

Metody dálkové detekce

RNDr. Milan Šálek

Český hydrometeorologický ústav

salek@chmi.cz

Osnova předmětu

- # Úvod
- # Základy fyziky oblaků a srážek
- # Základy fyziky elektromagnetického záření, šíření elmg. vln v atmosféře.
- # Meteorologické družice
- # Radary a jejich použití v meteorologii (detekce a odhad srážek, měření větru)
- # Detekce a identifikace významných povětrnostních jevů
- # Profilová měření z družic
- # Integrace měřících metod

Předběžný program a místa konání přednášek

- # 2. 3.: Záření v atmosféře
- # 9.3. 12.30: Družicová meteorologie I.
Systémy, technika, organizace, přenosy, zpracování
- # Opět 9.3. Družicová meteorologie II.
Základy multispektrální a synoptické interpretace snímků (ČHMÚ) – RNDr. Martin Setvák, CSc.

Předběžný program a místa konání přednášek

- # 23. 3.: Základy radarové meteorologie (Brandlova)
- # 30. 3.: Základy radarové meteorologie, odhady srážek (ČHMÚ)
- # Adresa ČHMÚ, pobočky Brno: Kroftova 43
- # Spojení: Trolejbus 36, případně tram 3, 11, zastávka Sochorova, potom ulicemi Maničky a Navrátilova

Výukové materiály a používané programy pro cvičení

Literatura:

- *Řezáčová a kol., 2007: Fyzika oblaků a srážek, 573 s.*
- *Bednář, J., 1989. Pozoruhodné jevy v atmosféře. Optika, akustika a elektřina atmosféry. Akademia, Praha, 236 s.*
- *Salek, M., et al., 2004. Radar techniques for identifying precipitation type and estimating quantity of precipitation. Document of COST-717, http://www.smhi.se/cost717/doc/WDF_01_200407_1.pdf*

Výukové materiály a používané programy pro cvičení (pokr.)

- *Meischner, P. (Ed.) et al., 2003. Weather Radar: Principles and Advanced Applications. Springer monograph series "Physics of Earth and Space Environment", 337 p.*
- *Další materiály (prezentace)*

■ Cvičení:

- **gnuplot**, popř. EXCEL nebo jiný tabulkový kalkulátor, může být R, MATLAB, Octave apod.

Metody dálkové detekce

- # podle *Meteorologického slovníku* jsou podmnožinou sondáže ovzduší (do které patří i aerologická měření)
- # <Definice> Pozorování a měření objektů na zem. povrchu a v atmosféře bez přímého fyzického kontaktu měřících zařízení s nimi.</Definice>
- # Dálkový průzkum Země, angl. termín: *remote sensing*
- # Rozdělení:
 - pasívní (zařízení pouze zpracovává přijatý signál)
 - aktivní (zařízení signál též vysílá)

Metody dálkové detekce

Hlavní využití v meteorologii:

- součást monitoringu ovzduší, významná především v oblastech s nedostatkem staničních měřicích systémů
- základní výzkum (fyzika oblaků a srážek)

Nejdůležitější výhody metod dálkové detekce:

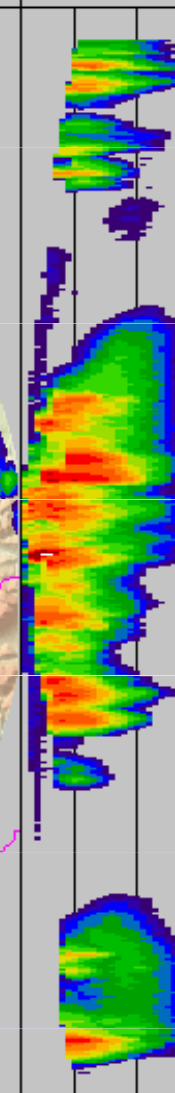
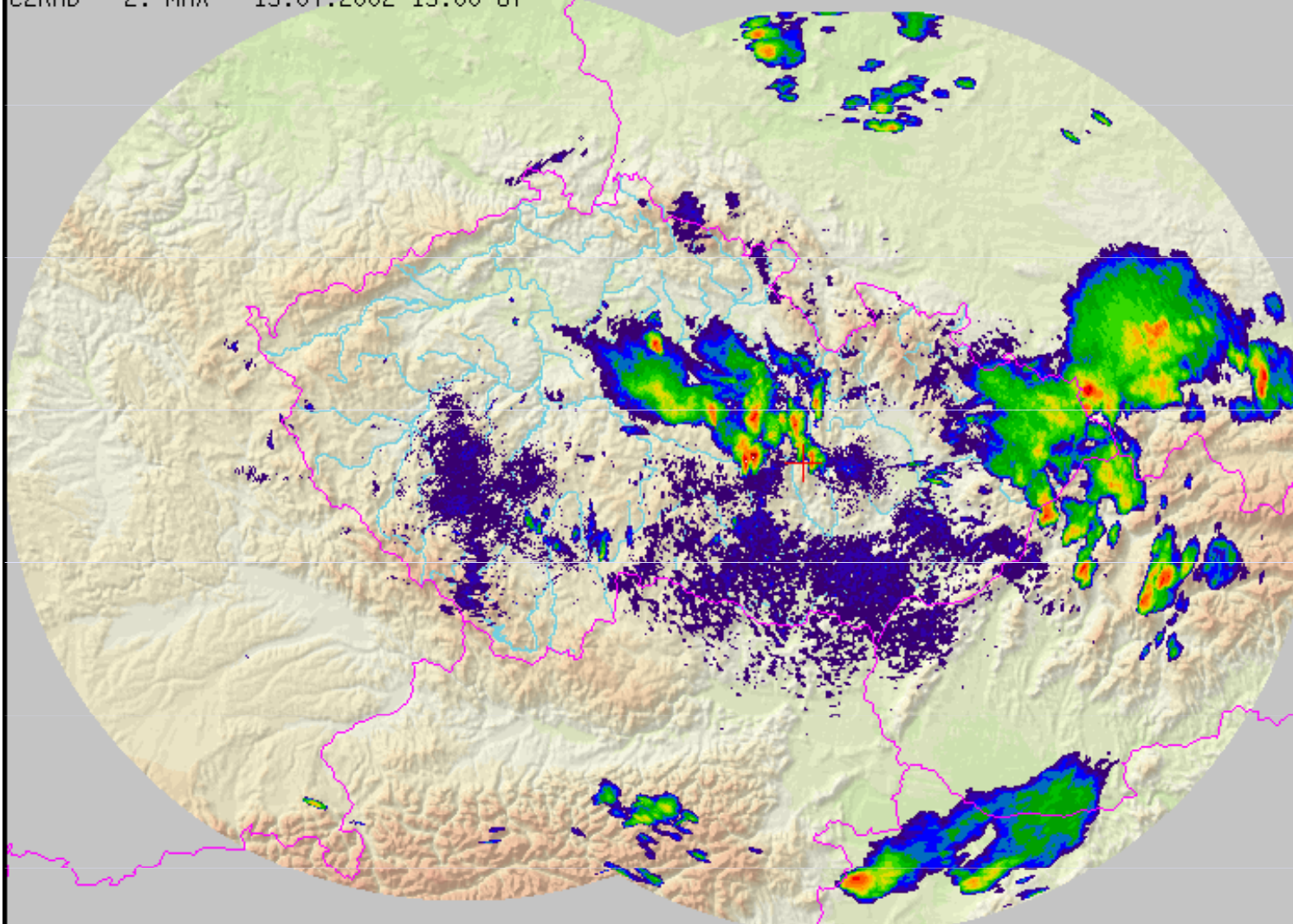
- aktuálnost měření (dostupnost dat v řádu minut)
- prostorová i časová rozlišovací schopnost měření

Vývoj konvektivních bouří z meteorologické družice

CHMI Radar
Department



CZRAD - Z: MAX - 15.07.2002 15:00 UT



Every

- 15.07.2002 13:50 ▲
- 15.07.2002 13:40
- 15.07.2002 13:30
- 15.07.2002 13:20
- 15.07.2002 13:10
- 15.07.2002 13:00
- 15.07.2002 12:50
- 15.07.2002 12:40
- 15.07.2002 12:30
- 15.07.2002 12:20
- 15.07.2002 12:10
- 15.07.2002 12:00 ▼

LOAD (156 / 156)

dBZ	°C
60.0	-90.0
56.0	-80.0
52.0	-70.0
48.0	-60.0
44.0	-50.0
40.0	-40.0
36.0	-30.0
32.0	-20.0
28.0	-10.0
24.0	0.0

< < || >> > ANIM: 1 s/img LAST: +2 s AUTO UPDATE Do not update

ORO col UND riv PDUS RAD LIGHTNING NWP none OVR none

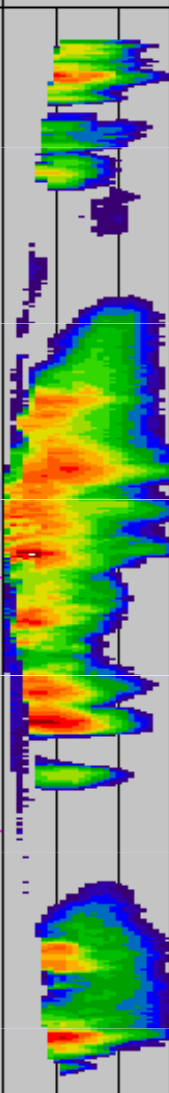
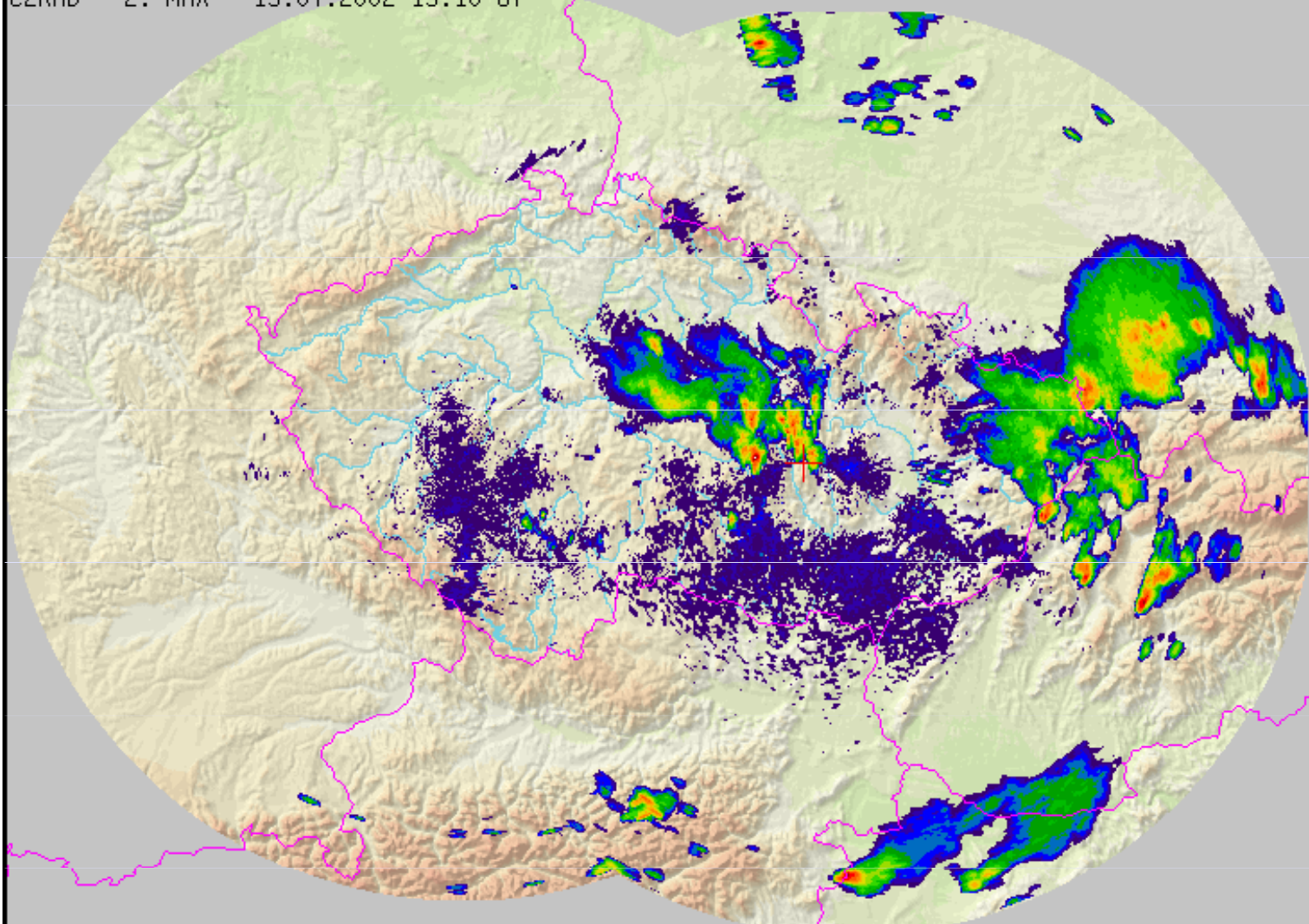
NAVIG. red LON. 16.432 LAT. 49.549 Choose predefined position

- CG neg
+ CG pos
| CC

CHMI Radar
Department



CZRAD - Z: MAX - 15.07.2002 15:10 UT



Every

- 15.07.2002 16:00 ▲
- 15.07.2002 15:50
- 15.07.2002 15:40
- 15.07.2002 15:30
- 15.07.2002 15:20
- 15.07.2002 15:10
- 15.07.2002 15:00
- 15.07.2002 14:50
- 15.07.2002 14:40
- 15.07.2002 14:30
- 15.07.2002 14:20
- 15.07.2002 14:10 ▼

LOAD (99 / 99)

dBZ	°C
60.0	-90.0
56.0	-80.0
52.0	-70.0
48.0	-60.0
44.0	-50.0
40.0	-40.0
36.0	-30.0
32.0	-20.0
28.0	-10.0
24.0	0.0

ANIM: 1 s/img LAST: +2 s AUTO UPDATE Do not update

ORO col UND riv PDUS RAD LIGHTNING NWP none OVR none

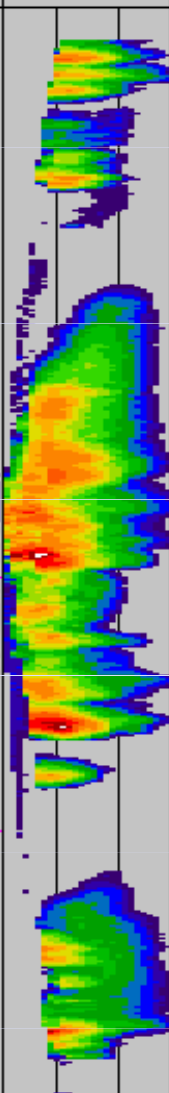
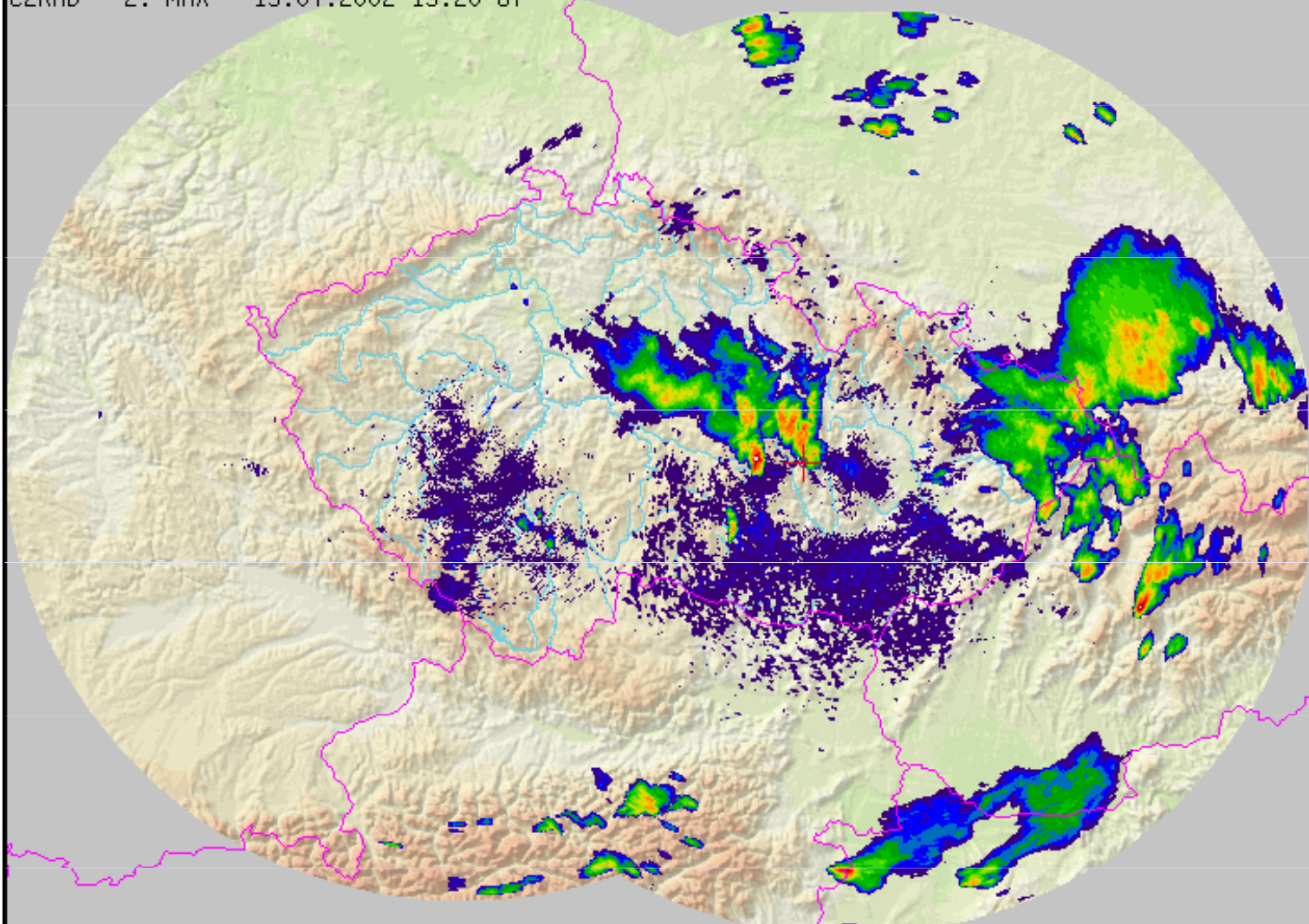
NAVIG. red LON. 16.432 LAT. 49.549 Choose predefined position

CG neg
+ CG pos
| CC
Last update: 4.0.2001

CHMI Radar
Department



CZRAD - Z: MAX - 15.07.2002 15:20 UT



Every

- 15.07.2002 13:50 ▲
- 15.07.2002 13:40
- 15.07.2002 13:30
- 15.07.2002 13:20
- 15.07.2002 13:10
- 15.07.2002 13:00
- 15.07.2002 12:50
- 15.07.2002 12:40
- 15.07.2002 12:30
- 15.07.2002 12:20
- 15.07.2002 12:10
- 15.07.2002 12:00 ▼

LOAD (156 / 156)

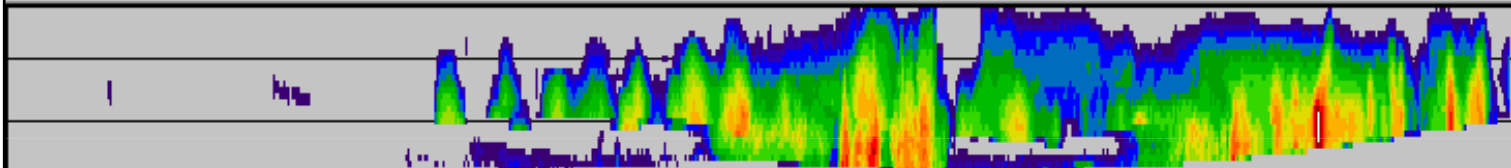
dBZ	°C
60.0	-90.0
56.0	-80.0
52.0	-70.0
48.0	-60.0
44.0	-50.0
40.0	-40.0
36.0	-30.0
32.0	-20.0
28.0	-10.0
24.0	0.0

< < || >> > ANIM: 1 s/img LAST: +2 s AUTO UPDATE Do not update

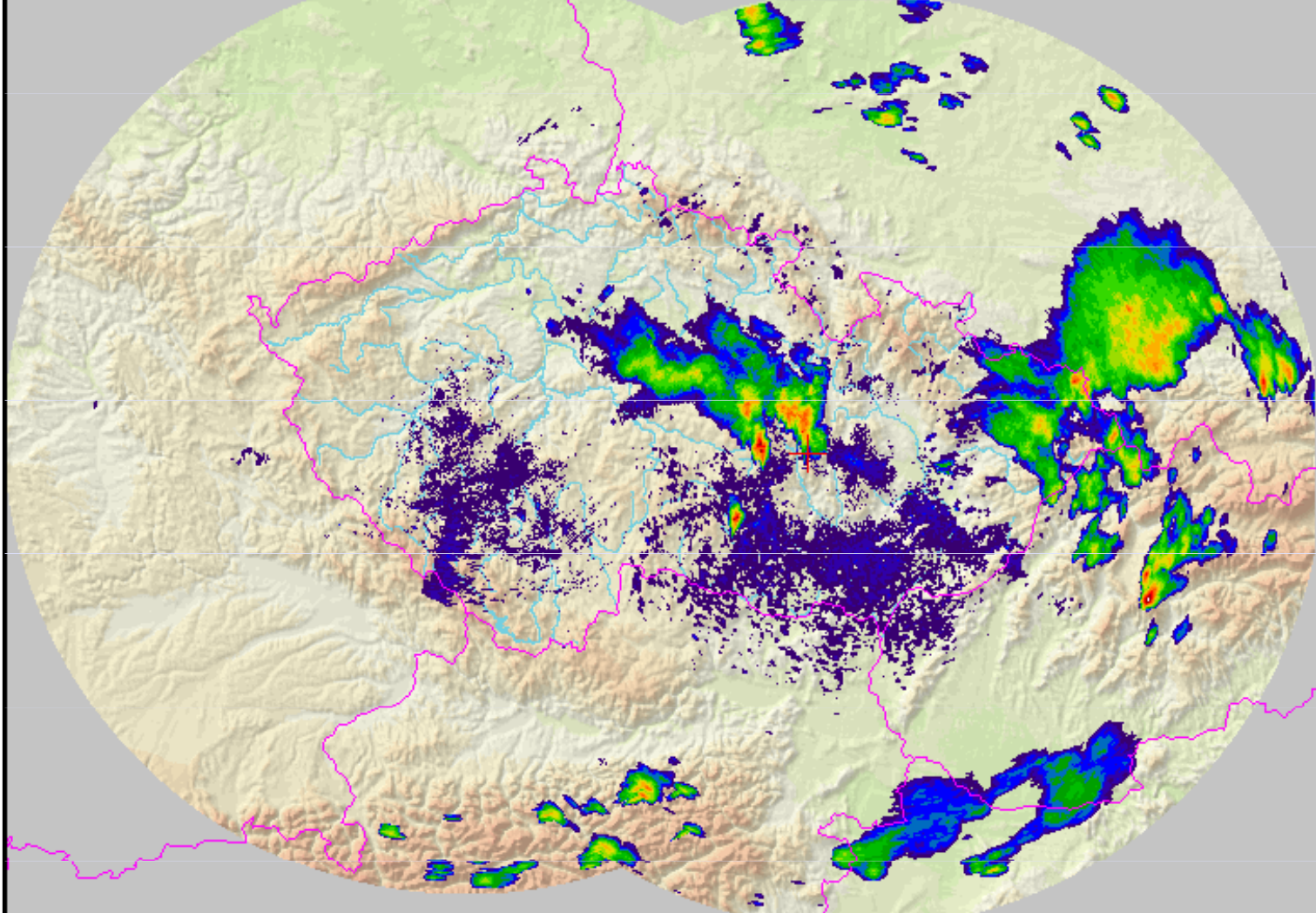
ORO col UND riv PDUS RAD LIGHTNING NWP none OVR none

NAVIG. red LON. 16.432 LAT. 49.549 Choose predefined position

- CG neg
+ CG pos
| CC



CZRAD - Z: MAX - 15.07.2002 15:30 UT



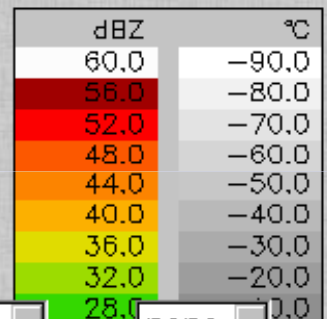
CHMI Radar Department



Every

- 15.07.2002 13:50 ▲
- 15.07.2002 13:40
- 15.07.2002 13:30
- 15.07.2002 13:20
- 15.07.2002 13:10
- 15.07.2002 13:00
- 15.07.2002 12:50
- 15.07.2002 12:40
- 15.07.2002 12:30
- 15.07.2002 12:20
- 15.07.2002 12:10
- 15.07.2002 12:00 ▼

LOAD (156 / 156)

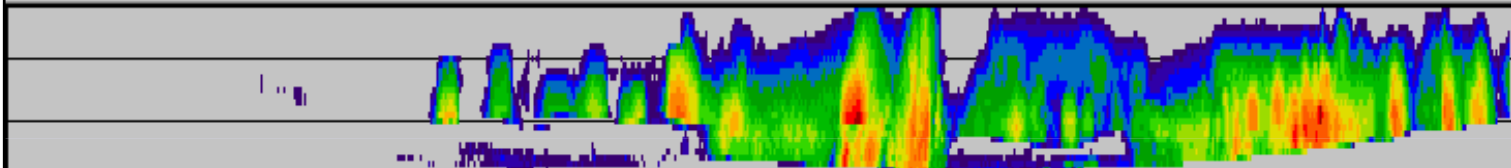


Navigation controls: < << || >> > ANIM: 1 s/img LAST: +2 s AUTO UPDATE Do not update

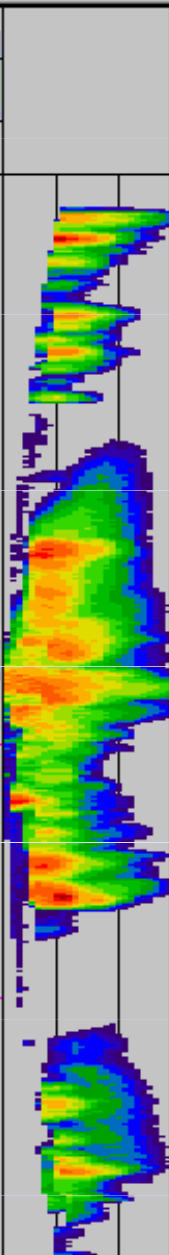
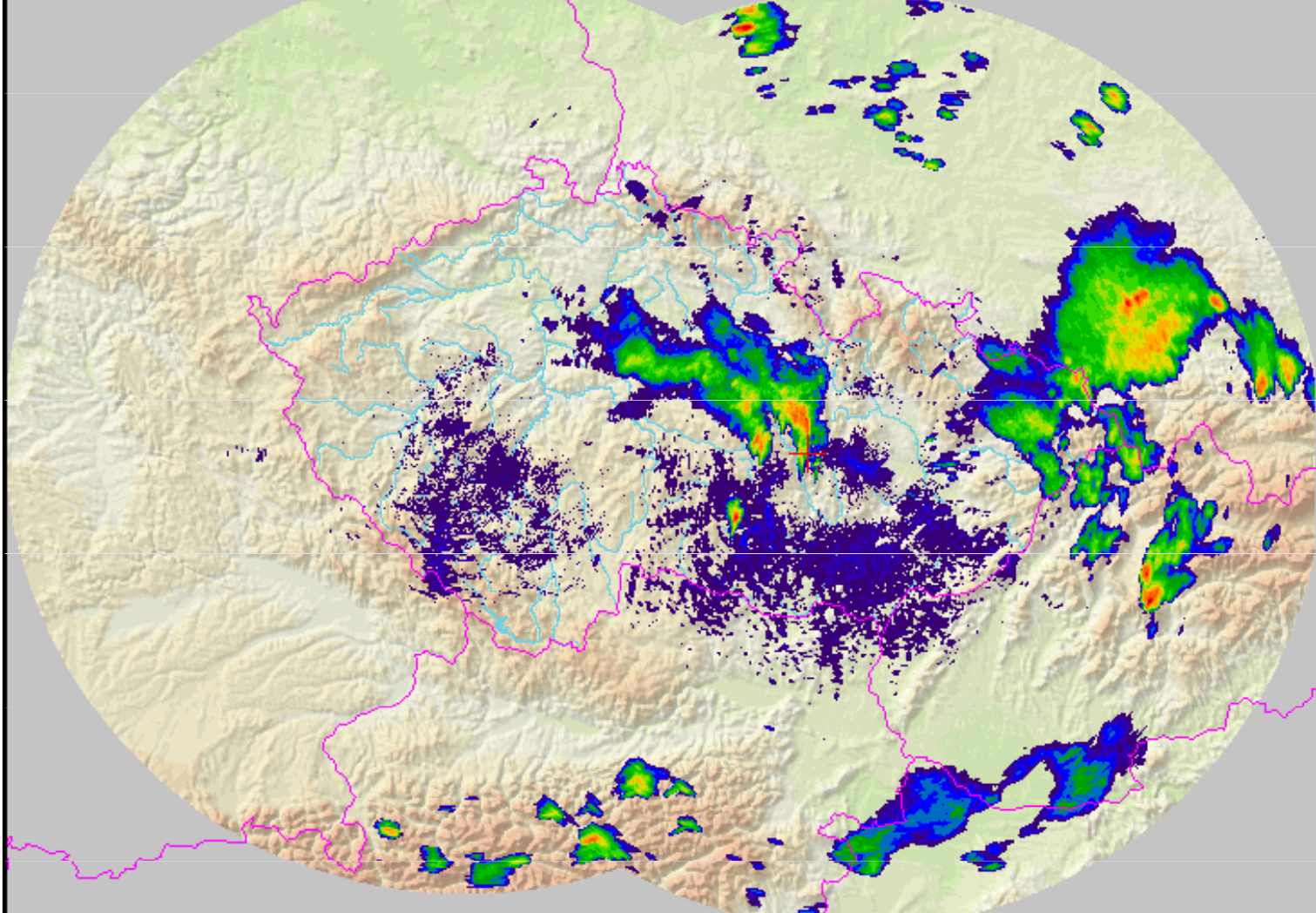
ORO col UND riv PDUS RAD LIGHTNING NWP none OVR none

NAVIG. red LON. 16.432 LAT. 49.549 Choose predefined position

CG neg
+ CG pos
CC



CZRAD - Z: MAX - 15.07.2002 15:40 UT



CHMI Radar Department



Every 6th 3rd

- 15.07.2002 13:50
- 15.07.2002 13:40
- 15.07.2002 13:30
- 15.07.2002 13:20
- 15.07.2002 13:10
- 15.07.2002 13:00
- 15.07.2002 12:50
- 15.07.2002 12:40
- 15.07.2002 12:30
- 15.07.2002 12:20
- 15.07.2002 12:10
- 15.07.2002 12:00

LOAD (156 / 156)

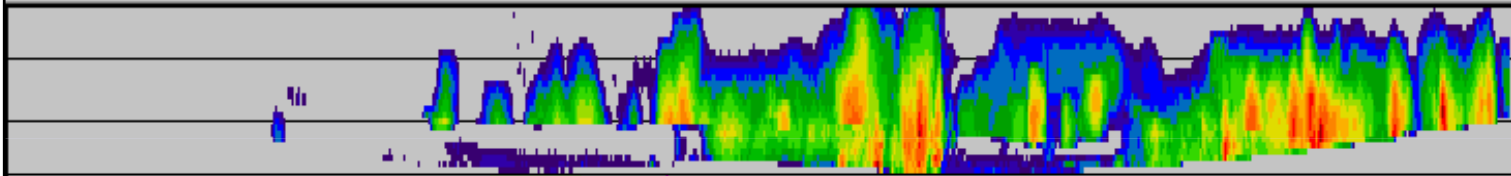
dBZ	°C
60.0	-90.0
56.0	-80.0
52.0	-70.0
48.0	-60.0
44.0	-50.0
40.0	-40.0
36.0	-30.0
32.0	-20.0
28.0	-10.0
24.0	0.0

Navigation controls: ANIM: 1 s/img, LAST: +2 s, AUTO UPDATE: Do not update

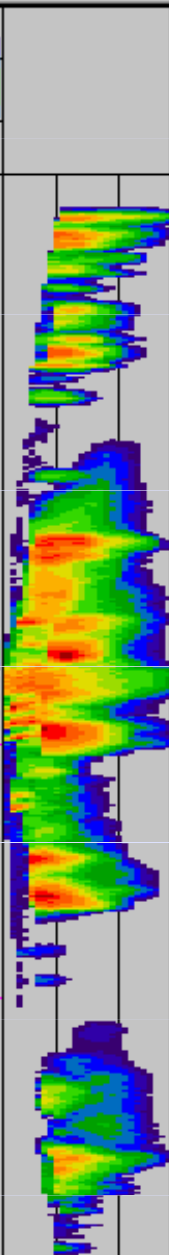
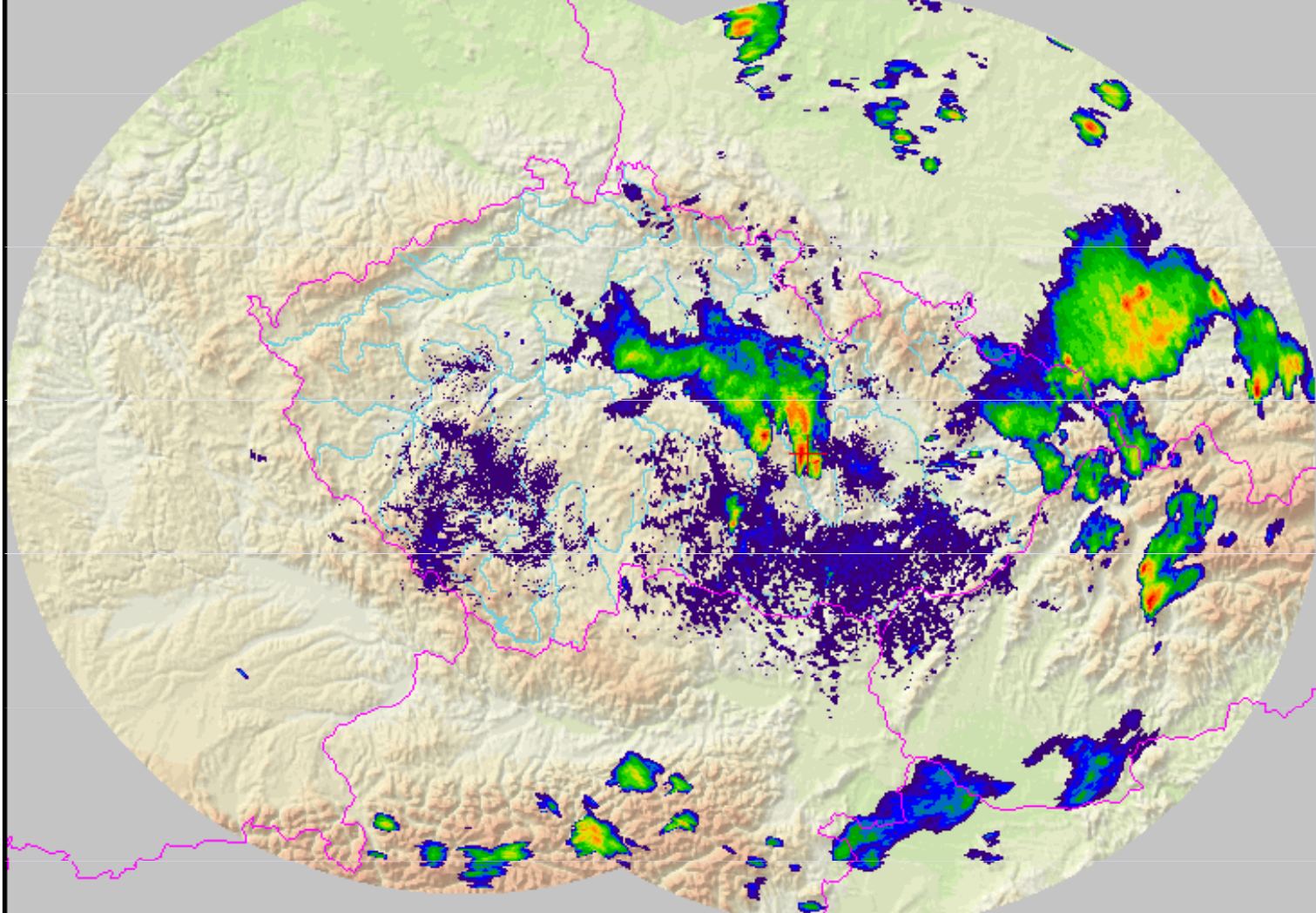
Display options: ORO col, UND riv, PDUS, RAD, LIGHTNING, NWP none, OVR none

NAVIG: red, LON: 16.432, LAT: 49.549, Choose predefined position

CG neg, + CG pos, CC



CZRAD - Z: MAX - 15.07.2002 15:50 UT



CHMI Radar Department



Every

- 15.07.2002 13:50 ▲
- 15.07.2002 13:40
- 15.07.2002 13:30
- 15.07.2002 13:20
- 15.07.2002 13:10
- 15.07.2002 13:00
- 15.07.2002 12:50
- 15.07.2002 12:40
- 15.07.2002 12:30
- 15.07.2002 12:20
- 15.07.2002 12:10
- 15.07.2002 12:00 ▼

LOAD (156 / 156)

dBZ	°C
60.0	-90.0
56.0	-80.0
52.0	-70.0
48.0	-60.0
44.0	-50.0
40.0	-40.0
36.0	-30.0
32.0	-20.0
28.0	-10.0
24.0	0.0

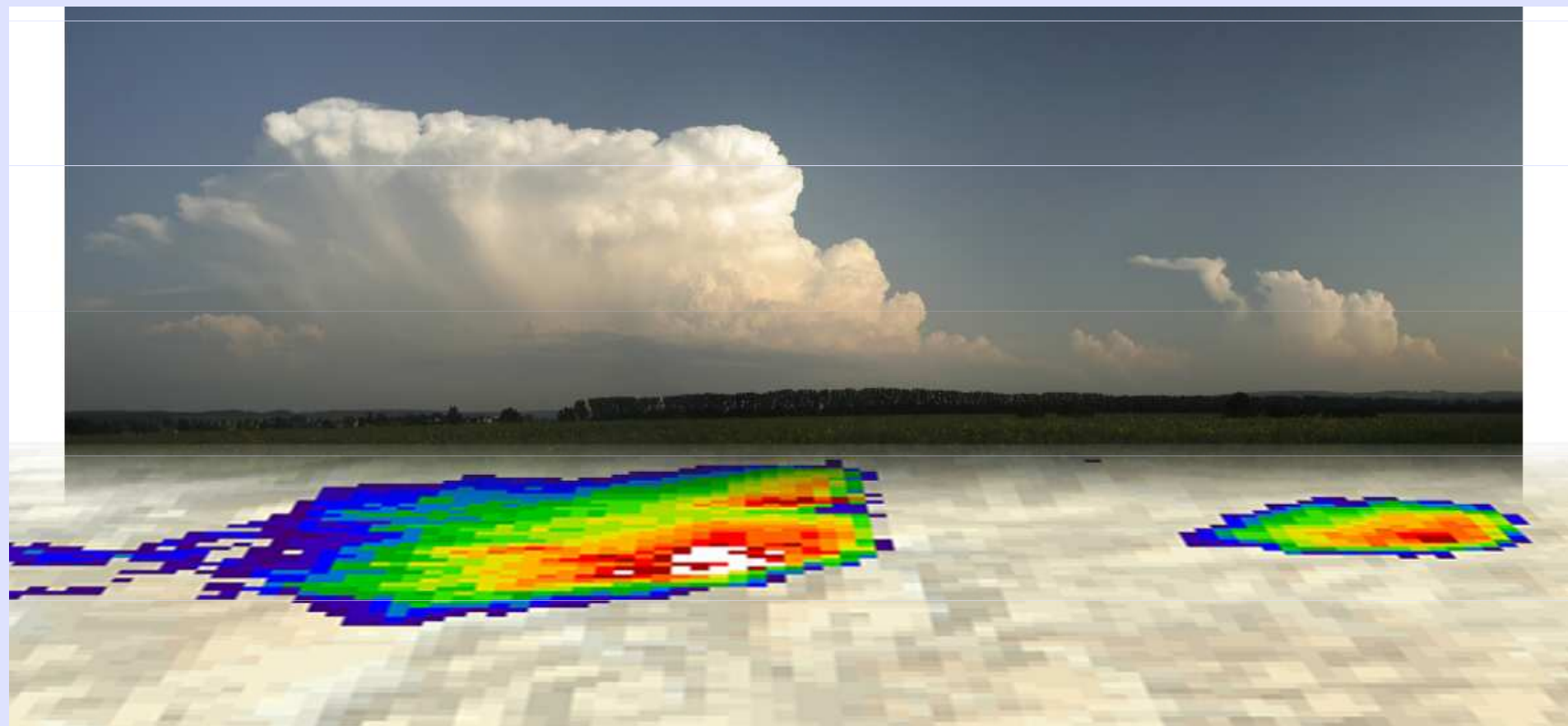
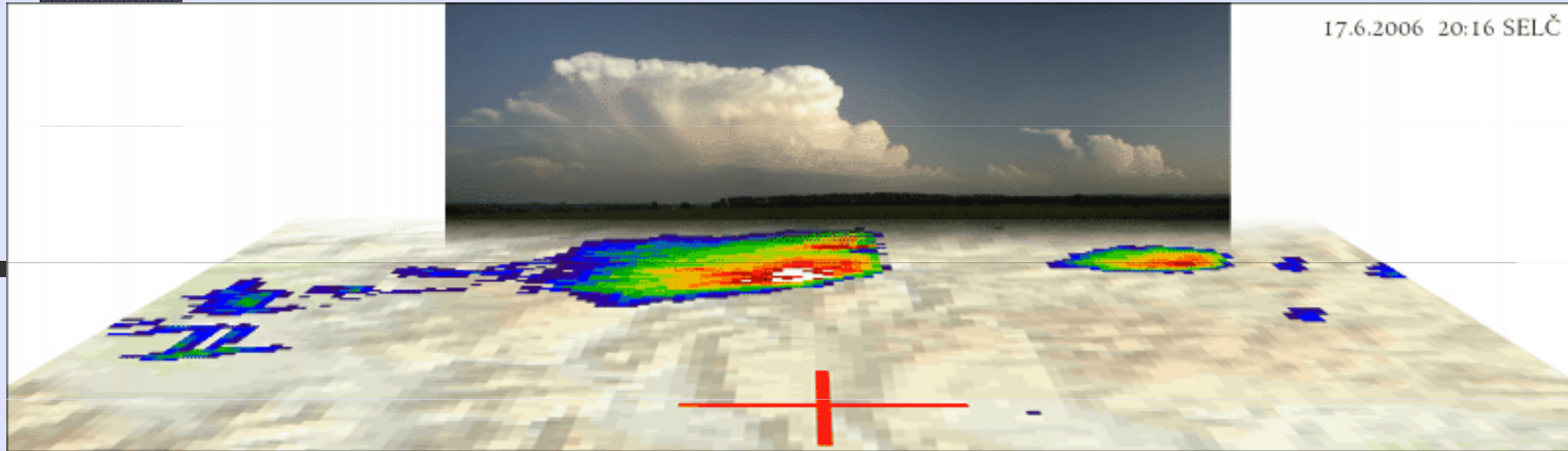
Navigation controls: < << || >> > > ANIM: 1 s/img LAST: +2 s AUTO UPDATE Do not update

ORO col UND riv PDUS RAD LIGHTNING NWP none OVR none

NAVIG. red LON. 16.432 LAT. 49.549 Choose predefined position

CG neg
+ CG pos
CC

17.6.2006 20:16 SELČ



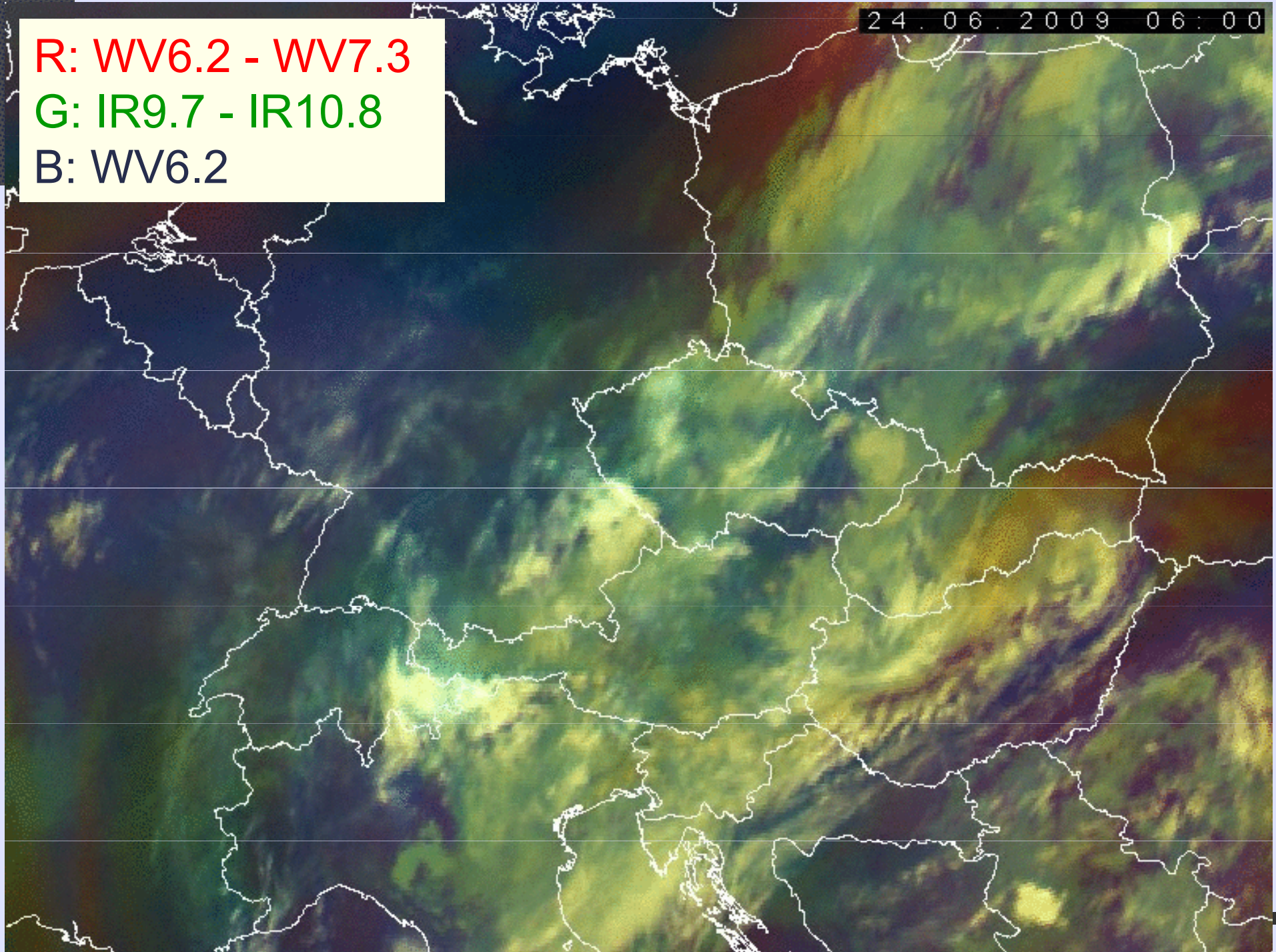
Meteosat 9, SEVIRI, Airmass

R: WV6.2 - WV7.3

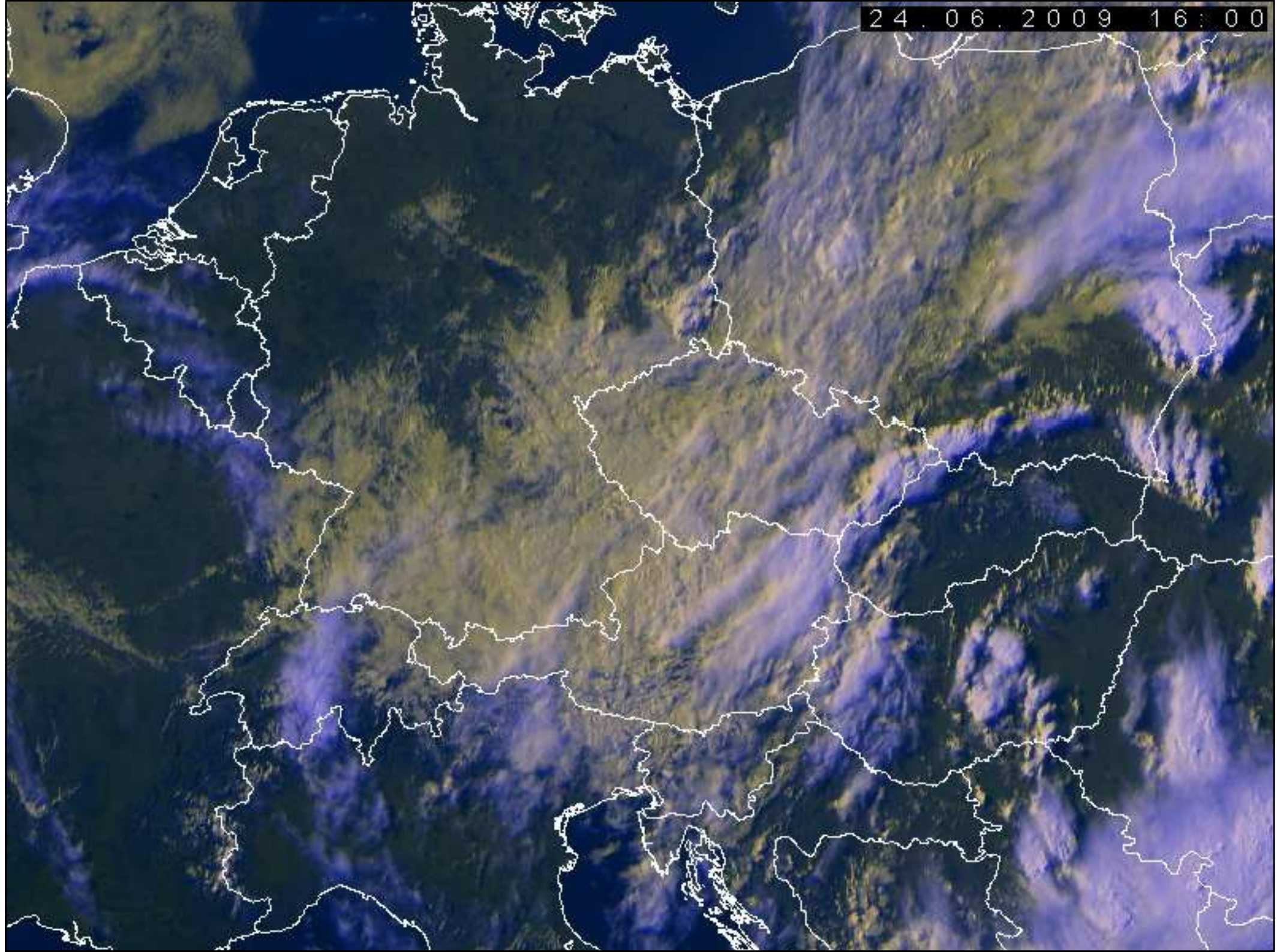
G: IR9.7 - IR10.8

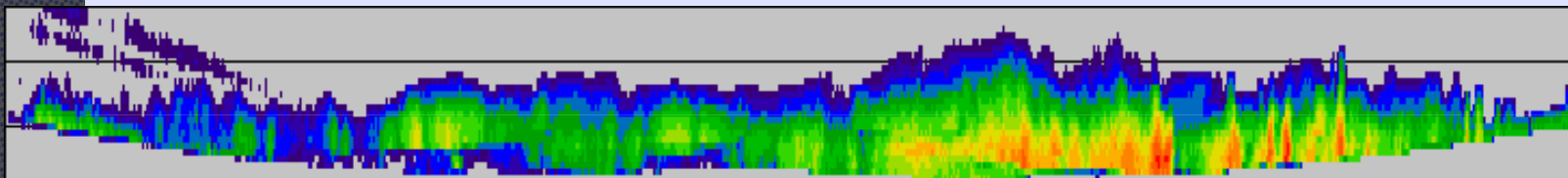
B: WV6.2

24.06.2009 06:00



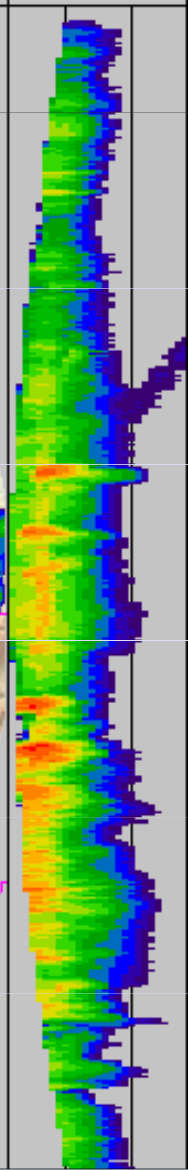
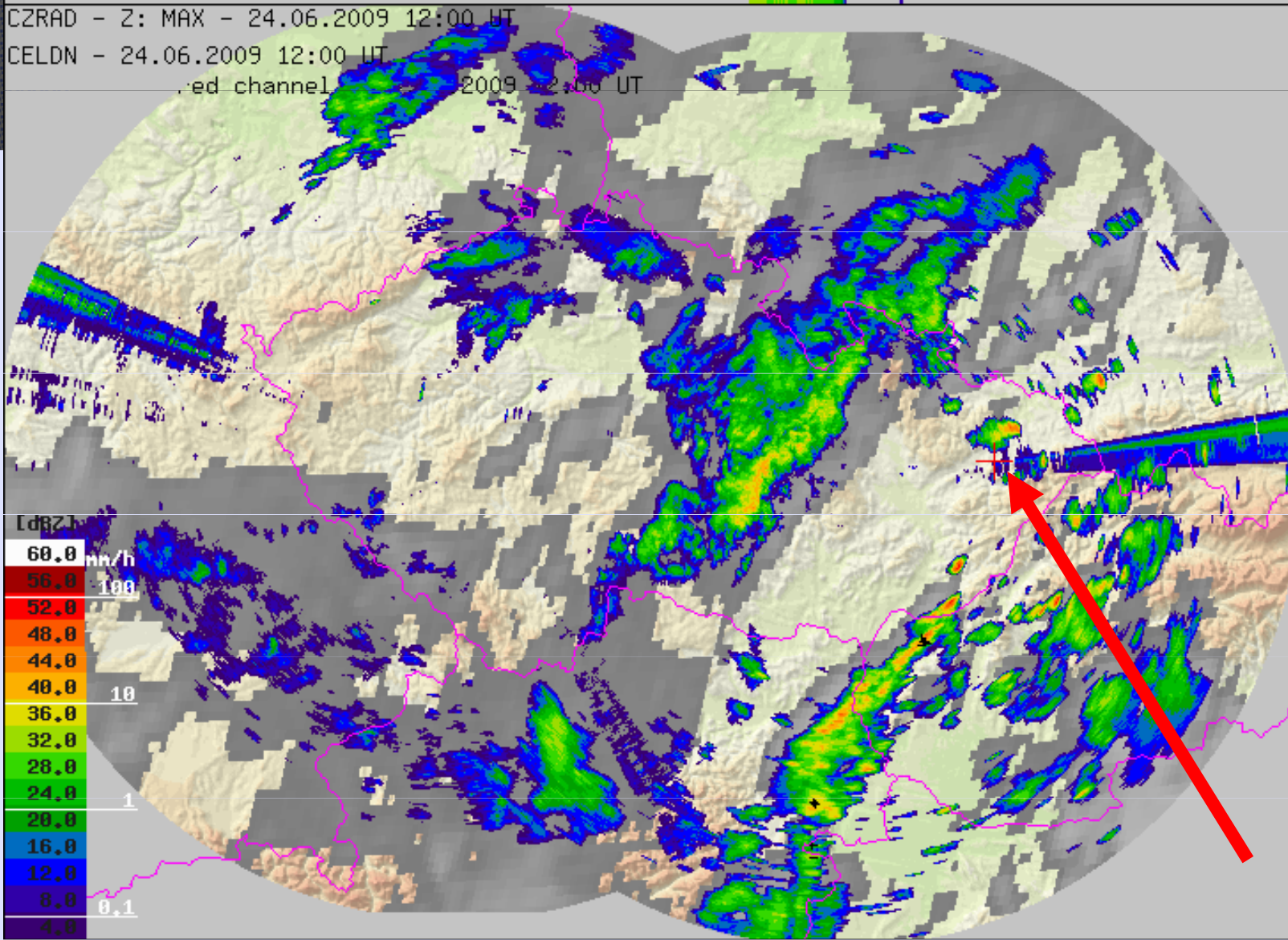
24.06.2009 16:00





CG+	3
CG-	5
CC	3
SUM	11

CZRAD - Z: MAX - 24.06.2009 12:00 UT
 CELDN - 24.06.2009 12:00 UT
 red channel - 24.06.2009 12:00 UT



[dBZ]

60.0	mm/h
56.0	100
52.0	
48.0	
44.0	
40.0	10
36.0	
32.0	
28.0	1
24.0	
20.0	
16.0	
12.0	
8.0	0.1
4.0	

Radar precipitation estimate without correction - 24h accumulation

CZRAD - radar_orig_24h - 25.06.2009 06:00 UT

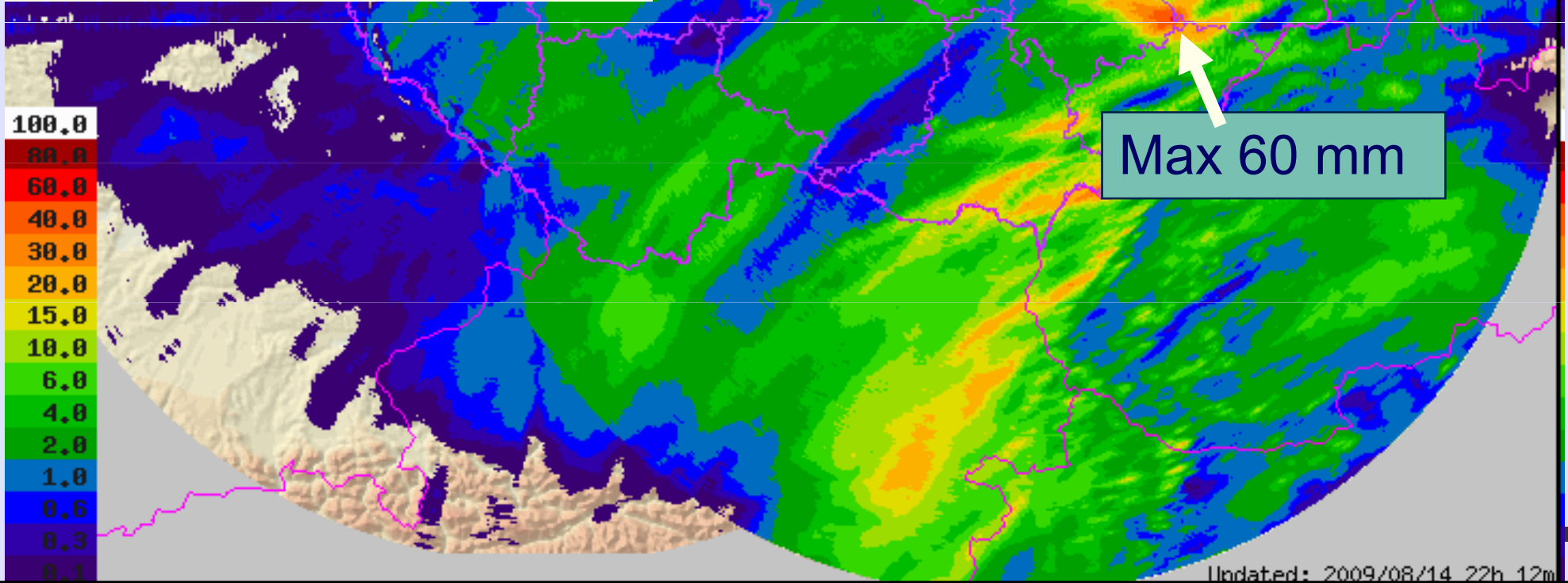
SK:100.0%
BR:100.0%

[mm]

Z-R relationship

$$Z=200R^{1.6}$$

5 minute data, C band



Max 60 mm

Updated: 2009/08/14 22h 12m

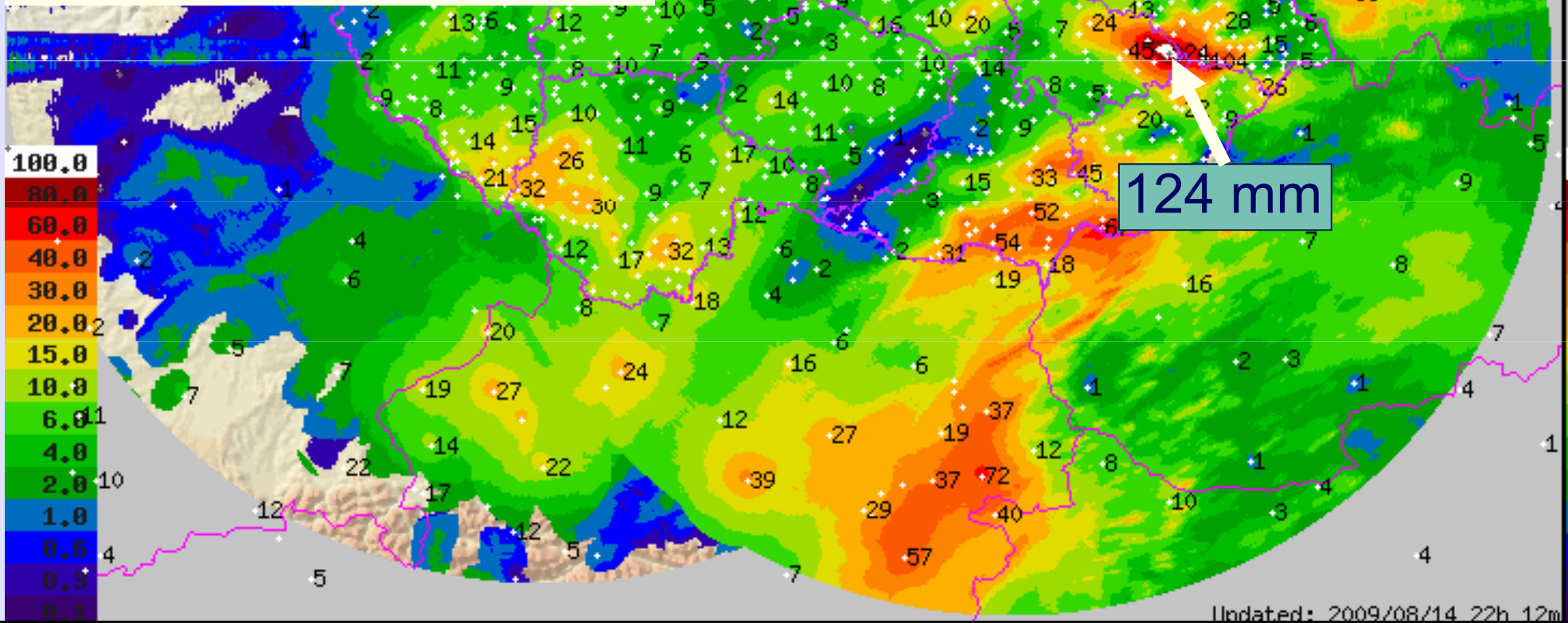
Radar precip estimate merged with raingauges - 24h totals

CZRAD - merge_24h - 25.06.2009 06:00 UT

[mm]

Merging algorithm

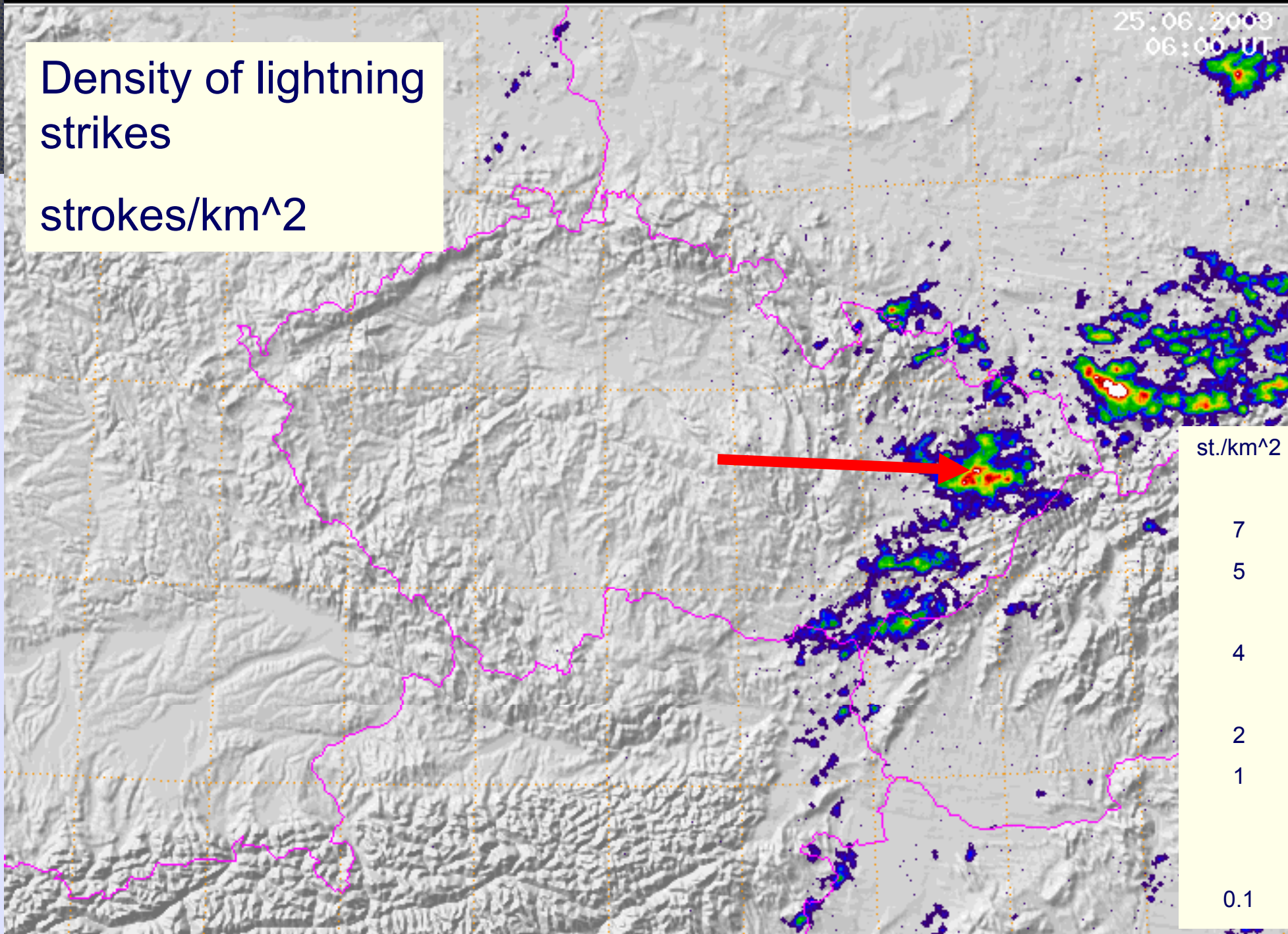
A modified version of
D-J Seo, 1998



R

Density of lightning
strikes
strokes/km²

25.06.2009
06:00 UT



st./km²

7

5

4

2

1

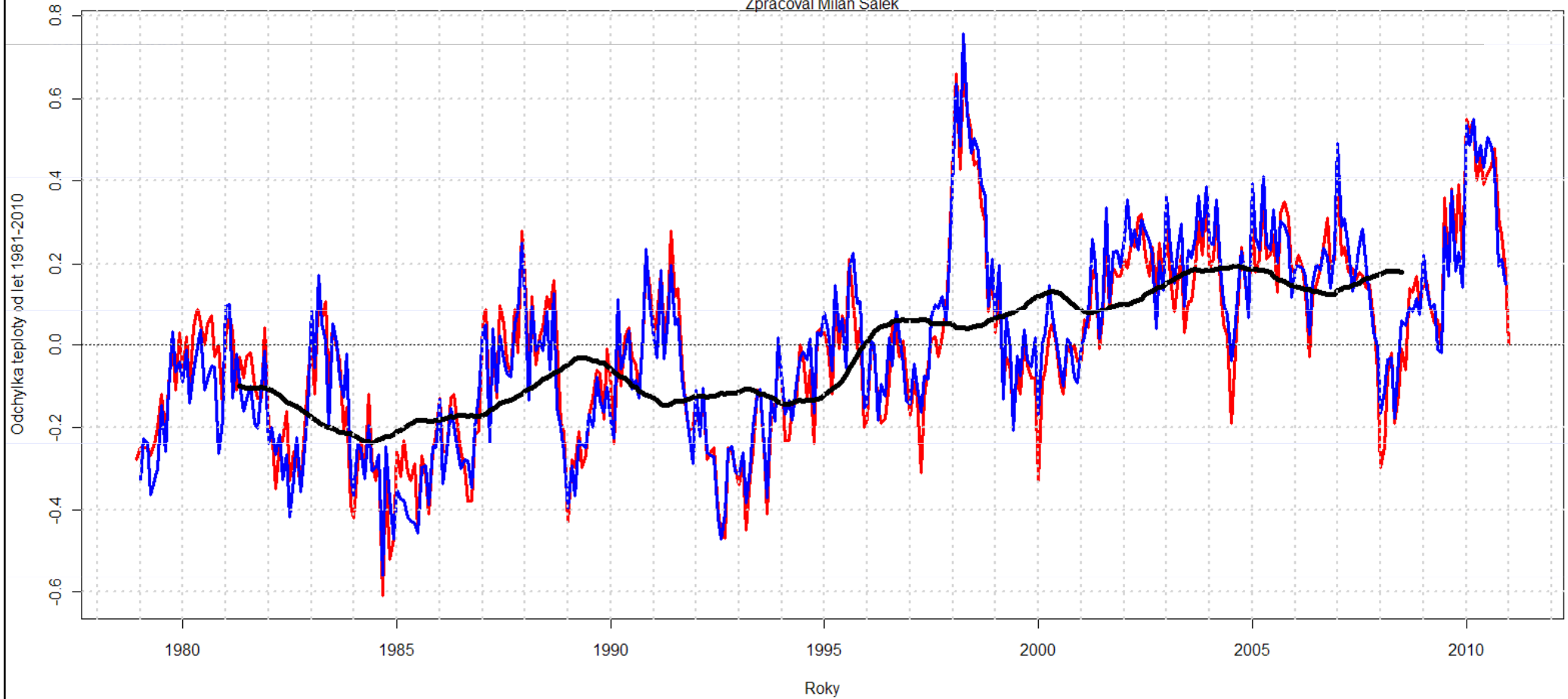
0.1

strol

Studium změn klimatu

Odchyly teploty spodní troposféry od průměru let 1981-2010 z družic NOAA/MSU, algoritmus UAH (červeně) a RSS (modře), od roku 1979 s 5letým klouzavým průměrem údajů UAH

Zpracoval Milan Šálek



Historická zmínka

- # poměrně mladý obor – počátek v polovině 20. století
- # první meteorologické družice – 60. léta, první met. radary – 50. léta, u nás 60.-70. léta
- # vývoj těchto metod svázán s celkovým rozvojem techniky, fyziky a matematiky
- # v posledních 20. letech je významný vliv informačních technologií => vyšší používání v praxi, dostupné aplikace pro veřejnost (<http://radar.bourky.cz>)

Kapitoly z fyziky atmosféry

Vlhkost vzduchu

- # Parametry:
- # (parciální) tlak (napětí) vodní páry e
- # napětí nasycení tlaku vodní páry E
- # relativní vlhkost: $r=e/E$
- # spec. vlhkost: $q=0.622e/(p-e)$
- # poměr směsi: $w=0.622e/(p-0.378.e)$
- # Tlak nasycené vodní páry nad vodou E_{wv} :
 - tlak vodní páry, která je ve stavu termodynamické rovnováhy s rovným povrchem čisté vody za dané teploty a tlaku vzduchu.

Vlhkost vzduchu (pokr.)

Tlak nasycené vodní páry nad ledem E_{iv} :

- tlak vodní páry, která je ve stavu termodynamické rovnováhy s rovným povrchem čistého ledu za dané teploty a tlaku vzduchu
- přibližné vztahy:

$$E_{wv} = E_{wv}^0 10^{\frac{8.5t}{273.16+t}}$$

$$E_{iv} = E_{iv}^0 10^{\frac{9.7t}{273.16+t}}$$

$$E_{wv}^0 = E_{iv}^0 = 6.11 [hPa]$$

Základy fyziky oblaků a srážek (viz Bednář, 1989)

Srážky:

- horizontální
- *vertikální*

Vznik vertikálních srážek:

- dosažení stavu nasycení, případně přesycení vzduchu vodní parou ochlazením vzduchu na (a pod) teplotu rosného bodu
 - (zřejmě okrajový) vliv mísení vzduchových hmot

Příčina ochlazení vzduchu

- izobarické ochlazení (většinou vyzařování)
- **výstupné pohyby**
 - velkoprostorové
 - konvektivní



Oblačnost vznikající izobarickým ochlazením

- # vznik podinverzní, případně inverzní oblačnosti (St, mlha), která se během dne může rozpustit
- # většinou není příčinou významných srážek

Vazba typu výstupných pohybů na druh oblačnosti

- # velkoprostorové výstupné pohyby: především Ci, Cs, As, Ns
- # konvekce (výsledek archimedovských vztlačových sil v atmosféře): Cu, Cb
- # poznámka: Termodynamické rozdělení srážek nemusí být vždy jednoznačné

Kondenzace vodní páry, kondenzační jádra

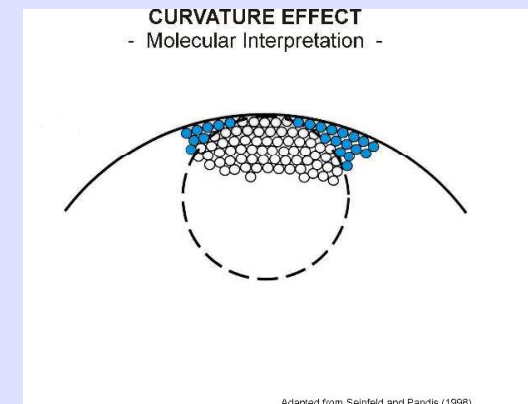
- # vznik kapiček vody spontánním spojováním molekul v. páry je statisticky nepravděpodobné
- # v reálné atmosféře: kondenzace okamžitě po dosažení nasycení
- # klíčový význam kondenzačních jader
 - velikost $10^{-8} - 10^{-6}$ m

$$e_{sr} = e_{s\infty} \exp\left(\frac{A}{r}\right)$$

A konst.

e_{sr} tlak nasyc. v. páry nad kapičkou o poloměru r

$e_{s\infty}$ tlak nas. v. páry nad rovinným vodním povrchem



Kondenzace vodní páry, kondenzační jádra (pokr.)

- # mnohé aerosolové částice jsou tvořeny rozpustnými látkami (především mořské soli)
- # kapičky jsou roztokem určité látky
- # Raoultův zákon pro disoc. roztoky:

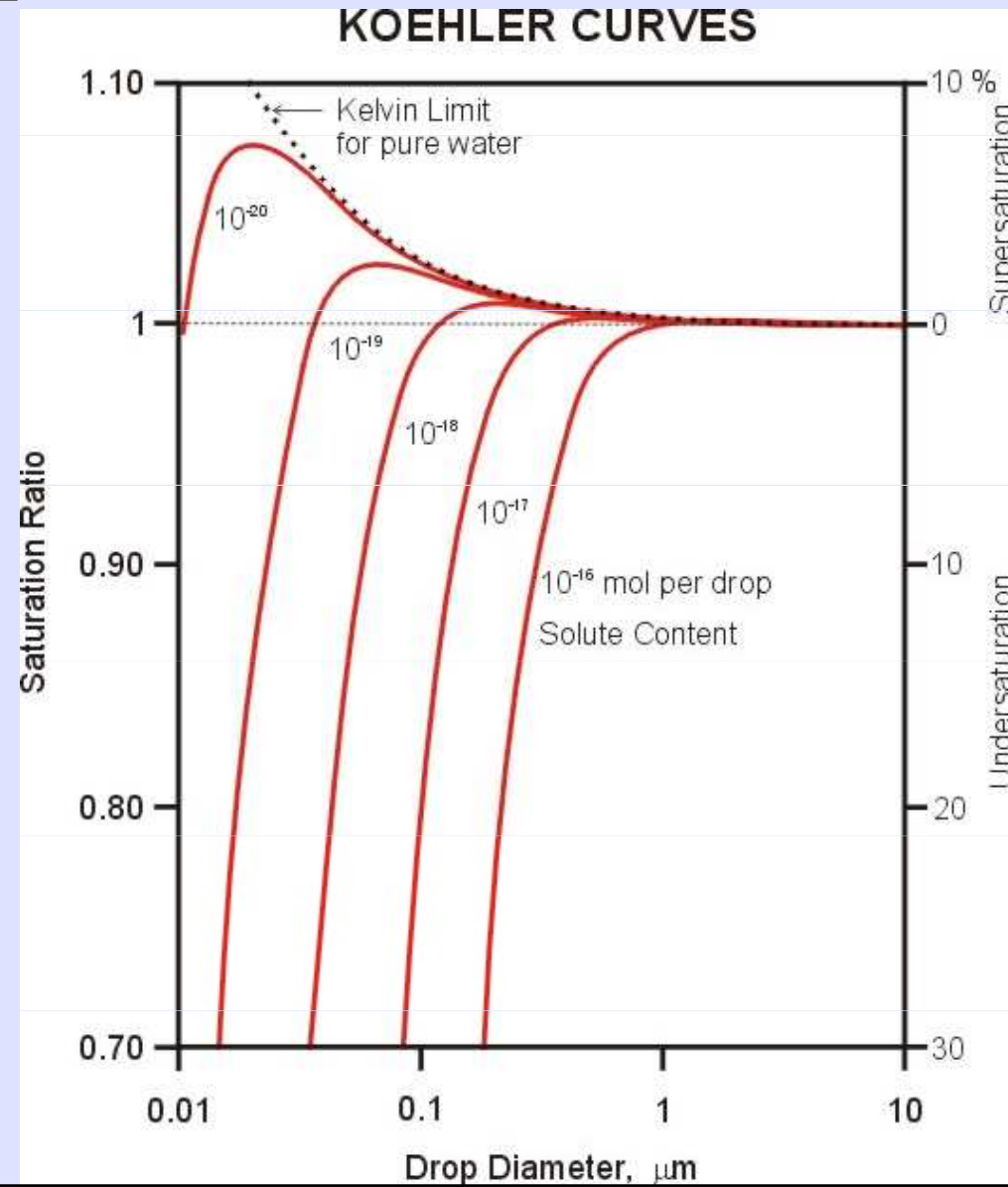
$$e'_s = e_s \left(\frac{n}{n + in^*} \right)$$

- # e_s tlak nasyc. v. páry nad čistou vodou
- # e'_s tlak nasyc. v. páry nad roztokem, obsahujícím v n kilogrammmolekulách vody n' kilogrammmolekul rozpuštěné látky
- # i van't Hoffův faktor závislý mj. na disoc. látce: pro NaCl, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ je $i=2$
- # n, n^* počet molekul vody, resp. rozpuštěné látky

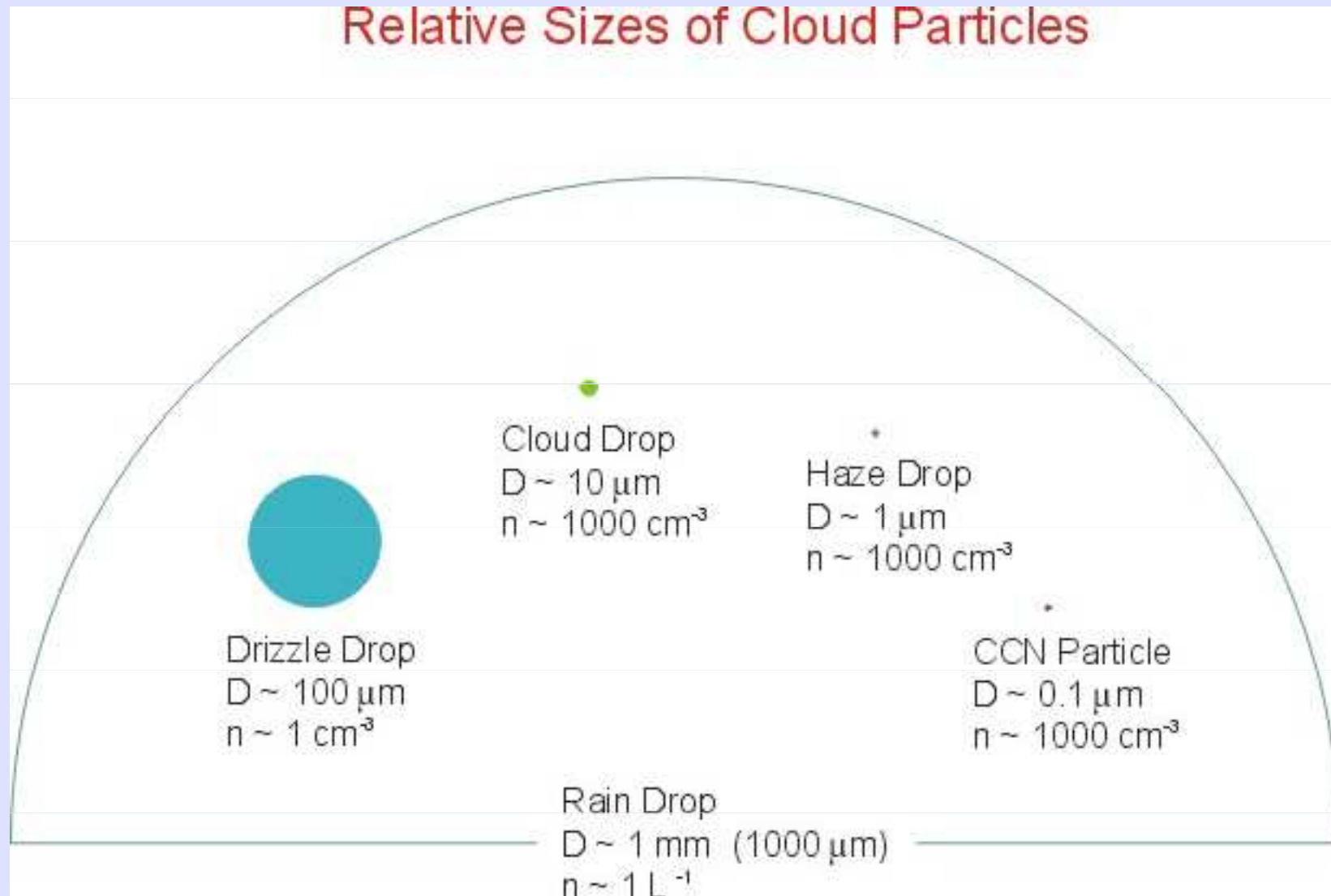
Kondenzace vodní páry, kondenzační jádra (pokr.)

- # vliv elektrického náboje (snižuje napětí nasycení v. páry především u kapiček do $r=10^{-6}$ m)
- # vznik el. náboje: absorbování částice s el. nábojem, vznik el. nábojů zejm. v bouřkových oblacích

Nasycení/přesycení v. páry nad kapičkou roztoku v závislosti na velikosti kapičky a obsahu rozp. látek



Velikosti aerosolů



Koalescence v oblacích

Narůstání v. kapek:

- kondenzace
- koalescence (splývání)

Koalescence:

- spontánní (Brownův pohyb) - nevýznamná
- **gravitační** (při dostatečném „rozdružení“ velikosti kapek)
- elektrostatická
- turbulentní
- hydrodynamická (zhuštění proudnic u souhlasně se pohybujících kapek)

Vznik ledových částic v oblacích

Mrznutí vodních kapiček:

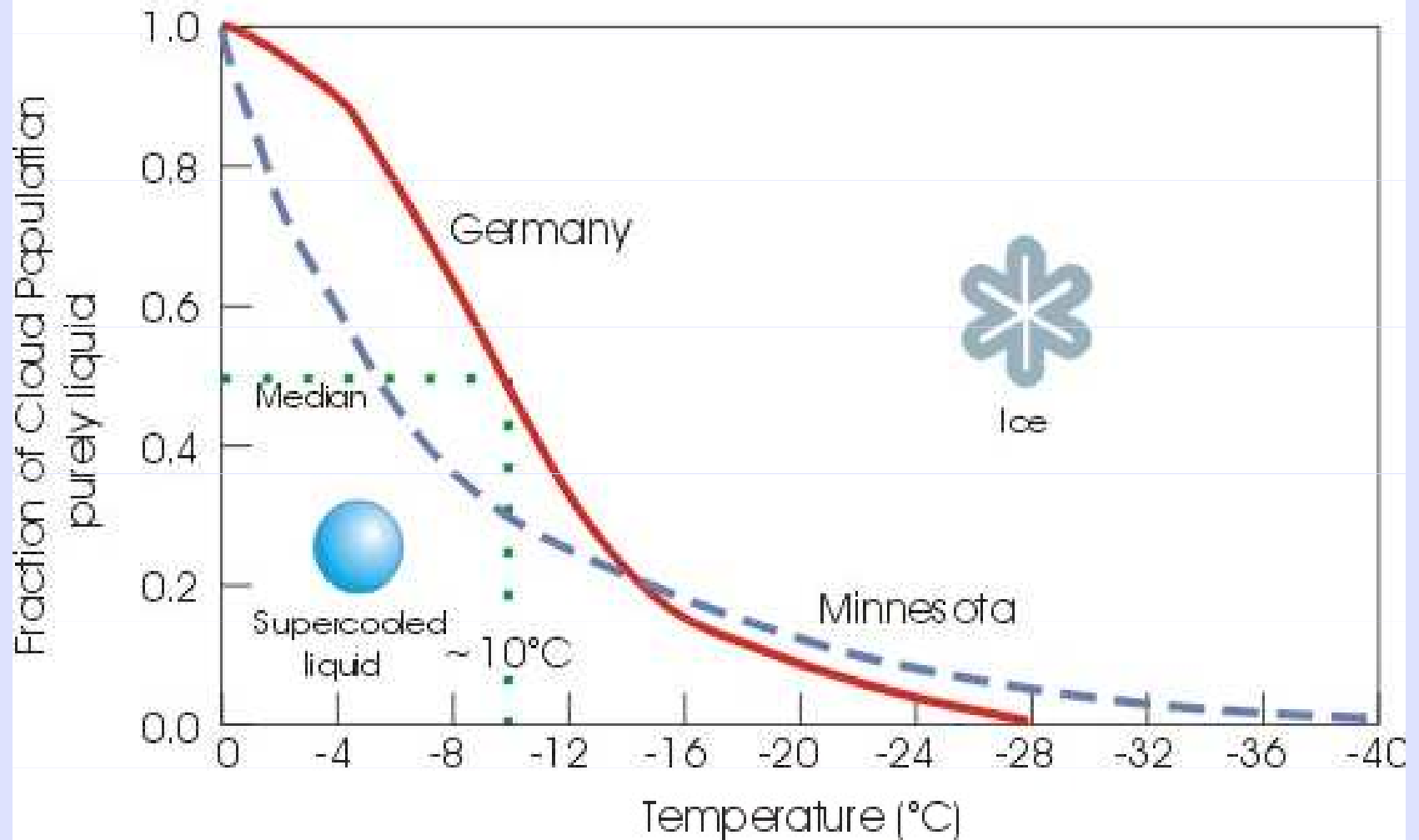
- vodní kapičky zůstávají v kapalně fázi při až do -42 st. C.
- úloha krystalizačních (ledových) jader

Ledové částice v oblacích:

- jednotlivé led. částice: -5°C
- vzrůst s poklesem teploty, avšak počet kapiček je několikařádově vyšší až do teplot -30 až -40°C

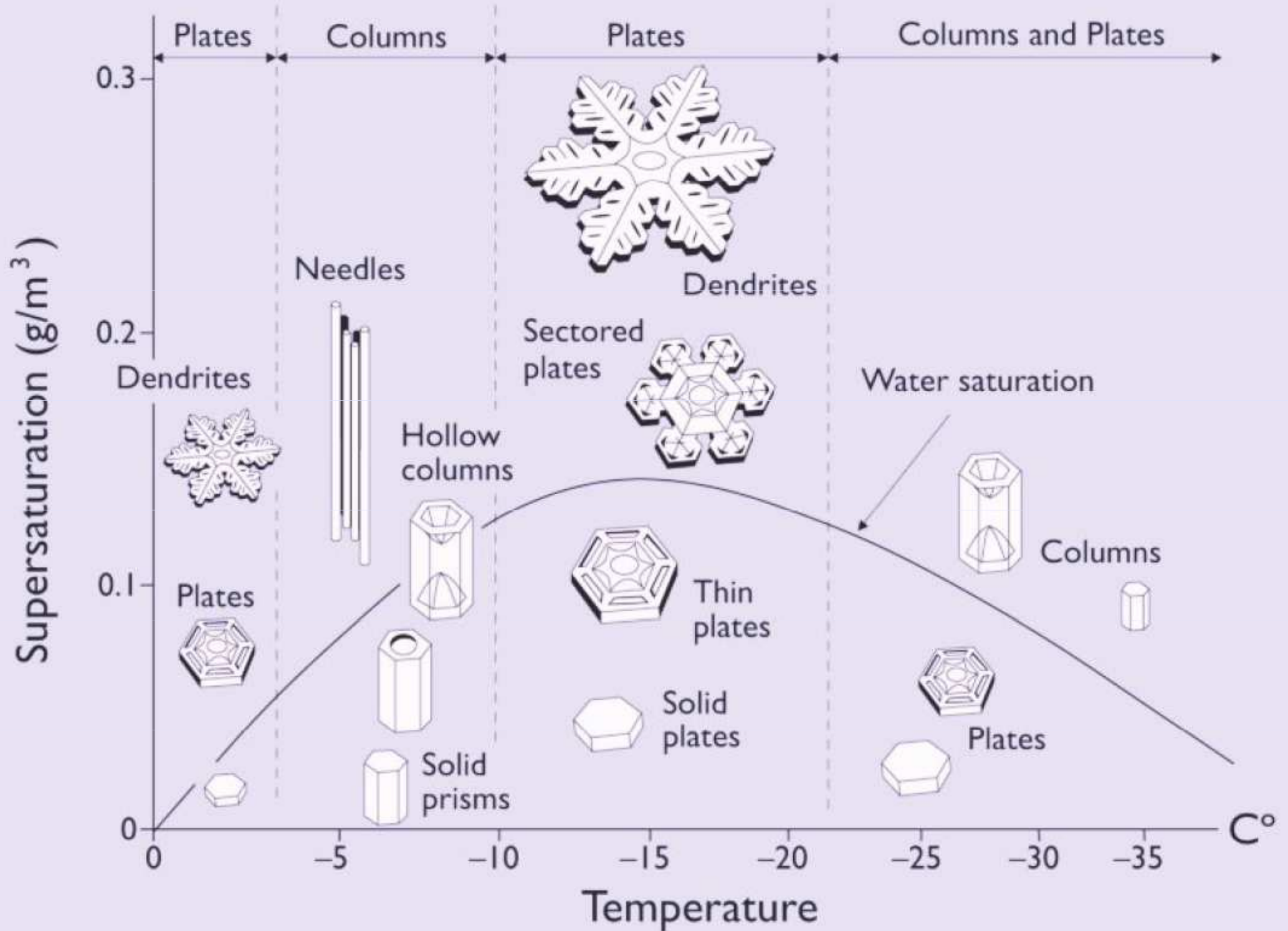
Přímá sublimace (depozice) v atmosféře je krajně nepravděpodobnou příčinou vzniku ledových částic (nikoliv narůstání)

Occurance of Supercooled Clouds



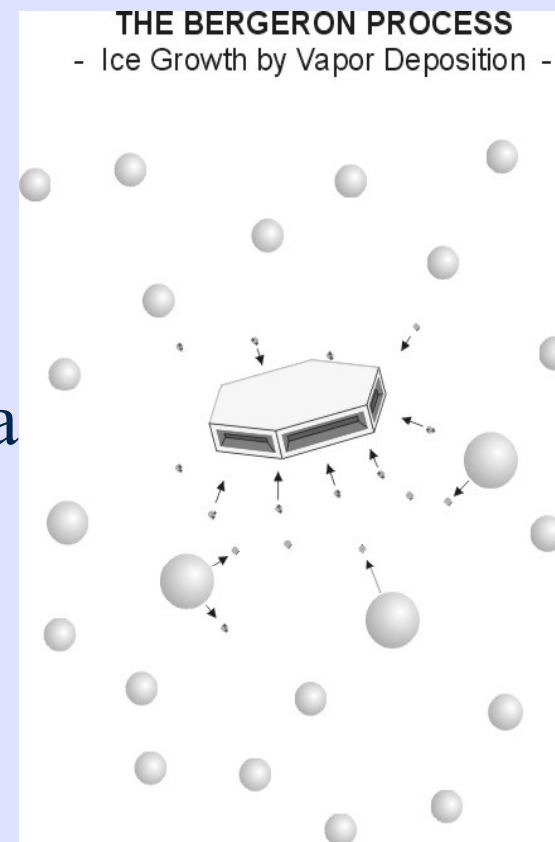
Tvary ledových krystalků

- # sloupek
- # destička
- # dendrit
- # Závislost na teplotě:
 - 0 až -5°C : převládají segmenty šestibokých destiček, dendrity
 - -5 až -10°C : sloupky, tenké jehlice
 - -10 až -25°C : šestiboké destičky
 - kolem -14°C : dendrity
 - -25 až -40°C : sloupky, složitější agregáty



Teorie vzniku srážek

- # spontánní koalescence je nepravděpodobnou příčinou vzniku srážek
- # Bergeronova-Findeisenova teorie:
 - tlak nasycené vodní páry nad ledem je nižší => narůstání ledových krystalků na úkor ledových kapiček, příp. mrznutí kapiček ledu na krystalcích ledu (*angl. riming*)
 - tento mechanismus vysvětluje vznik vert. srážek v mírných šířkách
 - předpokladem je tzv. *koloidní nestabilita*



Bergeronova-Findeisenova teorie

EFFECT OF PHASE DIFFERENCE

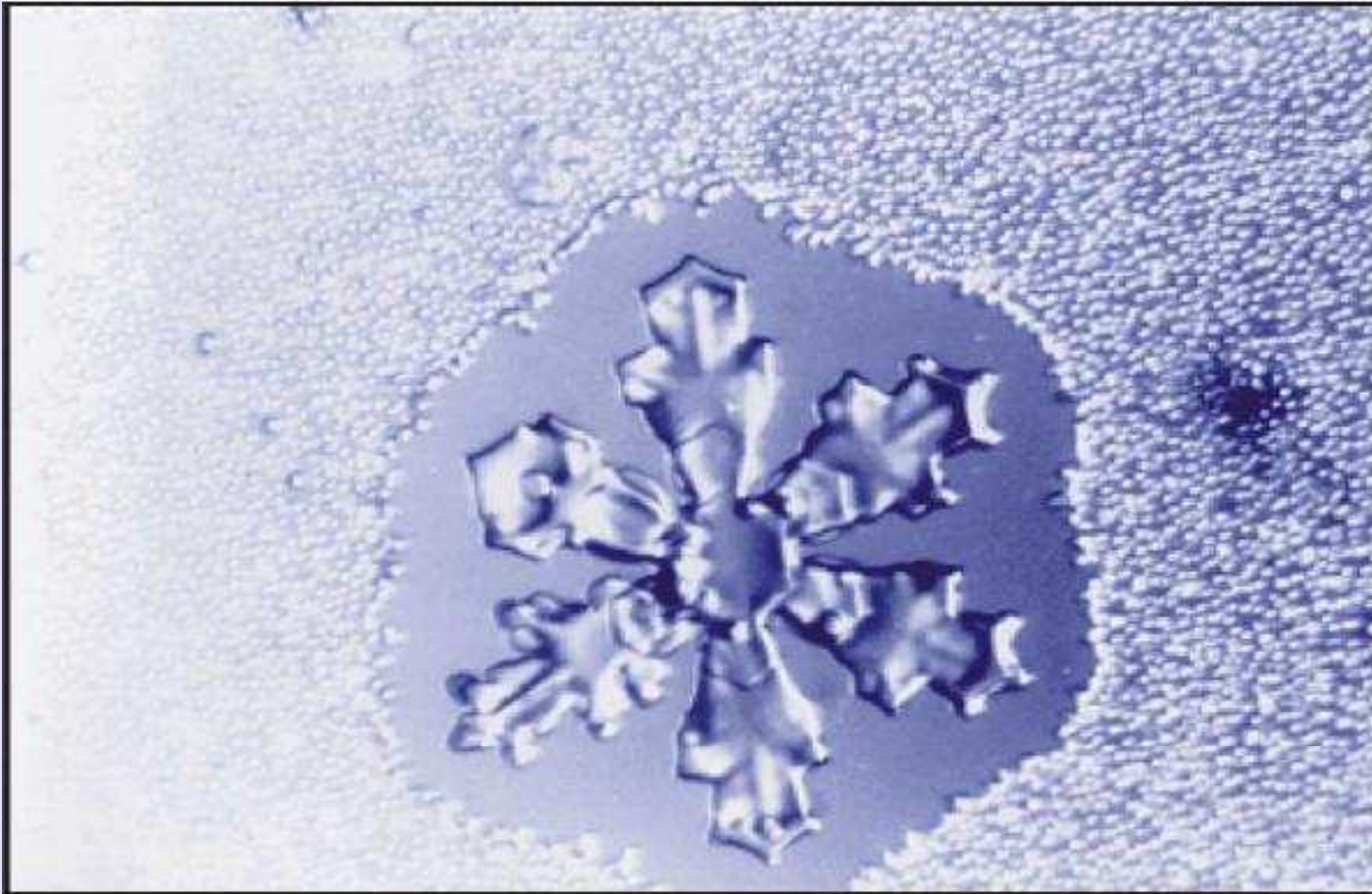
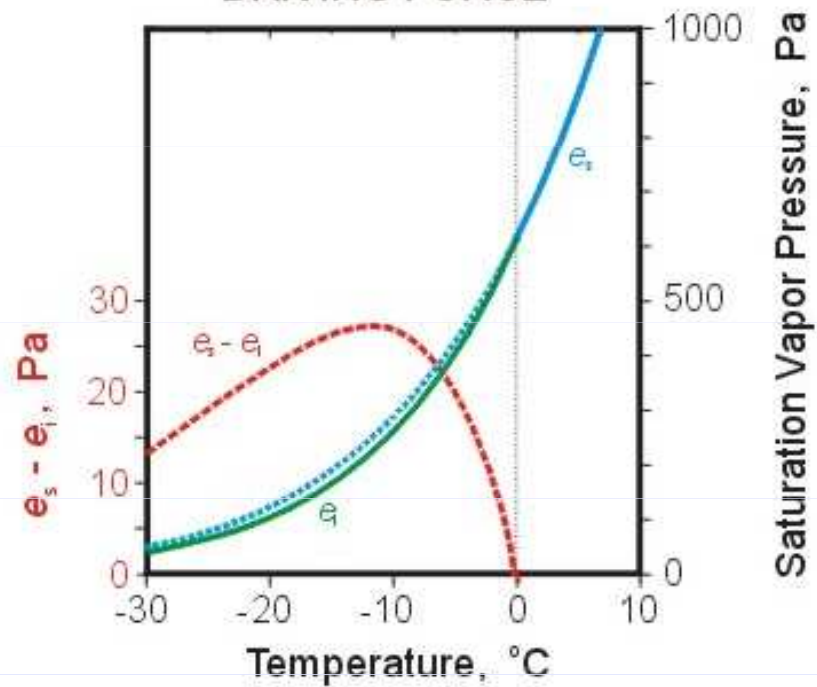
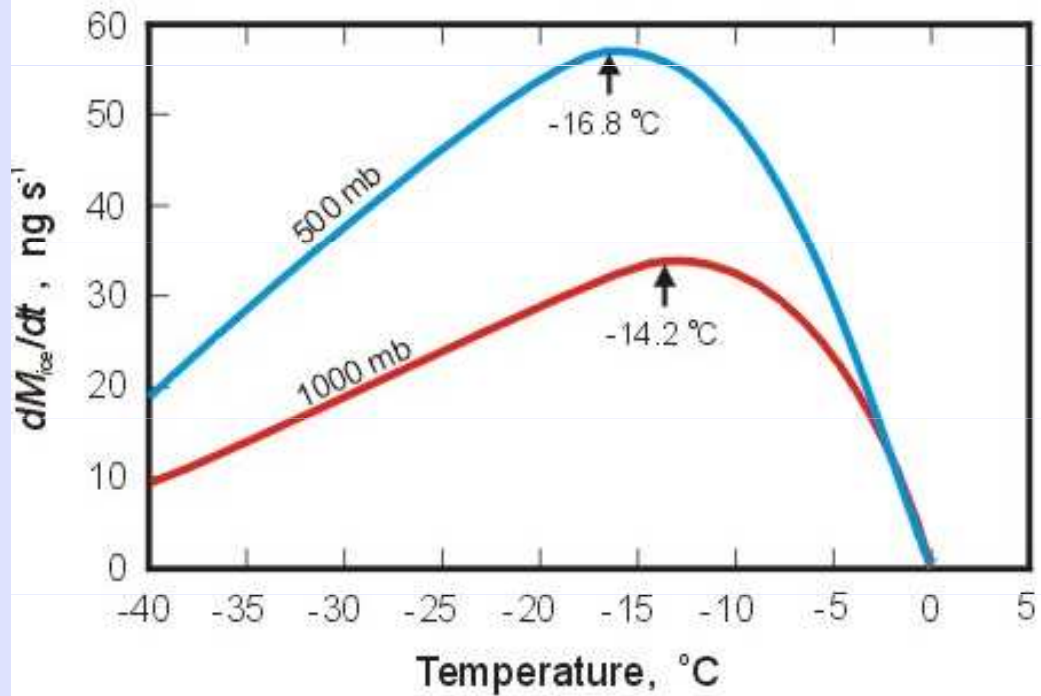


Photo by R. Pitter

DRIVING FORCE

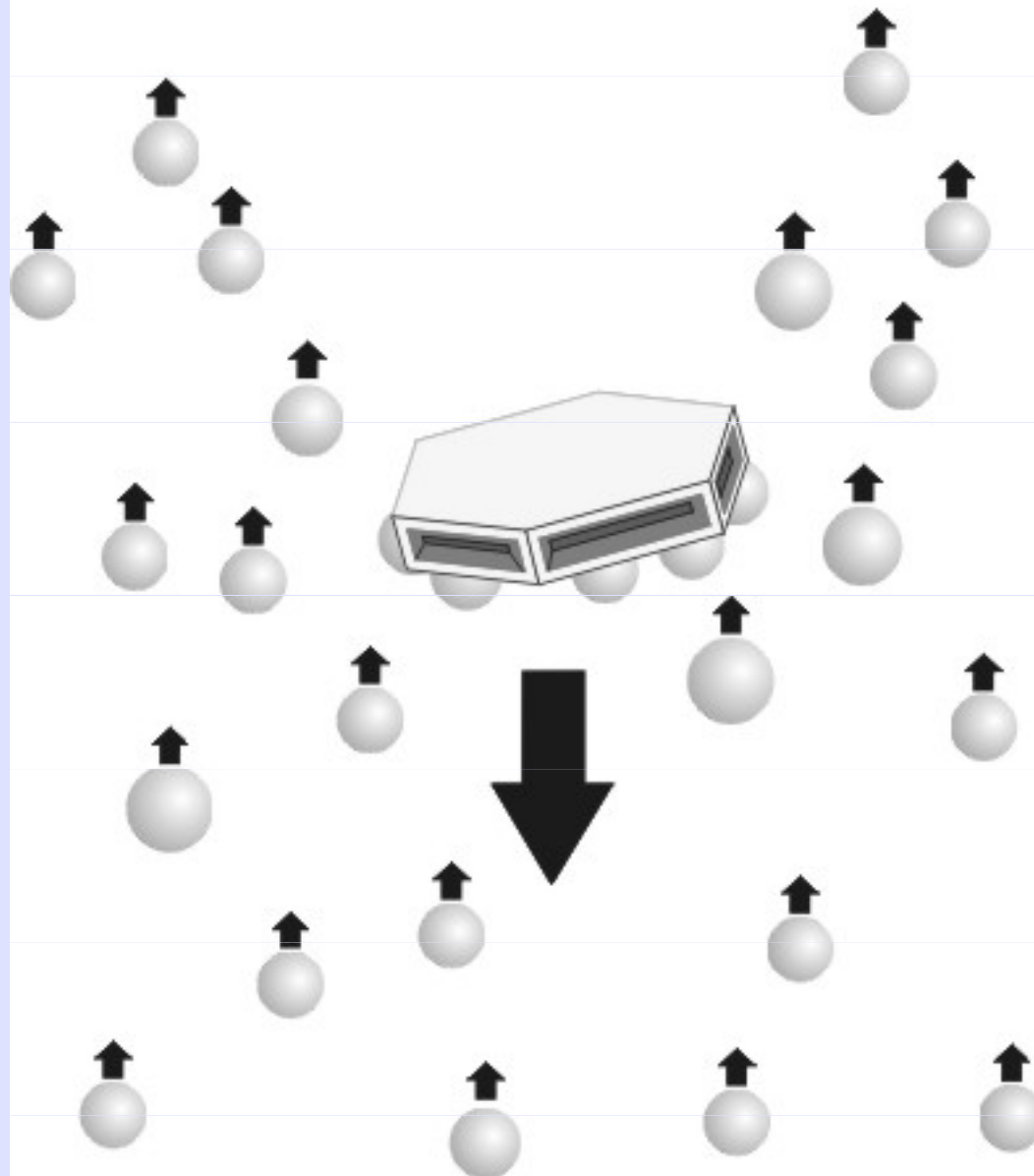


ICE GROWTH RATES AT LIQUID WATER SATURATION



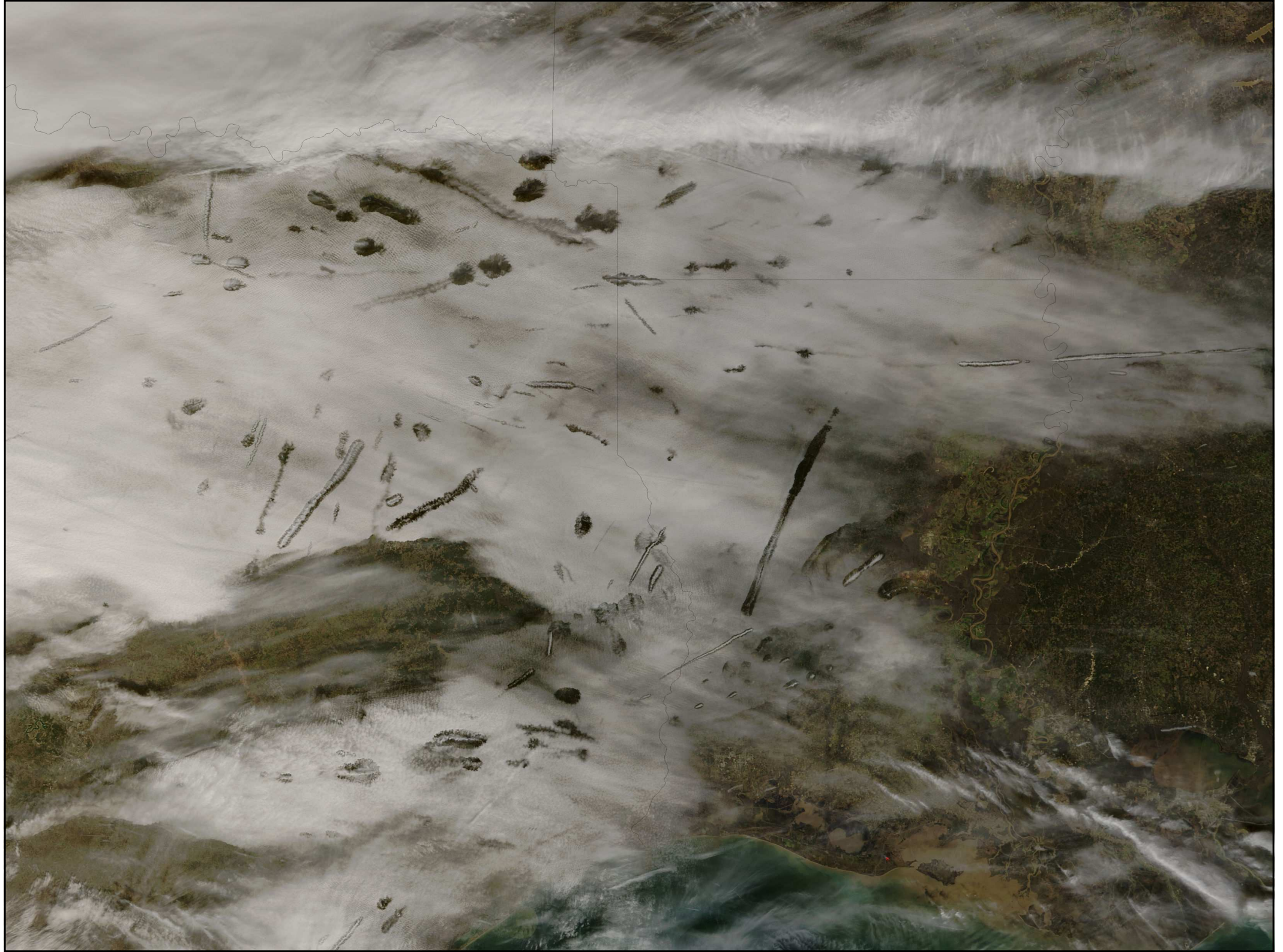
RIMING

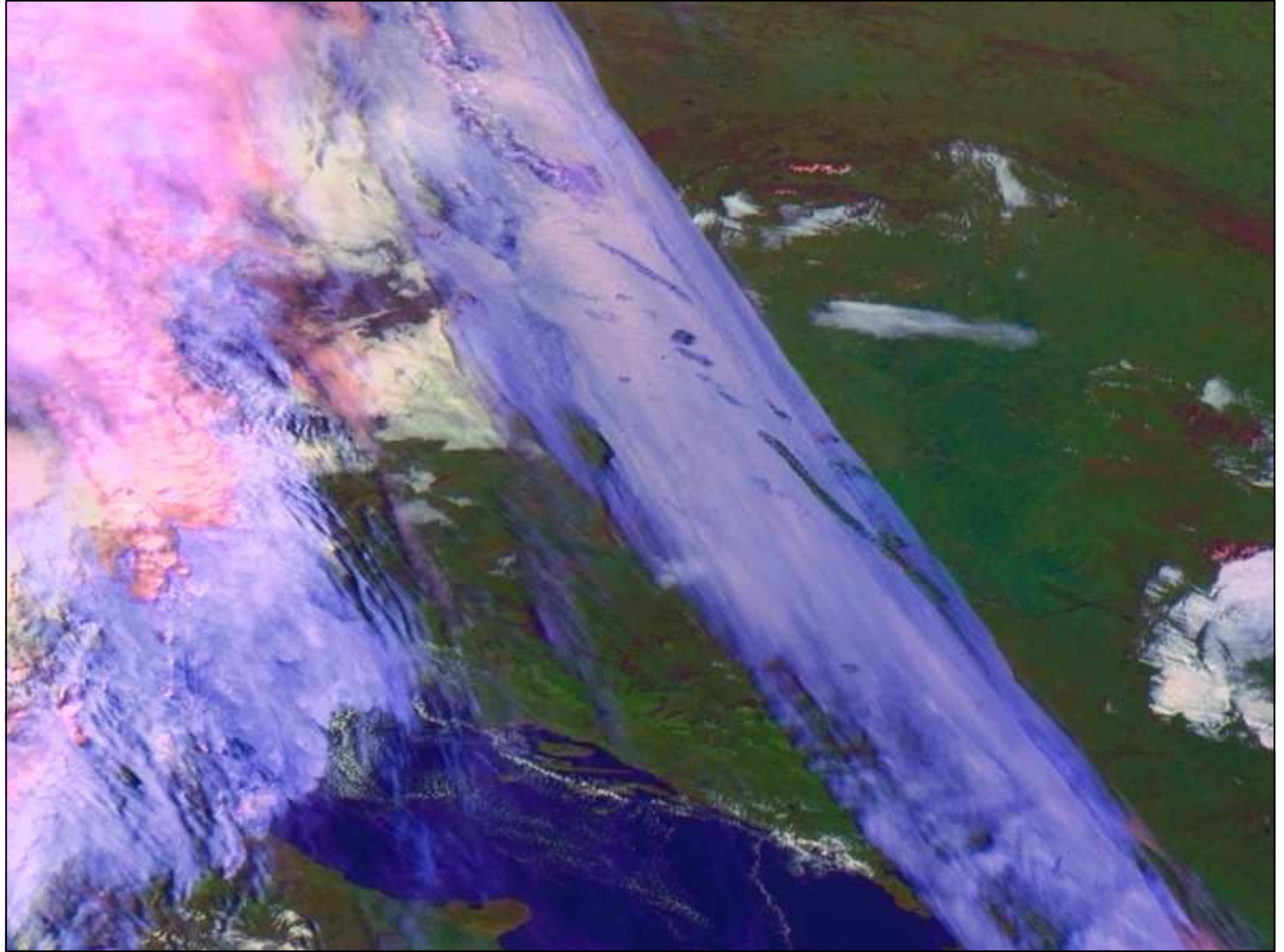
- Ice Growth by Collection -



'Hole-punch' – neobvyklý důsledek koloidní nestability







Teorie vzniku srážek (pokr.)

- # v tropech: intenzivní srážky z „teplých“ konvekčních oblaků (oblaka bez podstatné ledové fáze)
- # koalescenční teorie srážek:
 - obří kond. jádra (10^{-6} m a větší), zřejmě tvořené mořskými solemi => kapičky „větší než obvyklé“, tudíž začíná „pracovat“ gravitační koalescence
 - kapičky padají dolů, narůstají a rozpadávají se, mohou být dále unášeny nahoru výstupnými pohyby (v tropech jsou konvektivní bouře symetričtější)
 - oslabení výstupného proudu – vypadávání srážek

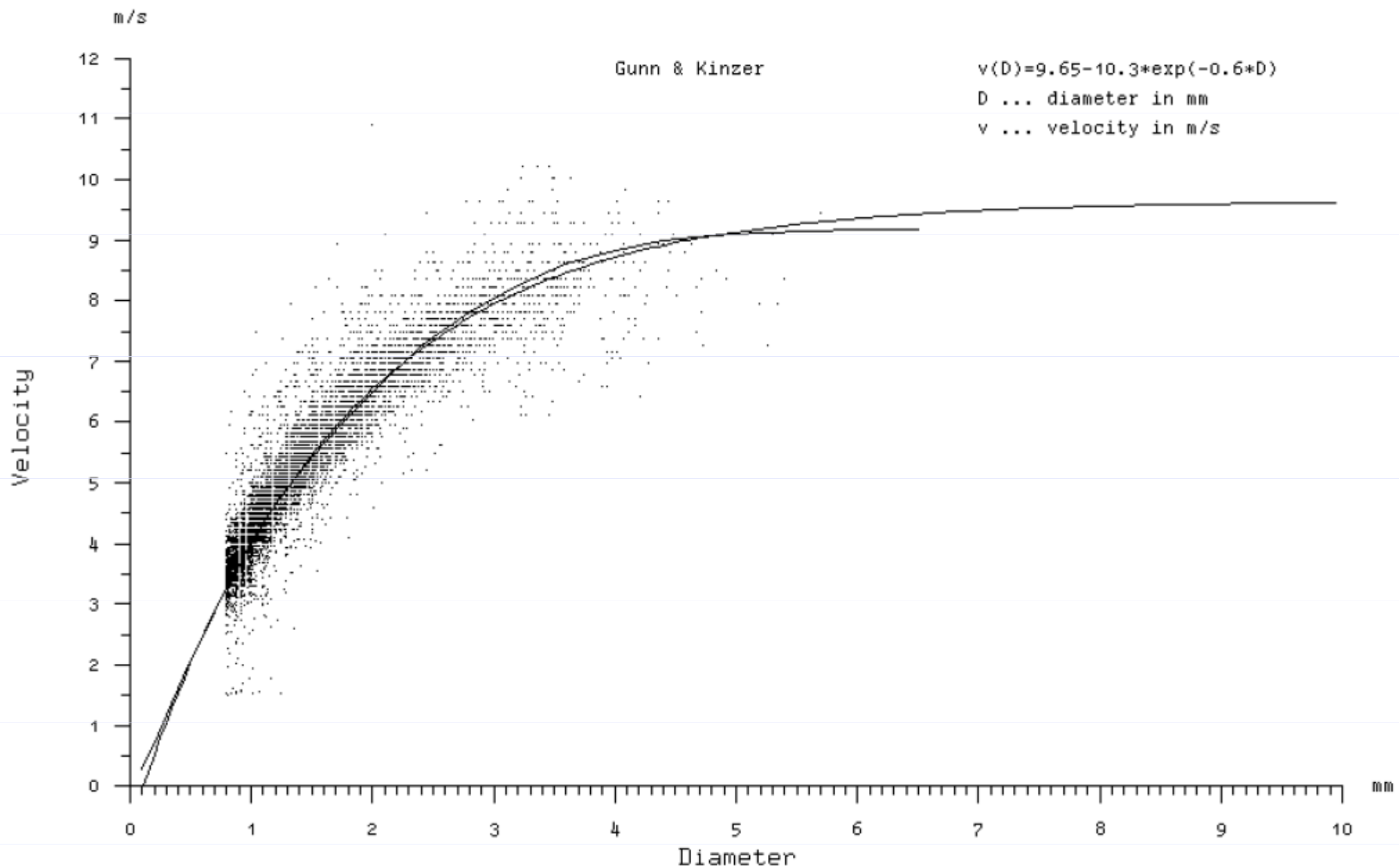
Teorie vzniku srážek (pokr.)

- # další koalescenční teorie vzniku srážek z „teplých“ vodních oblaků je založena na předpokladu, že vtahování okolního suššího vzduchu na vrcholu C_b i po stranách výstupného proudu umožňuje „zploštění“ spektra kapiček a vytvoření „obřích“ kapek
- # Tyto procesy se mohou objevit i mimo tropické šířky

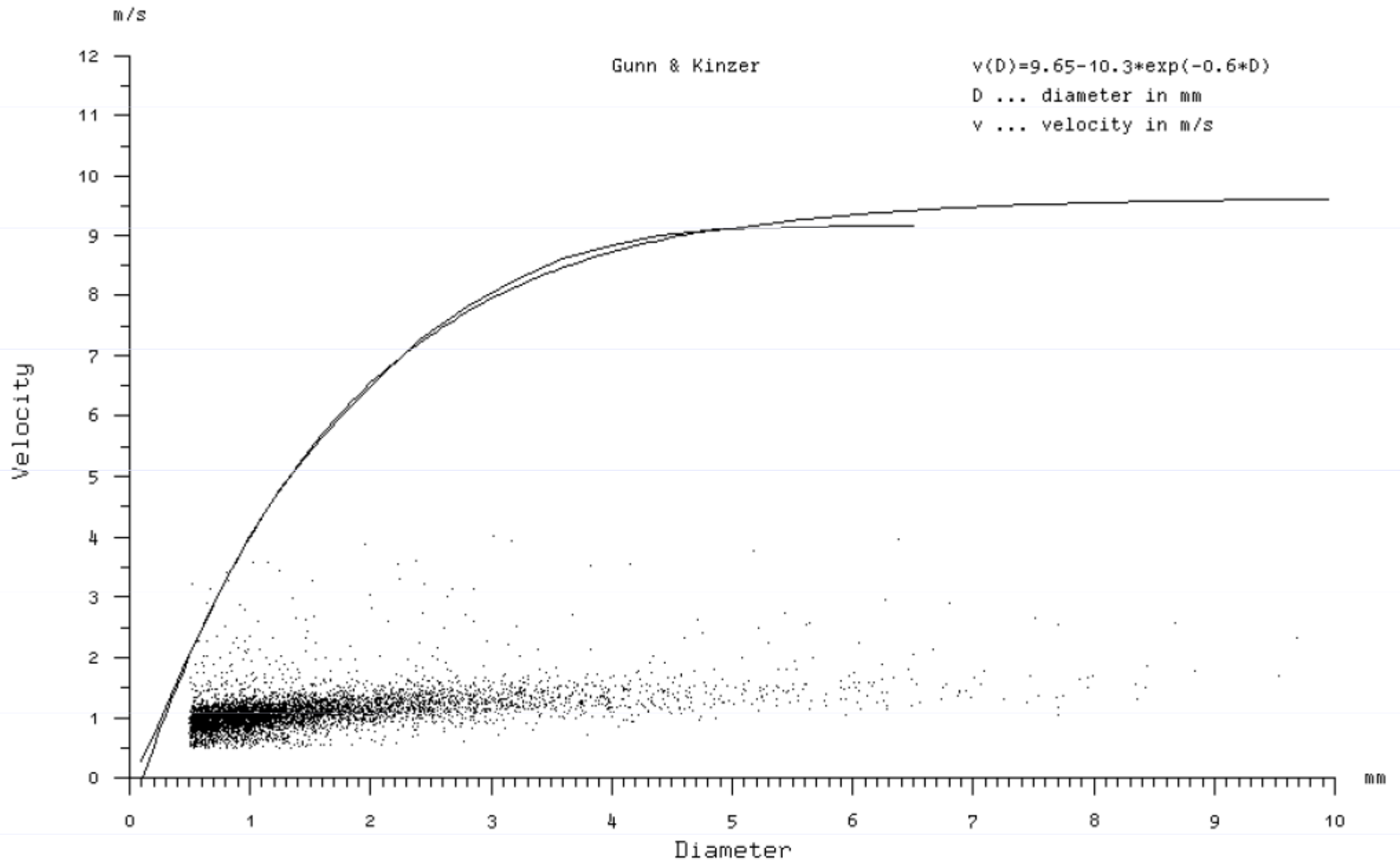
Pádová rychlost srážkových elementů

- # Závislá na fázi a velikosti částic a tlaku vzduchu
- # Déšť: při zemi do cca 9 m/s, typicky kolem 4-5 m/s (při průměru kapky cca 1-1.5 mm)
- # Sníh: při zemi do cca 2 m/s

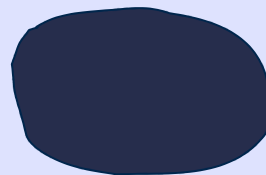
Vertical velocity versus Diameter



Vertical velocity versus Diameter



Tvar dešťových kapiček



Tvar kapky deště při pádu

Beard and Chuang (1987)

Equilibrium Axis Ratios (computed)

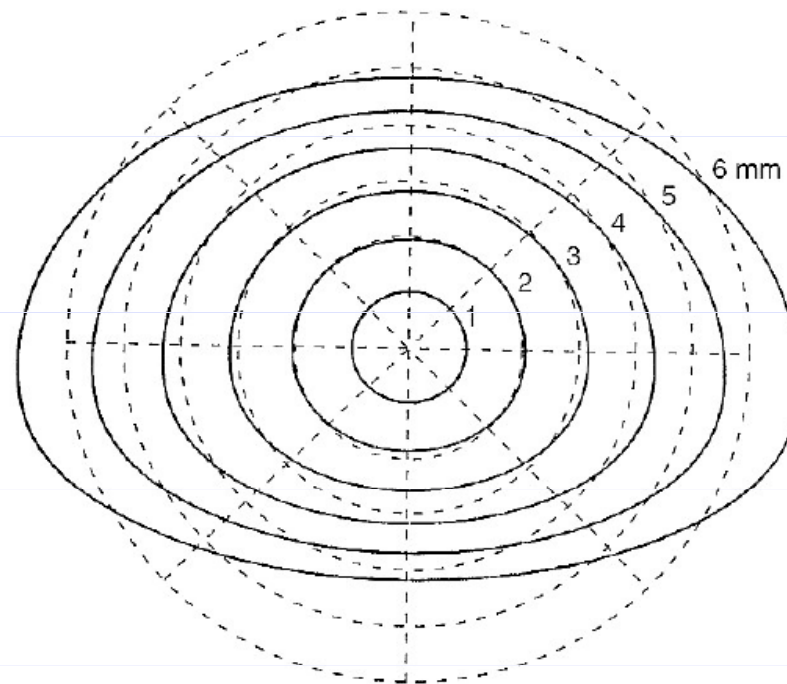


Fig. 7.1. Equilibrium drop shapes for drop diameters of 1–6 mm. From Beard and Chuang (1987).

BC2001

Dashed= D_{eq}

Solid= D

Kapka dosahuje maximálního průměru kolem 5 mm; při dosažení či překročení tohoto průměru se rozpadá

Deformation of Water Drops In the Air

Electro-static forces within the molecule are able to maintain the spherical shape against external forces.

Drop Size
.14 mm

Characteristic Shape

Actual Movement



click at right for more on electro-static forces in a water molecule.

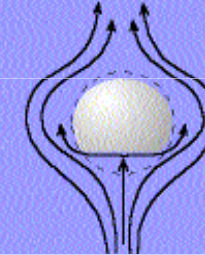
.50 mm

A very slight shortening of the vertical axis and the drop is an "oblate spheroid", the vertical axis is about 98% of the horizontal axis.



Flattening of bases begins

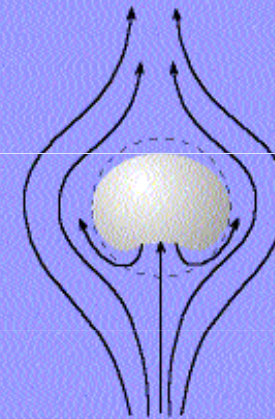
1.4 mm



Concavity of the flattened base begins.

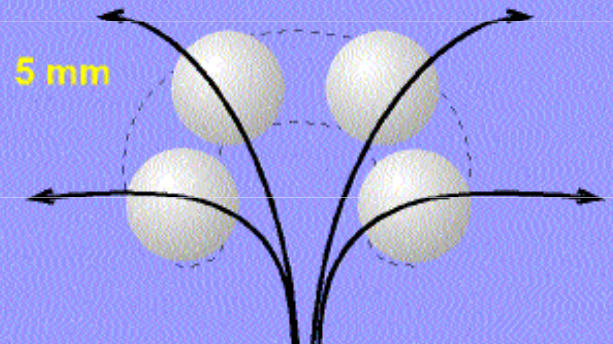


2 mm



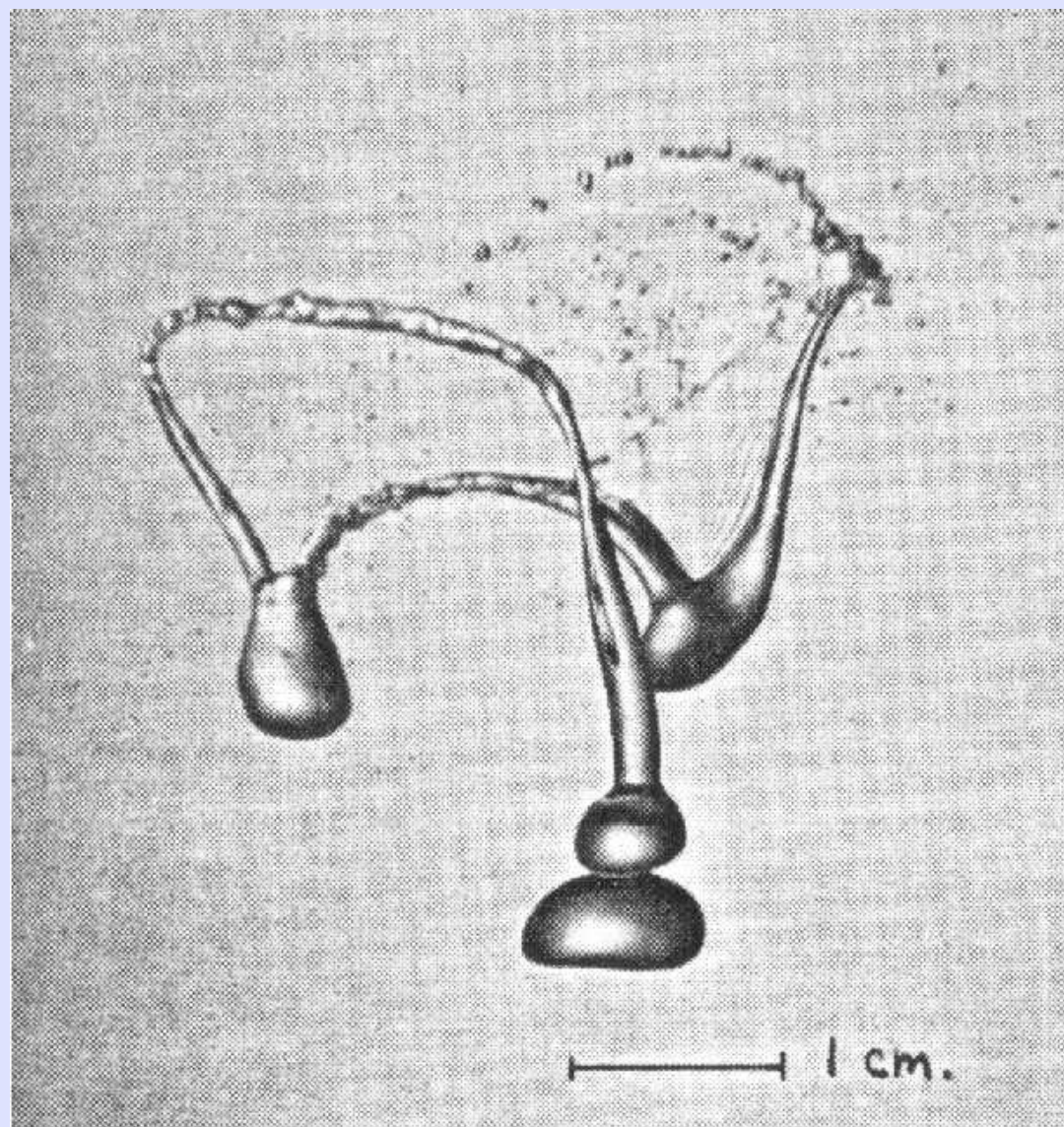
At 5mm the force of the air through which it is falling causes the drop to break up.

5 mm



Arrow Length Proportional to Rate of Fall

Rozpad kapky při pádu



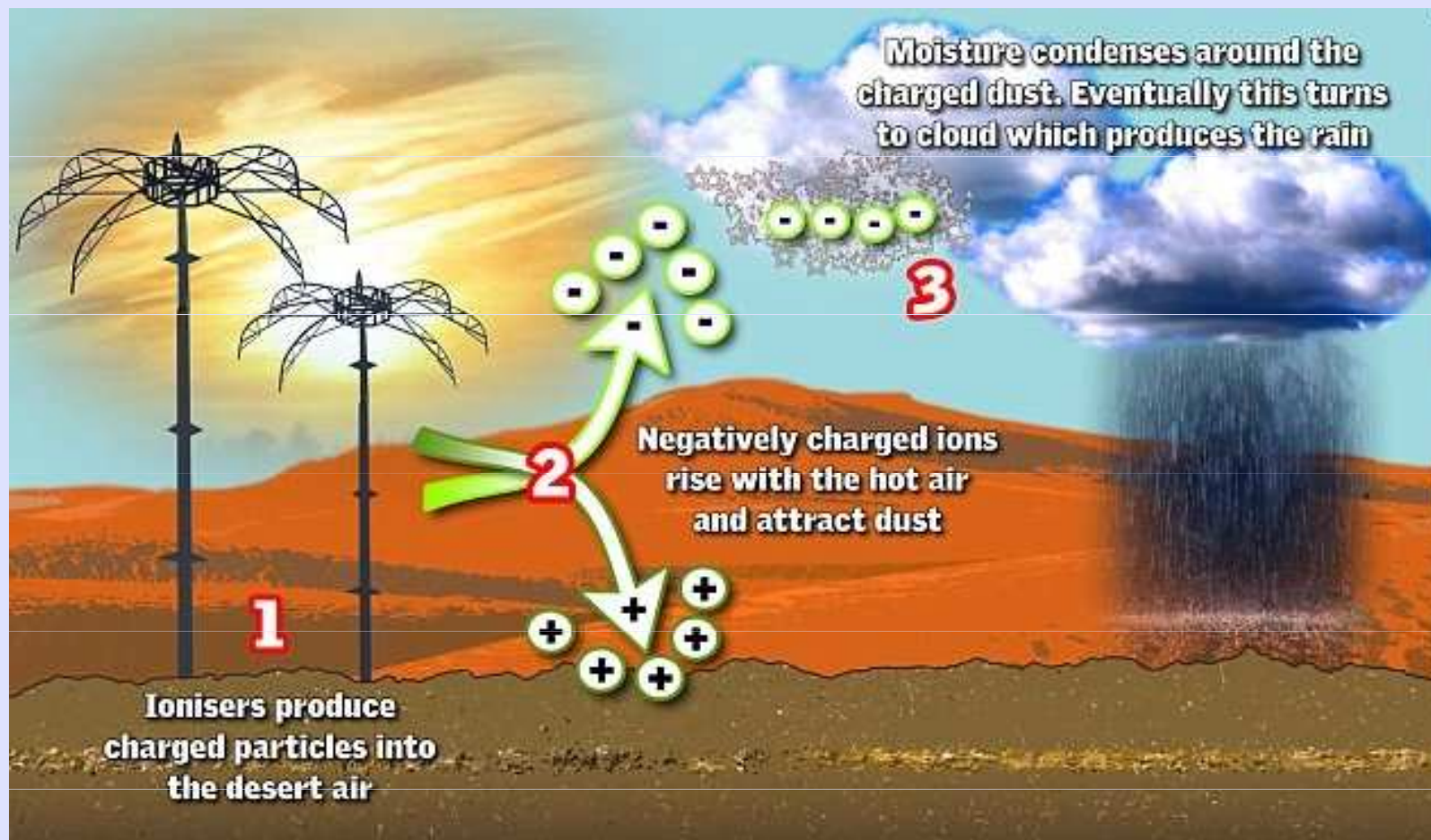
Ovlivňování srážek

- # umělé srážky:
- # infikování oblaku kondenzačními a krystalizačními jádry
- # aplikace AgI
- # V současné době: potlačování ničivých krupobití (obřích krup)
 - Předpoklad: aplikací AgI do vtoku vzduchu do Cb vede k urychlení vzniku většího počtu menších krup
 - V praxi: Francie, Chorvatsko, USA, Řecko ...

Příklad umělé infekce oblačnosti



Lijáky v Abú Zabí - ?



Konvektivní (konvekční) oblačnost

Příčina:

- archimedovské vztlakové síly
- podmíněná (příp. potenciální) instabilita

Tvar konvekční oblačnosti:

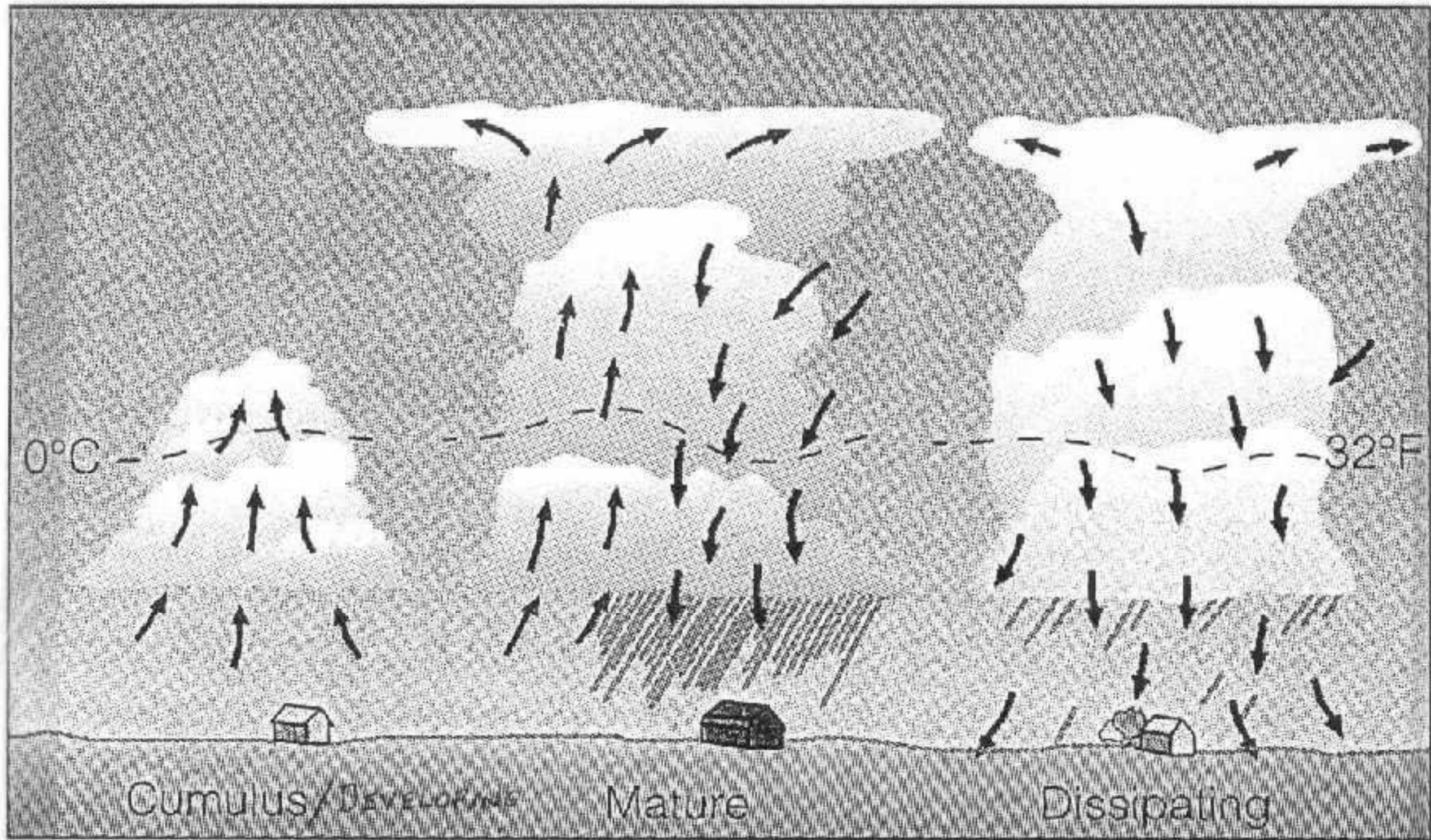
- za ideálních podmínek symetrický tvar (šestiúhelníkové Bénardovy buňky)
- v reálné atmosféře vlivem stříhu větru asymetrický tvar+proces

Vznik a vývoj konvekční buňky

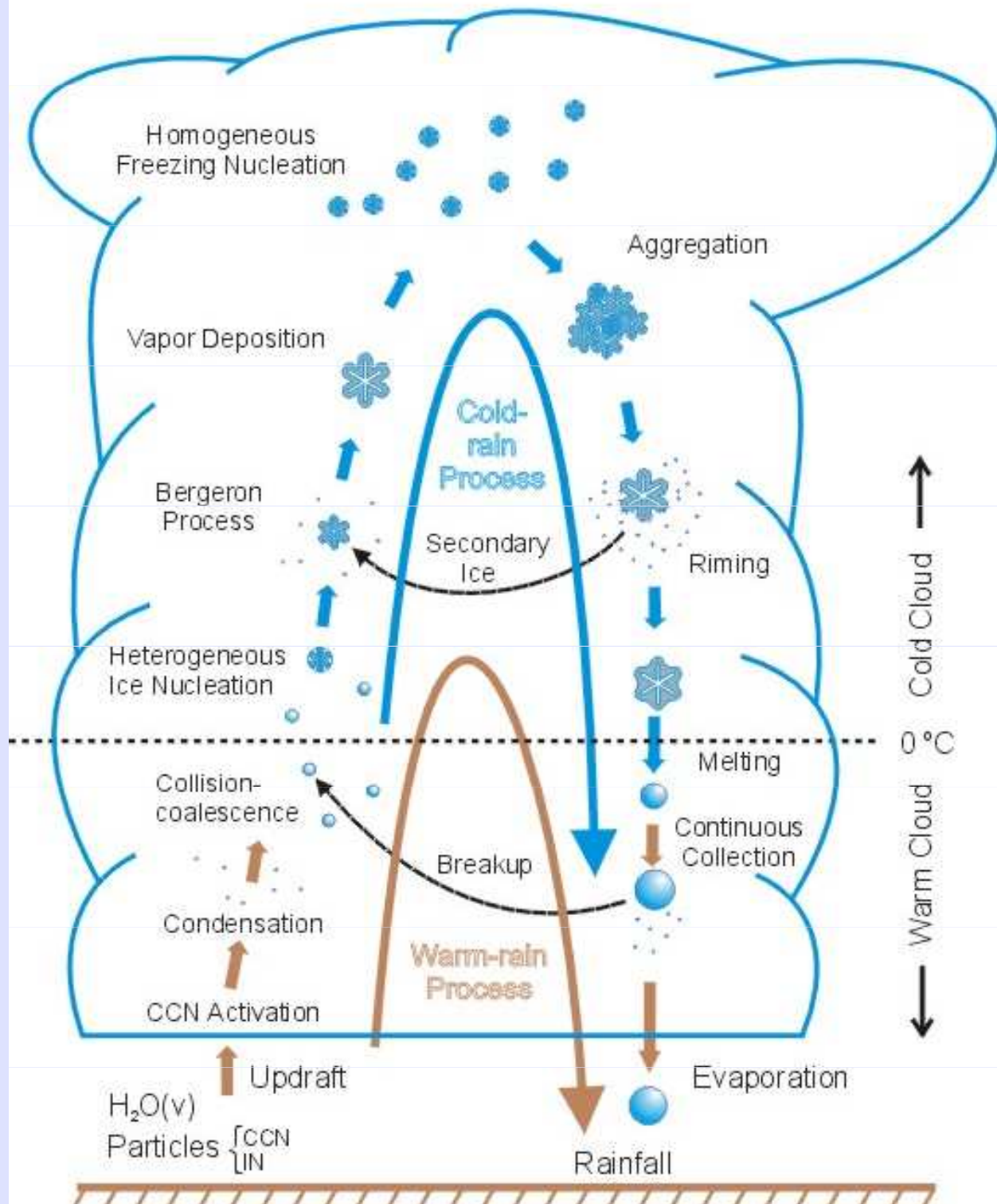
- # Symetrická buňka (nepatrný vliv stříhu větru)
- # Fáze 1
- # Fáze 2
- # Fáze 3
- # Fáze 4

Vznik a vývoj konvekční buňky

- # Asymetrická buňka (patrný vliv stříhu větru)
- # Vliv stříhu větru
- # Vývoj



PRECIPITATION MECHANISMS



Úkoly pro cvičení

- # Úkol č. 1. Nakreslete závislost tlaku nasycené vodní páry na teplotě vzduchu v rozmezí -40 až 0 st. C. nad ledem a nad vodou a vhodně znázorněte jejich rozdíl. Při jakých teplotách je rozdíl nejvyšší? Použijte Magnusův vzorec.

$$E_{wv} = E_{wv}^0 10^{\frac{8.5t}{273.16+t}}$$

$$E_{iv} = E_{iv}^0 10^{\frac{9.7t}{273.16+t}}$$

$$E_{wv}^0 = E_{iv}^0 = 6.11[hPa]$$

Úkoly pro cvičení

- # Úkol č. 2. Nakreslete závislost teploty nasyceného vzduchu (tj. teploty rosného bodu) na tlaku nasycené vodní páry v rozmezí 0.2 až 6.11 hPa nad ledem a nad vodou a vhodně znázorněte jejich rozdíl. Použijte opět Magnusův vzorec. Odvod'te z něj závislost $t_{\text{nasys}}=f(E)$.