

# **Teorie závětrné vlny pro plachtaře**

Lítáme v ní a při tom toho o ní  
moc nevíme... 😊

# Program prezentace

- vlny v atmosféře
- princip vzniku gravitačních vln
- parametry vlny - Froudovo číslo
- model vlny
- příklady dvouvrstvého modelu vlny
- plachtařsky využitelná vlna - trapped wave
- terény v ČR a vlastnosti proudění z jednotlivých směrů

# Vlny v atmosféře

Vlny různých měřítek a původů

- Planetární vlny
- Gravitační vlny
- Stojaté vlny

# Planetární vlny

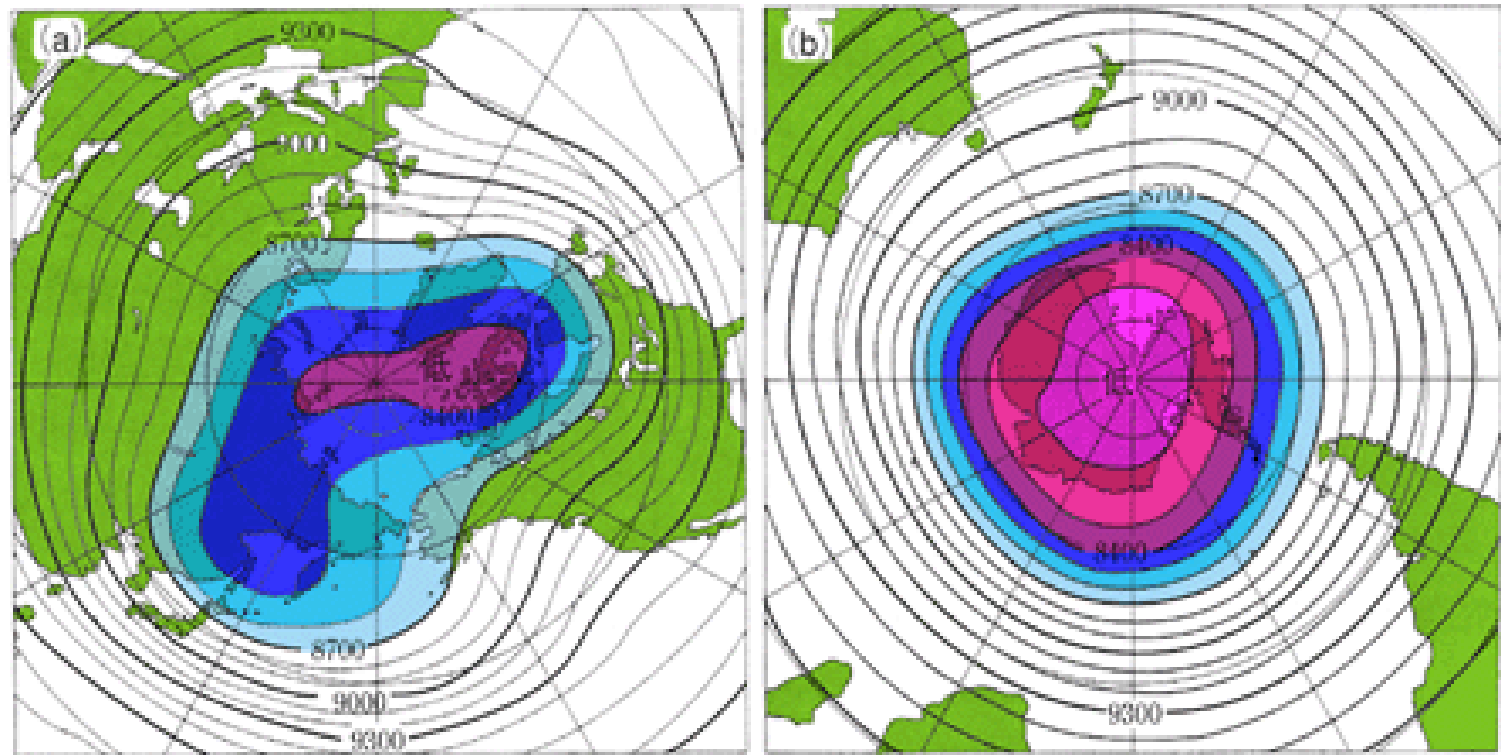
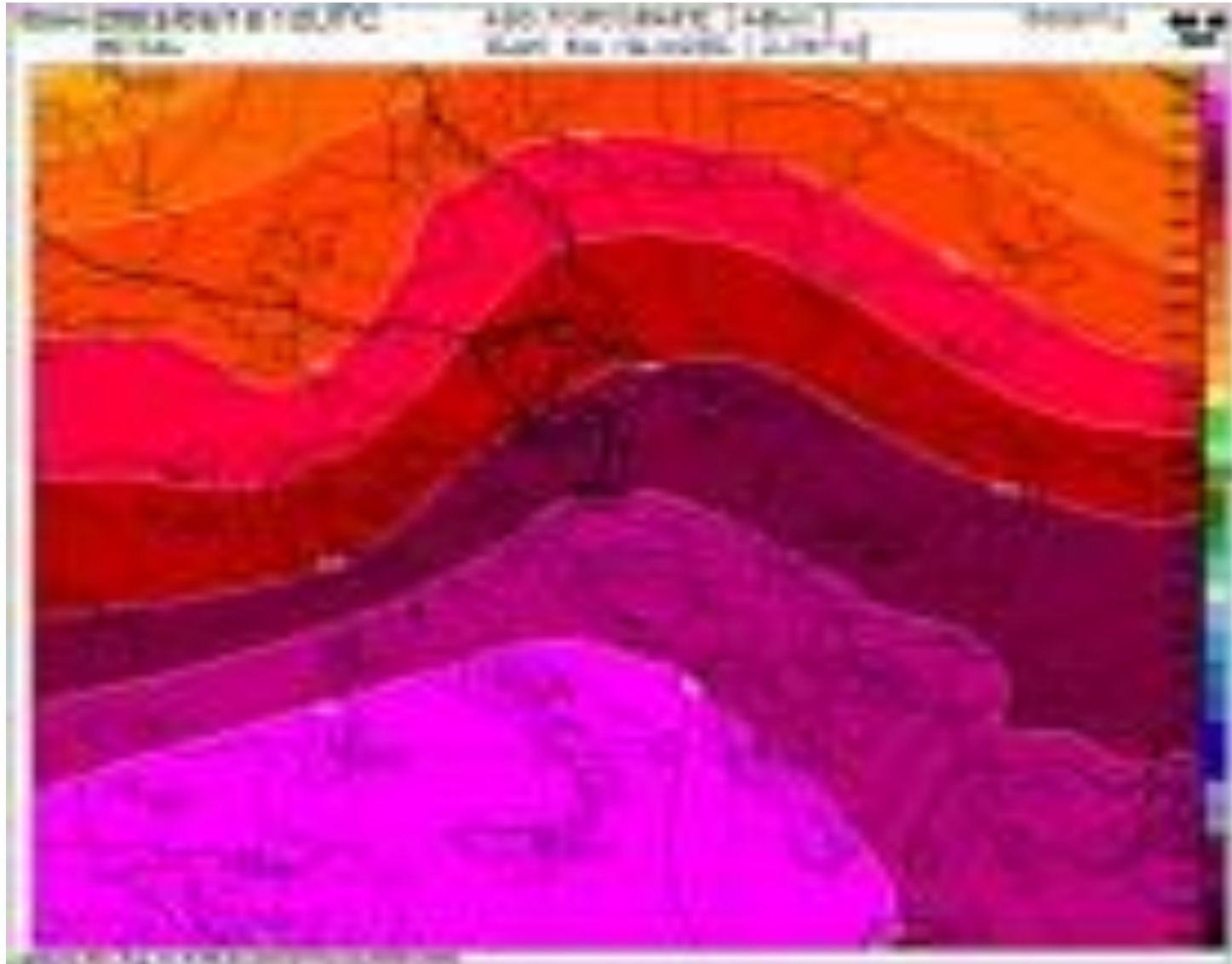


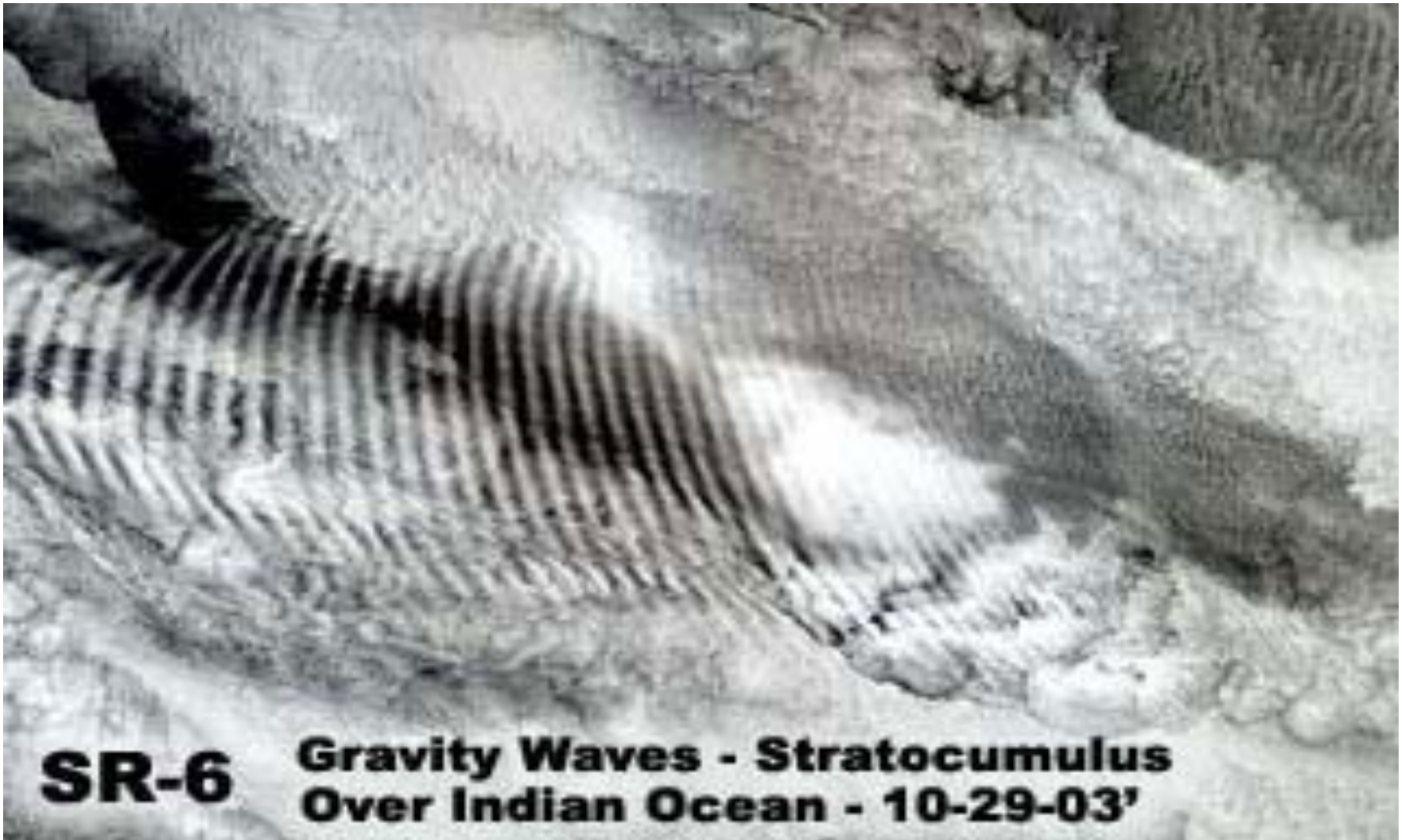
図 2 1971～90 年の期間で平均した(a) 1月の北半球月平均 300 hPa 等高度線  
と(b) 7月の南半球月平均 300 hPa 等高度線 (『気象科学事典』)

等高度線の間隔は 100 m.

# Planetární vlny II



# Gravitační vlny



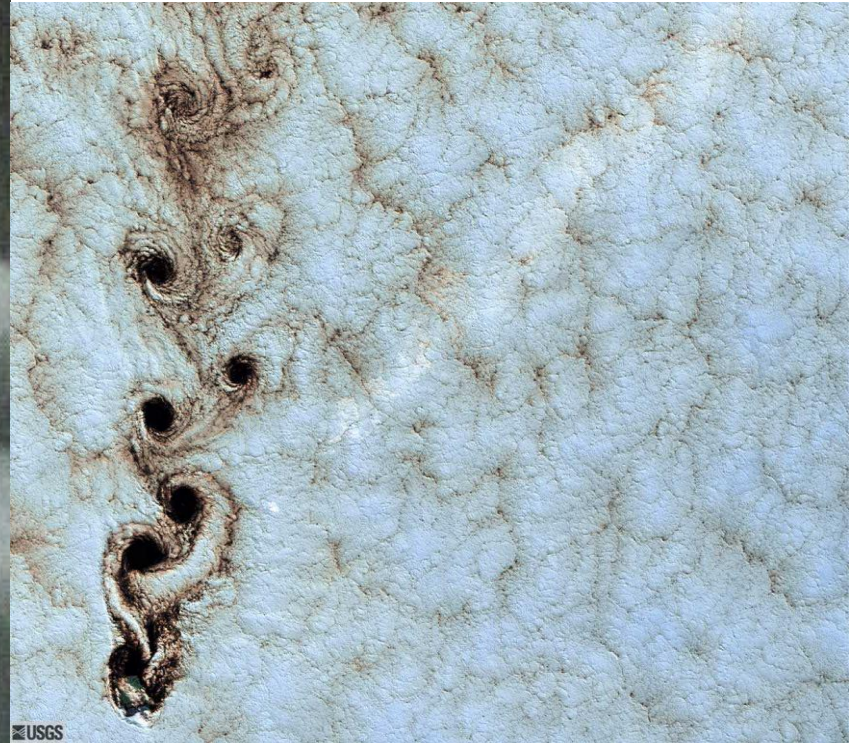
**SR-6 Gravity Waves - Stratocumulus  
Over Indian Ocean - 10-29-03'**



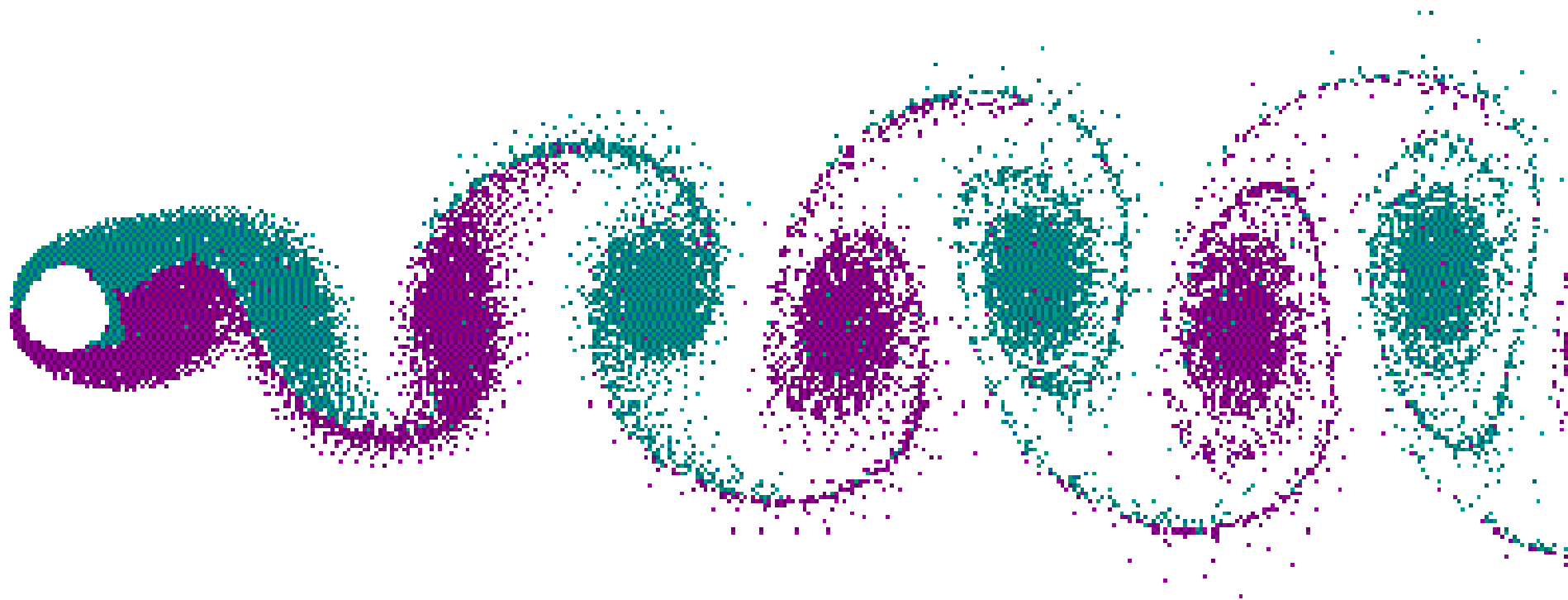
# Příklady dalších vln...



K-H vlna



von Kármánovy víry





# Stojatá vlna

- Orograficky generovaná gravitační vlna.

# Podmínky vzniku závětrných vln

Tři hlavní faktory ovlivňující její výskyt

- Stabilní vertikální zvrstvení
- Rychlost větru
- Vlastnosti překážky

# Podmínka vzniku vlnění

STABILITA. Vzduch se stabilním zvrstvením má snahu odolávat vertikálnímu přemístování. Vystupuje-li přes překážku má snahu se za překážkou vracet zpět do původní hladiny a potom kolem ní oscilovat než se ustálí v původní hladině. Perioda oscilace závisí na stabilitě zvrstvení. Při gradientu  $0,65^{\circ}\text{C}/100\text{m}$  (MSA) je tato perioda u nenasyceného vzduchu 590 sec. Při inverzi  $-5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$  kolem 280 sec. S rostoucí stabilitou se tedy perioda zkracuje.

RYCHLOST VĚTRU. Horizontální pohyb vzduchu je nezbytný k překonání překážky... Při rychlosti větru 10 m/s a standardní atmosféře ( $T=590$  sec) je vlnová délka rovna 5900 m. V případě inverze ( $-5^{\circ}\text{C}/100$  m,  $T=280$  sec) jen 2800 m. Tato vlnová délka se nazývá **PŘIROZENOU VLNOVOU DÉLKOU** pro konkrétní vrstvu vzduchu. Tato vlnová délka ovšem není „vlnovou délkou závětrného vlnění“ za reálnou překážkou



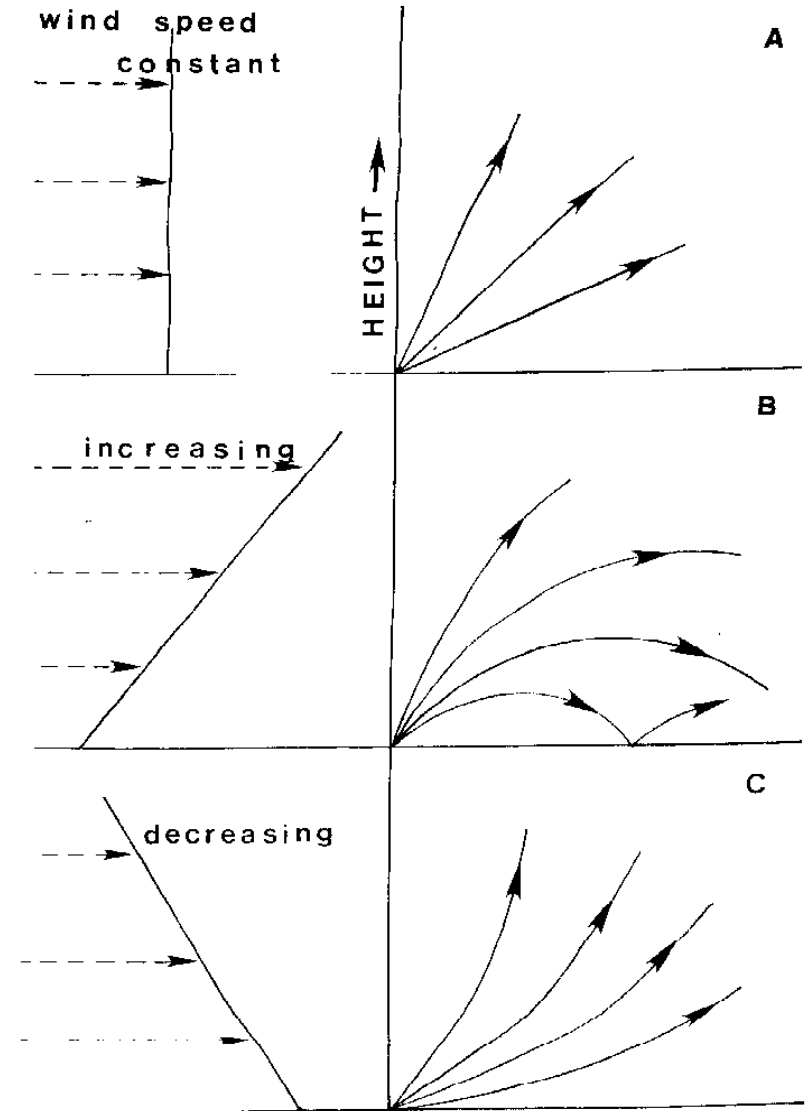
V reálné atmosféře většinou najdeme více vrstev s různou přirozenou vlnovou délkou.

Pro vytvoření závětrného vlnění je ale nezbytně nutné aby ve vyšších vrstvách byla přirozená vlnová délka delší než ve vrstvách nižších – což bývá při konstantním vertikálním gradientu teploty splněno vzrůstající rychlostí větru s výškou.

# ZMĚNA RYCHLOSTI VĚTRU S VÝŠKOU.

Předp. konstantní gradient T

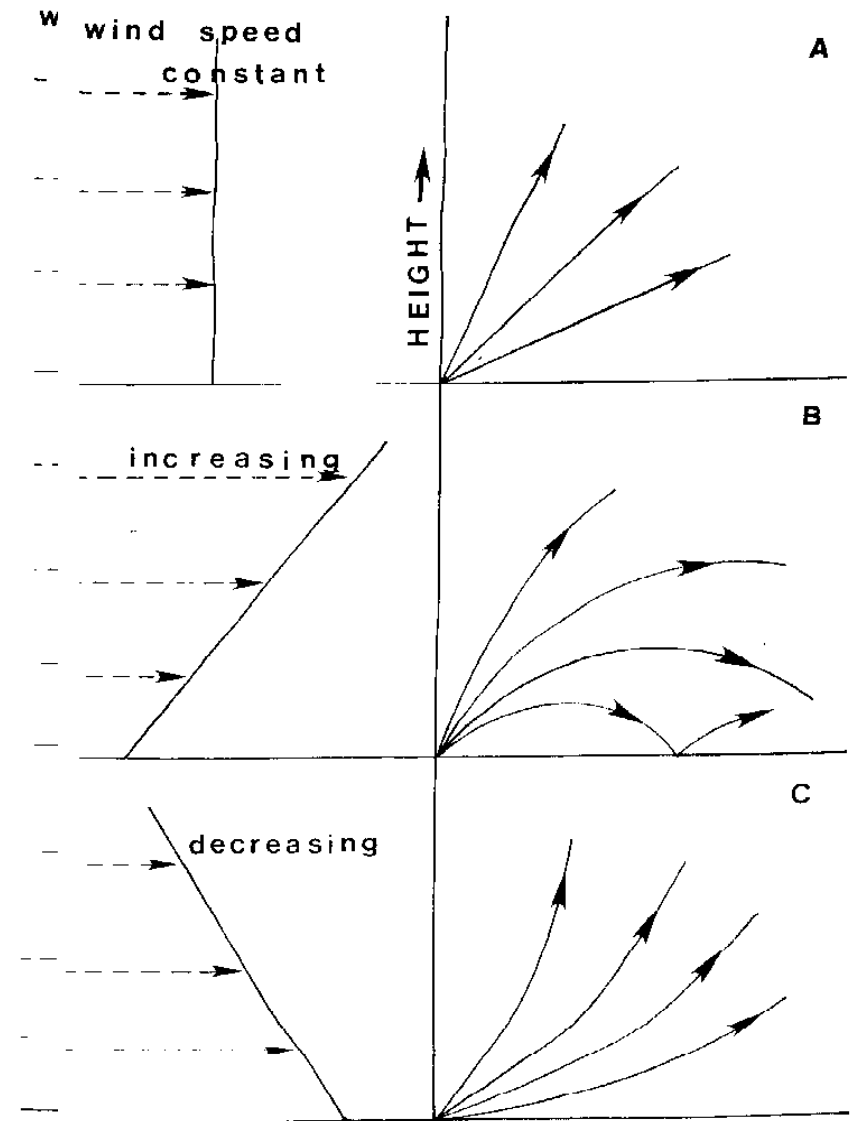
A- v případě, že vítr je z výškou neměnný přirozená vlnová délka se s výškou nemění. Vlnová energie se šíří lineárně. Pokud si vybereme nějakou vrstvu vzduchu tak se z ní energie ztrácí.





# ZMĚNA RYCHLOSTI VĚTRU S VÝŠKOU.

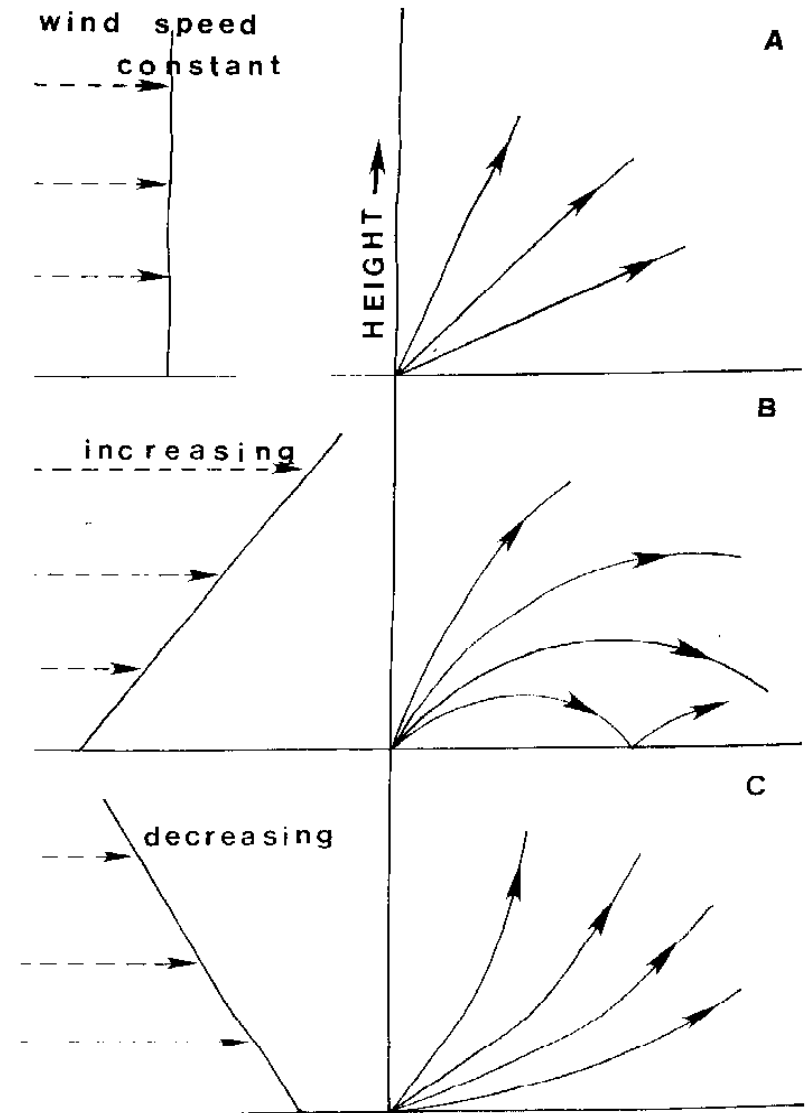
B- v případě, že vítr s výškou zesiluje, přirozená vlnová délka s výškou roste. Vlnová energie šířící se z bodu na zemi „se ohýbá“ ve směru větru. Silnější vítr nahoře „udrží“ vlnovou energii uvnitř vrstvy, což vede k rezonančnímu zesilování určitých vlnových délek a přetrvávání a šíření vlny dále od zdroje.



# ZMĚNA RYCHLOSTI VĚTRU S VÝŠKOU

C- v případě že vítr s výškou slábne, přirozená vlnová délka se s výškou zkracuje a vlnová energie se vytrácí z dané vrstvy rychleji.

Podobně jako když mořská vlna dorazí na pobřeží – zpomalí se, napřímí a zhroutí...



# ZMĚNA SMĚRU VĚTRU S VÝŠKOU

Změna směru větru z výškou není v dvourozměrném popisu vlny uvažována, ale má vliv podobný jako pokles rychlosti větru s výškou, ale navíc vede k prostorovým deformacím vlny a jejímu narušení prostorovými interferencemi, takže pásmo stoupání je rozbité a nehomogení a tudíž obtížněji využitelné.

# VLIV VLHKOSTI VZDUCHU

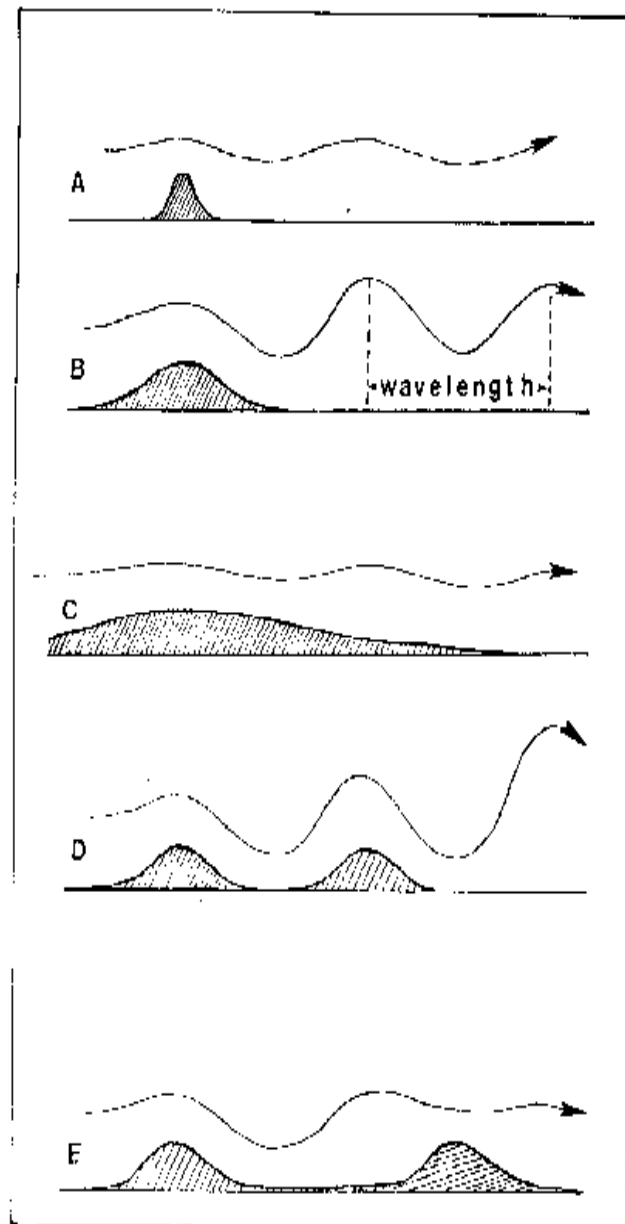
Vlhkost vzduchu se projeví podobně jako u konvekce až při kondenzaci, kdy se změní stabilitní podmínky uvnitř vrstvy vzduchu. Vrstva vzduchu se může stát po nasycení vodní parou labilní a vlnový charakter proudění se může zhroutit. Kondenzace při vyšších teplotách a při vyšším množství uvolněné energie při skupenské přeměně vede častěji ke zhroucení vlny. Ac lent vznikající při menších teplotách a v nižším tlaku (kdy se již nasycená adiabata blíží suché) vlnu zhroutit nemusí – což je potvrzeno 😊.

# Vliv překážky a jejího tvaru

- Je důležité si uvědomit, že vlnová délka závětrné vlny tedy není ovlivněna rozměrem překážky, její amplituda je tvarem a převýšením překážky ovlivněná.
- Na dalším obrázku je znázorněno jak šířka překážky ovlivňuje amplitudu vlny, vlnová délka je ve všech případech stejná.

# Tvar překážky a amplituda vlny

- A - příliš „úzká“ překážka oproti vlnové délce - malá amplituda
- B - šířka překážky odpovídá vlnové délce - velká amplituda
- C - příliš široká překážka - redukuje převýšení „zhoupnutí“ a tím redukuje amplitudu
- D - dvě překážky za sebou v celém násobku vlnové délky
- E - dvě překážky v neceločíselném násobku vlny





# Výška překážky a amplituda vlny

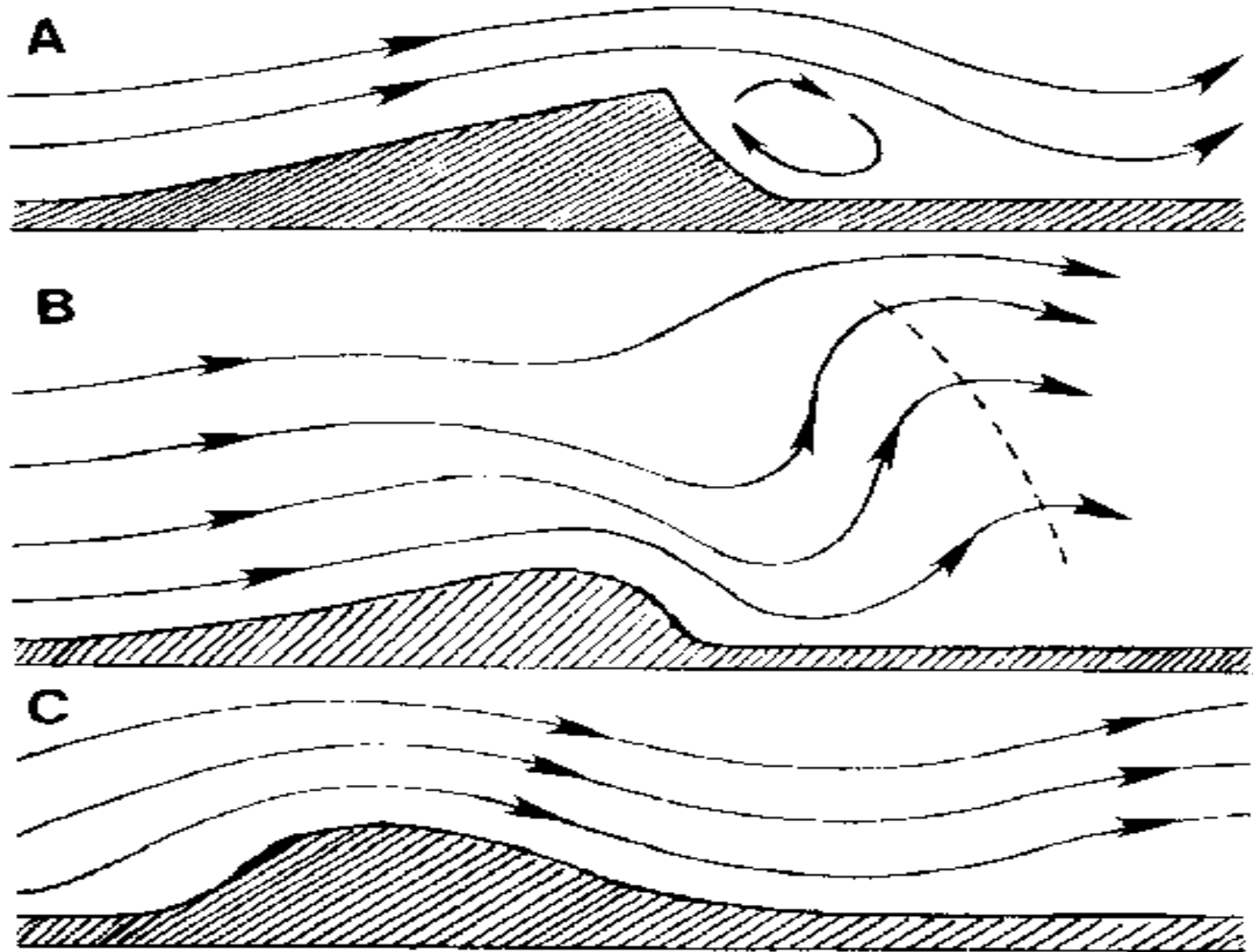
Předpokládáme případ B - kdy vlnová délka odpovídá šířce překážky. Vyšší překážka pak znamená větší amplitudu vlny.

V reálu ale vyšší pohoří často bývají i širší, a širší překážka má větší vliv na delší vlnové délky. Vzhledem k tomu že delší vlnové délky bývají spojené se silnějším větrem je potřeba silnějšího větru aby produkovaly větší vlnovou amplitudu. Takže často mohou menší pohoří produkovat větší amplitudu vlny při relativně slabším větru - jsou tedy často využitelnější...

# Vliv tvaru překážky

Dosud jsme předpokládali, že nejspodnější proudnice kopírují tvar překážky. U velmi členitých hřebenů nebo u hřebenů s ostrou hranou mohou v závětrí vznikat víry/rotory. Takovéto víry/rotory bezprostředně za překážkou mohou často vhodně doplňovat tvar překážky a vlna se může tvořit společně přes překážku a vír/rotor.

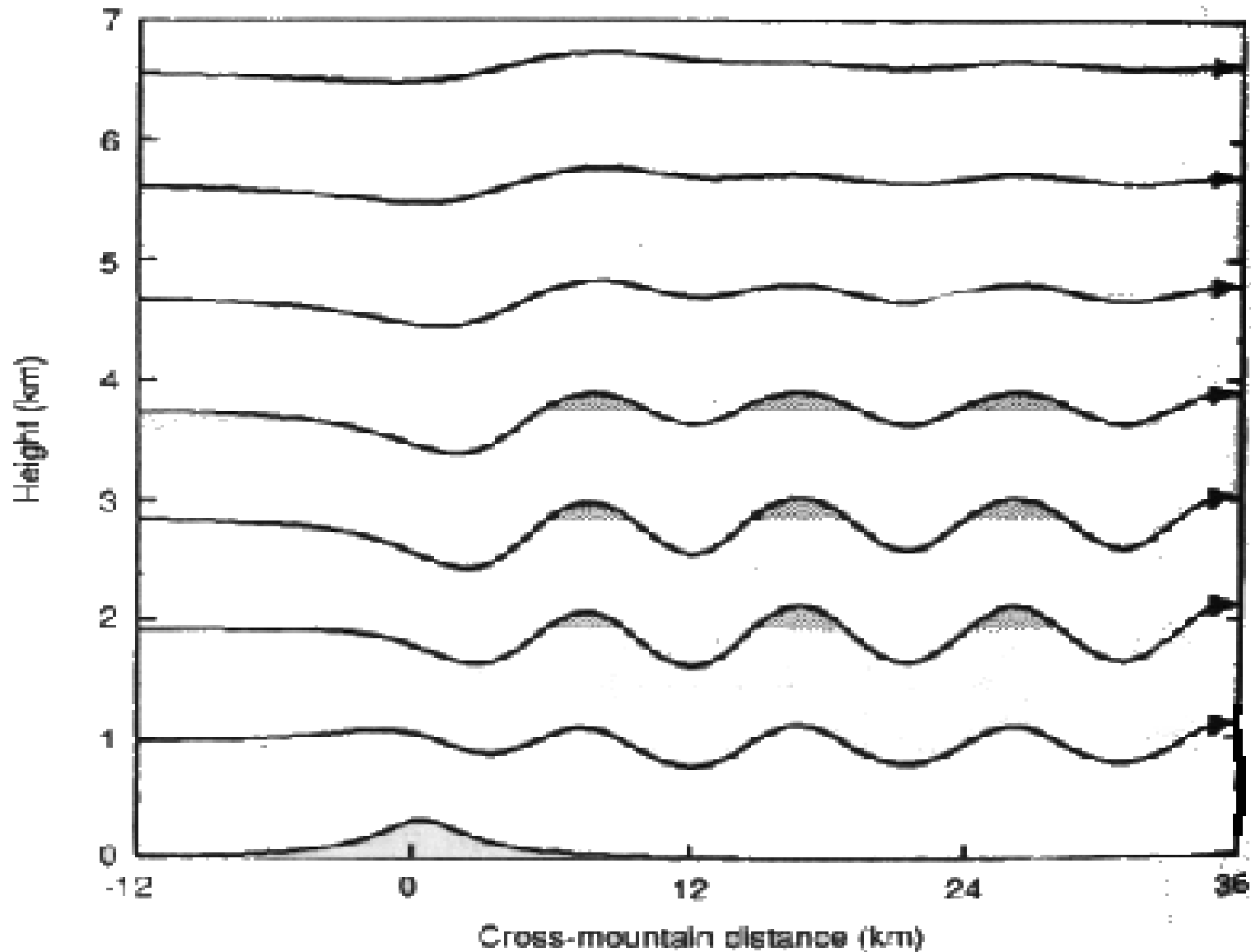
# Vliv tvaru překážky na charakter vlny



# Vlastní tvar vlny

V jednoduchých knihách o meteorologii bývá často tvar vlnového proudění kreslen velmi zjednodušeně - jako sinusoidy umístěné vertikálně souměrně nad překážkou. S takovými podmínkami se však setkáme jen velmi zřídka a to jen v podmínkách blízcích se ideálním...

# Ideální případ...



# Charakteristika vlny - Froudovo číslo

- závislost na stabilitě atmosféry, proudění a tvaru překážky.

$$Fr = U/Nh$$

**U** - rychlost větru **h** – výška překážky

**N** - Brunt-Vaisalova frekvence

$$N = \{(g * dth)/(th*dz)\}^{1/2}$$

**th** - potenciální teplota, **dth** - gradient pot.temp (K), **dz** – tloušťka vrstvy, **g** - tíhové zrychlení



# Froudovo číslo

- Kvantifikuje všechny tři parametry do jednoho parametru. Vyjadřuje poměr mezi kinetickou energií (rychlost větru) a potenciální energií (stabilita, výška překážky)

# Froudovo číslo

- Je-li  $Fr = 1$  nebo o málo vyšší je velmi pravděpodobné, že vznikne vlnový rozruch
- Je-li  $Fr \ll 1$  není dostatečná rychlost větru k tomu aby proudění překonalo překážku a proudění je blokováno
- je-li  $Fr \gg 1$  proudění překoná překážku bez významnějšího zavlnění

# Froudovo číslo

H [m]	Dth [°C]	U [m/s]	Fr
500	0.4	9	1
500	0.65	6	1
500	0.8	4	1
1000	0.4	15	1
1000	0.65	11	1
1000	0.8	8	1
1500	0.4	23	1
1500	0.65	17	1
1500	0.8	12	1

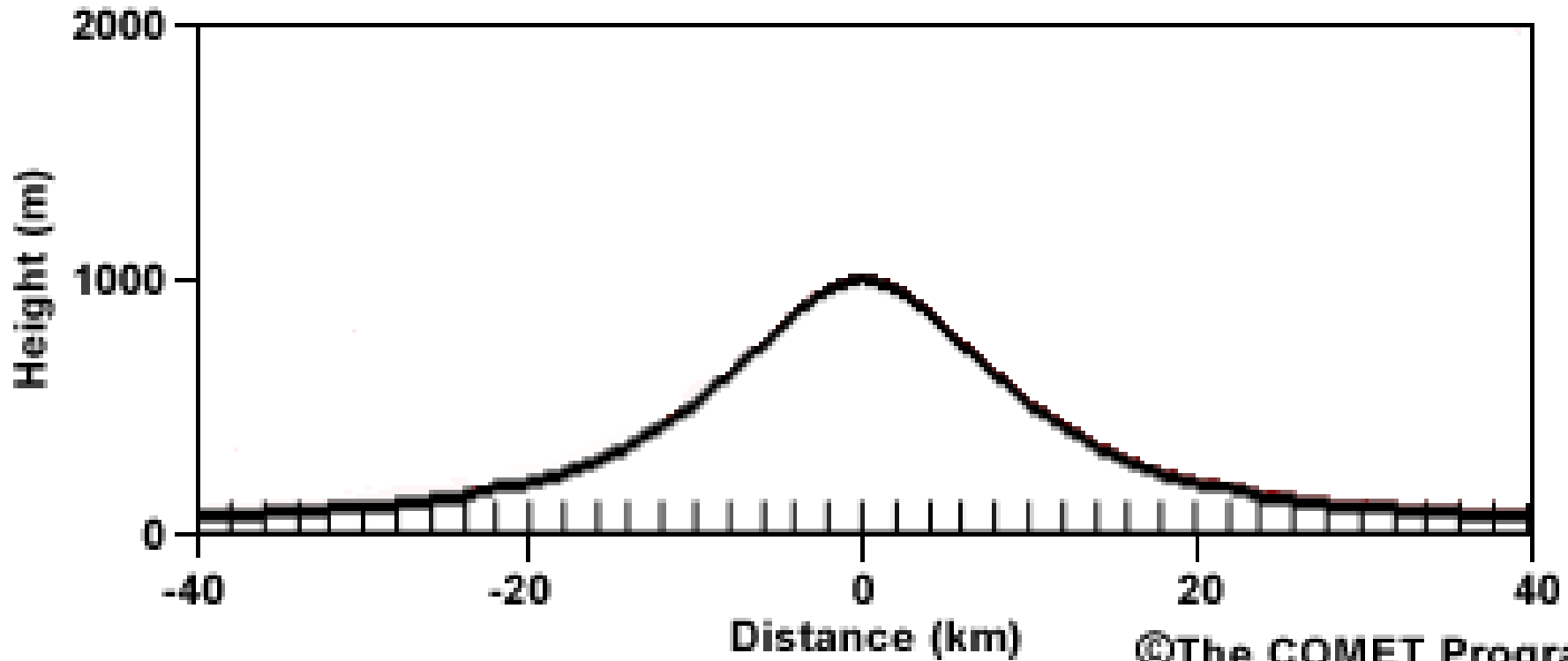
# **Vliv zvrstvení a změn větru s výškou na druh závětrných jevů**

trochu odbočka od vlastní vlny, ale  
demonstruje závětrné jevy a vliv  
změny jednotlivých parametrů s  
výškou

# Ilustrační příklady

- konstantní zvrstvení i vítr
- konstantní zvrstvení, zesilující vítr
- konstantní zvrstvení, slábnutí větru I
- konstantní zvrstvení, slábnutí větru II
- inverze ve výši hřebene, konstantní vítr
- inverze „nad“ hřebenem, konstantní vítr
- inverze ve výši hřebene, slábnutí větru I

# Witch of Agnesi Mountain

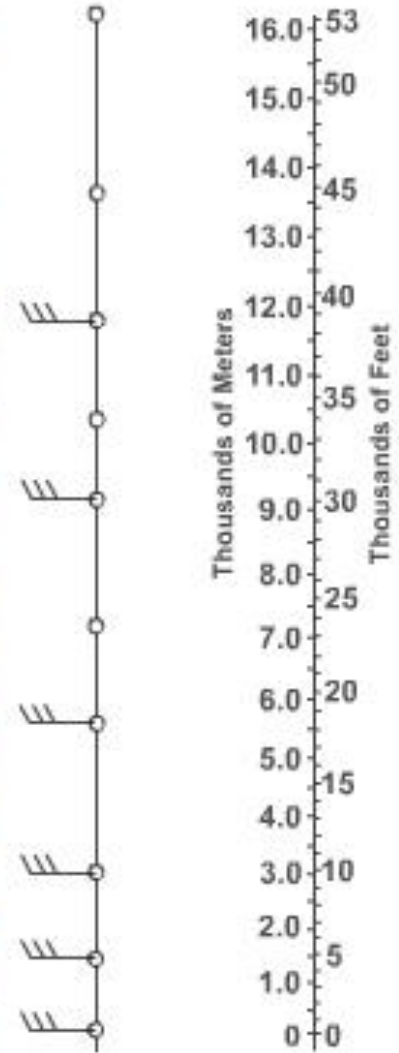
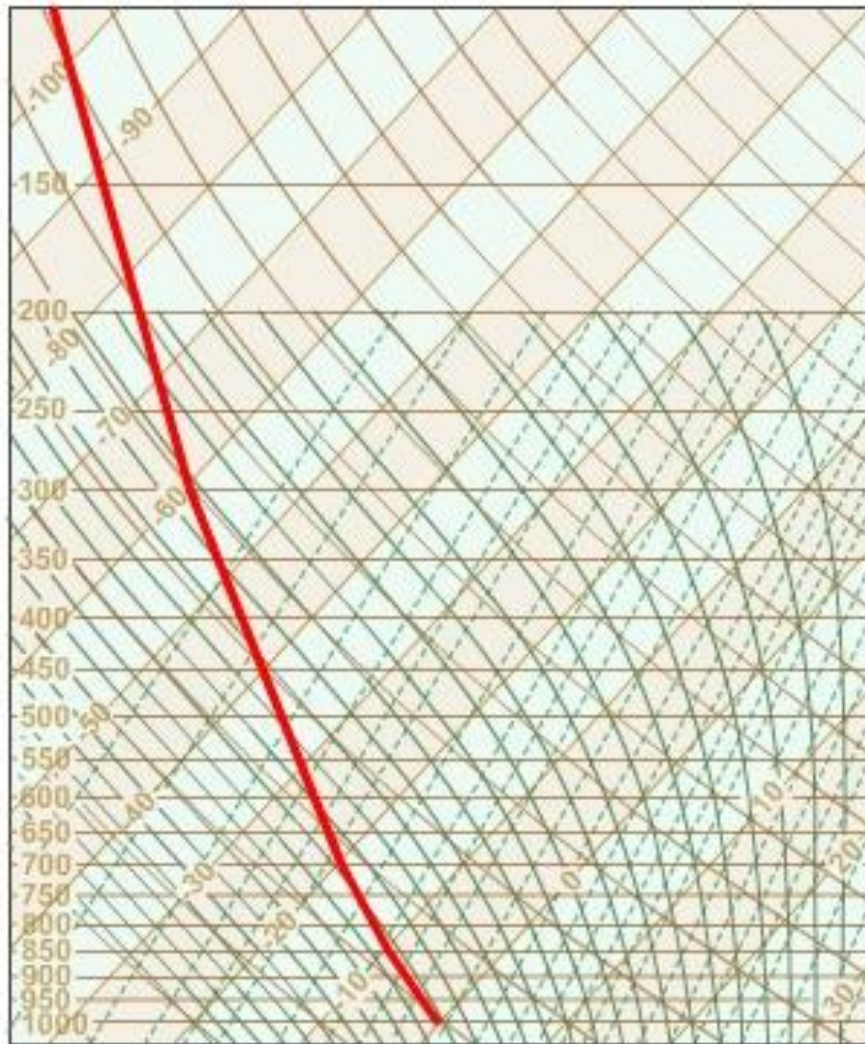


©The COMET Program

# Případ 0

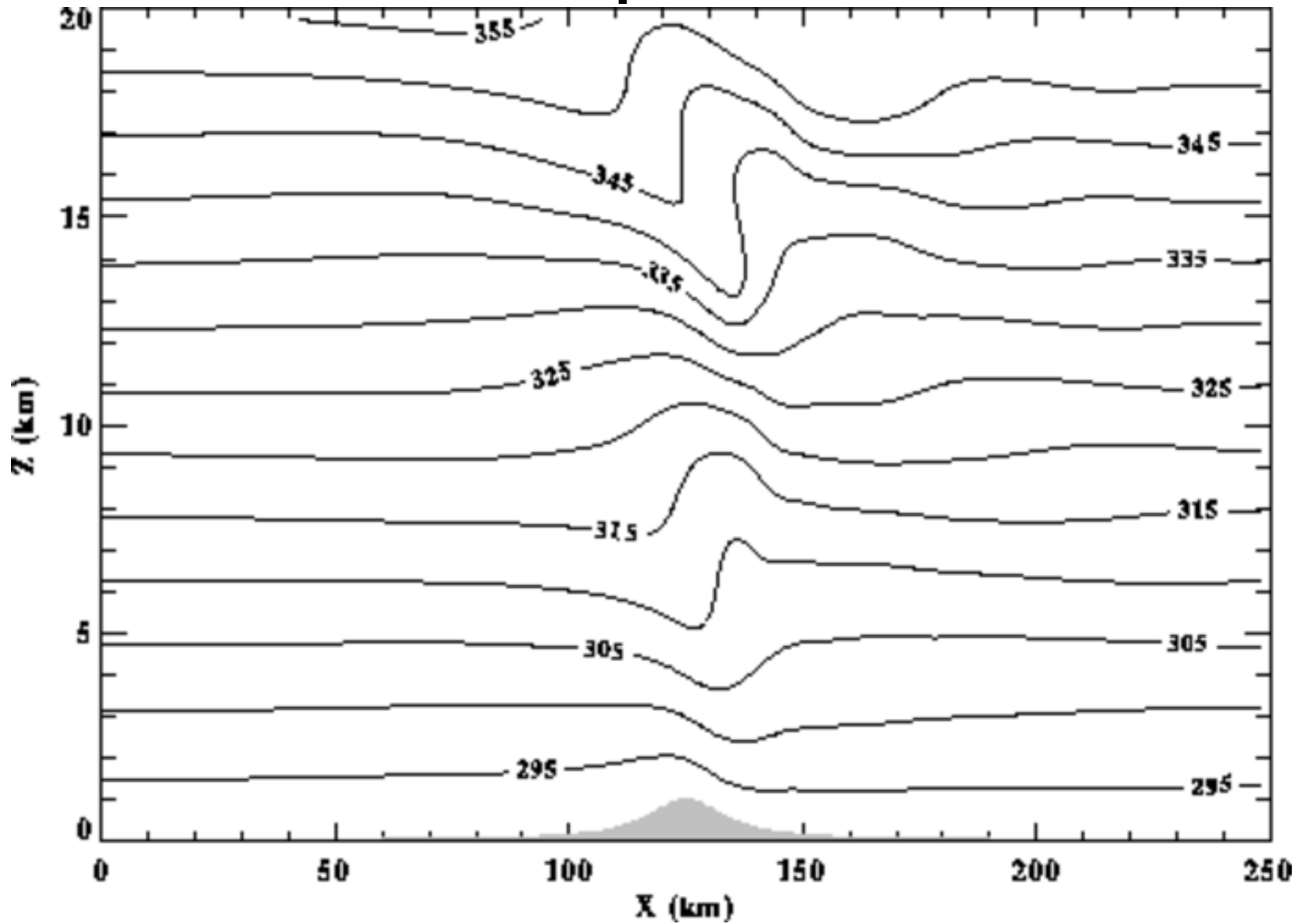
- Konstantní teplotní zvrstvení  $0.65^{\circ}\text{C}/100\text{m}$
- Vítr v celé vrstvě stejný  $15\text{ m/s}$

# Případ 0





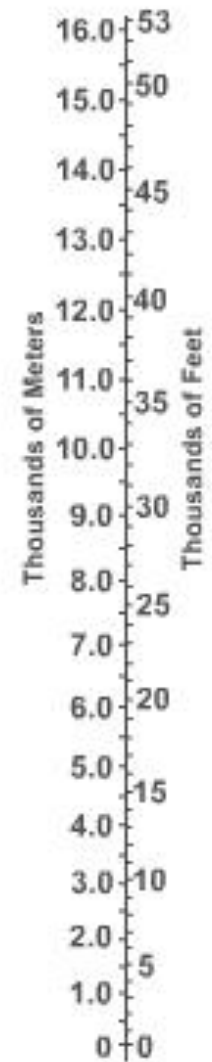
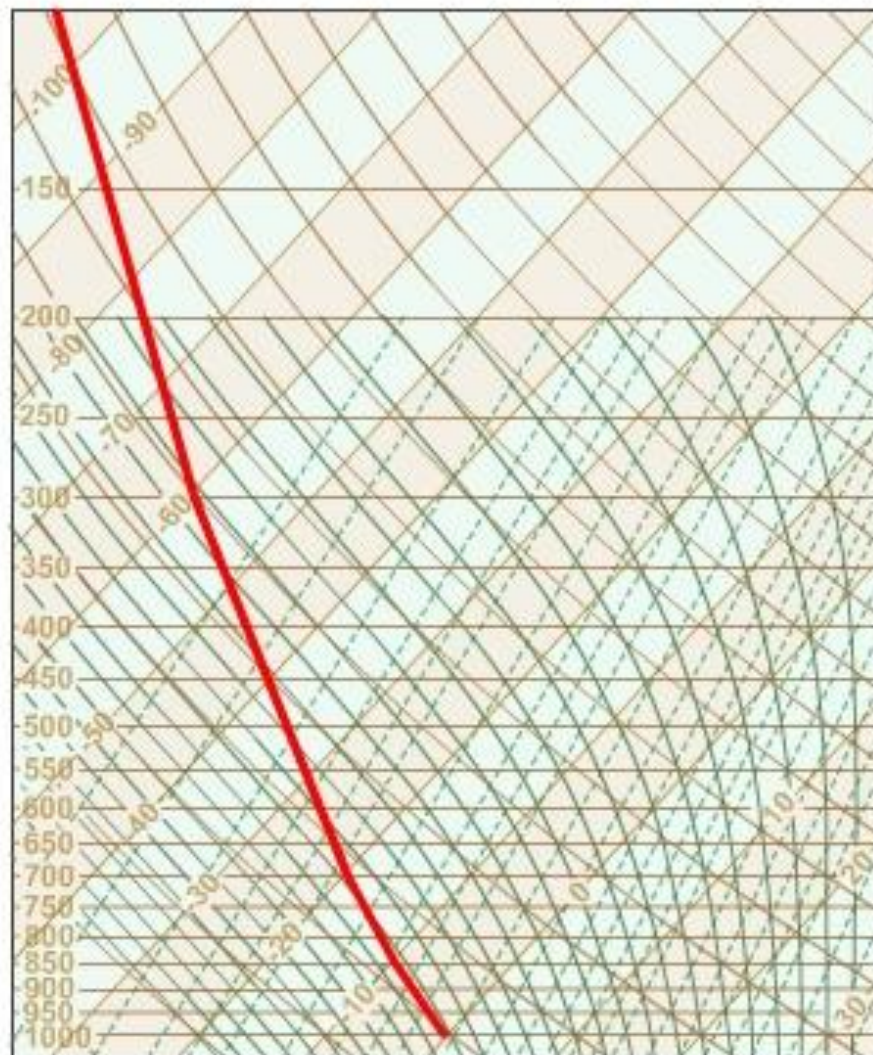
# Případ 0



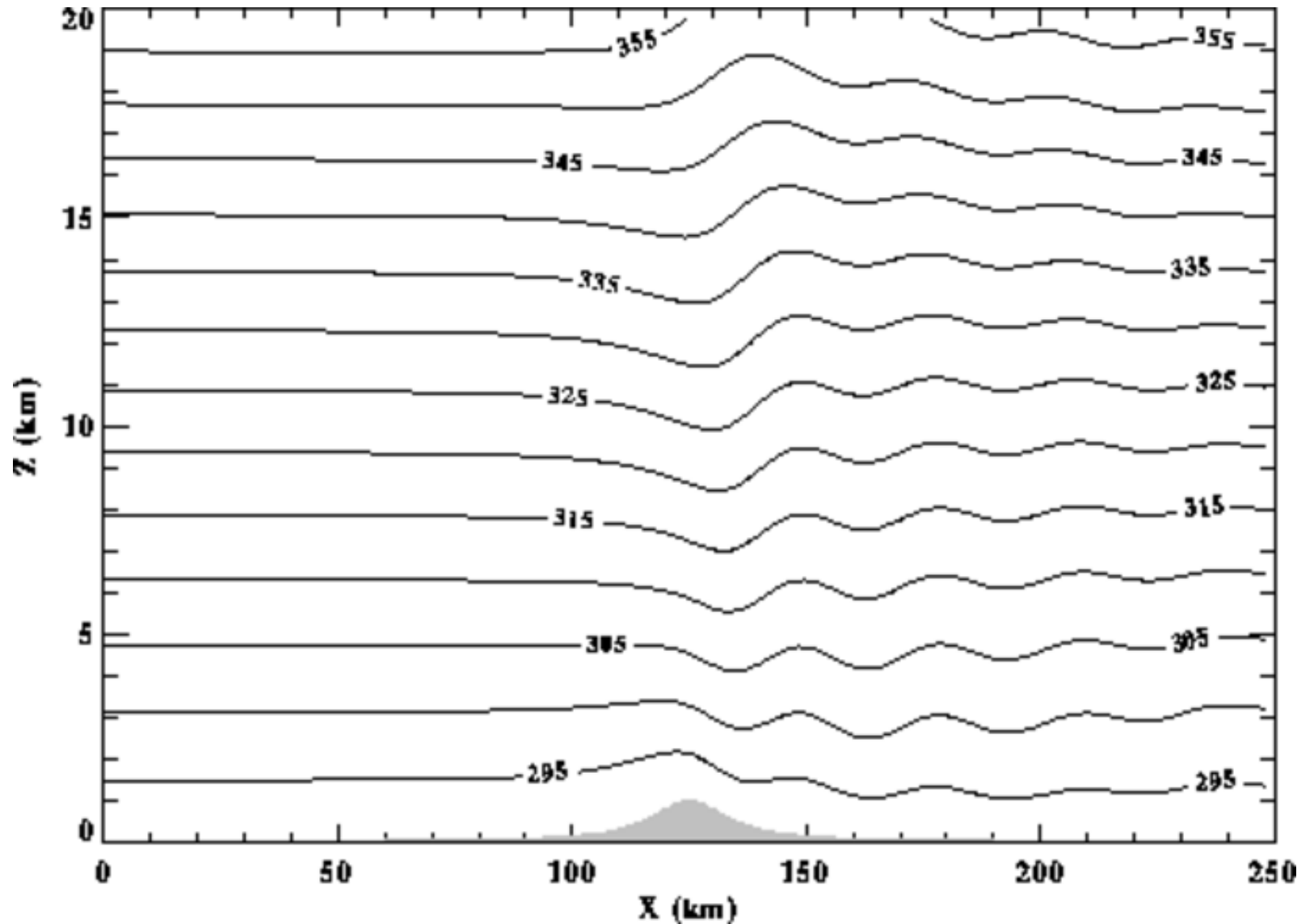
# Případ 1

- Konstantní teplotní zvrstvení  $0.65^{\circ}\text{C}/100\text{m}$
- Vítr konstantní do 2000 m a potom zesiluje z 15 m/s na 45 m/s v 8000 m

# Případ 1



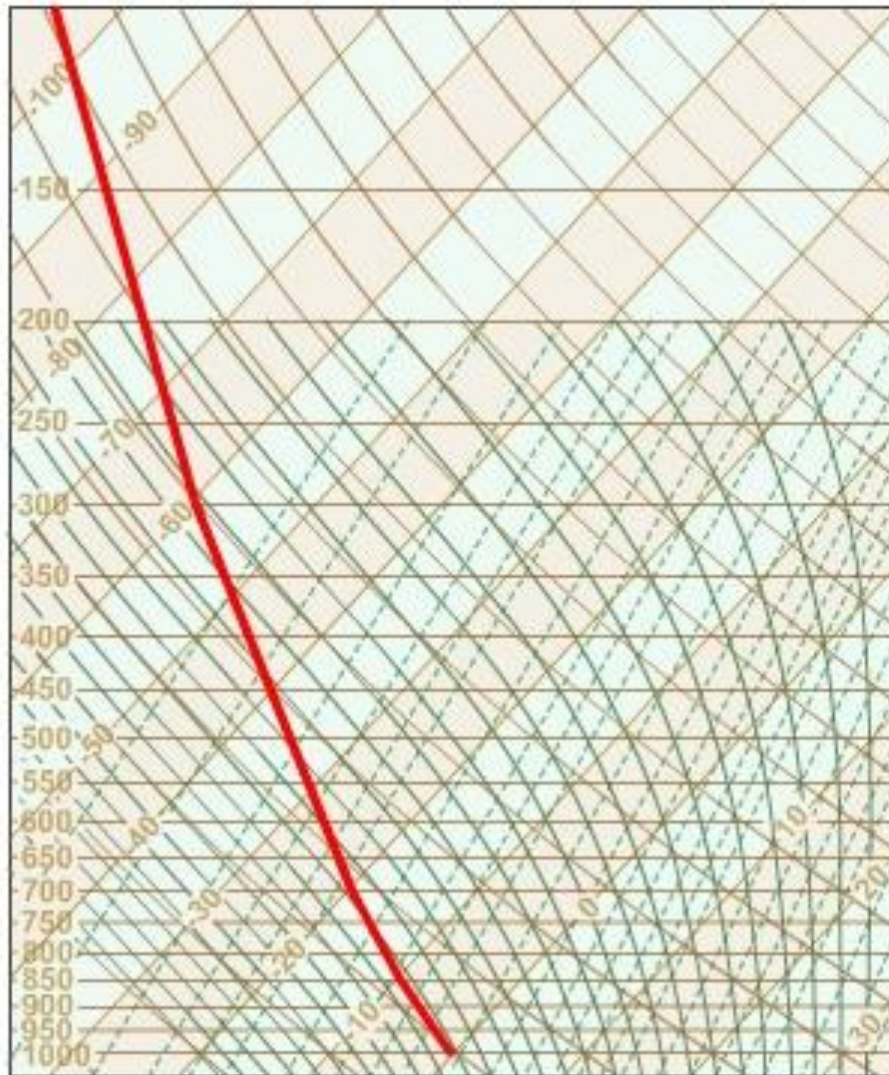
# Případ 1



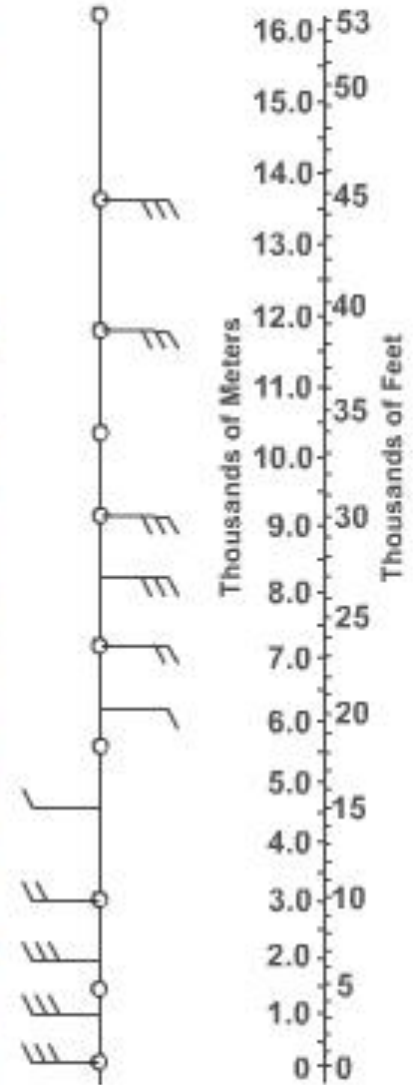
# Případ 2

- Konstantní teplotní zvrstvení  $0.65^{\circ}\text{C}/100\text{m}$
- Vítr do 2000 m konstantní 15 m/s, potom slábnutí větru a následně vítr z opačné strany

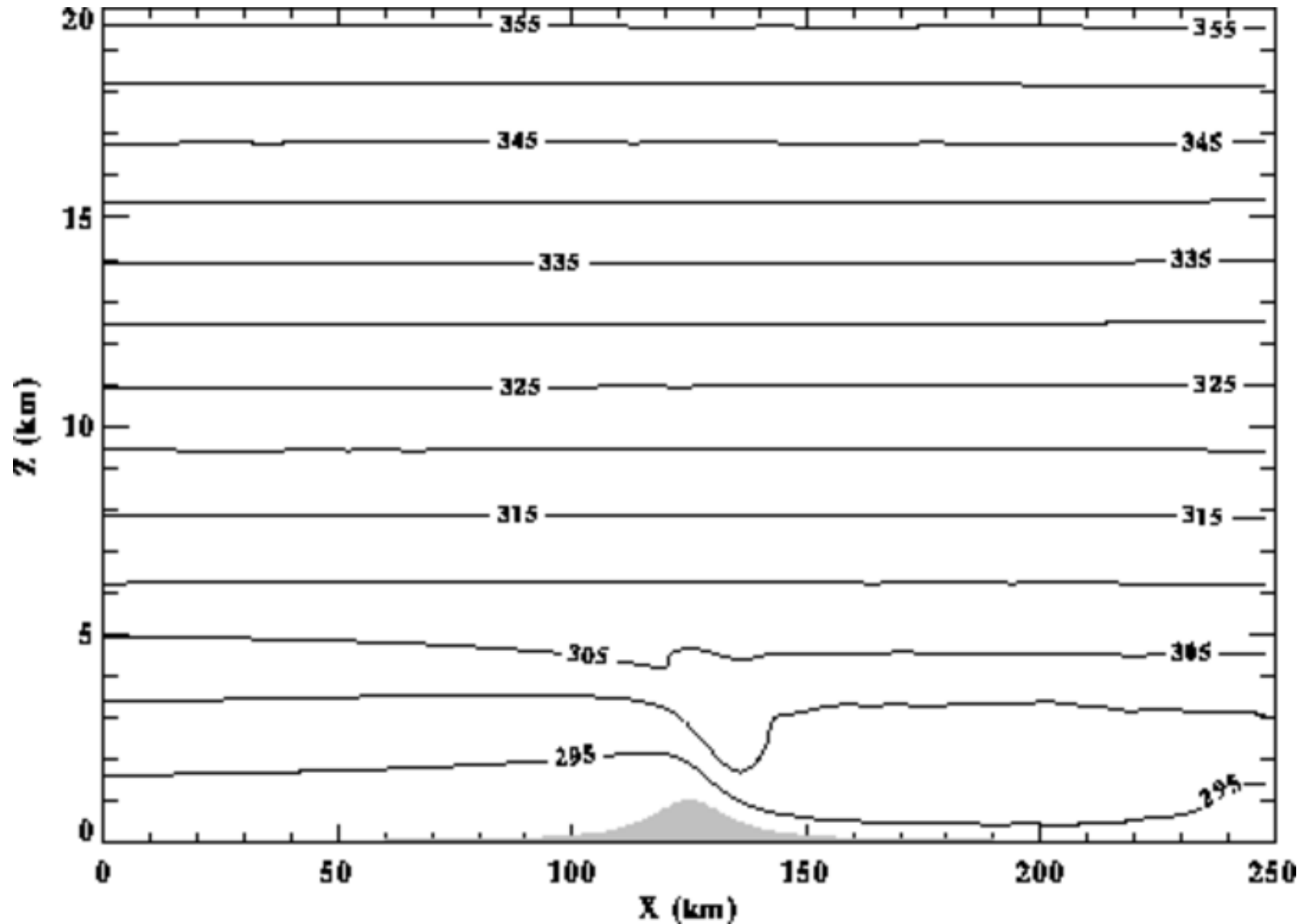
# Případ 2



©The COMET Program



# Případ 2

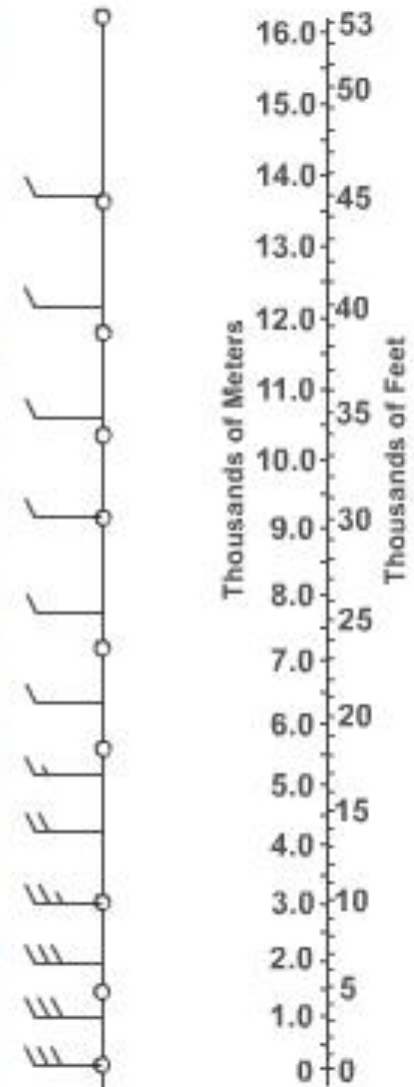
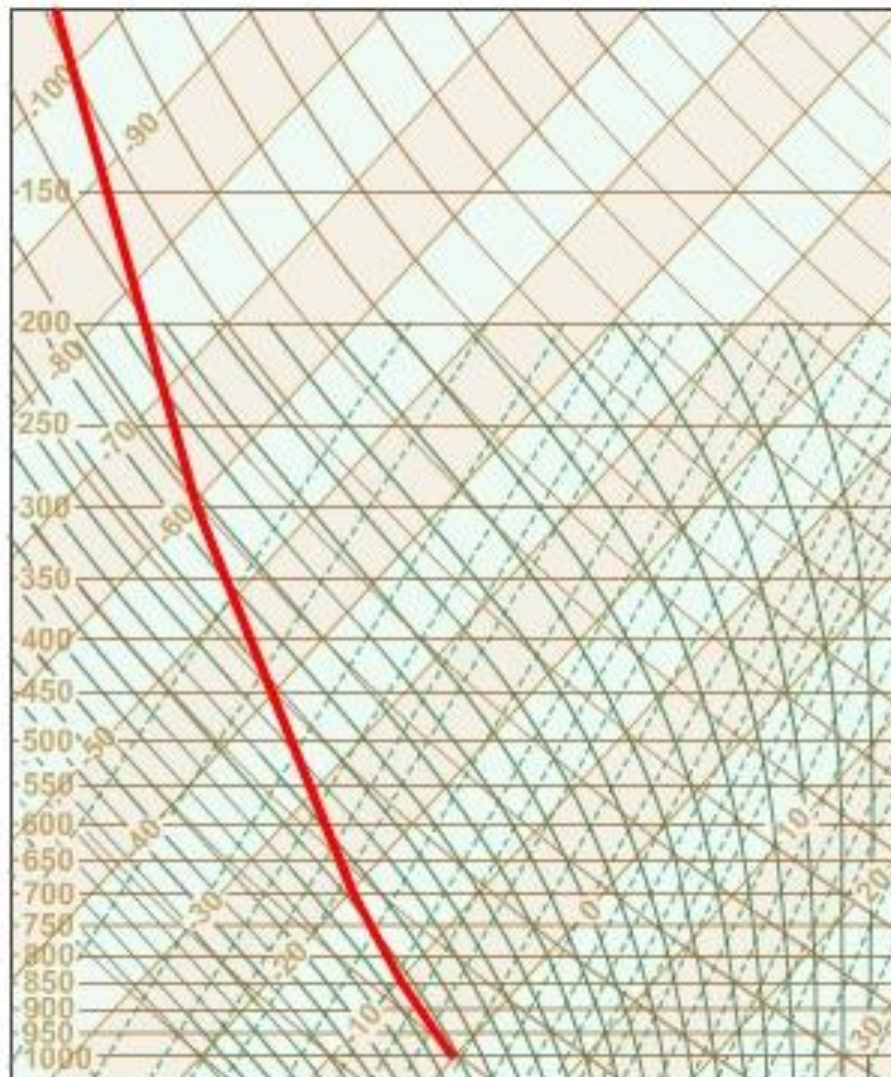


# Případ 3

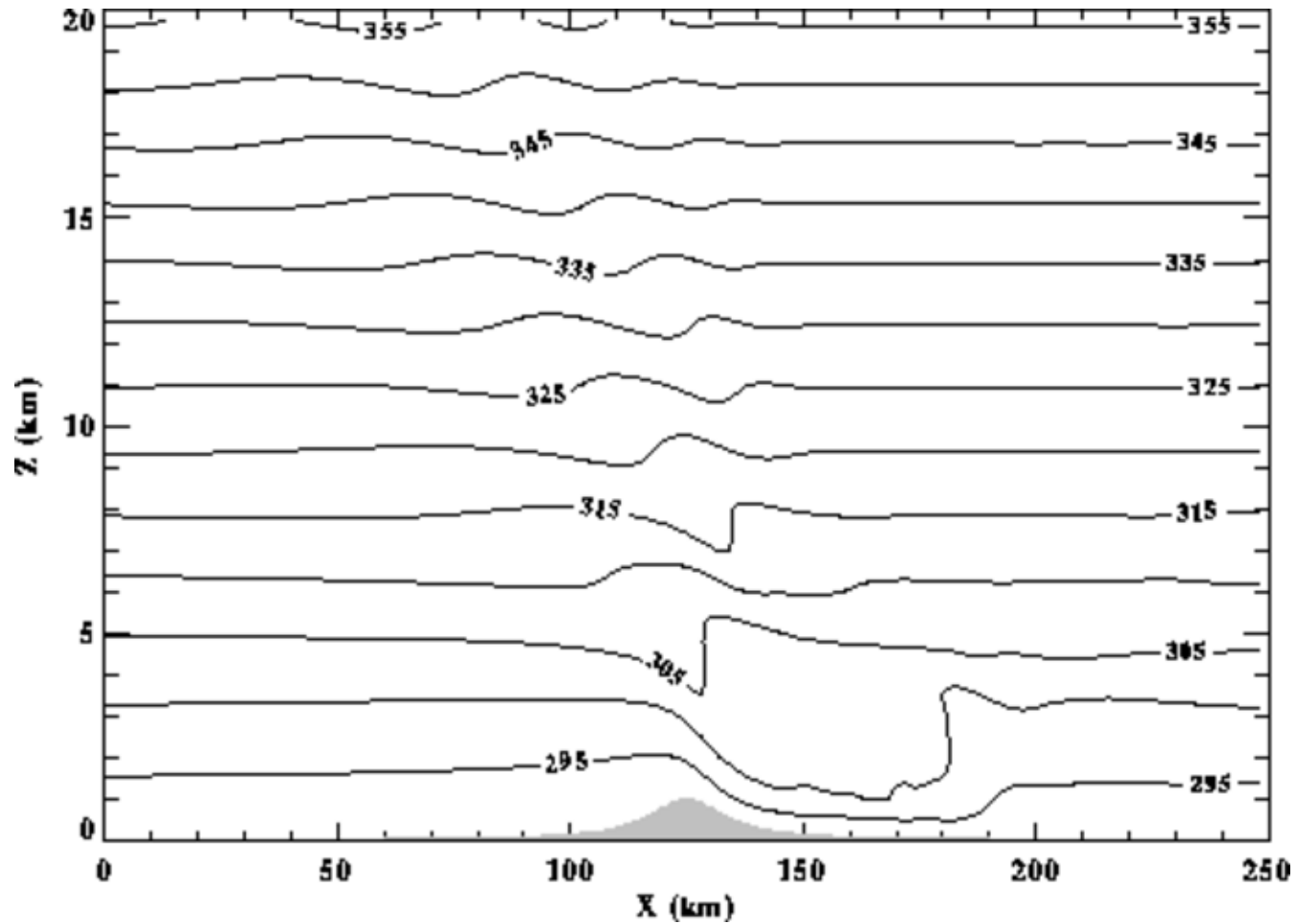
- Konstantní teplotní zvrstvení  $0.65^{\circ}\text{C}/100\text{m}$
- Vítr stálý do 2000 m 15 m/s a potom slábnutí s výškou



# Případ 3



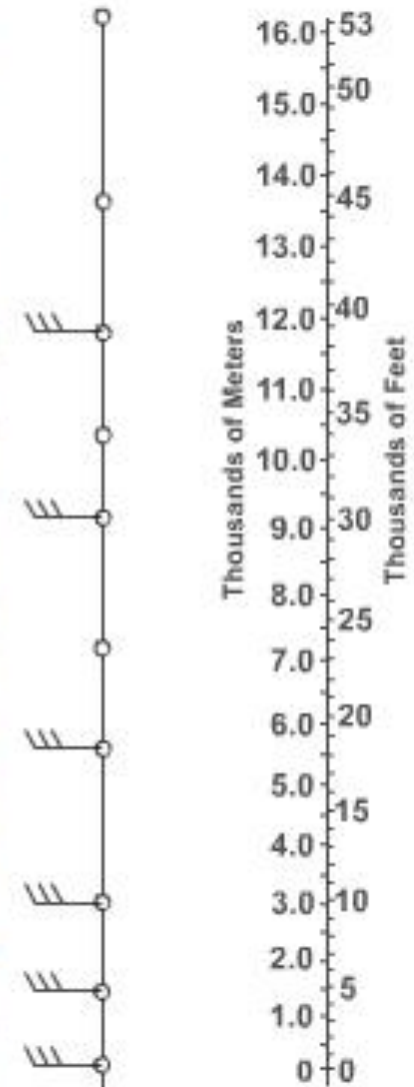
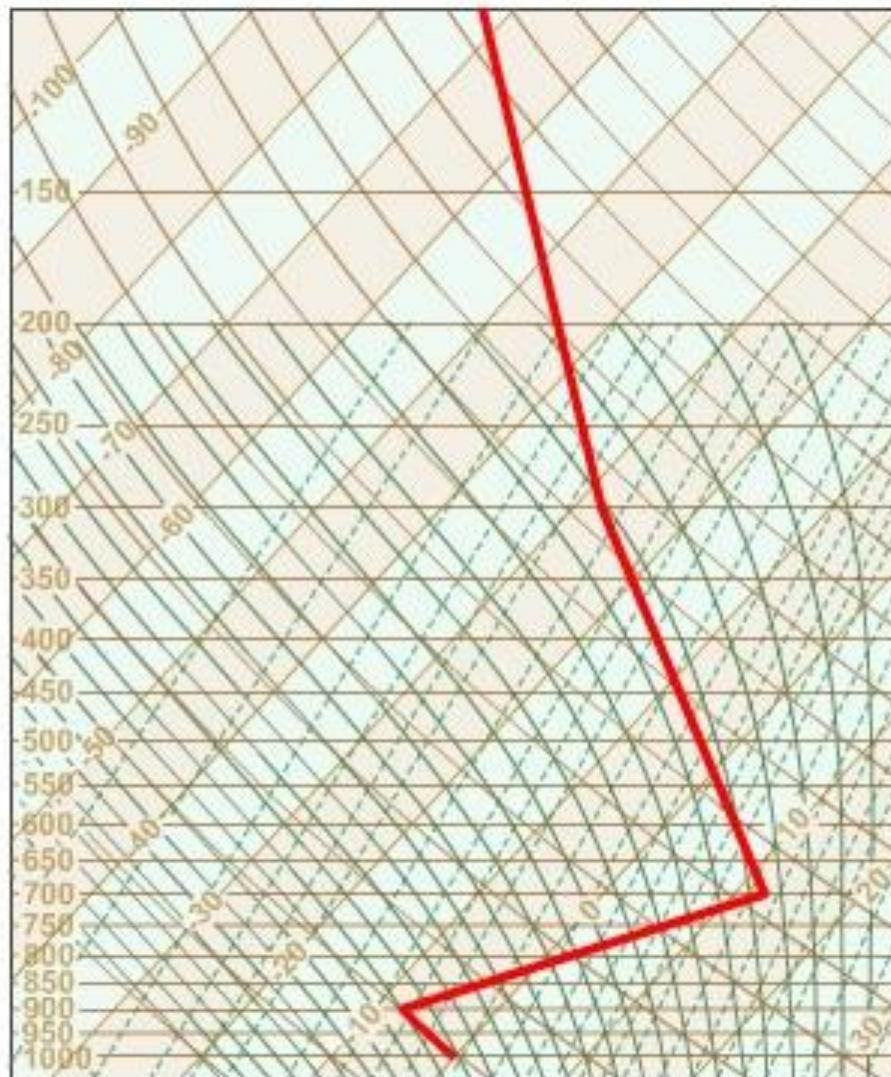
# Případ 3



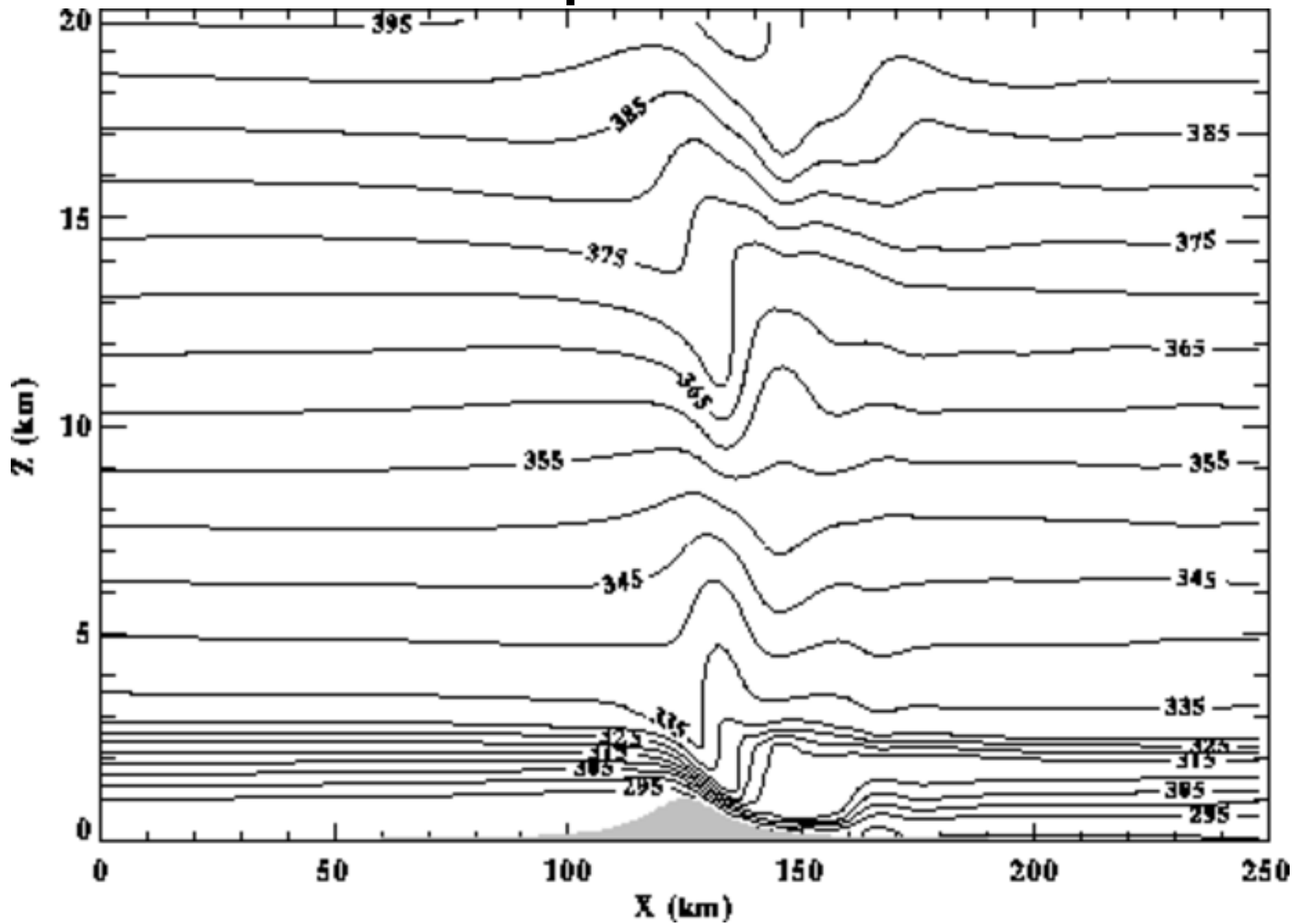
# Případ 4

- Inverze ve výši překážky  $-1^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$  od 1000m do 3 km, pod ní a nad zvrstvení  $0.65^{\circ}\text{C}/100\text{m}$
- Vítr v celé vrstvě stejný 15 m/s

# Případ 4



# Případ 4

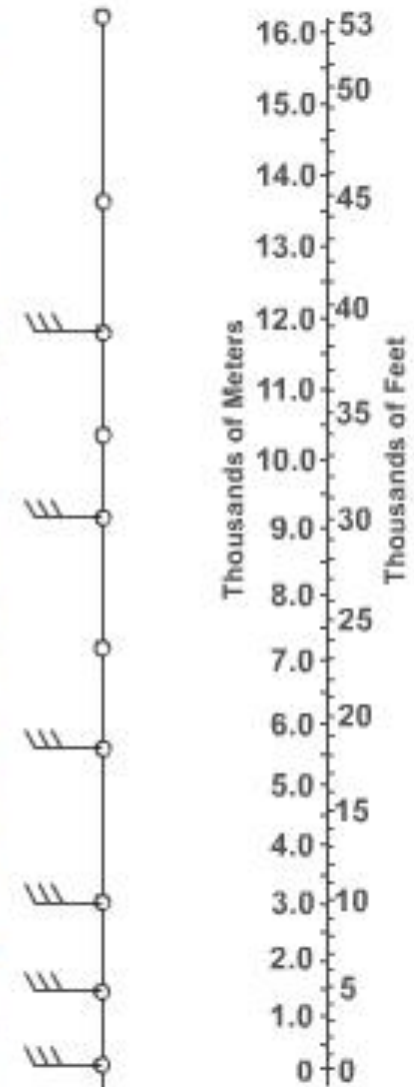
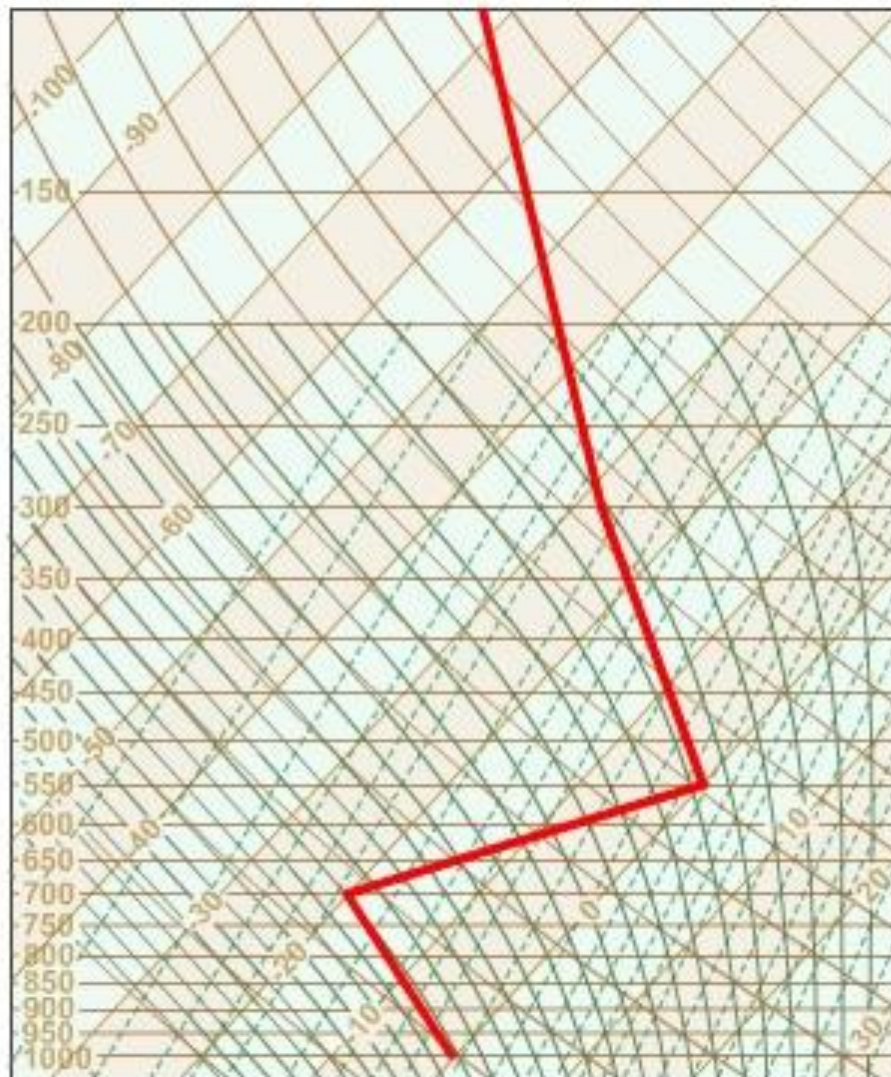


# Případ 5

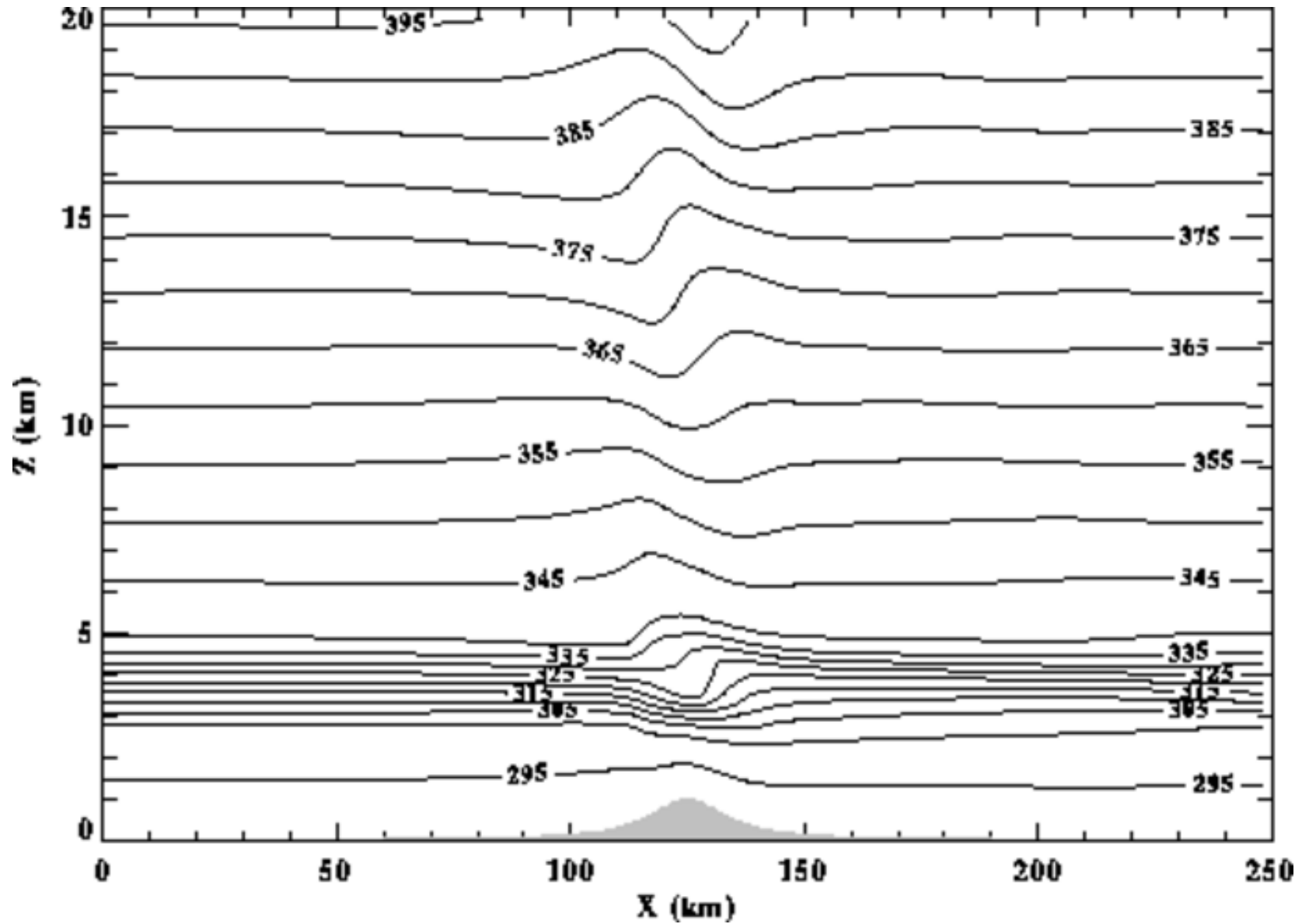
- Inverze „nad“ překážkou ve výšce 2000m silná 2000m  $-1^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ . Nad ní a pod ní konstantní teplotní zvrstvení  $0.65^{\circ}\text{C}/100\text{m}$
- Vítr v celé vrstvě stejný 15 m/s



# Případ 5



# Případ 5

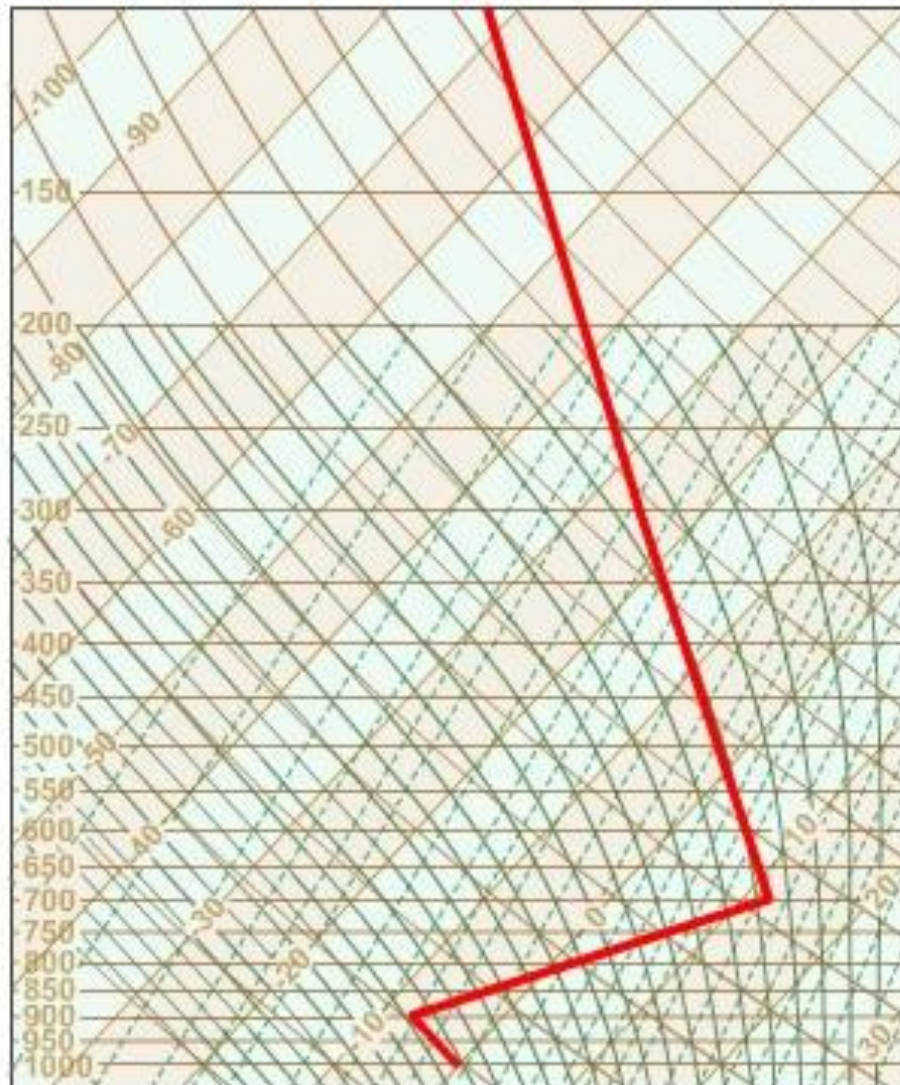




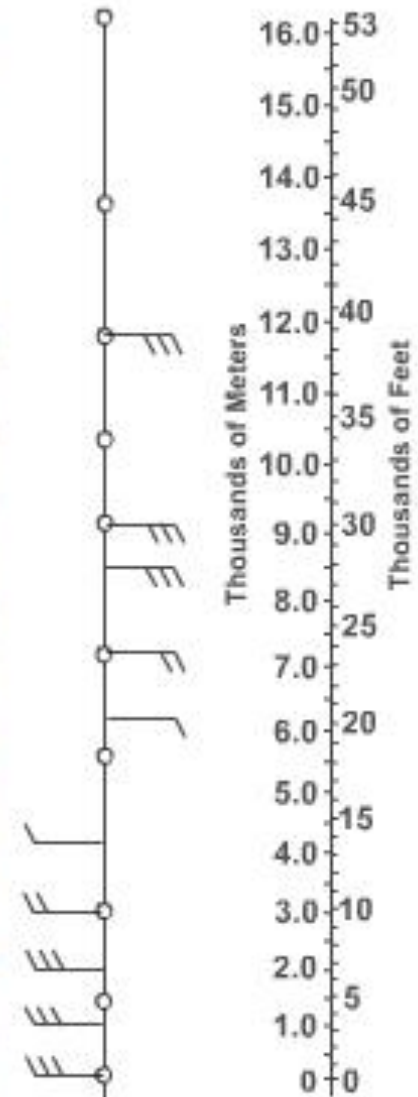
# Případ 6

- Inverze „nad“ překážkou ve výšce 2000m silná 2000m  $-1^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ . Nad ní a pod ní konstantní teplotní zvrstvení
- $0.65^{\circ}\text{C}/100\text{m}$  Vítr do 2000 m konstantní 15 m/s, potom slábnutí větru a následně vítr z opačné strany

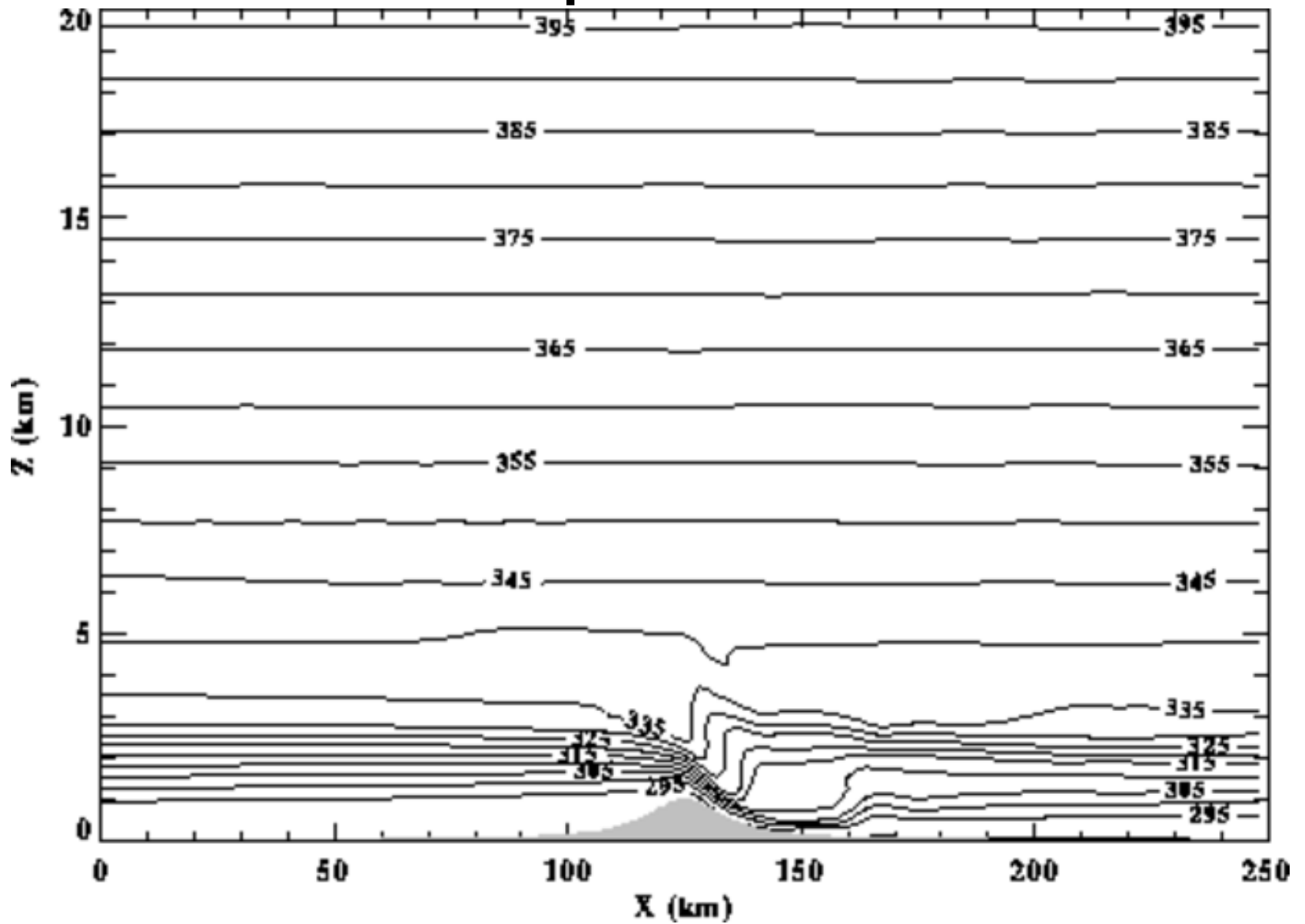
# Případ 6



©The COMET Program



# Případ 6



...zpátky k vlně

# Využitelné podmínky

- Použitelná vlna tedy vzniká v případě 1

stabilní zvrstvení

vír zesilující s výškou

froudovo číslo 1

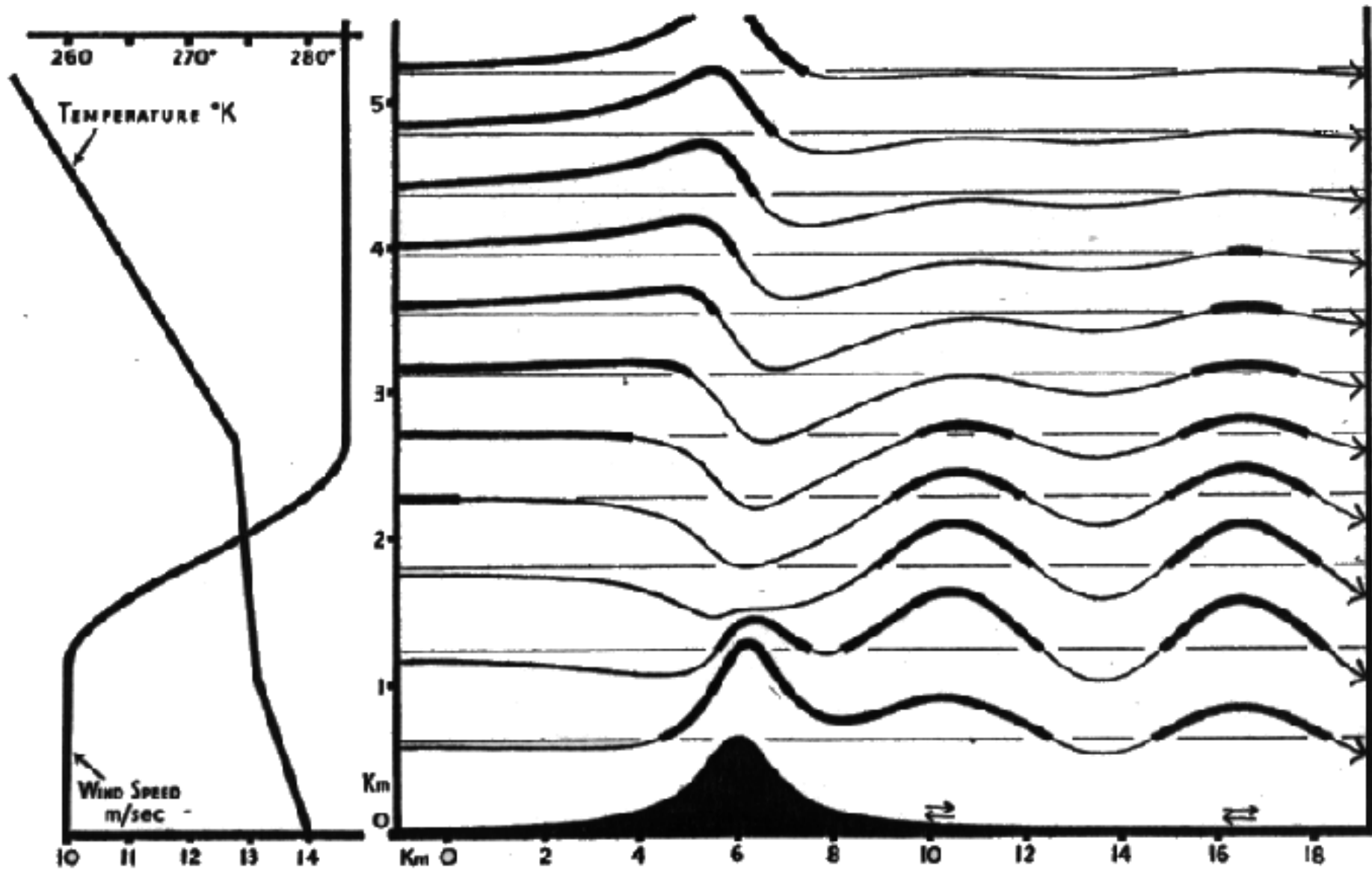
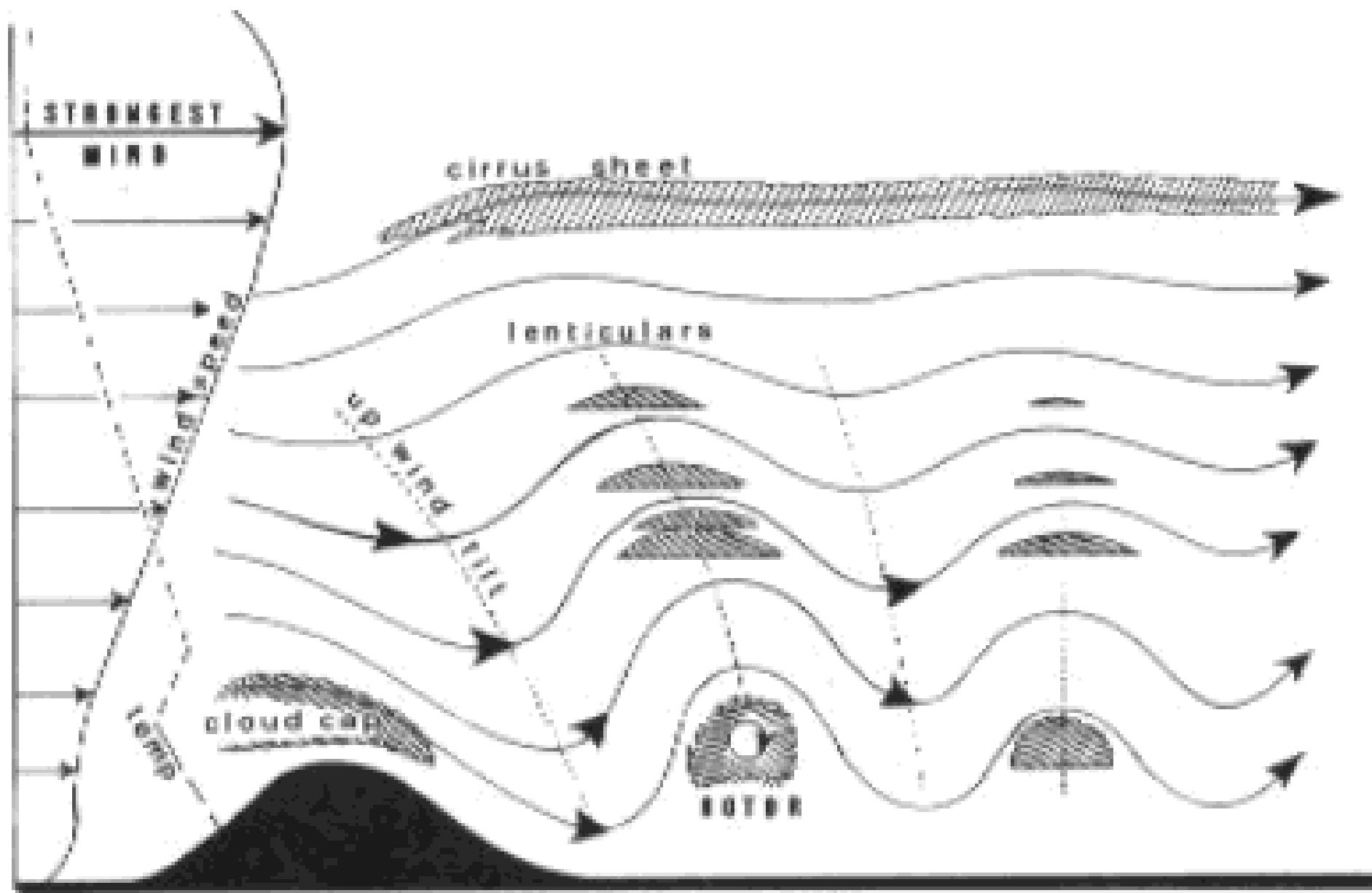


FIG. 3. Airflow over a mountain ridge under conditions favourable for the occurrence of lee waves.



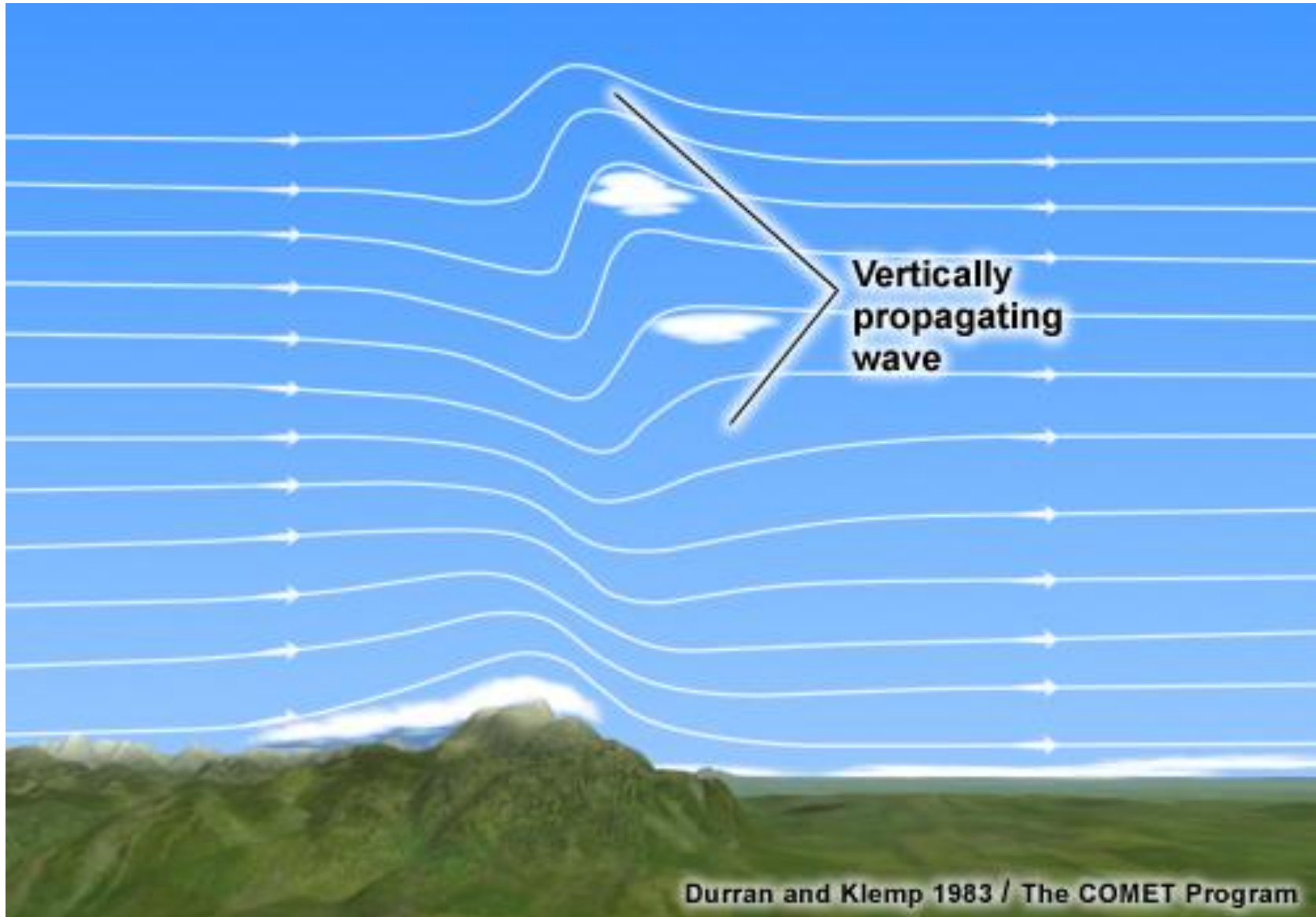
# pravidlo 1.6

Platí pravidlo 1.6 které říká jak by se měla měnit rychlost větru s výškou. Zní:

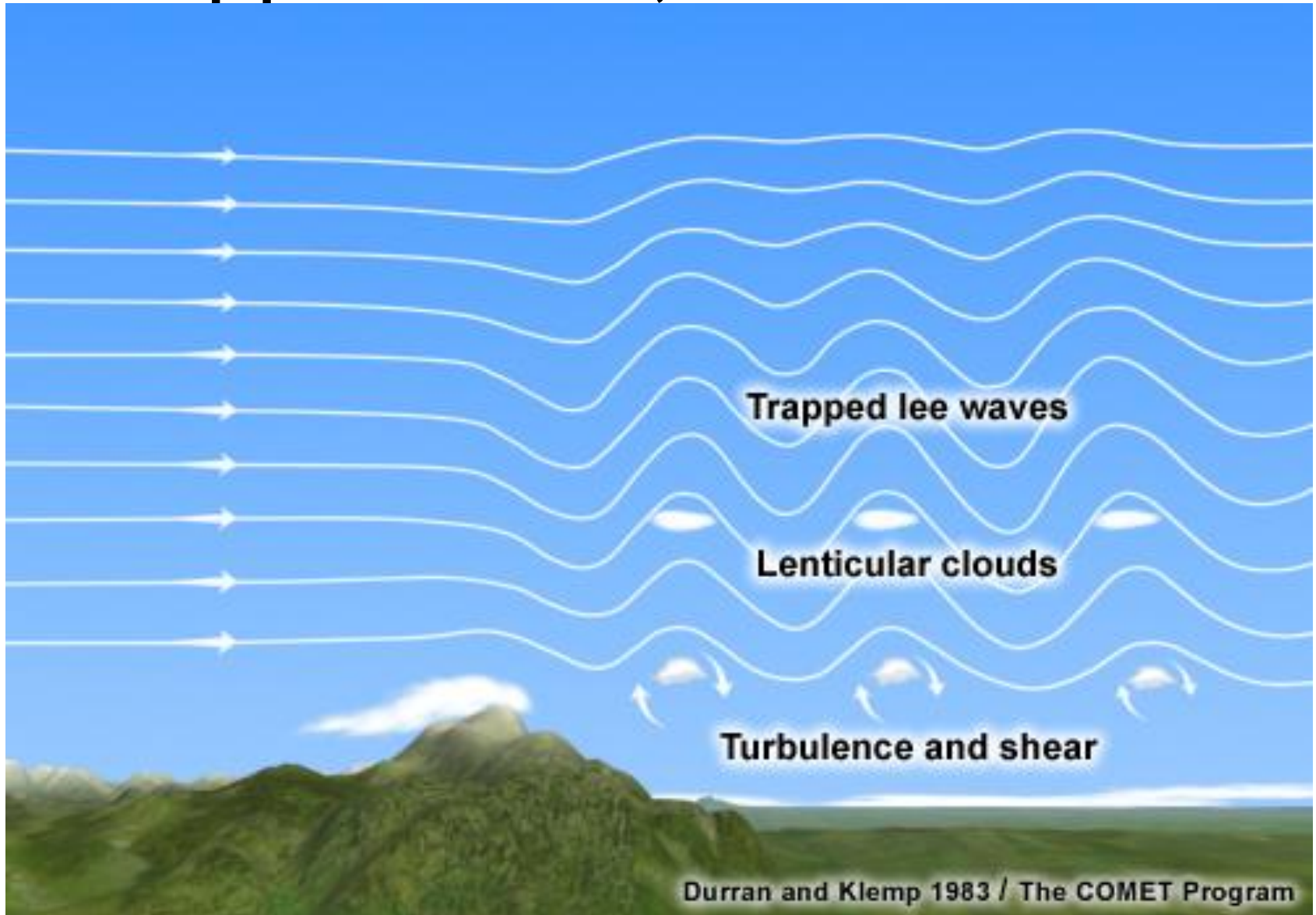
**Vítr ve výšce 2000 m nad hřebenem by měl mít 1.6 krát větší rychlost než vítr v úrovni hřebene (ne na kopci...)**



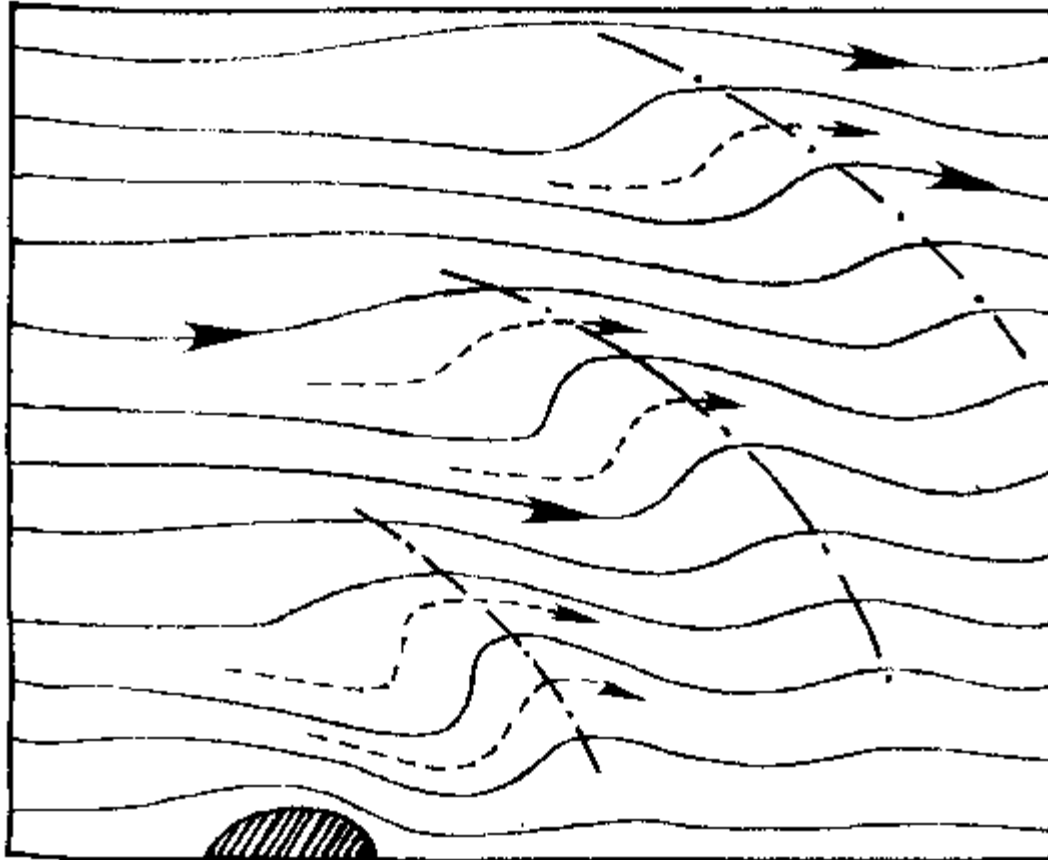
# vertikálně se šířící vlna



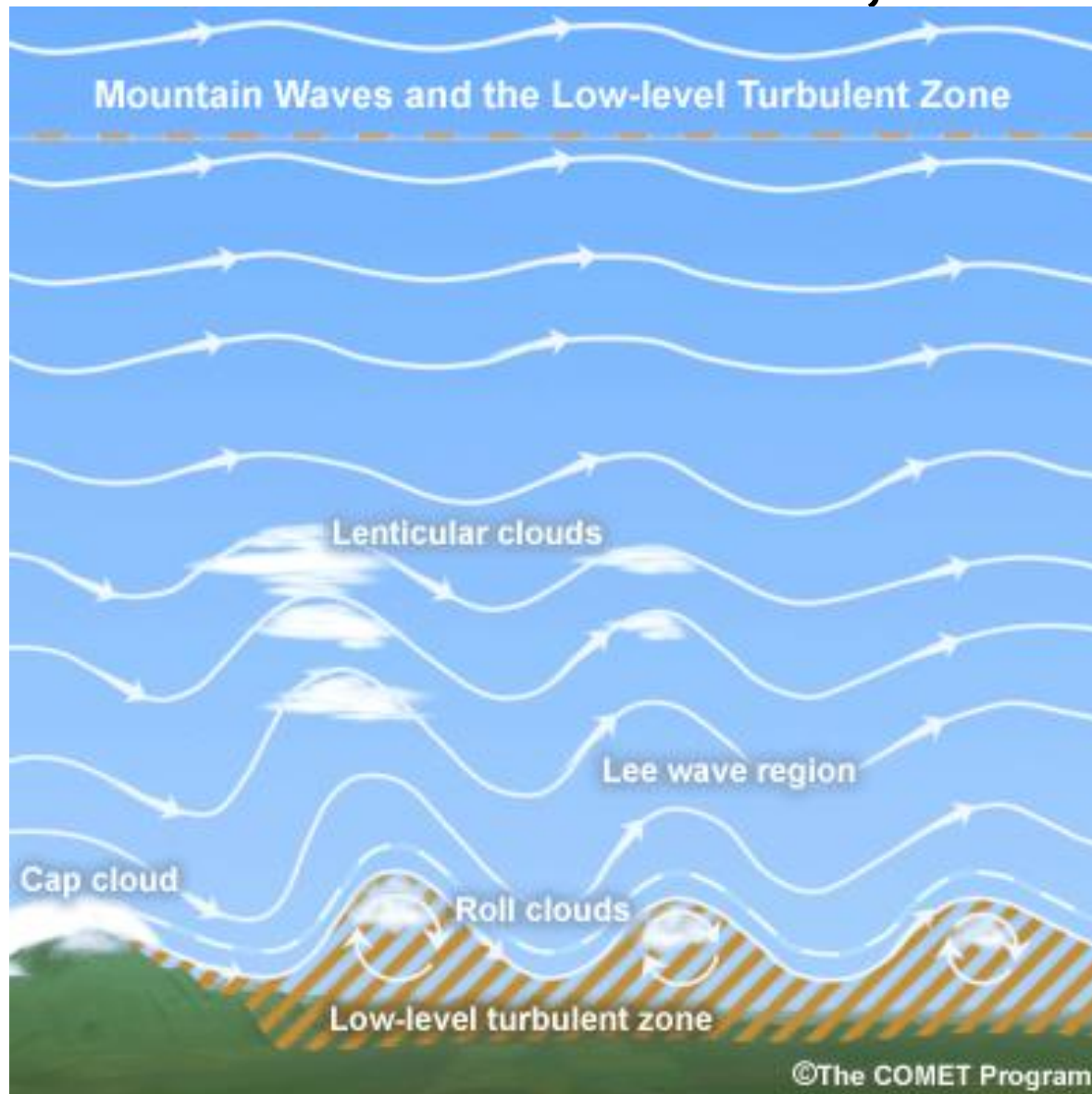
# Trapped wave, rezonanzwelle



něco mezi...

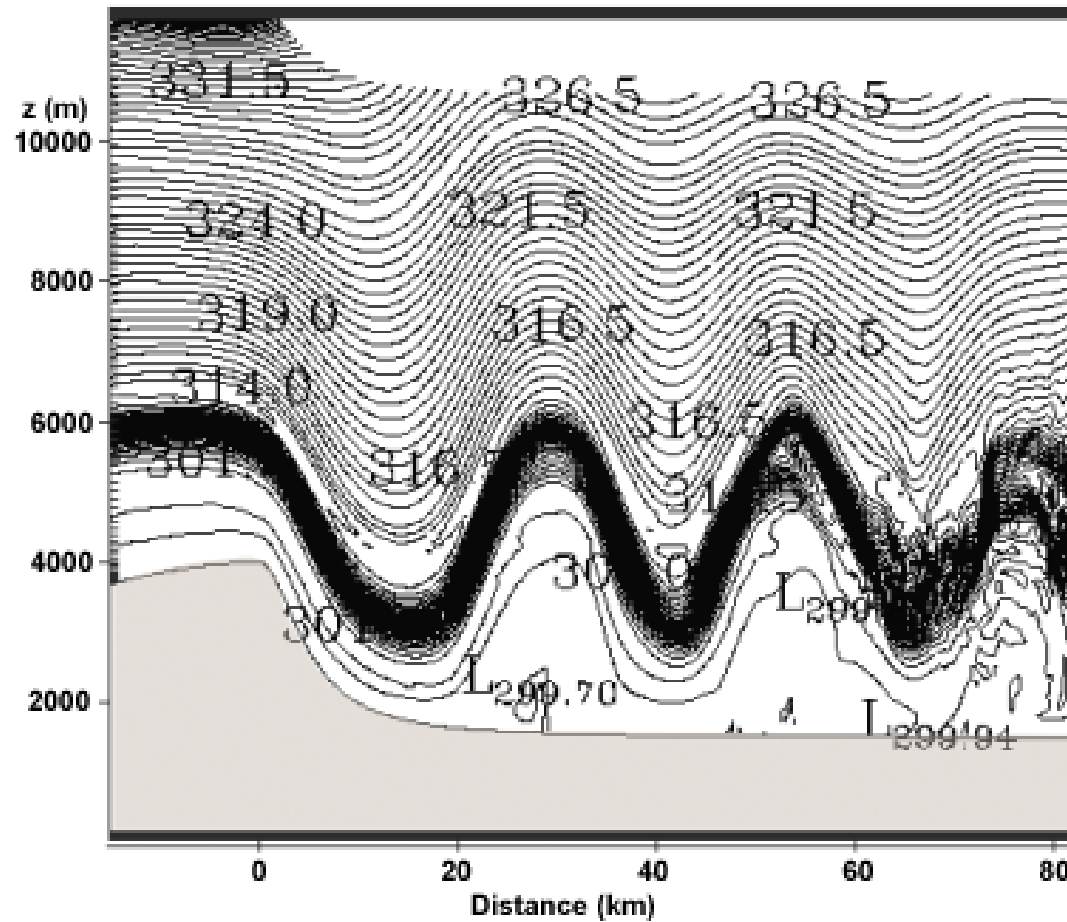


# Přízemní turbulence, rotory



# rotor 1

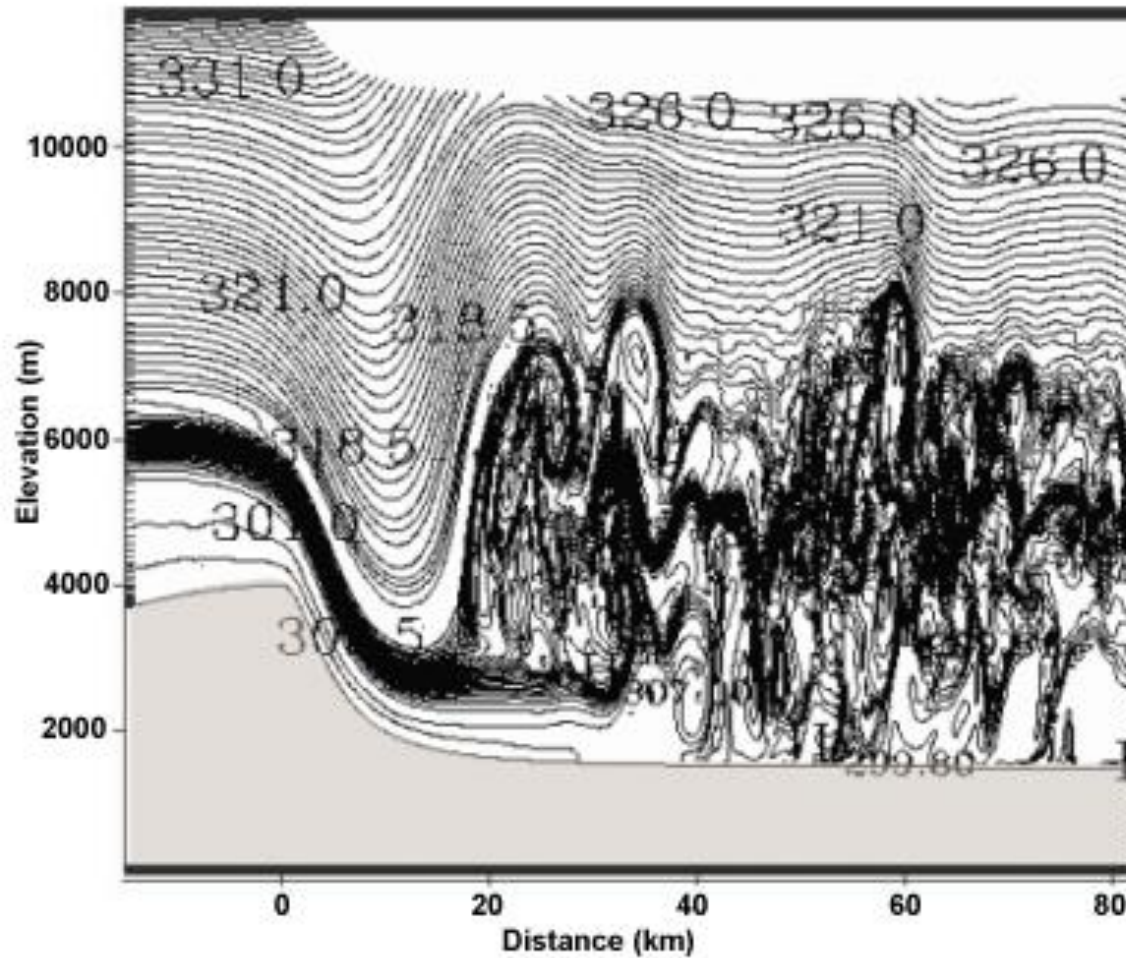
Type 1 Rotor, Potential Temperature (K)





# rotor 2

Type 2 Rotor, Potential Temperature (K)



# tohle nejsou Tatry...

## Forest Blowdown in the Colorado Rocky Mountains

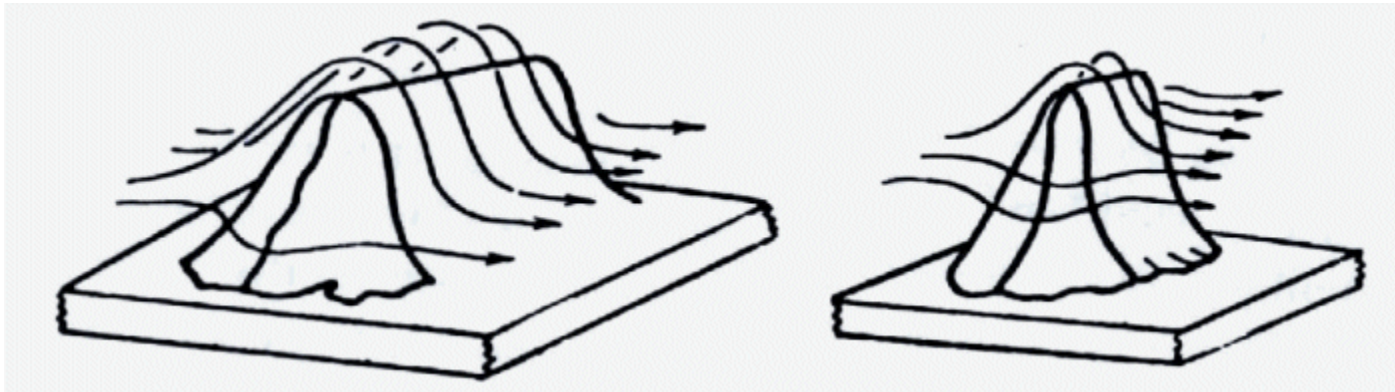


# **Terény v ČR, charakteristika proudění z jednotlivých směrů**



# obecně

- Vhodná překážka má nekomplikované závětrí, rozumné převýšení a vhodný profil. Není příliš široká ve směru proudění a je „dost široká“ ve směru kolmém na proudění. Říp není úplně ideální...



# vlnky a pavlnky

- Melechov, Blaník, Ještěd, Brdy, Železné hory...

# vlny a „megavlny“

- Jeseníky, Šumava, Krušné hory, Krkonoše, Beskydy...
- Jeseníky - Soví hory - Krkonoše  
(česko-polská atlantýda)

# Charakteristika proudění

- Orientace překážky je leckdy důležitější než její geografické vlastnosti.
- Vzhledem orientaci vhodných terénů jsou důležité směry větru J-JZ, SZ, S-SV

# S - SV

- Česká strana Krkonoš
- Vrstva proudícího vzduchu není dostatečně silná, zvrstvení často není u země dostatečně stabilní a ve výšce bývá část inverze a stříh větru.

# SZ

- Krušné hory
- Poměrně častý směr větru, kdysi se učilo ve škole že je převládající 😊
- Většinou velká vlhkost a malá stabilita – vzduch je mořského původu. Většinou bývá hodně oblačnosti a přeháněk.

# JZ

- Jeseníky, Krkonoše, Šumava
- Asi nejprůhodnější směr větru v našich podmínkách
- V chladnější polovině roku bývá stabilní, většinou je dostatečně silná vrstva – bývá přes celou troposféru. Nevýhodou je, že v zimě je tropopauza níže (9 km) než v létě (11, 12 km). Často se z výškou mění směr větru k západu až severozápadu.

# JV

- Beskydy
- Stabilní zvrstvení i v létě, většinou malá vlhkost.



# Zdroje a odkazy

- <http://www.go.ednet.ns.ca/~larry/bsc/articles/wave/wavesoar.html>
- <http://meted.ucar.edu/mesoprim/mtnwave/index.htm>