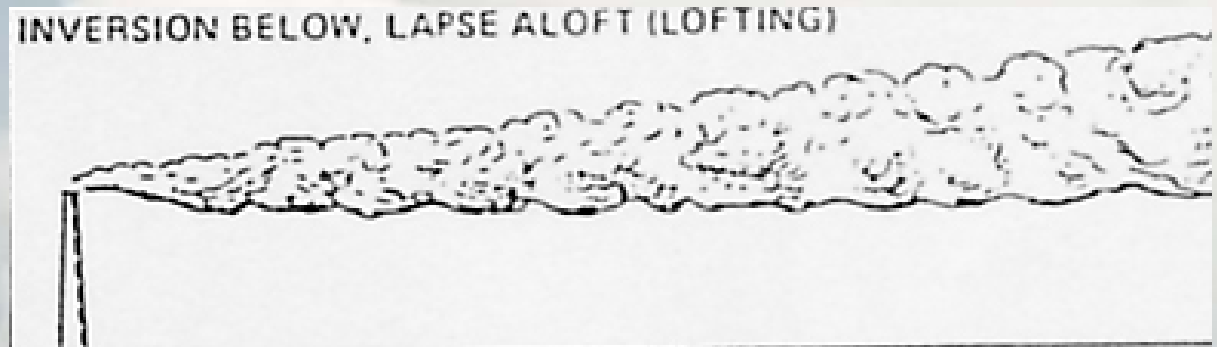
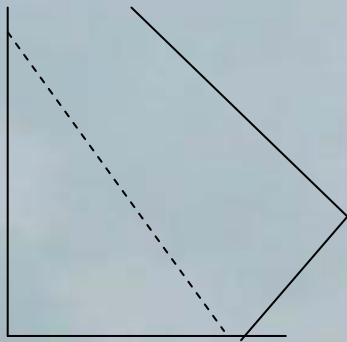


Vliv zvrstvení na šíření vleček (2)

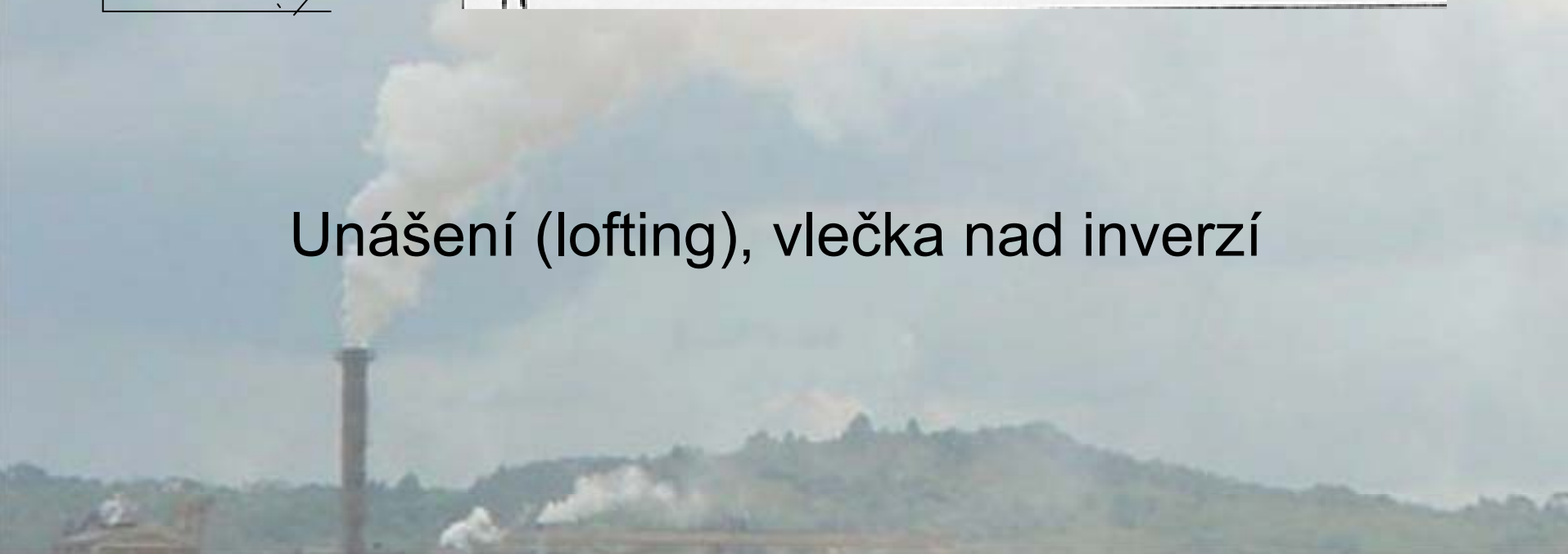


Čeření (fanning), stabilní zvrstvení

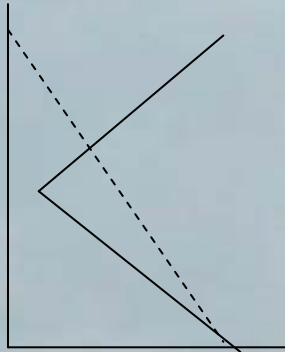
Vliv zvrstvení na šíření vleček (3)



Unášení (lofting), vlečka nad inverzí



Vliv zvrstvení na šíření vleček (5)



Zadýmování (fumigation), vlečka v inverzi, likvidace přízemní inverze zdola, přenos vlečky k povrchu

Fumigation of Elevated Layer

A Water Tank Simulation of Convective Conditions

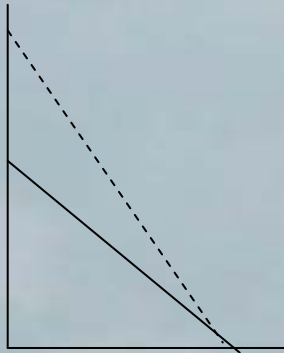
by Mark Hibberd



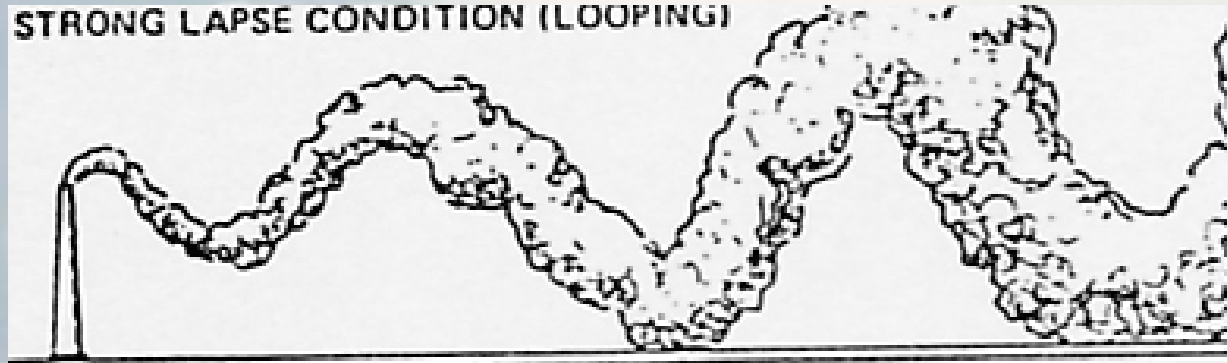
Atmospheric Research

fumig3.avi

Vliv zvrstvení na šíření vleček (6)



STRONG LAPSE CONDITION (LOOPING)



Přemetání (looping) – labilní zvrstvení



Vzhůru k modelům!

... a odtud již vede přímá cesta k úvahám o rozptylových parametrech a modelování šíření vleček,

