

# Monitoring a předpověď počasí

*RNDr. Milan Šálek, Ph.D.*

*milan.salek@email.cz*

# Předpověď počasí

- ▶ **Předpověď počasí – předpověď vyjadřující budoucí stav povětrnostních podmínek** (*Meteorologický slovník*)
- ▶ **Meteorologická předpověď je fyzikální úloha, jejíž cílem je vytvořit nejpravděpodobnější scénář nebo scénáře budoucího vývoje atmosféry v časovém horizontu typicky několika hodin, dnů až týdnů, max. měsíců.** Využívá základní zákony klasické fyziky (zákony pohybu, zákony termodynamiky) a řeší je pomocí **matematiky**, případně s pomocí znalostí chování synoptických objektů (tlakové útvary, fronty, bouřky).
  - U dlouhodobé předpovědi se využívají více klimatické údaje a vazby mezi jednotlivými složkami klimatického systému (např. teplotou povrchu oceánů a průměrnou teplotou v blízké oblasti).

# Rozdělení předpovědí počasí

- Podle období (předstihu), místa a účelu
- Také podle převažující technologie či zdrojových údajů
  - (numerické modely, pozorování, metody dálkové detekce apod.)

# Rozdělení předpovědí počasí

## I. Podle období, na které je vydána:

- 1) **Velmi krátkodobá 0–12h, nowcasting 0–2h.**
  - využití numerických modelů, metod dálkové detekce (radary, družice, systémy detekce blesků), koncepčních modelů (znalosti „chování“ určitých atmosférických struktur)
- 2) **Krátkodobá: 1–2 dny (1–3 dny)**
  - dominantní využití numerických modelů, částečně i koncepčních modelů, okrajově skupinové metody

# Rozdělení předpovědí počasí

I. Podle období, na které je vydána (pokr.):

3) **Střednědobá: 3–15 dnů (2–15 dnů)**

– dominantní využití numerických modelů, využívání poznatků z teorie deterministického chaosu k odhadu pravděpodobnosti jednotlivých scénářů vývoje (tzv. skupinové / ansámblové metody)

# Rozdělení předpovědí počasí

I. Podle období, na které je vydána (pokr.):

## 4) Dlouhodobá

– měsíční, sezónní – využívá numerické modely a tzv. skupinové předpovědi; větší vliv některých konzervativních faktorů na dlouhodobý režim počasí (teplota povrchu oceánů, zejména v tropech, a dále obsah vlhkosti v půdě a tloušťka sněhové pokrývky)

# Rozdělení předpovědí počasí

I. Podle období, na které je vydána (pokr.):

5) Předpověď klimatu

– předpověď dlouhodobého režimu počasí (klimatu) v časovém horizontu typicky roky až staletí, většinou desetiletí

Pozor na záměnu s *klimatickou „předpovědí“* počasí, tj. rámcovou „předpovědí“ (odhadem počasí) na základě znalosti klimatu dané oblasti

# Rozdělení předpovědí počasí

## II. Podle účelu:

- 1) **Všeobecná** – určená pro nejširší veřejnost, prezentovaná ve sdělovacích prostředcích
- 2) **Speciální** – pro specializované uživatele, jimž se přizpůsobuje obsah i forma předpovědi (předpovědi pro letectví, údržbu silnic, energetiku, zemědělské práce, stavebnictví atd.)



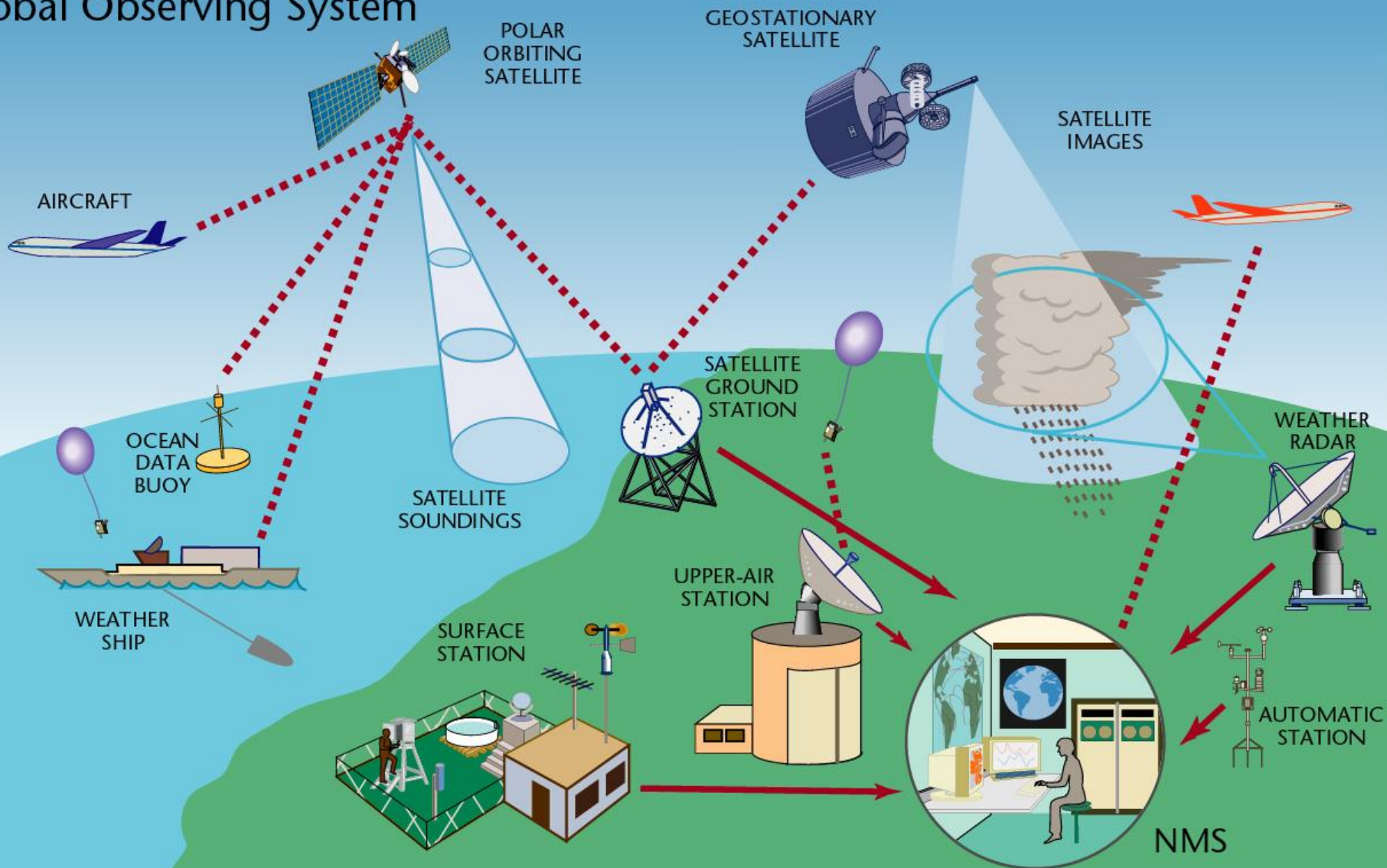
# Rozdělení předpovědí počasí

## III. Podle místa / oblasti:

- 1) **Oblastní** (pro administrativně nebo jinak specifikované území)
- 2) **Liniová (traťová)** – speciální předpověď zejména pro sféru dopravy – letectví, silnice.
- 3) **Místní** – předpověď pro určitou lokalitu (dnes je velmi rozšířená v mobilních zařízeních)

# Měřená data pro předpověď počasí

## Global Observing System



# Pozemní stanice (zprávy SYNOP, BUFR)

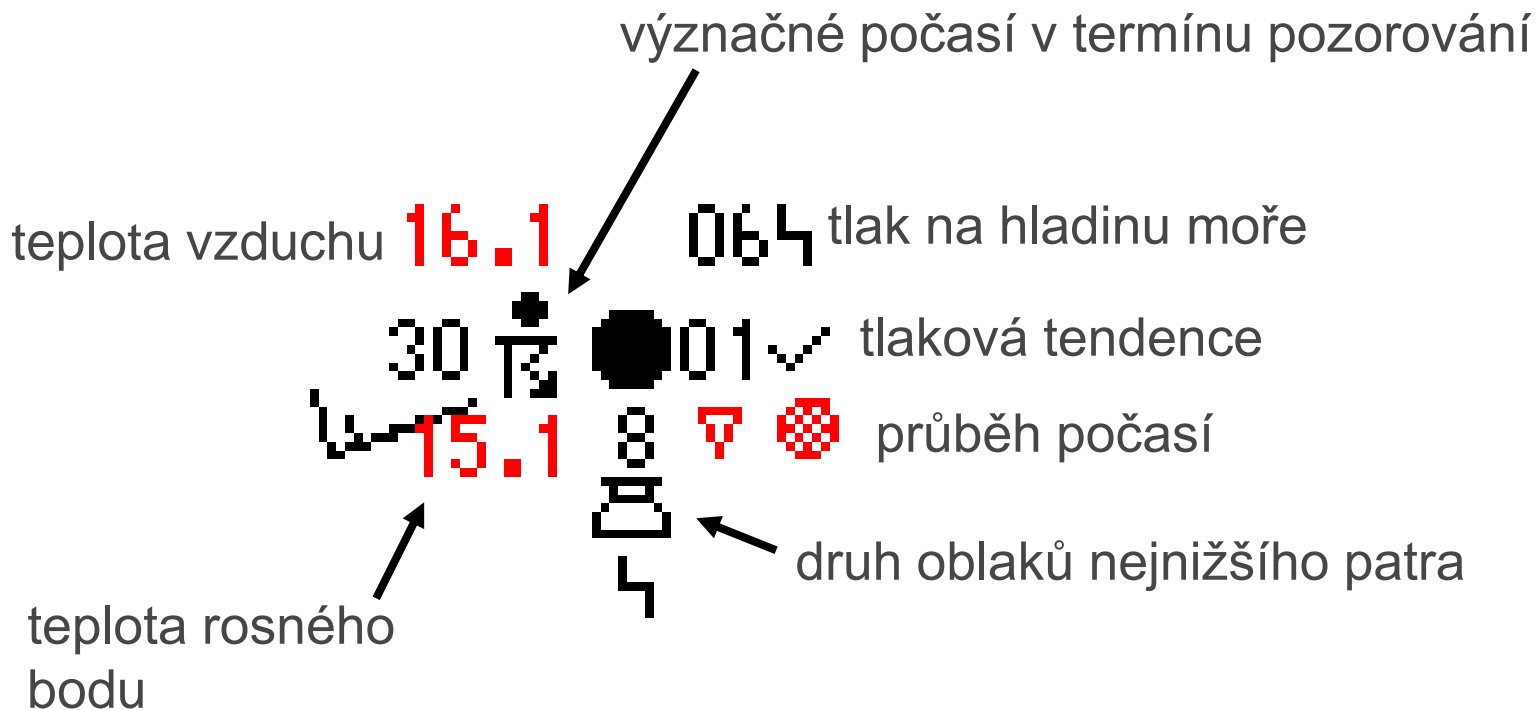
**Síť pozemních (oceánských) stanic o počtu kolem 10000: alespoň každé 3 hodiny, nejčastěji každou hodinu zpráva, t.č. SYNOP (přechází se na kód BUFR):**

11624	11760	79901	10187	20179	39906	40184
	57006	60051	72598	87500		
333	55044	87656				
555	395//	=				

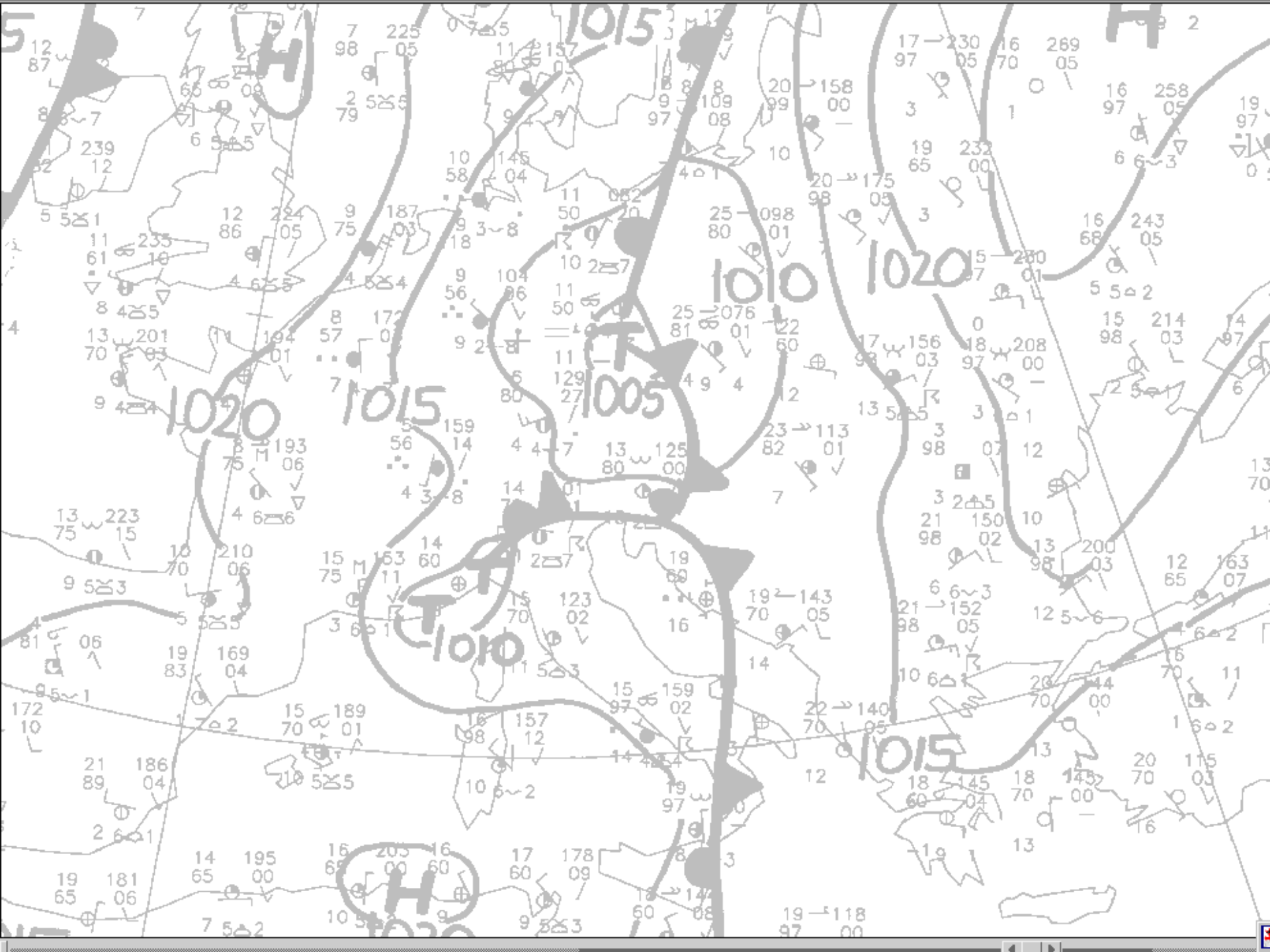
# Meteorologická stanice Svratouch



# Zápis stavu a průběhu počasí na přízemních povětrnostních mapách



11723 11430 82607 10161 20151 39873 40064 51001 60051 79582 88900  
333 55044 88933 555 395// =

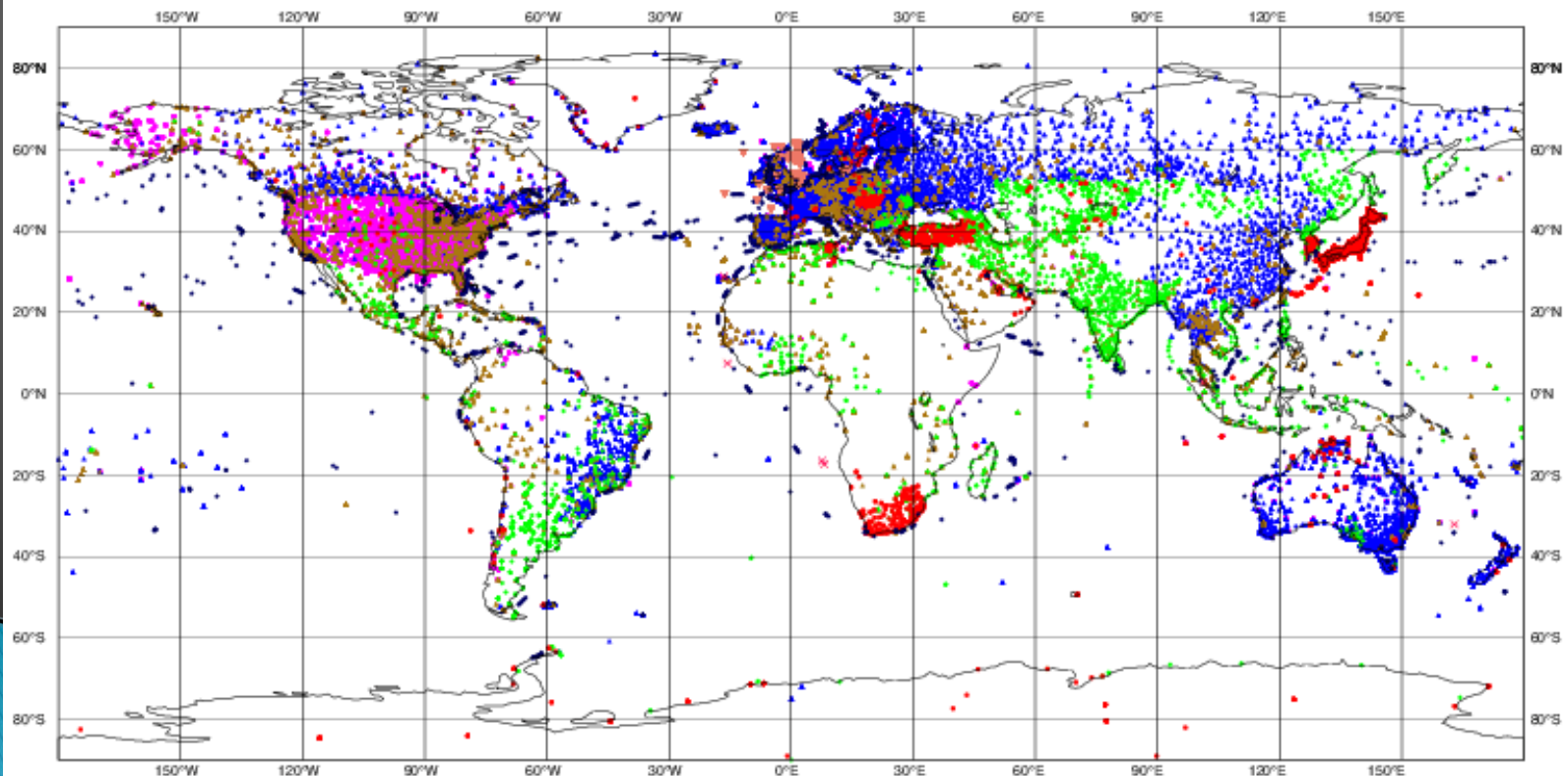
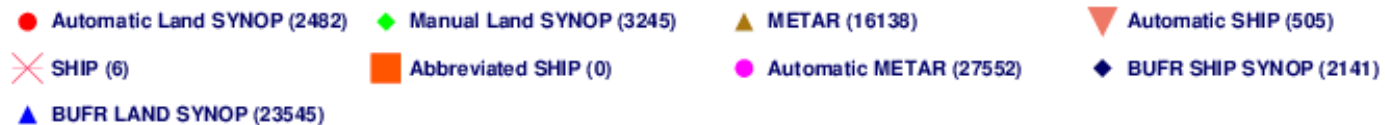


# Ilustrace rozložení pozemních synoptických stanic

ECMWF data coverage (used observations) - SYNOP-SHIP-METAR

03/12/2020 00

Total number of obs = 75614



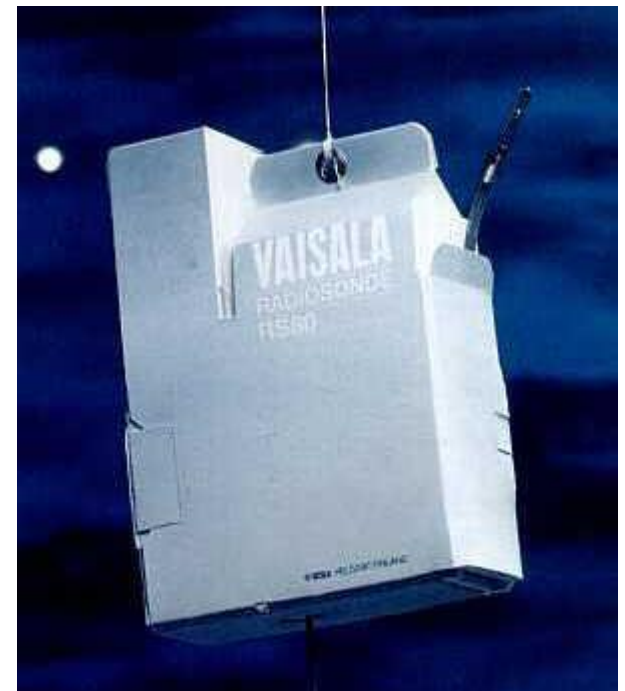
# Podklady pro tvorbu předpovědi počasí

- 2) Informace z aerologických stanic: 600–800 stanic na Zemi měří výškový profil základních meteorologických prvků (teplota, vlhkost, tlak vzduchu, vítr) alespoň 1x denně
- formát zprávy: BUFR, „přežívající“ TEMP





# Vypouštění sondy



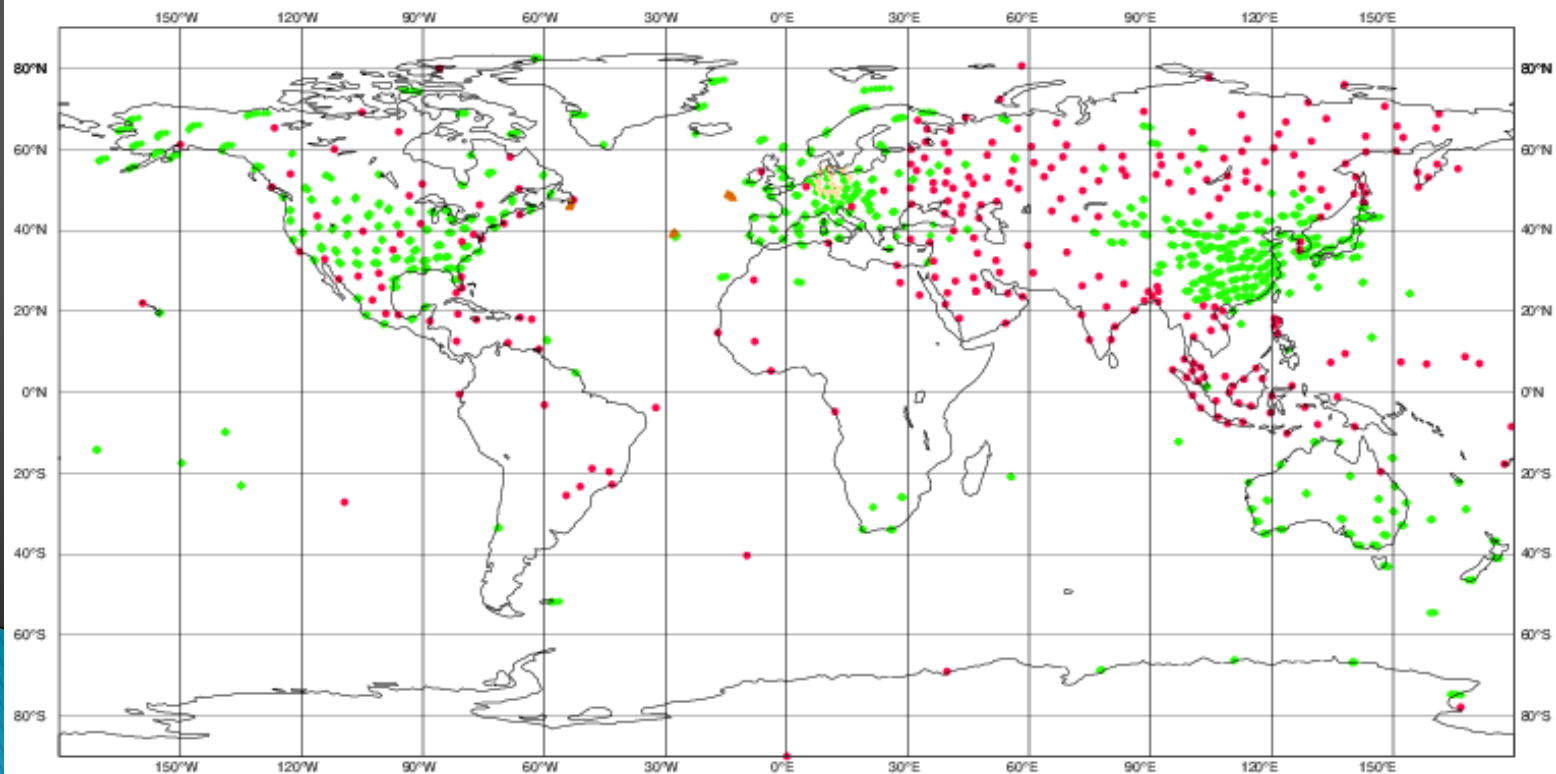
# Ilustrace rozložení aerologických stanic

ECMWF data coverage (used observations) - RADIOSONDE

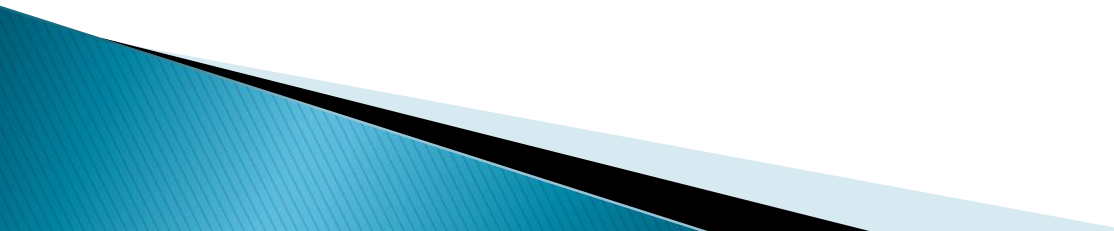
03/12/2020 00

Total number of obs = 641

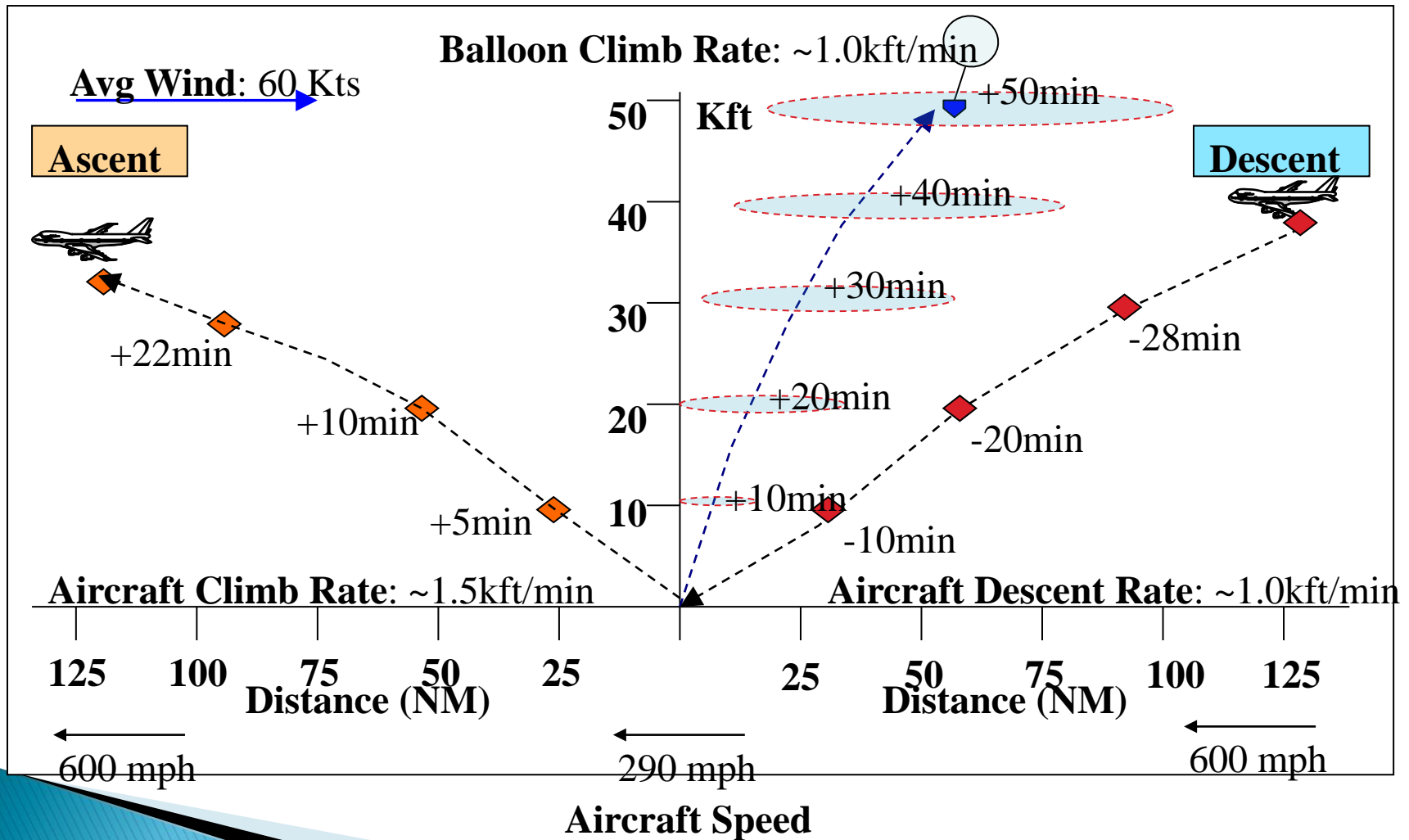
● Land TEMP (271)    ◆ High Reso land (356)    ▲ High Reso sea (3)    ▼ BUFR TEMP DESCENT (11)



# Další zdroje přímo měřených meteorologických údajů

- ▶ Účelové stanice dalších organizací (problémy s kvalitou dat)
  - ▶ Údaje z letadel (zprávy AMDAR – Aircraft Meteorological DATA and Reporting)
- 

# AMDAR vs. balonové sondáže

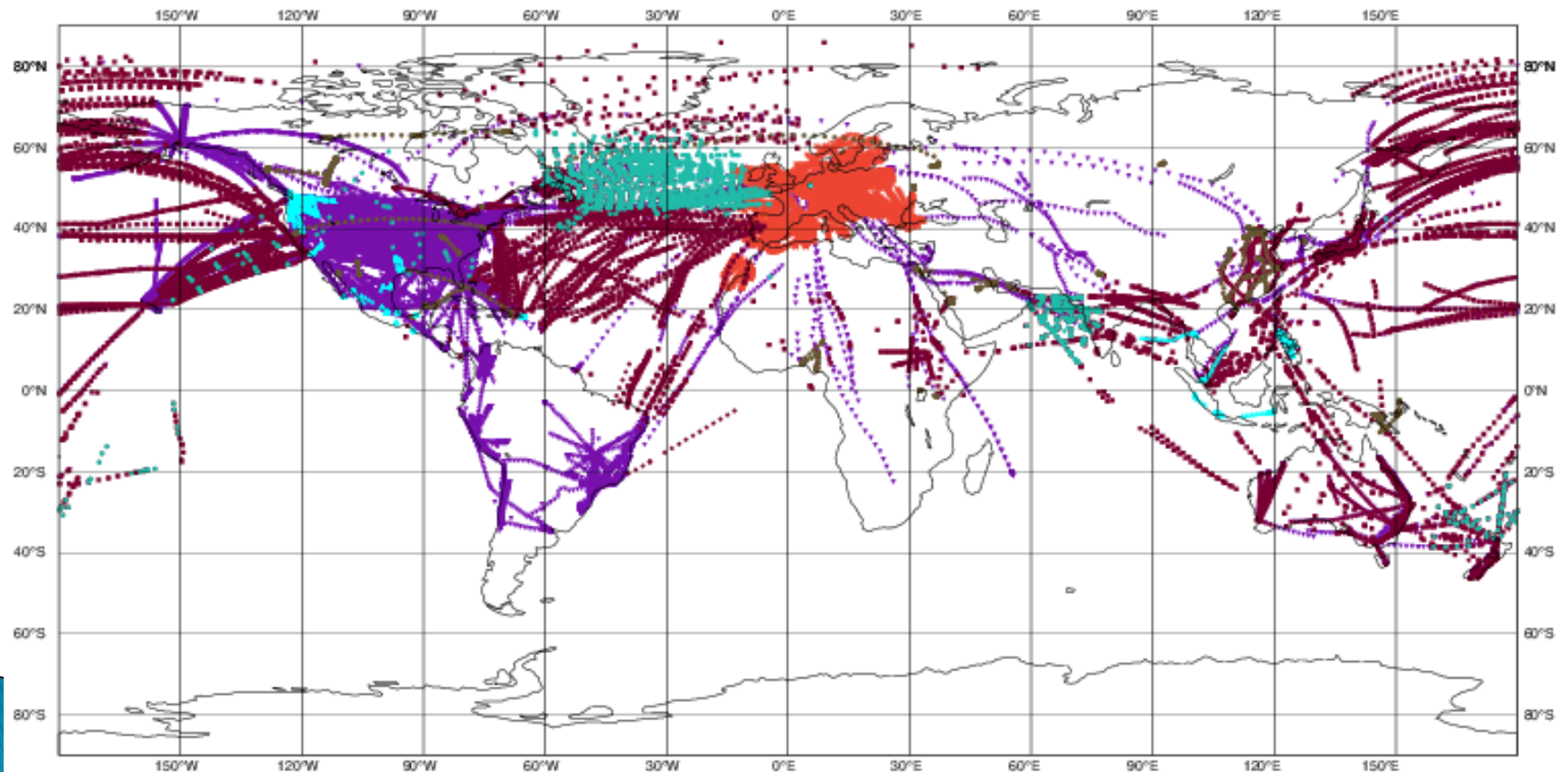


# Data z letadel (AMDAR)

ECMWF data coverage (used observations) - AIRCRAFT

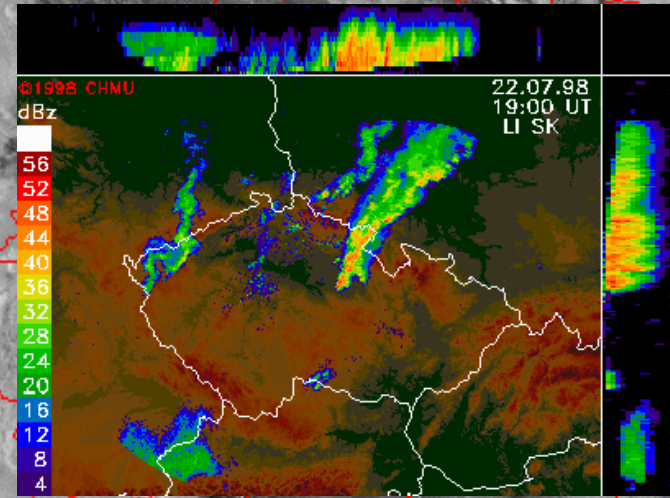
03/12/2020 00

Total number of obs = 162413



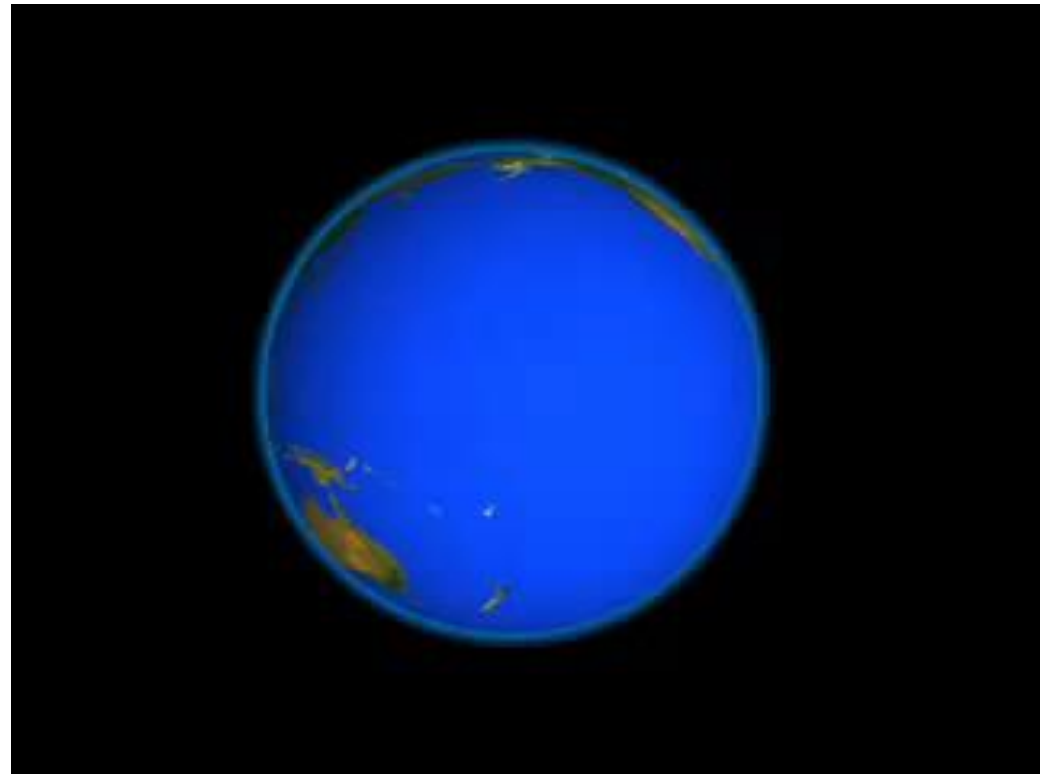
# Podklady pro tvorbu předpovědi počasí (pokrač.)

3) Informace získané metodami dálkové detekce (meteorologické družice, meteorologické radary)



# Metody dálkové detekce

- ▶ meteorologické družice
- ▶ meteorologické radary
- ▶ sodary, lidary



# Geostacionární meteorologické družice



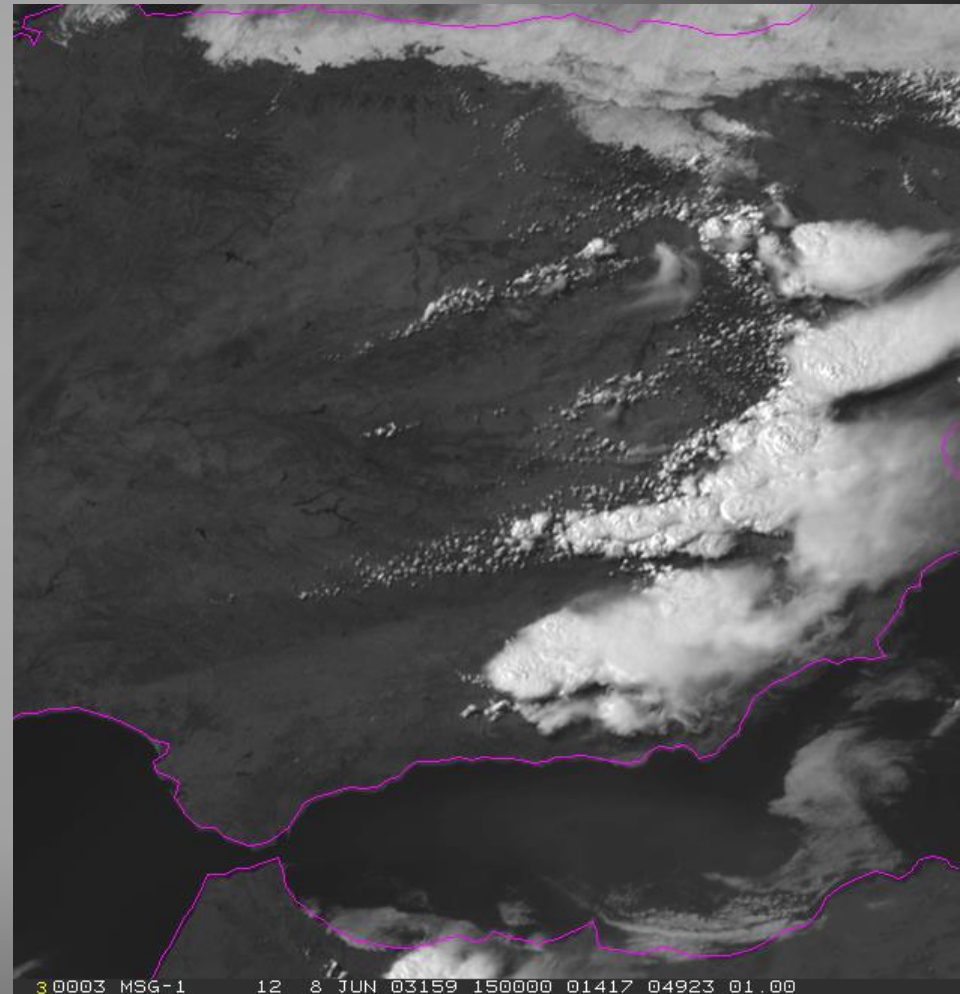
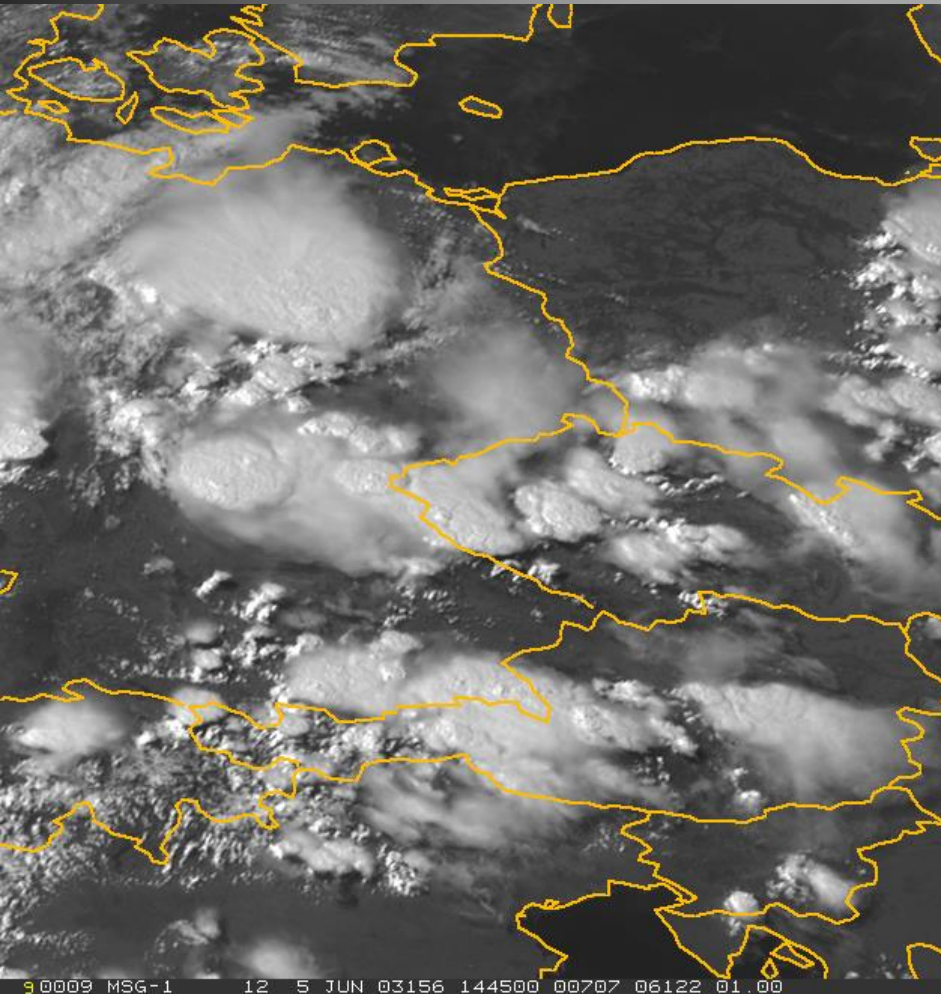
- METEOSAT 8 (od r. 2003;  $41.5^{\circ}$  E )
- METEOSAT 9 (od r. 2006;  $3.5^{\circ}$  E)
- METEOSAT 10 (od r. 2012,  $9.0^{\circ}$  E)
- METEOSAT 11 (od r. 2015,  $0^{\circ}$ )

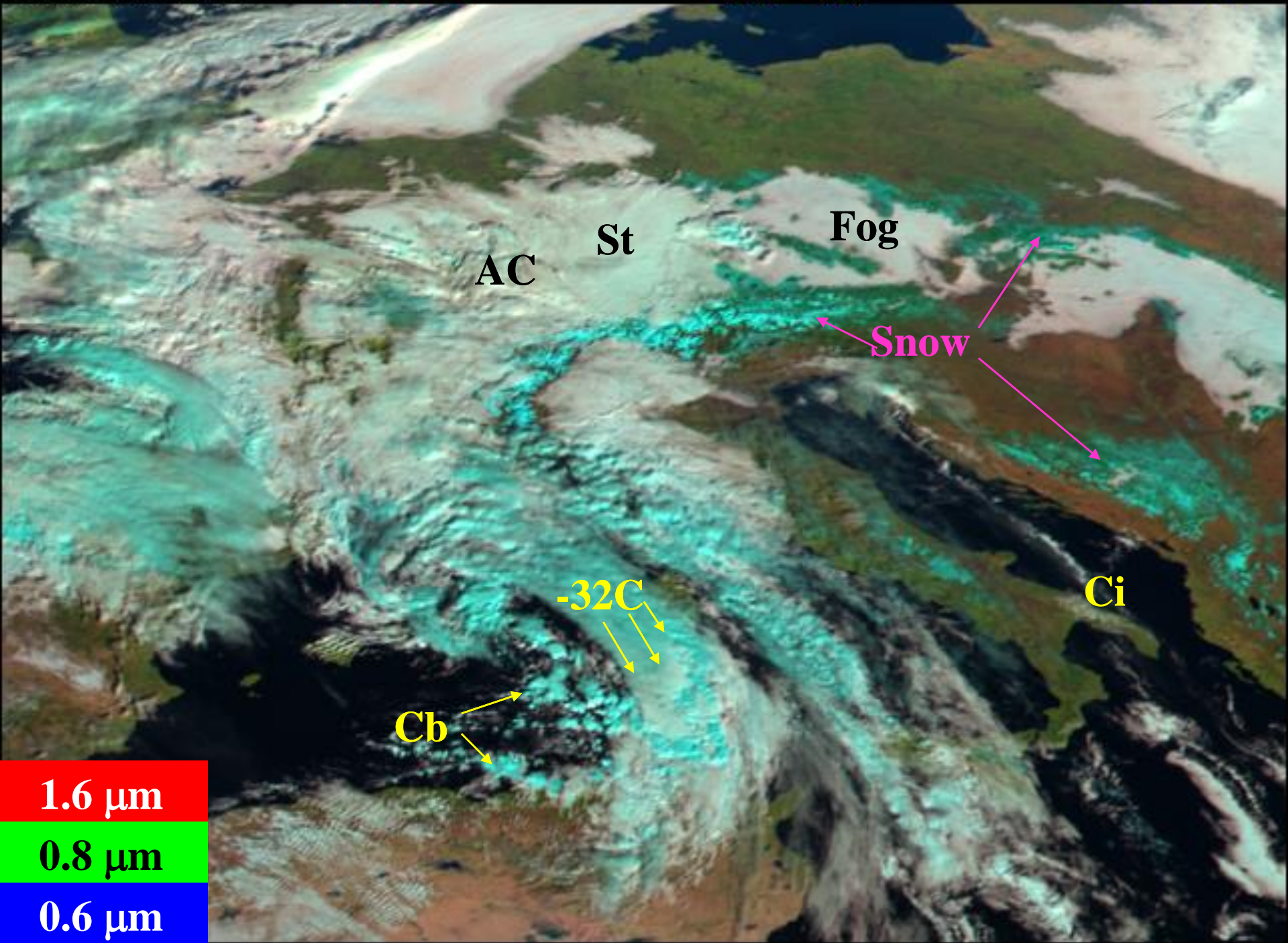


# Kanály MSG

- ▶ Viditelná ( a blízká infračervená) část spektra (Visible, VIS)
  - HRV (high resolution visible):
  - VIS 0.6
  - VIS 0.8
  - IR 1.6
- ▶ Spektrum pro odhad obsahu vodní páry (Water Vapour – WV)
  - WV 6.2
  - WV 7.3
- ▶ Infračervená atmosférická okna (IR Window)
  - IR 3.8
  - IR 8.7
  - IR 10.8
  - IR 12.0
- ▶ Pseudo sondáže atmosféry (Pseudo Sounding)
  - IR 9.7
  - IR 13.4

# High Resolution Visible





AC

St

Fog

Snow

-32C

Cb

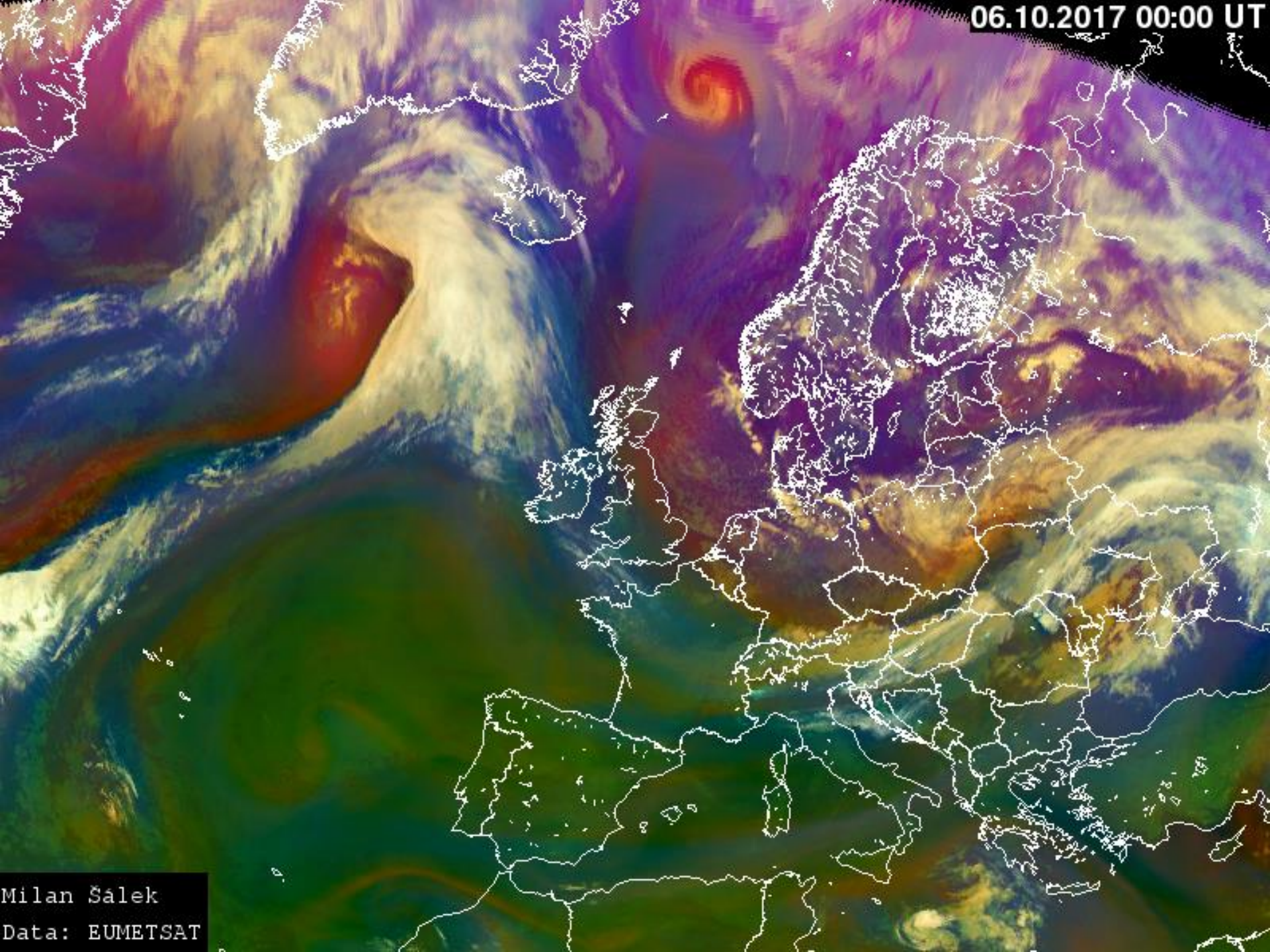
Ci

1.6 μm

0.8 μm

0.6 μm

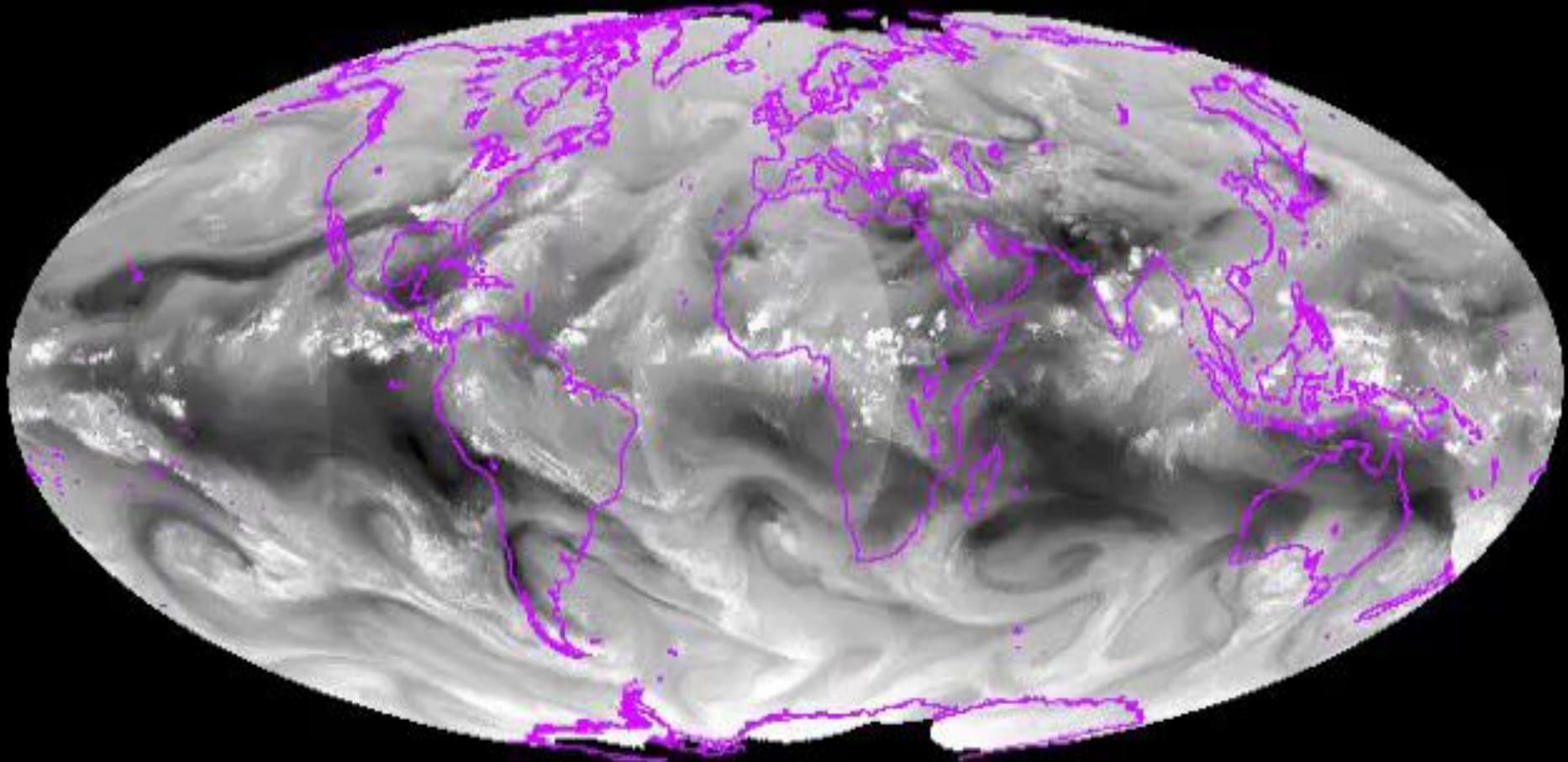
06.10.2017 00:00 UT



Milan Šalek  
Data: EUMETSAT

# Sloučení měření více geostacionárních družic

WATERVAPOR COMPOSITE FROM 11 JUN 09 AT 15:00 UTC (SSEC:UW-MADISON)



1

2009162 150000

McIDAS

# Družice NOAA s polární drahou (800 km nad povrchem)

## 1. kanál

0.58 - 0.68 mikrometru

červená oblast spektra

## 2. kanál

0.725 - 1.1 mikrometru

blízké infračervené záření

## 3. kanál

3.55 - 3.93 mikrometru

tepelné záření

## 4. kanál

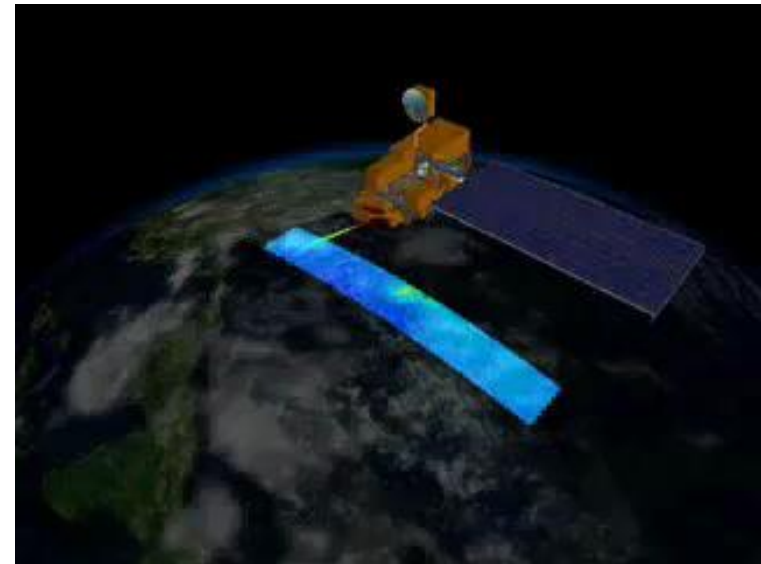
10.3 - 11.3 mikrometru

tepelné záření

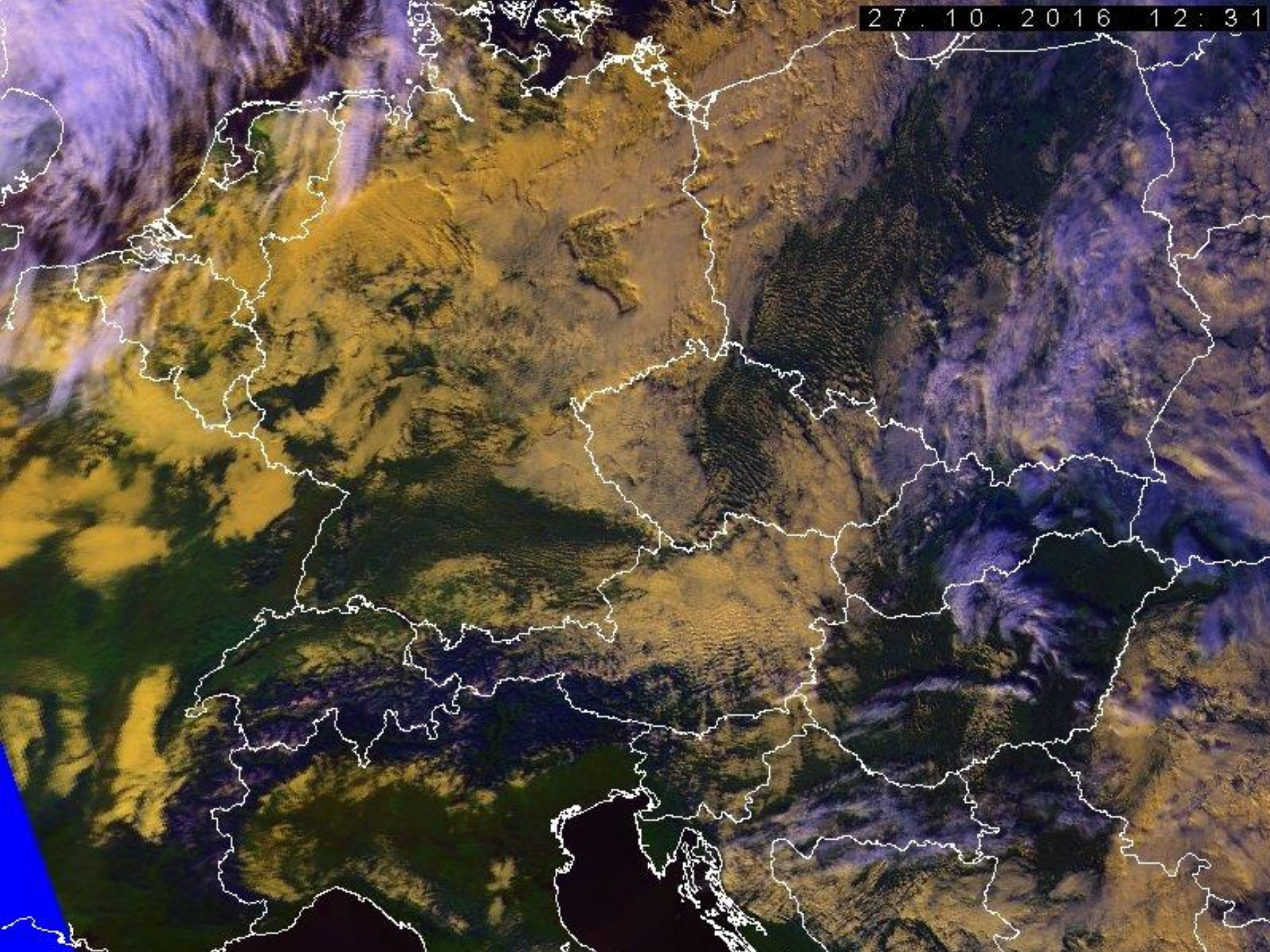
## 5. kanál

11.5 - 12.5 mikrometru

tepelné záření

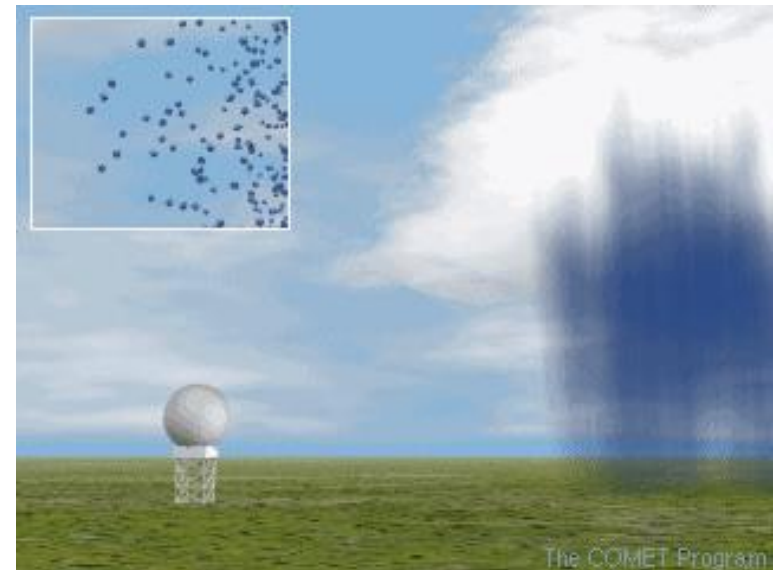


27.10.2016 12:31



# Meteorologický radar

- je zařízení, které vyzařuje směrovou anténou elektromagnetickou energii v krátkých časových pulsech do určité oblasti, přičemž objekty, ležící v dráze radarového paprsku, určitou část energie odrazí zpět. Ze zpoždění přijatého signálu oproti vyslanému a z množství přijaté energie lze získat informaci o poloze a vlastnostech objektu, případně o jeho pohybu.
- více typů meteorologických radarů rozličných vlastností





# Radiolokační odrazivost

Radiolokační odrazivost  $z$  lze vypočítat podle radarové rovnice (ve zjednodušeném tvaru) :

$$P_r = \Pi_M \cdot \frac{z}{r^2}$$

kde :

$P_r$  – přijatý výkon,

$\Pi_M$  – radarová „konstanta“ (meteorologický potenciál radaru),

$r$  – vzdálenost cíle.

# Dopplerovské radary

- ▶ Dopplerův efekt: využití Dopplerova efektu pro zjištění **radiální** složky rychlosti větru (tedy v jednom směru – od radaru, k radaru)
- ▶ využití: zjištění pohybu, případně rotace oblačnosti, eliminace odrazů od pozemních cílů

# Odhady srážek z meteorologických radarů

Z odrazivosti meteorologického cíle  $z$  lze vypočítat intenzitu srážek  $R$  [mm/h] tzv. Marshall-Palmerovým vztahem:

$$z = a \cdot R^b$$

hodnoty  $a$ ,  $b$  jsou vhodně zvolené konstanty, které se mohou lišit v závislosti na předpokládaném rozdělení velikosti kapek. Pro naše podmínky byly zvoleny  $a=200$ ,  $b=1,6$ .

# Radarová síť v České republice

(dle [http://www.chmi.cz/meteo/rad/rad\\_main.html](http://www.chmi.cz/meteo/rad/rad_main.html))

- ▶ Brdy EEC DSWR–2501 C
- ▶ Skalky (Drahanská vrchovina): Gematronik Meteor 360 AC
- ▶ (do roku 2000): Praha–Libuš: MRL–5
  - *Oba radary dopplerovské a od roku 2015 polarimetrické (měří různé parametry na horizontální a vertikální polarizaci)*

# **RADAR Brdy**

**V provozu od r. 2000**

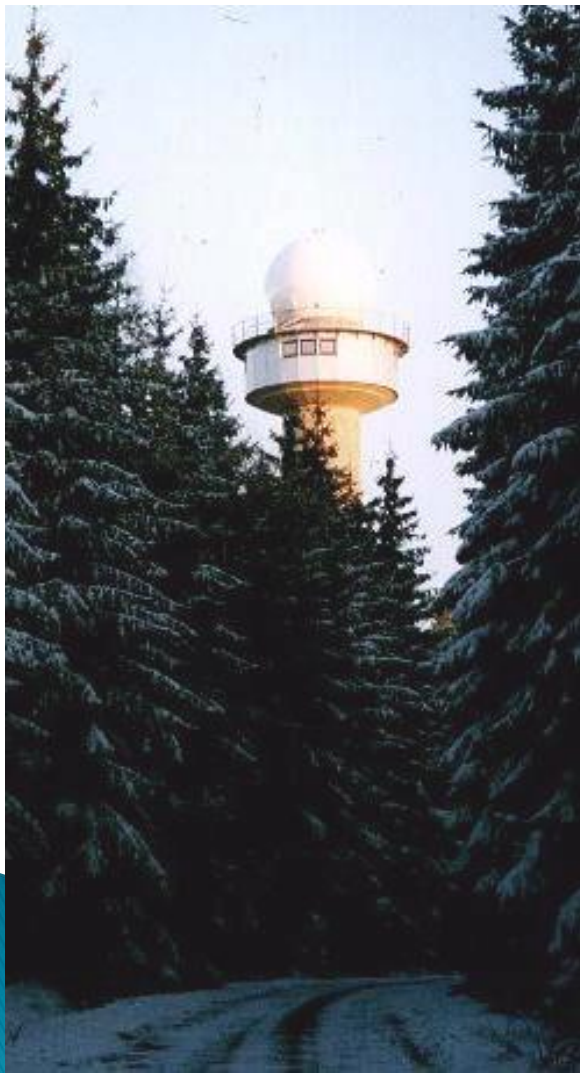
**(postupně modernizace)**



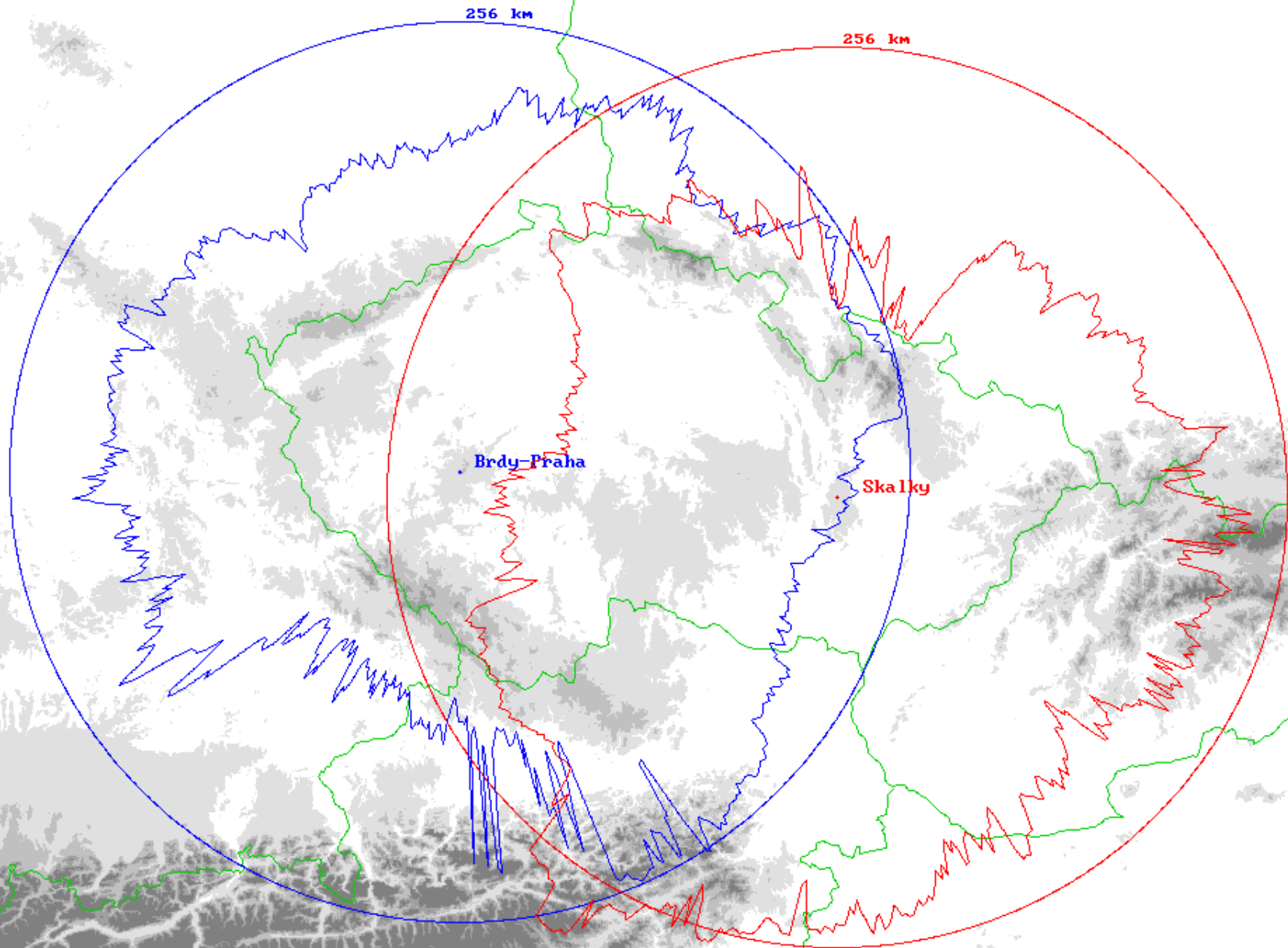
<b>Stanoviště</b>	<b>Brdy-Praha</b>
<b>Oblast</b>	<b>střední Čechy</b>
<b>WMO indikativ</b>	<b>11480</b>
<b>Typ radaru</b>	<b>EEC DWSR-2501 C</b>
<b>Zeměpisná šířka</b>	<b>49,658 N</b>
<b>Zeměpisná délka</b>	<b>13,818 E</b>
<b>Nadmoř.výška</b>	<b>860 m</b>
<b>Výška antény n.m.</b>	<b>916 m</b>
<b>Interval měření</b>	<b>5 min.</b>

# **RADAR SKALKY**

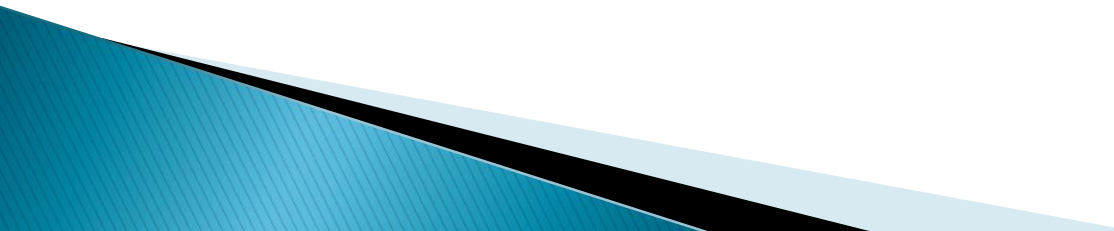
**V provozu od r. 1995  
(postupně modernizace)**



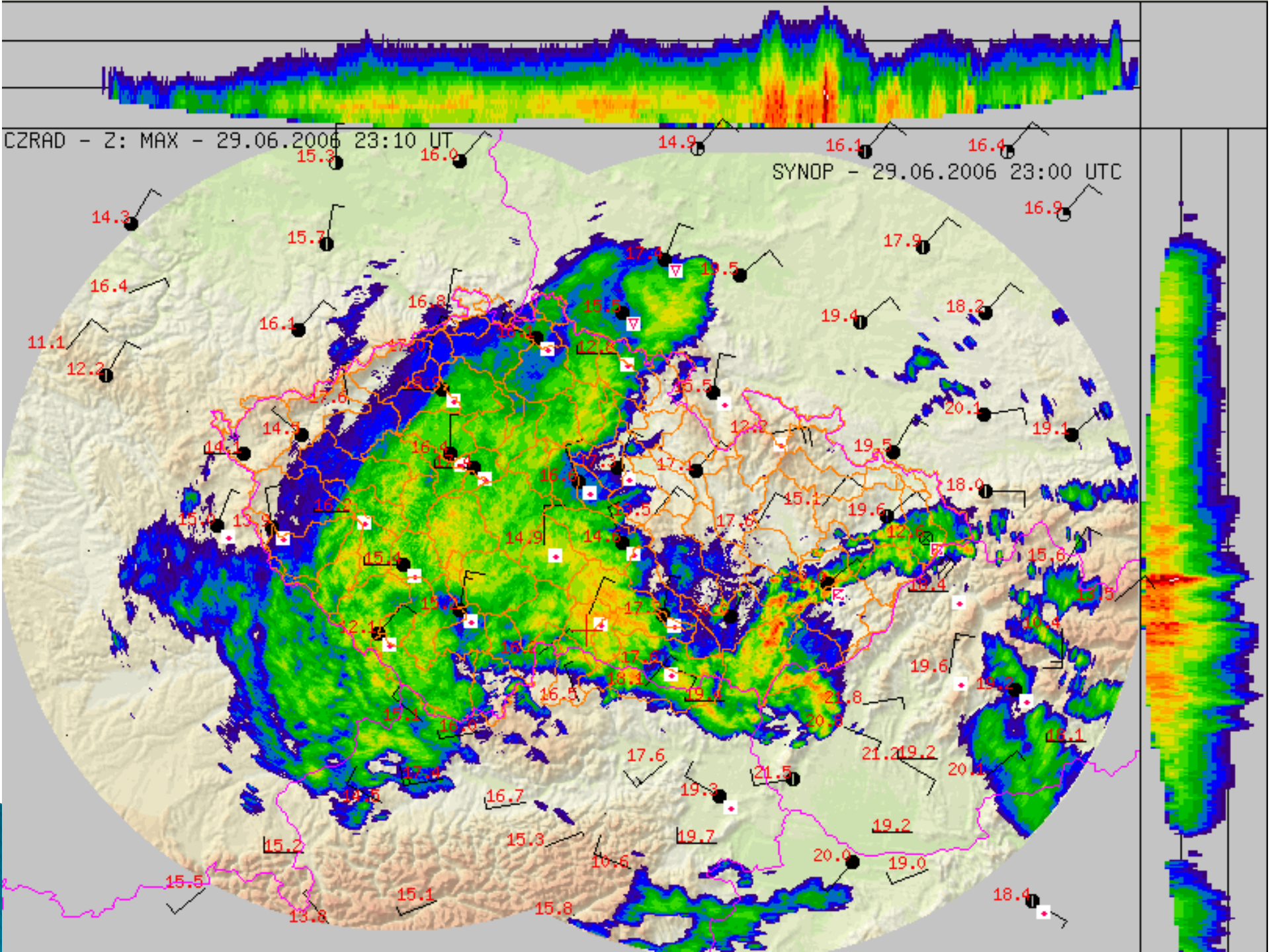
<b>Stanoviště</b>	<b>Skalky u Protivanova</b>
<b>Oblast</b>	<b>střední Morava</b>
<b>WMO indikativ</b>	<b>11718</b>
<b>Typ radaru</b>	<b>Gematronik METEOR 360AC</b>
<b>Zeměpisná šířka</b>	<b>49,501 N</b>
<b>Zeměpisná délka</b>	<b>16,790 E</b>
<b>Nadmoř.výška</b>	<b>730 m</b>
<b>Výška antény n.m.</b>	<b>767 m</b>
<b>Interval měření</b>	<b>5 min.</b>

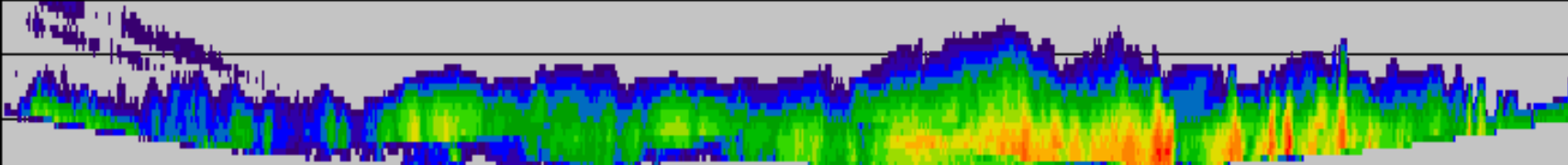


# Použití radarů v meteorologii

- ▶ detekce srážek (oblaků)
  - ▶ zjištění pohybu a vývoje oblačnosti
  - ▶ zjištění struktury oblačnosti
  - ▶ měření větru
  - ▶ velmi krátkodobá předpověď
  - ▶ odhady množství srážek
- 

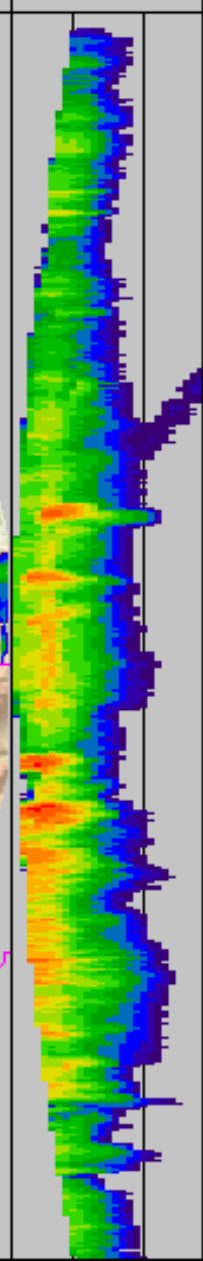
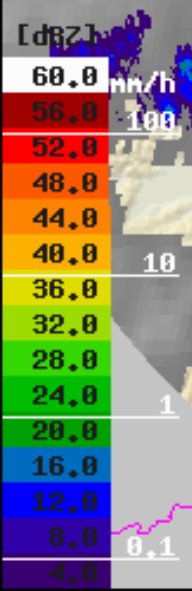
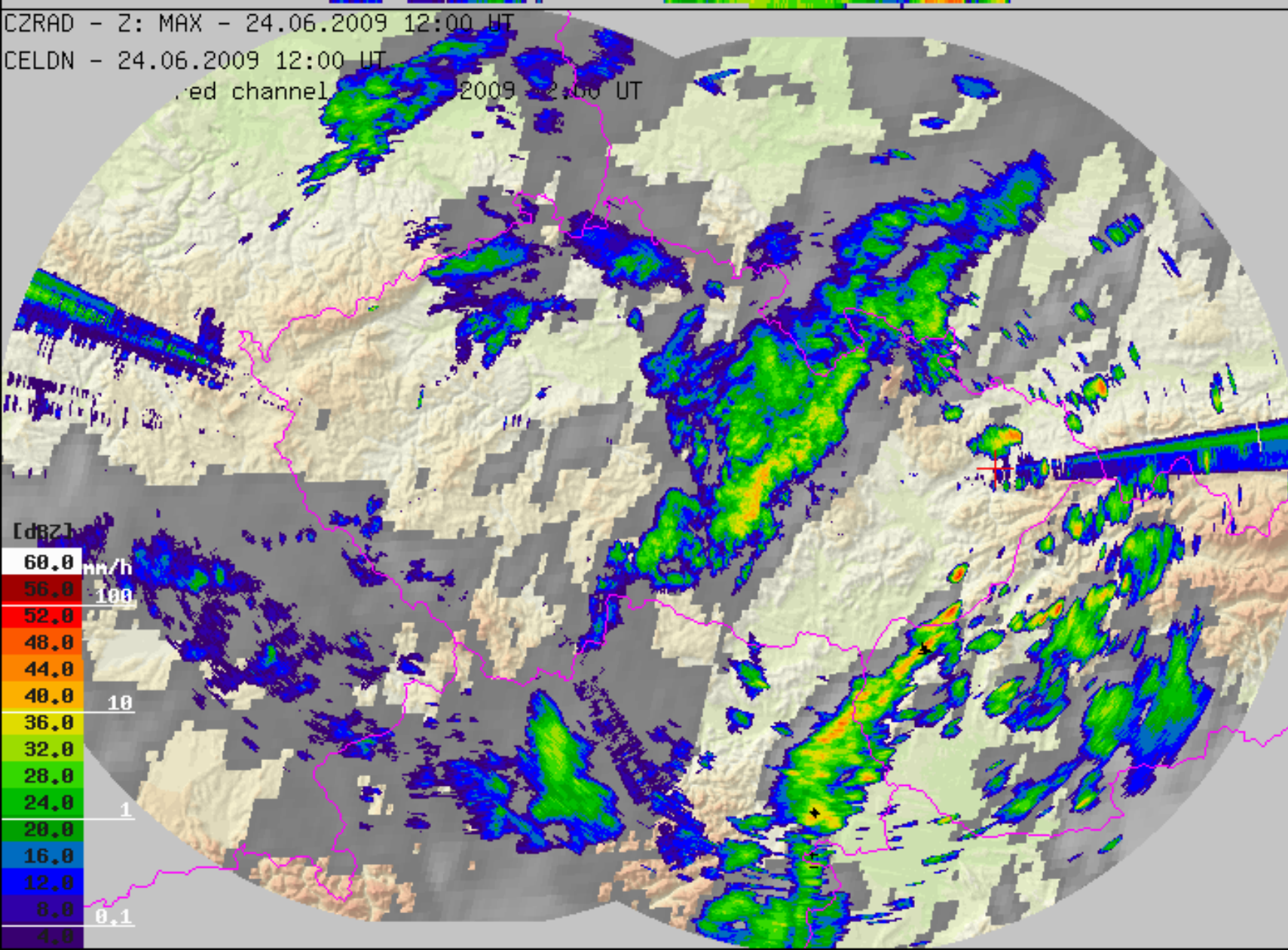






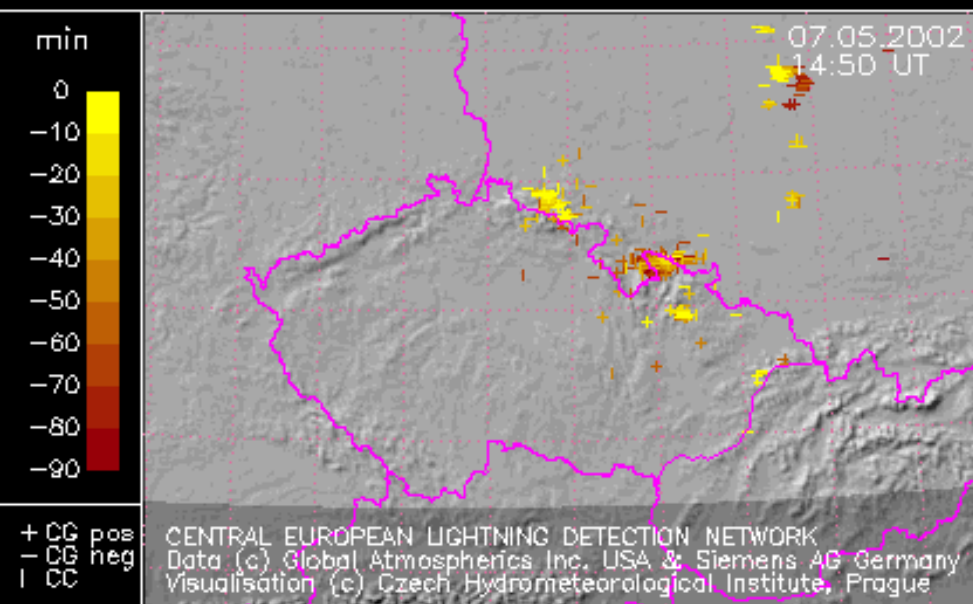
CG+	3
CG-	5
CC	3
SUM	11

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



LIGHTNING STROKES:  $\Sigma$  838, CG+ 4.1%, CG- 78.6%, CC 17.3%

Last data connection: 07.05.2002 14:52 UT



# Metody detekce blesků

Aktuální data viz např.

<http://www.lightningmaps.org>

- ▶ Pomocí vhodně rozmístěných detekčních čidel se zachycuje elektromagnetické záření, které se vyzařuje při bleskovém výboji
- ▶ Čidla určí směr, ve kterém došlo k výboji, nebo dobu zachycení signálu synchronizovanou pomocí GPS. Informace z čidel jsou v reálném čase zasílány do zpracovatelského počítače, který je vyhodnotí a určí, zda šlo o blesk, a pokud ano, kde se vyskytl. Většinou je možno určit i typ blesku (mrak–mrak, mrak–země), polaritu a velikost elektrického proudu ve výboji.

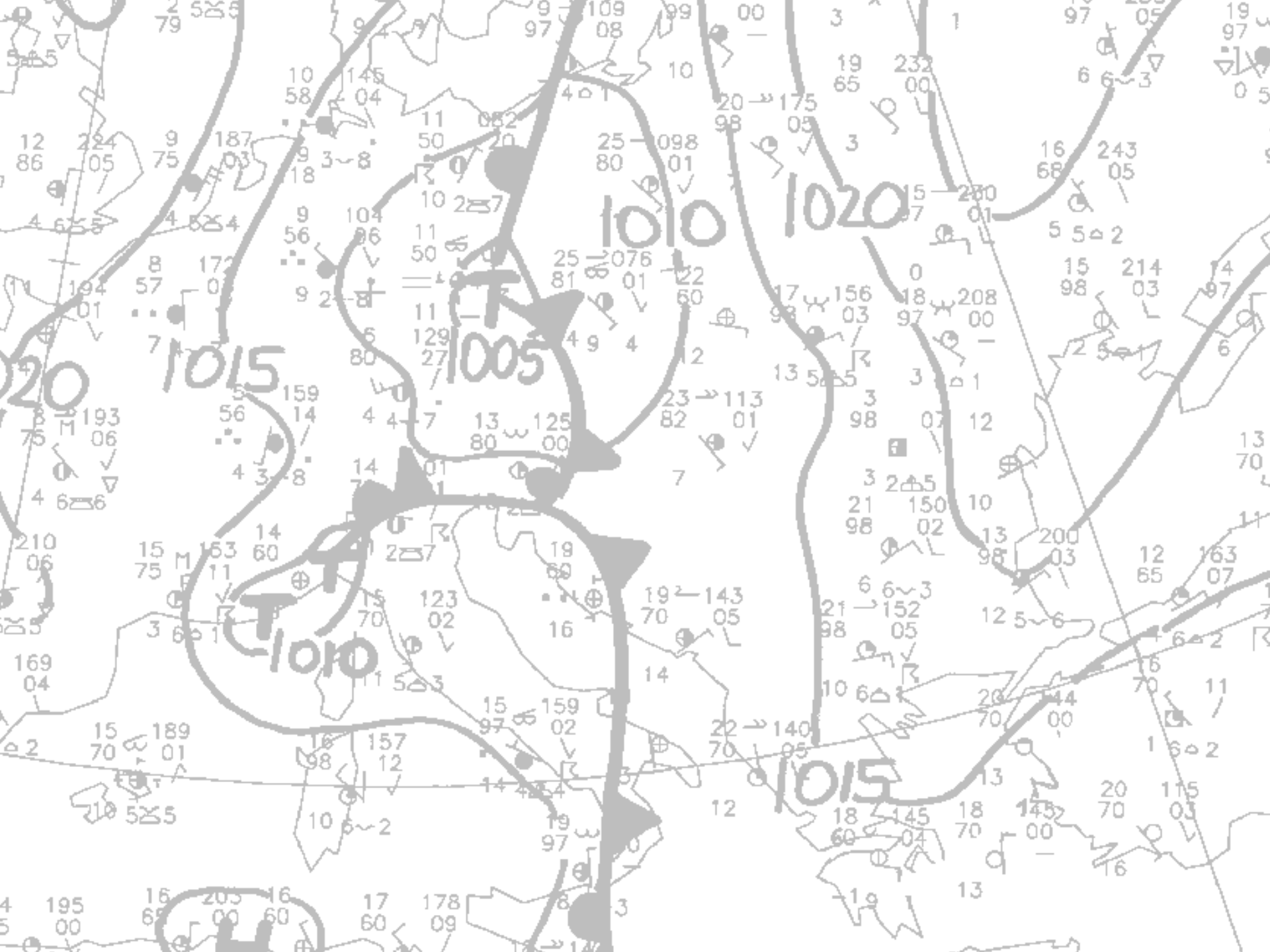
# Metody předpovědi počasí

## 1) Norská (bergenská) škola

- rozvíjená především v první polovině 20. století.

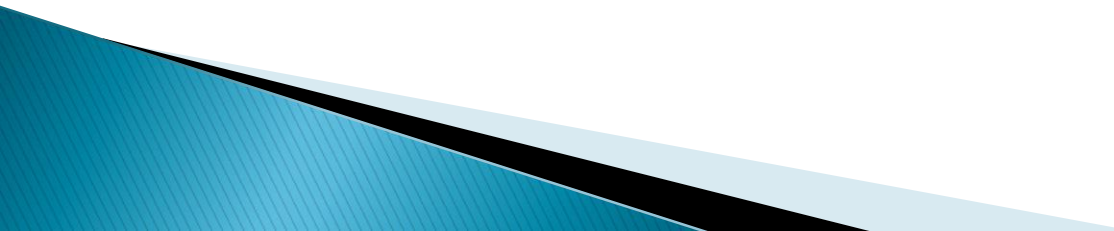
- založená na teoretickém rozpracování termodynamiky a hydrodynamiky (aerodynamiky) vzduchových hmot, atmosférických front, tlakových níží a výší a všeobecné cirkulace atmosféry

- v současnosti je tato škola téměř zcela nahrazena **numerickým modelováním**.



# Metody předpovědi počasí

## 2) Numerické modelování (NWP – Numerical Weather Prediction)

- klíčová součást nynější tvorby předpovědi počasí
  - umožněno pokrokem ve výpočetní a telekomunikační technice
  - podnítilo vznik teorie deterministického chaosu
- 

# Metody předpovědi počasí

„Technologická linka “ předpovědi s pomocí numerických modelů:

- 1) Měření stavu atmosféry (600–800 aerologických stanic), zakódování do zpráv BUFR (TEMP) apod., další informace z metod dálkové detekce (především z met. Družic i radarů), z pozemních měření SYNOP/BUFR i z dalších zdrojů (AMDAR)
- 2) Pomocí telekomunikačních linek distribuce údajů po celém světě, zejm. v meteorologických centrech (Offenbach, Reading, NOAA/NCEP atd.)

# Metody předpovědi počasí

**„Technologická linka “ předpovědi s pomocí numerických modelů (pokrač.):**

3) Výpočet budoucího stavu atmosféry v centrech pomocí NWP modelů na (super)počítačích

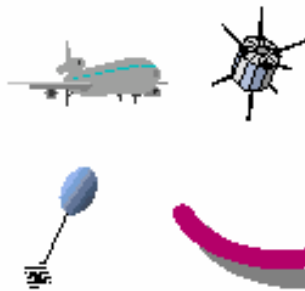
4) Rozesílání předpovědí prostřednictvím telekomunikačních linek

5) Zpracování těchto dat pomocí „malé“ výpočetní techniky (PC, popř. prac. stanice UNIX, v graf. podobě i mobilní telefony, tablety)

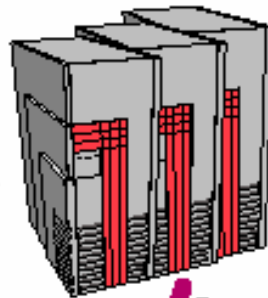


# Schéma technologické linky předpovědi počasí

OBSERVATIONS



NUMERICAL MODEL



CUSTOMERS



HUMAN FORECASTER



# Historie NWP modelů

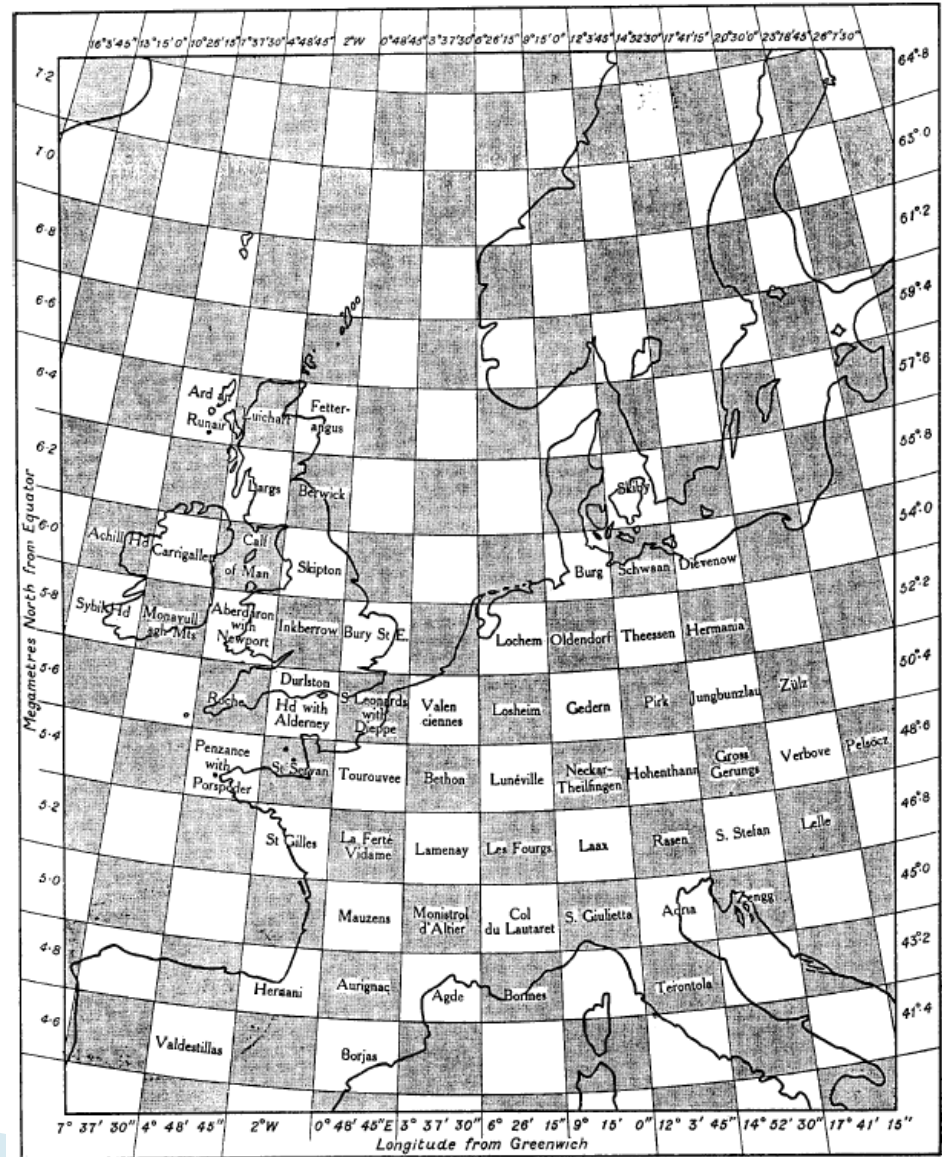
- ▶ 1901 Cleveland Abbe (USA), 1904 Vilhelm Bjerknes (Norsko) navrhli možnost řešit hydrodynamické a termodynamické rovnice a vytvořit objektivní předpověď.
- ▶ 1922 Lewis F. Richardson provedl první výpočet budoucího stavu atmosféry. Zjednodušené rovnice vývoje atmosféry řešil numericky metodou grafické integrace, ale dopustil se při tom porušení důležitého pravidla mezi vzdáleností sousedních uzlů a časovým krokem integrace, čímž se výsledky lišily od skutečnosti o řády. Uvedený neúspěch na čas ochladil zájem meteorologů o tyto metody.

# Historie NWP modelů (pokrač.)

Rozvoj NWP modelů nastal až s vývojem prvních počítačů na sklonku 40. a počátku 50. let (J. von Neumann, J. Charney, C.G. Rossby, H. Panofsky) – nejdříve barotropní model (kde hustota závisí pouze na tlaku), poté baroklinní modely (hustota závislá na tlaku i teplotě). Dnes se v NWP modelech používají základní (nespr. „primitivní“) rovnice.

# První pokus o početní (numerickou) předpověď počasí

► Lewis Fry Richardson



Richardsonův amfiteátr: 64000 '(lidských) počítačů', komunikace pomocí světelného paprsku, řídicí pult



# Richardsonův amfiteátr

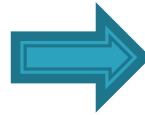
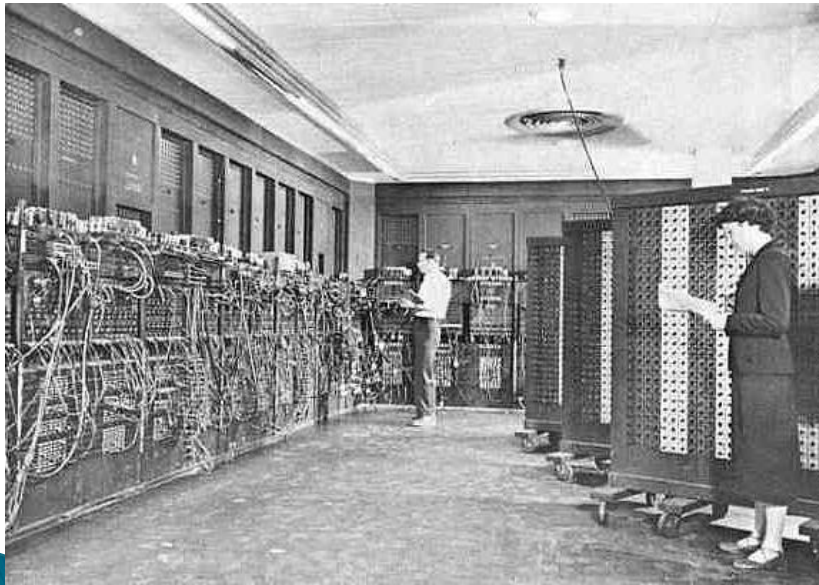
(zprac. podle R. Brožkové, ČHMÚ)

- ▶ Čtyři zkušení pracovníci řídicího pultu shromažďují předpověď počasí tak rychle, jak je počítána, a posílají jí potrubní poštou do speciální místnosti. Tady bude kódována a telefonována na rádiovou vysílací stanici (*výpočetní svita, prognóza, média, ...*)
- ▶ Papíry s výpočty budou uschovány ve sklepních prostorách (*archív*).
- ▶ V sousední budově bude oddělení výzkumu, kde se budou vymýšlet zlepšení systému. Ale než jakákoliv změna bude udělána v komplexní rutině výpočetního amfiteátru, bude muset být podrobena řadě experimentů (*paralelní testy*).
- ▶ Venku budou hřiště, domy, hory a jezera, protože bylo myšleno na ty, kteří předpovídají počasí, aby si jej mohli užívat plnými doušky.



# Uskutečnění digitálního snu ...

- ▶ Rozvoj numerického modelování od experimentů z 50. let do až do dnešní podoby rutinního používání numerických modelů



# Historie NWP modelů (pokrač.)

## Vývoj v ČR:

MF UK, prof. Brandejs, 50. léta

- ▶ První studie týkající se problematiky numerického modelování (Kibelův model, Sutcliffova vývojová teorie atd.)
- ▶ Na konci 50. a během 60. let první pokusy o rutinní výpočty
- ▶ Problém: omezenost výpočetní techniky (Ural 1 ...)
- ▶ V 70–80. letech zastavení výpočtů
- ▶ Na konci 80. let jejich obnovení – model ČHMÚ
- ▶ Na počátku 90. let se ČSFR a později ČR aktivně zúčastnila vývoje moderního numerického modelu ALADIN.



# Numerické modelování

## Objektivní analýza, asimilace dat

- jako tzv. předběžné pole se používá výstup z předchozího běhu modelu (obvykle výstup 6h, případně 12h starý), do kterého se matematickými technikami zavádějí nově naměřené hodnoty a pole meteorologických veličin se tímto opravuje.
- moderní trend: asimilace dat i mimo standardní pozorovací termíny (např. z letadel, družic s polární drahou atd.)

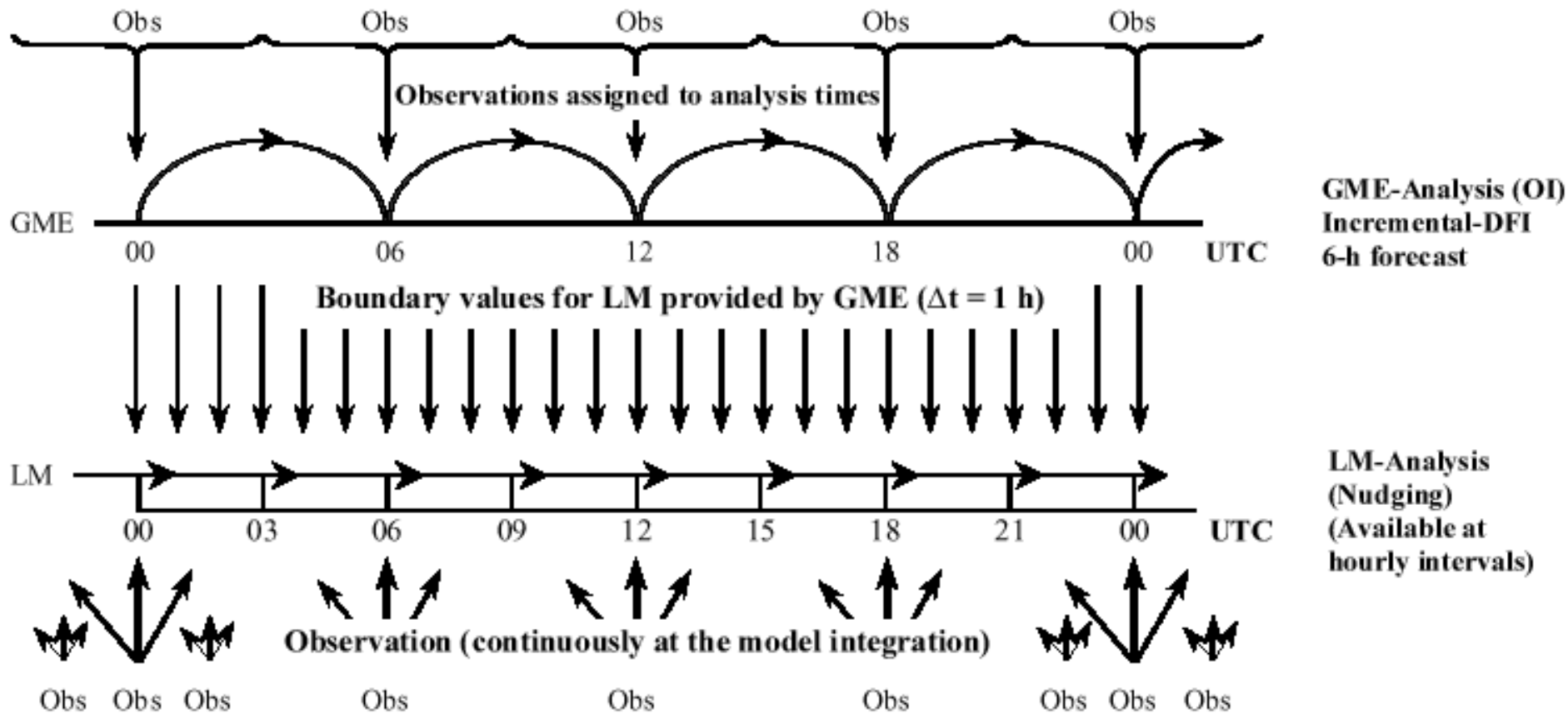


Fig. 5.1 4 dim data assimilation for GME and LM

# Výpočet předpovědi – základní rovnice

**Pohybové rovnice (rovnice impulsu, dynamická část modelu):**

$$\frac{d\vec{v}}{dt} + 2\vec{\Omega} \times \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{g} + \vec{F}$$

$\vec{v}$  - vektor větru

$\vec{g}$  - gravitační zrychlení Země

$\vec{\Omega}$  - úhlová rychlost rotace Země

$\vec{F}$  - síla tření (včetně vnitřního tření)



$p$  - tlak vzduchu

$\rho$  - hustota vzduchu

# Základní rovnice – pokr.

## Rovnice kontinuity

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\partial\rho}{\partial t} + \vec{v}\nabla\rho = -\rho\nabla\vec{v}$$

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + u\frac{\partial\rho}{\partial x} + v\frac{\partial\rho}{\partial y} + w\frac{\partial\rho}{\partial z} = \frac{d\rho}{dt} = \rho\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}\right)$$

# Základní rovnice – pokr.

První věta termodynamická,  
přepsaná do následujícího tvaru:

$$c_p \frac{dT}{dt} = \alpha \omega + F_T$$

T - teplota vzduchu [K]

$C_p$  - měrné teplo při konstantním tlaku

$\omega = \frac{dp}{dt}$  - generalizovaná vertikální rychlost

$\alpha$  - měrný objem vzduchu

$F_T$  - dodaná tepelná energie

# Základní rovnice – pokr.

Stavová rovnice:

$$p\alpha = RT$$

$R = 287 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$  - plynová konstanta pro suchý vzduch.

Rovnice bilance vodní páry (rovnice kontinuity vodní páry):

$$\frac{dQ}{dt} = F_Q$$

Q - směšovací poměr

(hmotnost vodní páry / hmotnost suchého vzduchu)

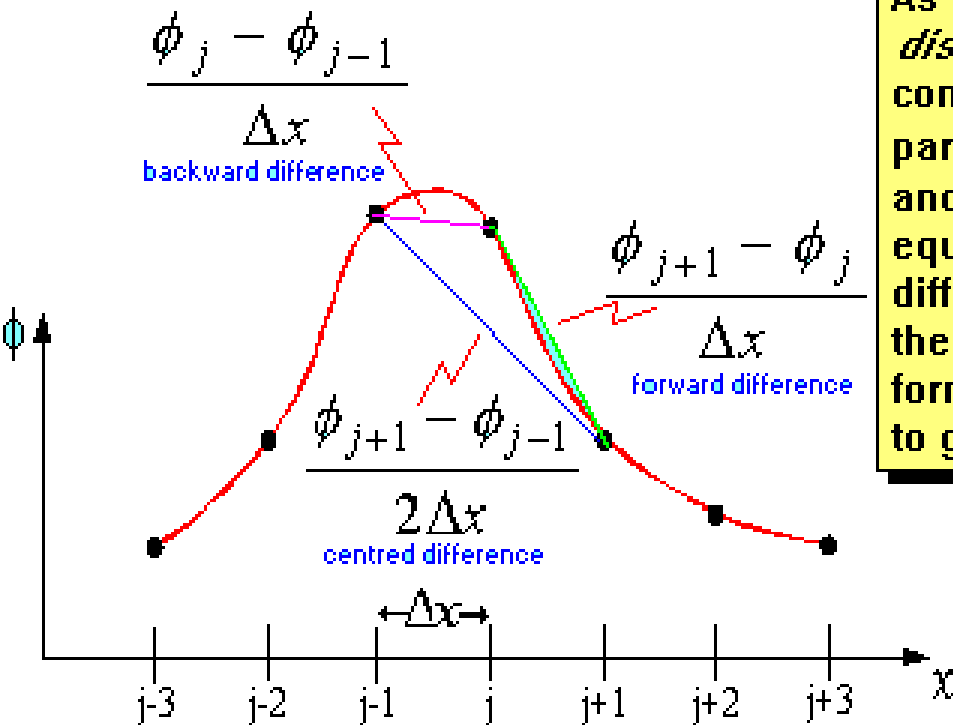
$F_Q$ - změna množství vodní páry způsobená výparem nebo kondenzací vody.

# Integrace základních rovnic

- ▶ pouze numericky:
  - 1) metodou konečných diferencí
  - 2) spektrálními metodami

# Metoda konečných diferencí

Meteorologické veličiny a jejich změny (derivace) v prostoru jsou vyjádřeny konečnými rozdíly:



As a first step in the numerical representation, or *discretization*, of the linear advection equation, consider the geometrical representation of a parameter  $\phi$  varying in the  $x$  direction (red curve) and grid point values (black dots).  $\partial\phi/\partial x$  is equal to the slope of the red line, whilst finite difference estimates are given by the slopes of the straight lines marked and given by the formulae below. Click on the formula which seems to give the most accurate estimate of  $\partial\phi/\partial x$ .

Centred differences are generally more accurate than forward or backward differences. Taylor series expansions may be used to investigate the nature of the errors involved in these approximations, and to derive other approximations.



# Spektrální metody

- ▶ proměnné se reprezentují na základě konečného, diskrétního Furierova rozvoje (konečného součtu sinusoid)
- ▶ v současné době převažují nad metodami konečných diferencí

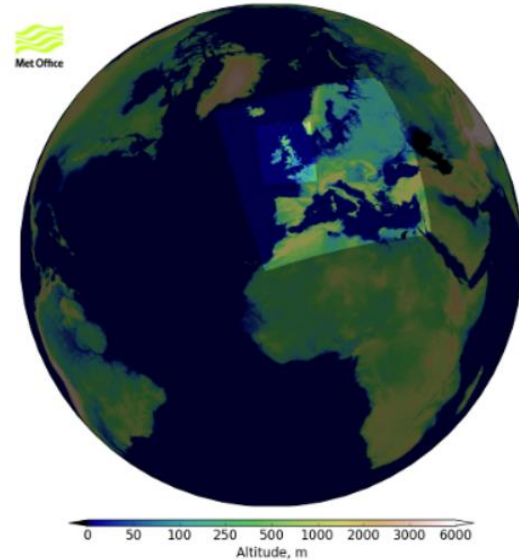
# Globální modely, LAM modely

- ▶ Globální modely
- ▶ Local Area Model – LAM modely, modely na omezené oblasti; okrajové podmínky se přebírají z globálních modelů
- ▶ V současné době jsou typické tyto série modelů: Globální model na cca H+0–168 (240) h, LAM model s jemným rozlišením na H+48 (72) h

# Unified Model UK

## MetOffice

(stav v r. 2016)



### Main Operational Model Configurations

	Global	UKV
Resolution	~17 km in mid-lats	1.5 km inner 4 km outer (EURO4)
model size	1536 x 1152	744 x 928
Model Levels	70	70
Forecast length	144 hrs	36 hrs

# System model Německé povětrnostní služby



## Numerical Weather Prediction at DWD

### Global model GME

Grid spacing: 20 km

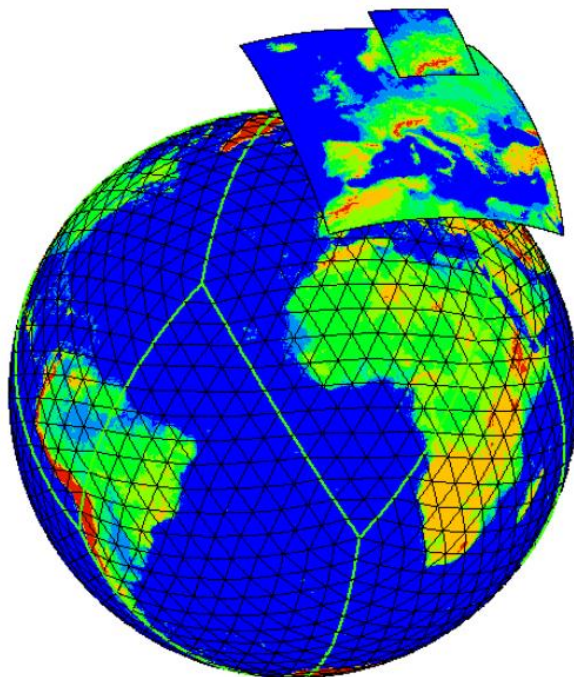
Layers: 60

Forecast range:

174 h at 00 and 12 UTC

48 h at 06 and 18 UTC

1 grid element: 346 km<sup>2</sup>



### COSMO-EU

Grid spacing: 7 km

Layers: 40

Forecast range:

78 h at 00 and 12 UTC

48 h at 06 and 18 UTC

1 grid element: 49 km<sup>2</sup>

### COSMO-DE

Grid spacing: 2.8 km

Layers: 50

Forecast range:

21 h at 00, 03, 06, 09,

12, 15, 18, 21 UTC

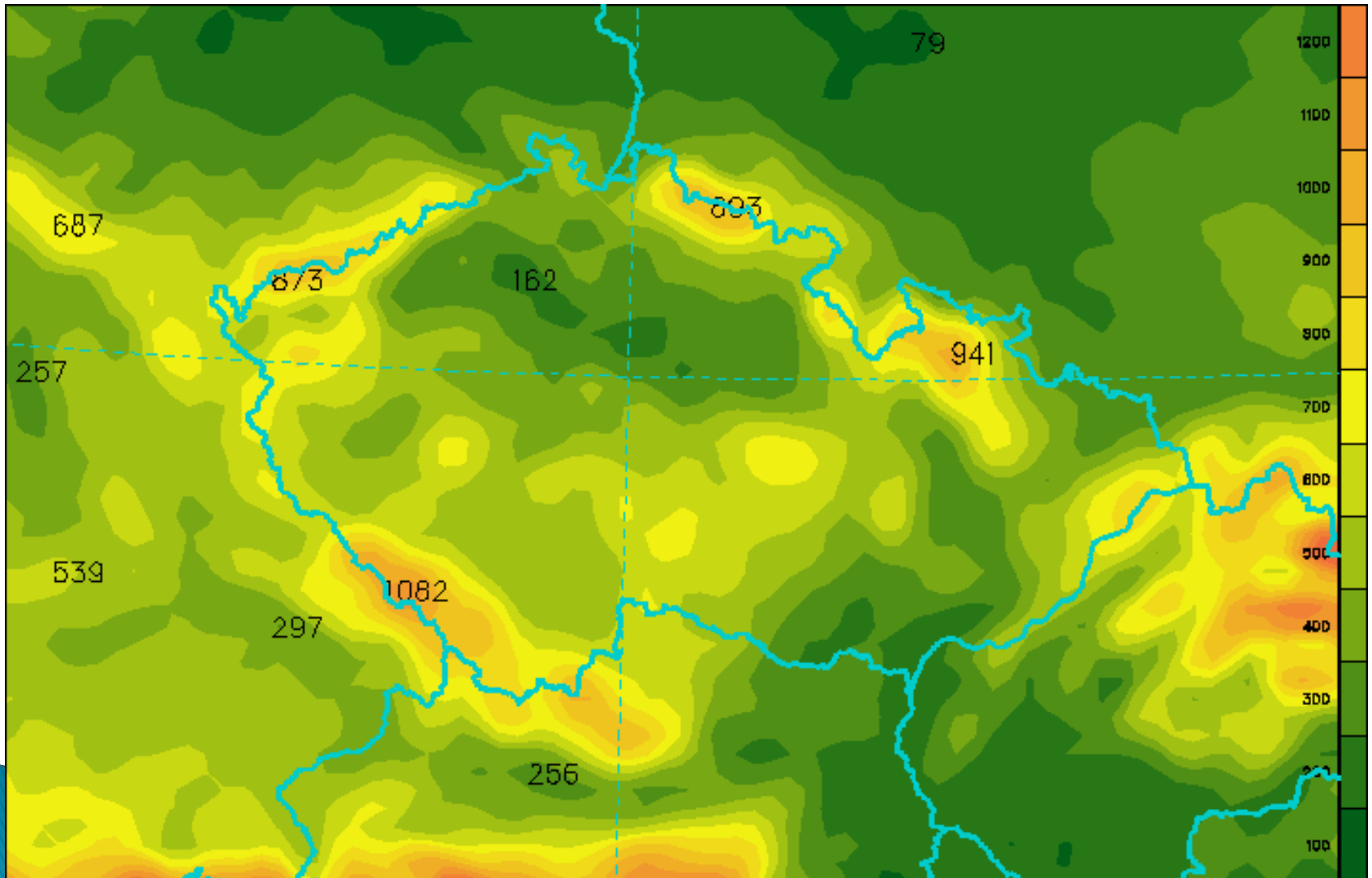
1 grid element: 8 km<sup>2</sup>

# ALADIN

- ▶ Mezinárodním týmem byl pod patronací METEO France vyvinut LAM model ALADIN, který se nyní využívá též Českým hydrometeorologickým ústavem
- ▶ Horizontální rozlišení: 4,7 km (od října 2010 do března 2019)
- ▶ Horizontální rozlišení: 2,3 km (od března 2019)
- ▶ Počet hladin: 87

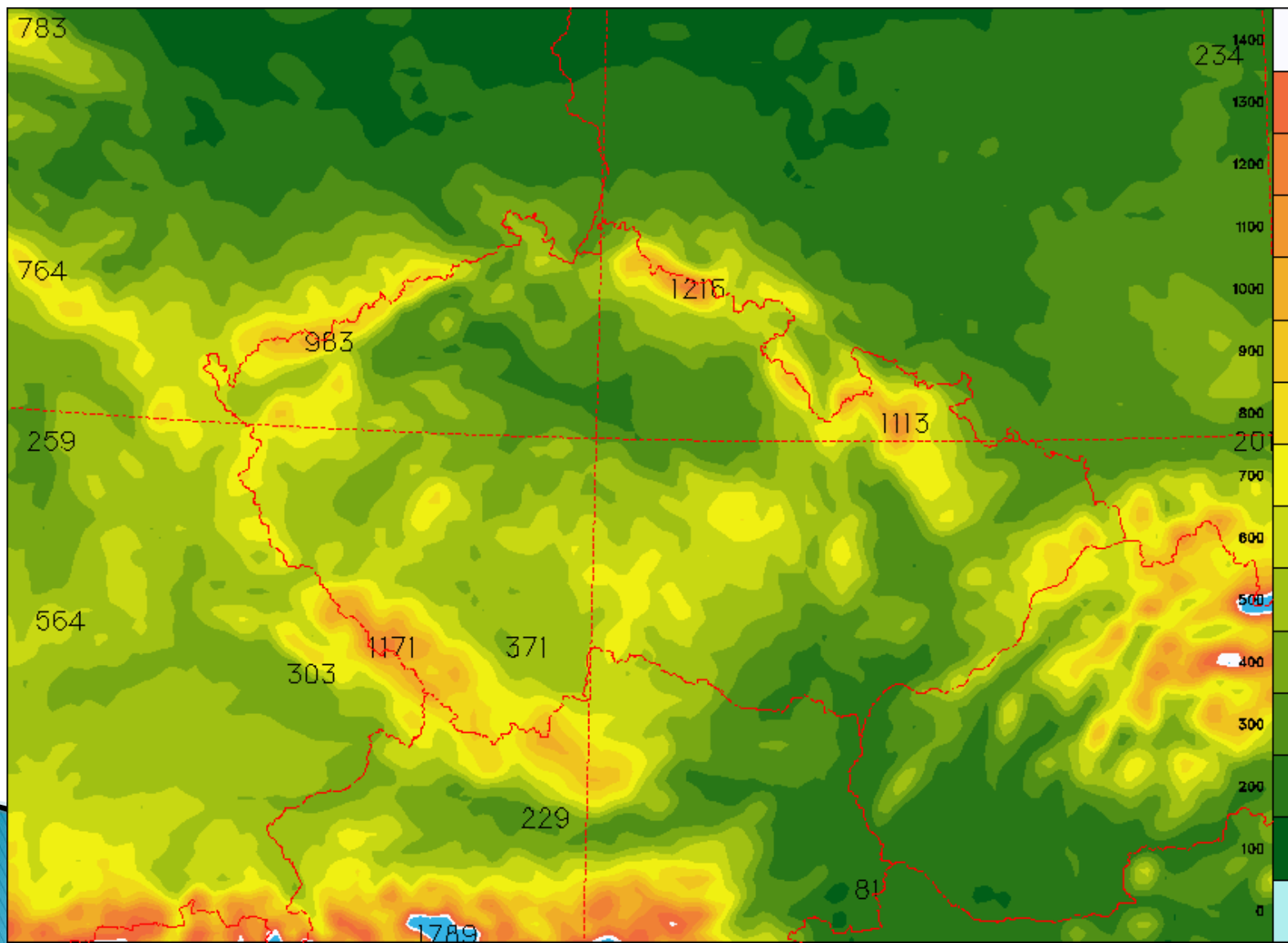
# Nadmořská výška terénu v modelu ALADIN

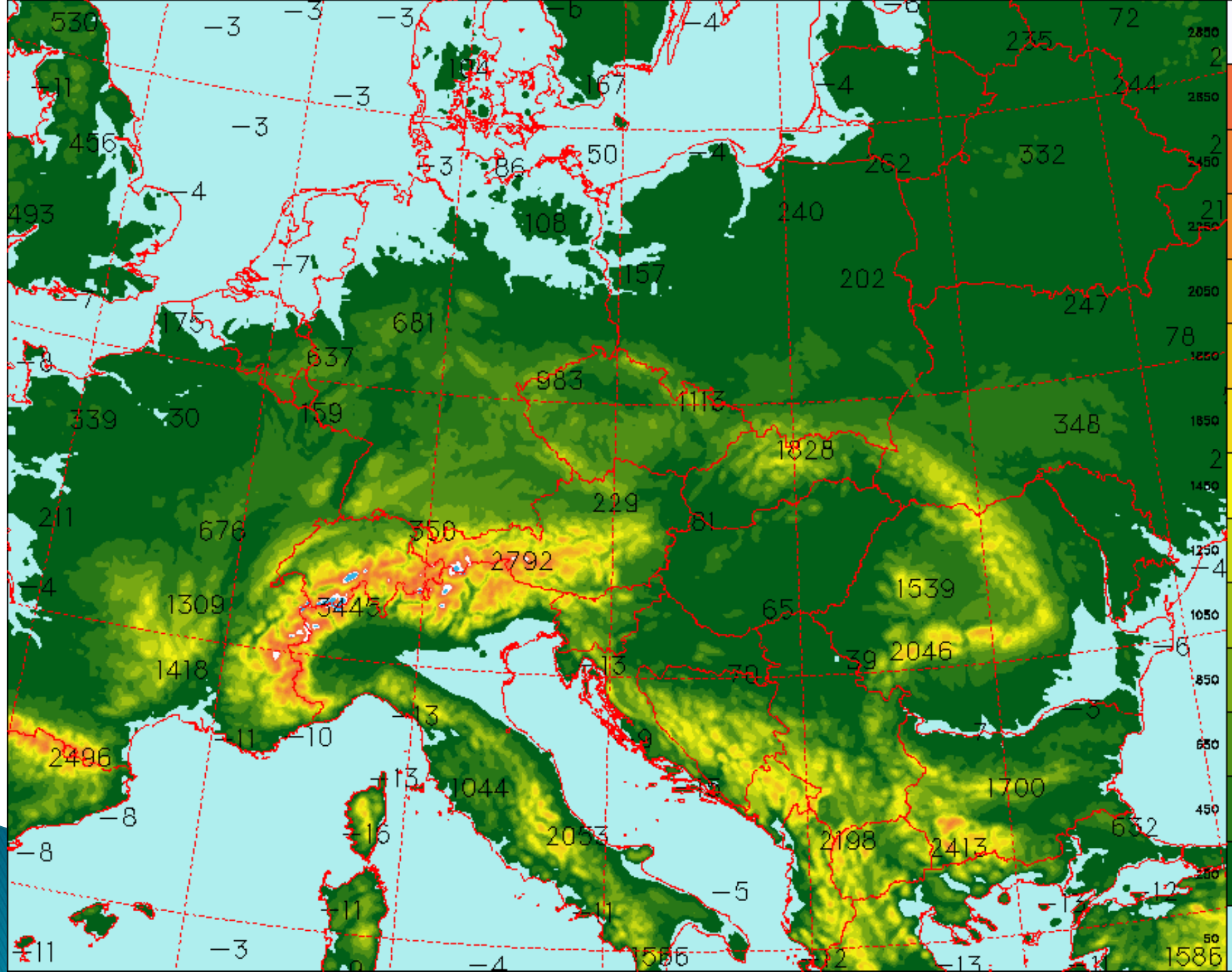
(rozlišení 9 km, 43 hladiny)



# Nadmořská výška terénu v modelu ALADIN

(rozlišení 4,7 km, 87 hladin)







# Výstupy modelu

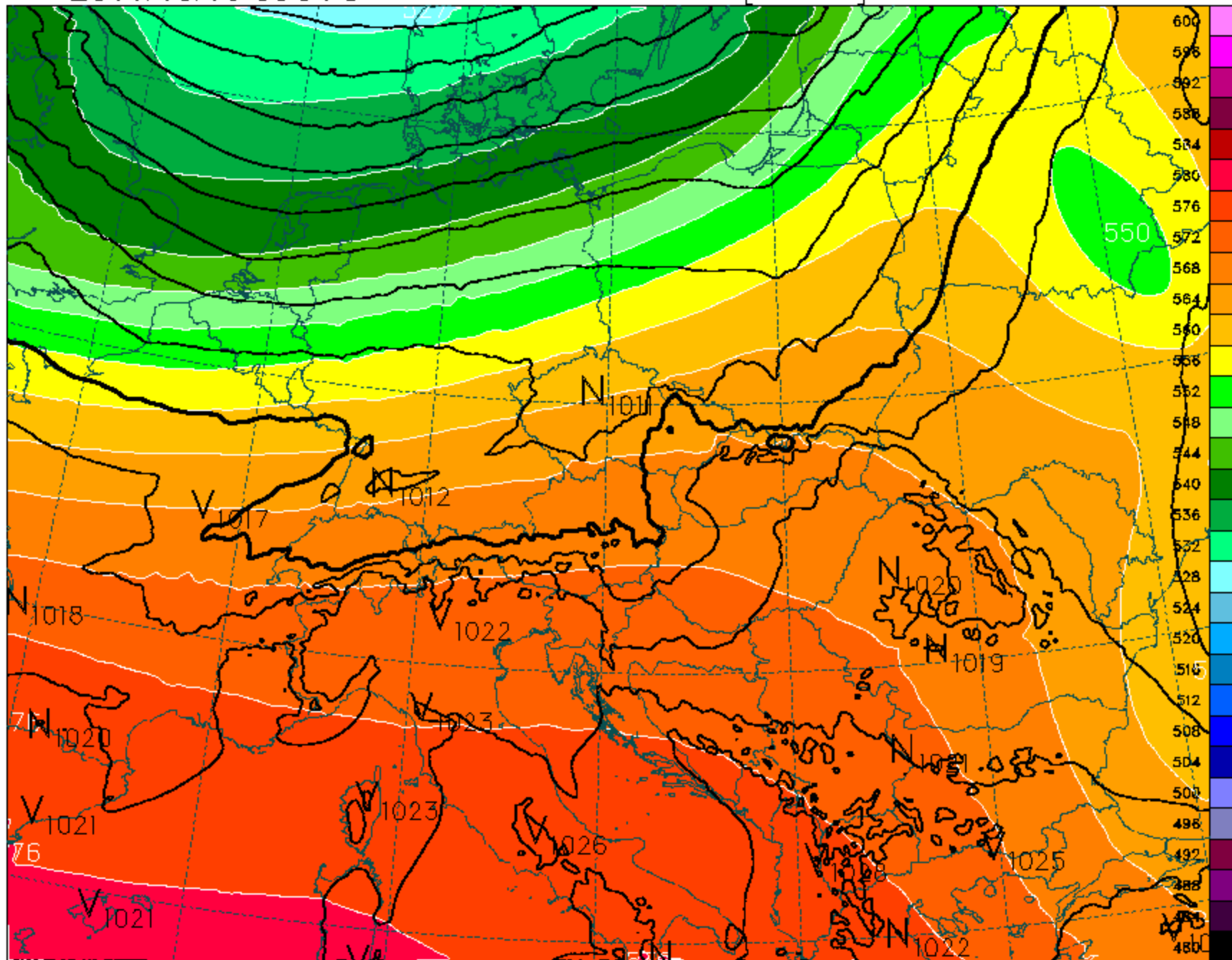
- ▶ přímo předpovídané veličiny:
  - směr a rychlost větru
  - teplota
  - přízemní tlak
  - měrná vlhkost
- ▶ odvozené veličiny:
  - geopotenciál
  - přízemní teplota, vítr a vlhkost
  - srážky (déšť x sníh, konvektivní x velkoprostorové)
  - vertikální rychlost  $\omega$
  - oblačnost (L, M, H, C)
  - toky tepla, hybnosti a vlhkosti z parametrizací

Base 2011/10/17 00UTC  
Valid 2011/10/19 00UTC

48

ABS.TOPOGRAFIE [4dkm]  
TLAK NA HL.MORE [2.5hPa]

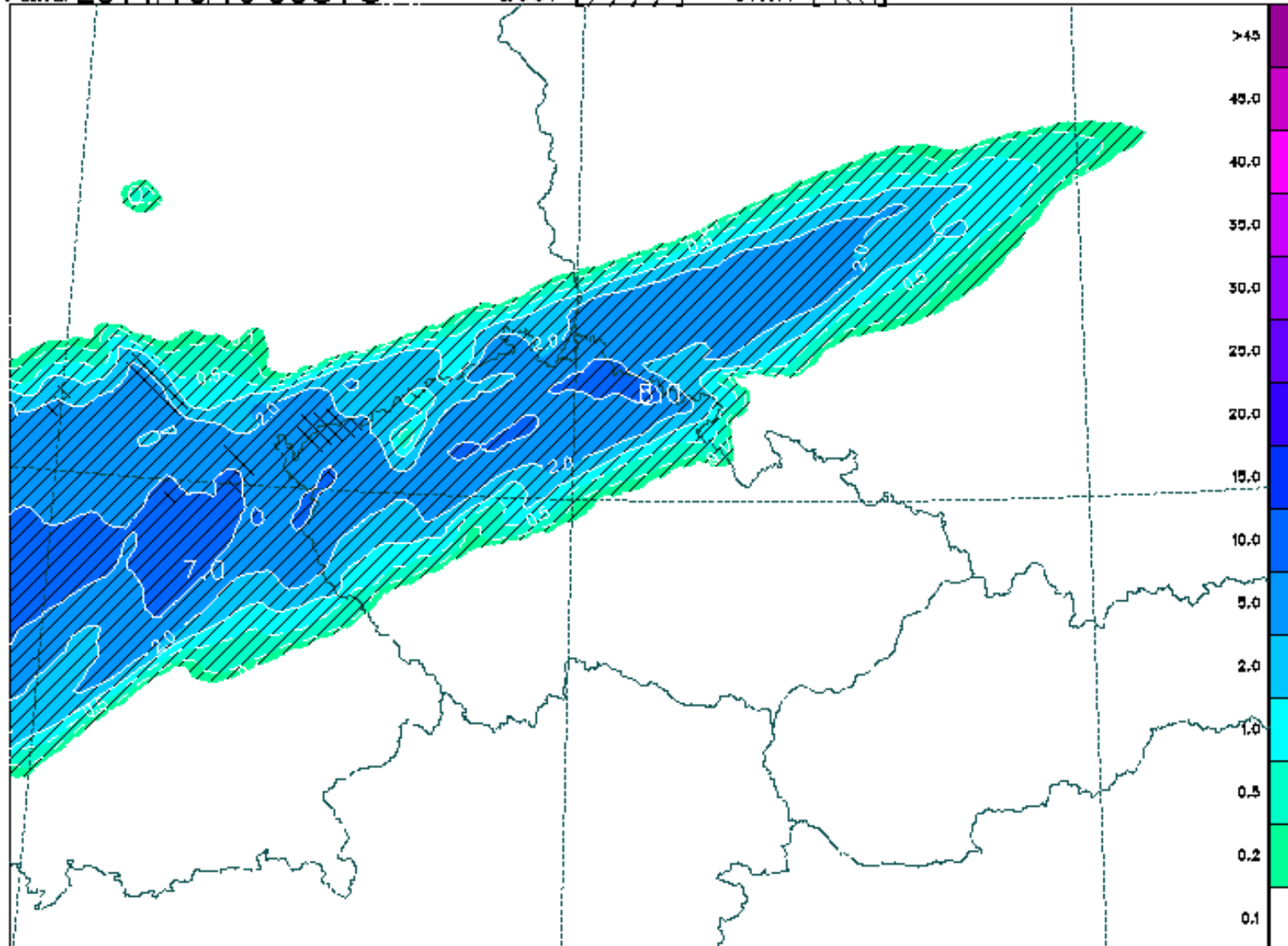
500hPa



Base2011/10/17 00UTC  
Valid 2011/10/19 06UTC

54

celkove srazky [mm/6hod]  
dest [////] snih [\\\\\\\\]

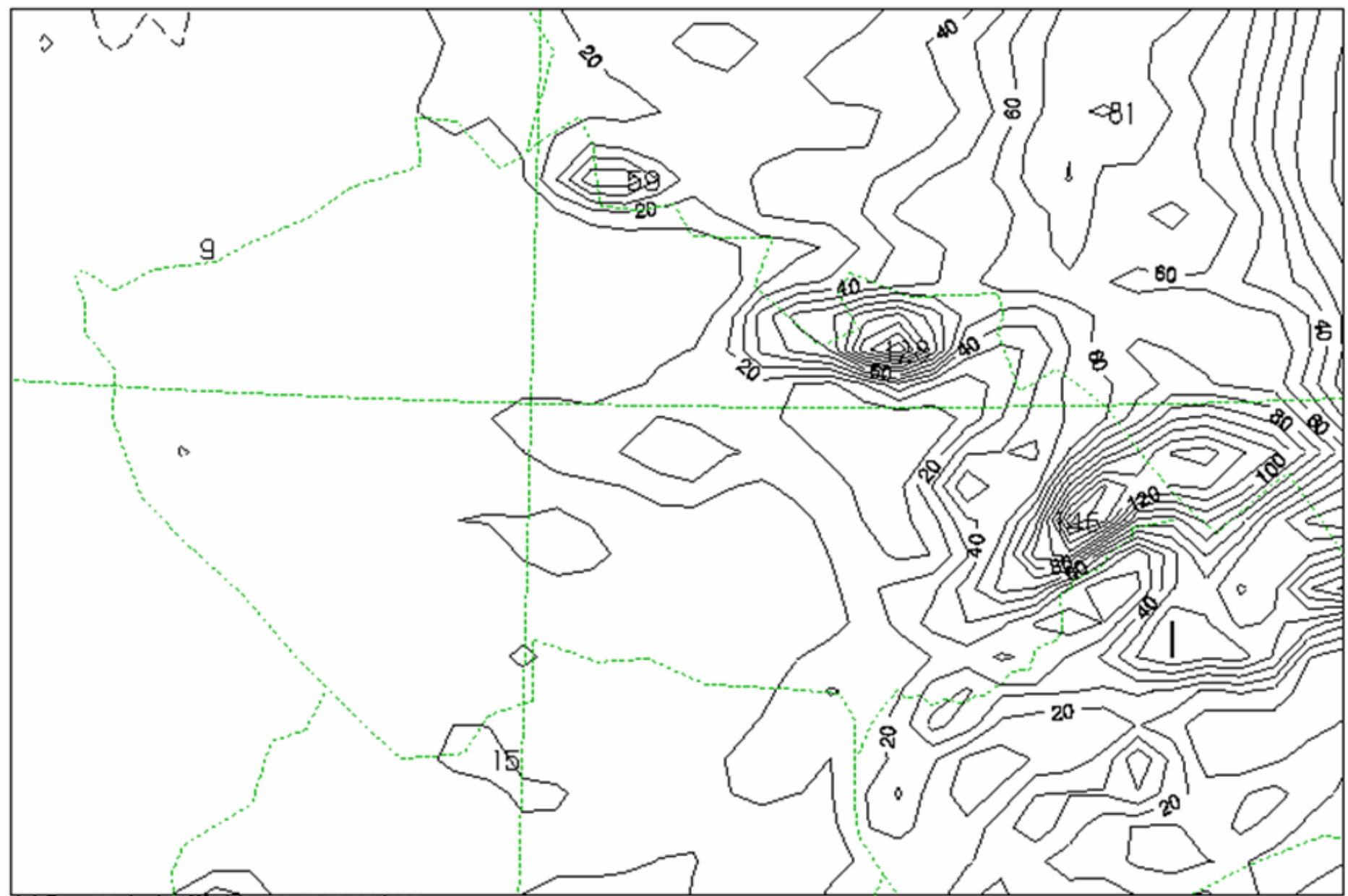


Base 97/07/06 00UTC  
Valid 97/07/07 06UTC

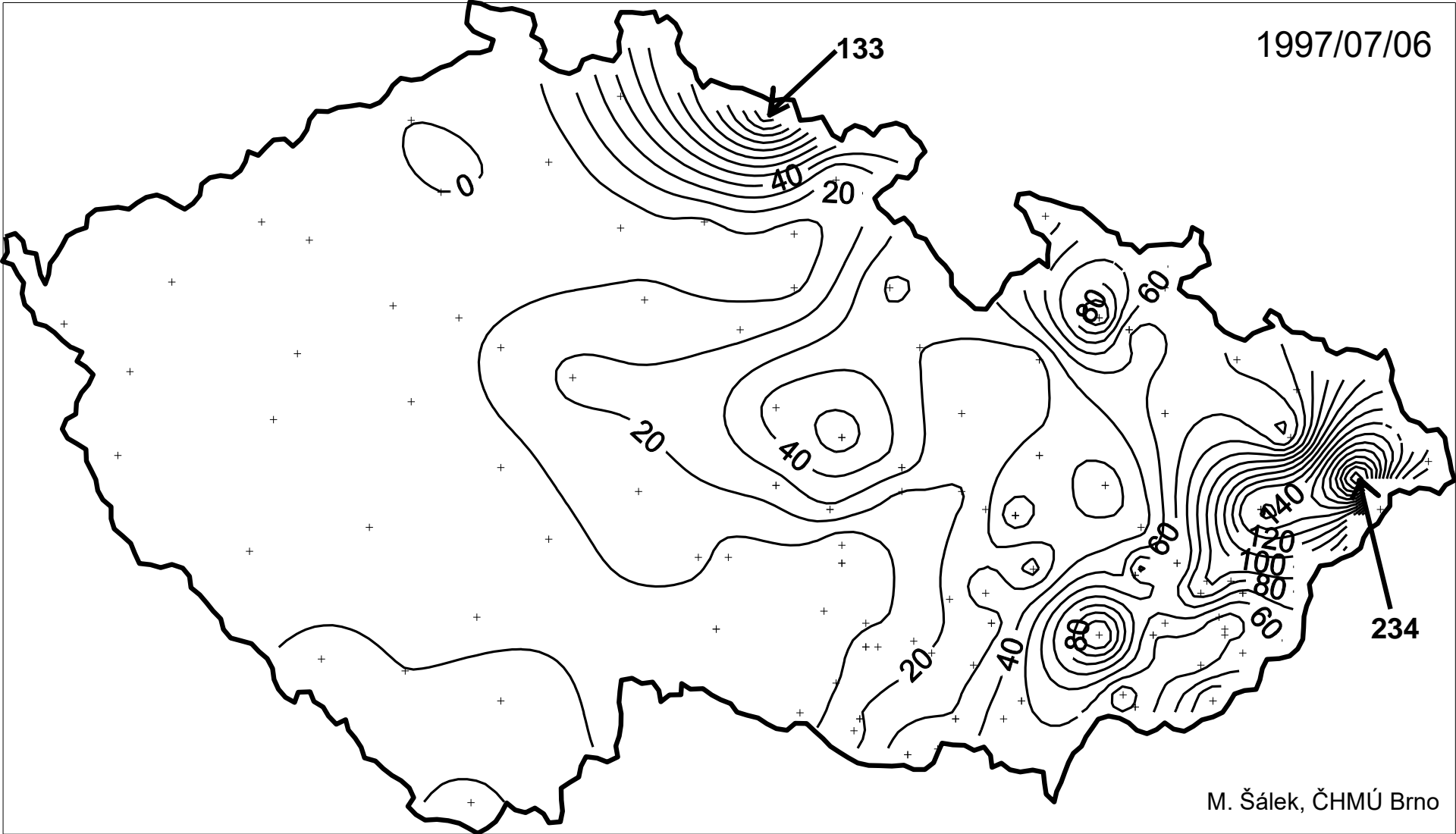
30

SRAZKY 06-30 [mm/24hod]

0m



1997/07/06

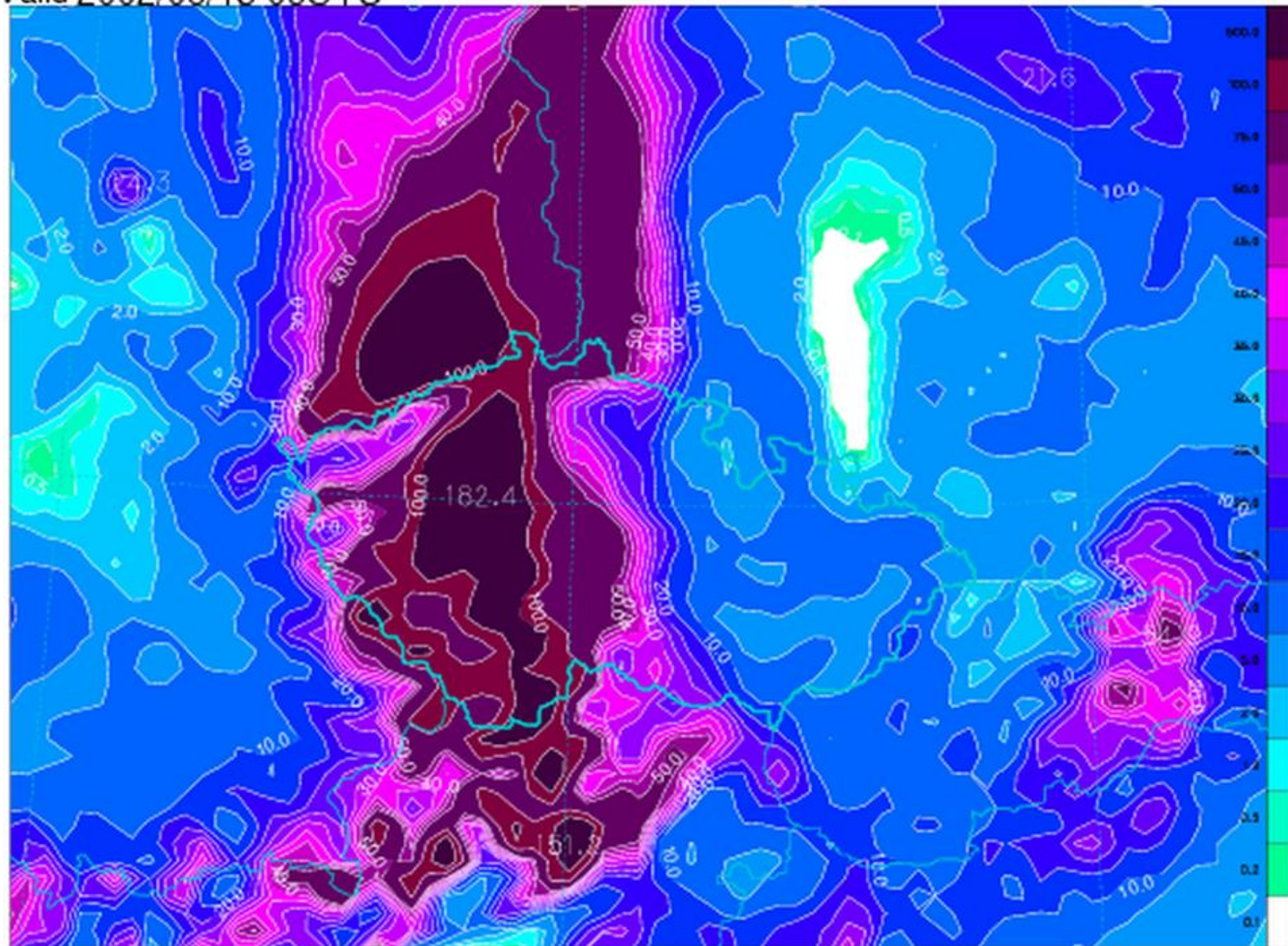


M. Šálek, ČHMÚ Brno

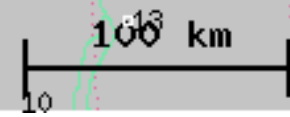
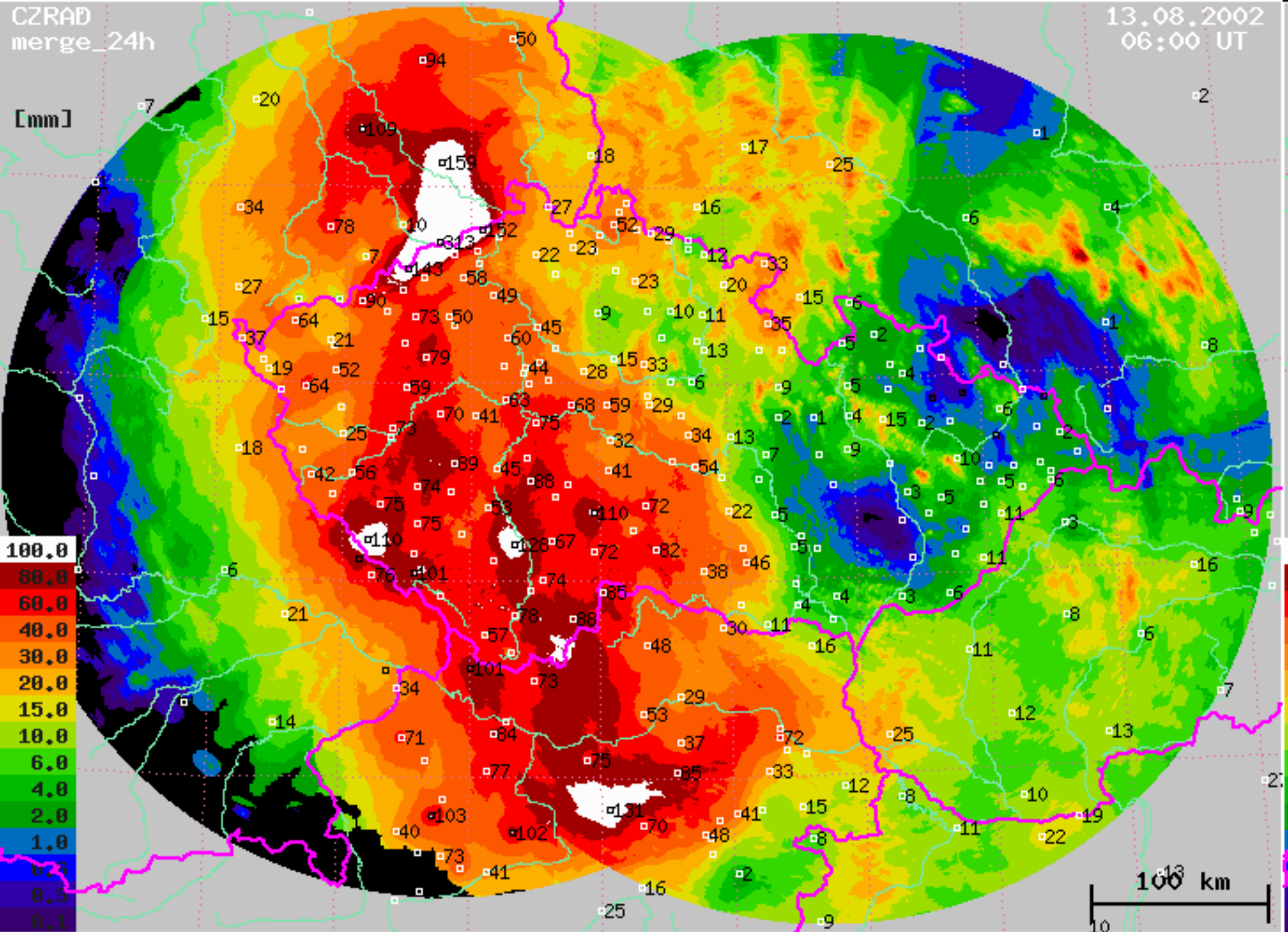
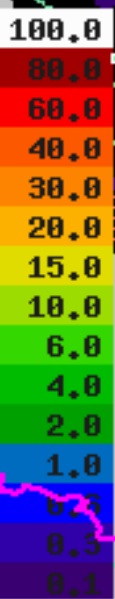
Base 2002/08/12 00UTC  
Valid 2002/08/13 06UTC

30

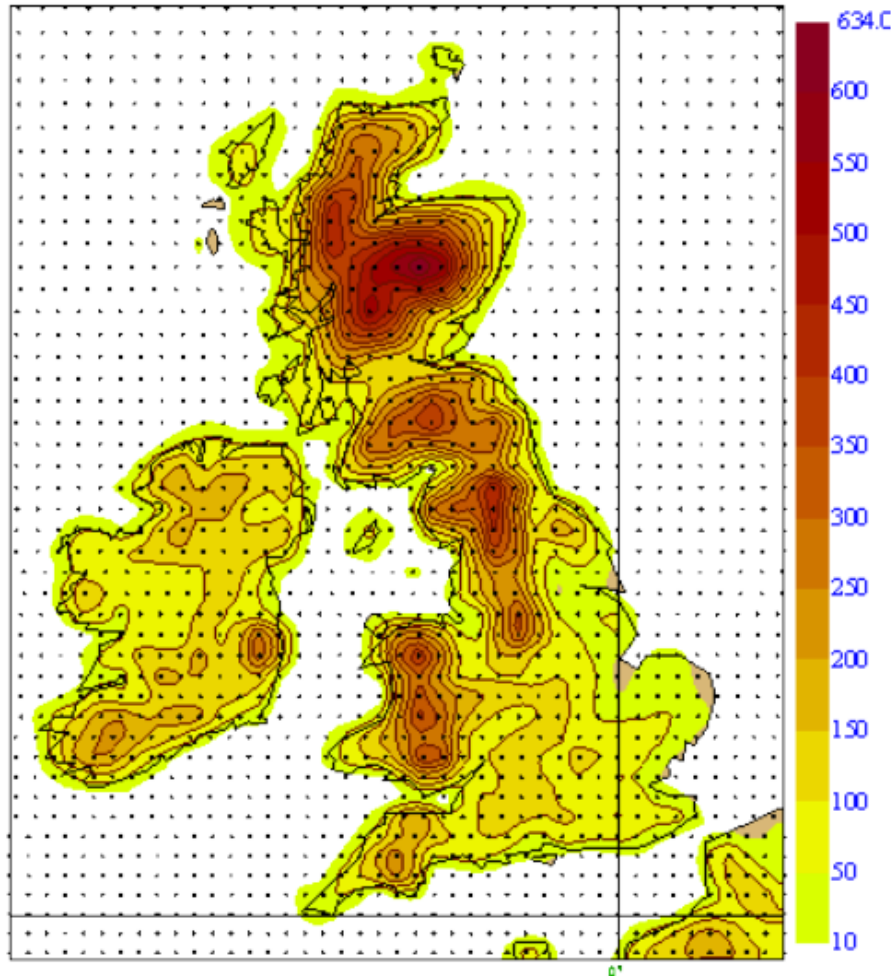
celkove srazky [mm/24hod]



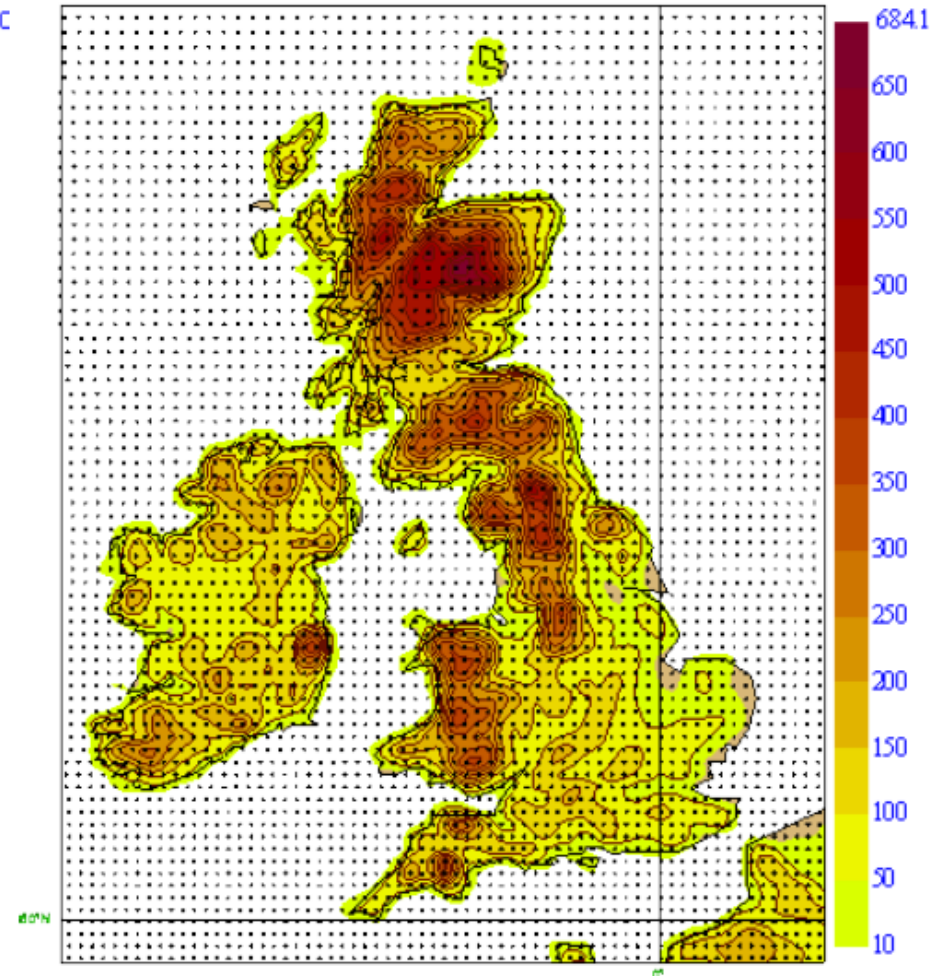
[mm]



# Od ledna 2010 má deterministický model ECMWF horizontální rozlišení 16 km



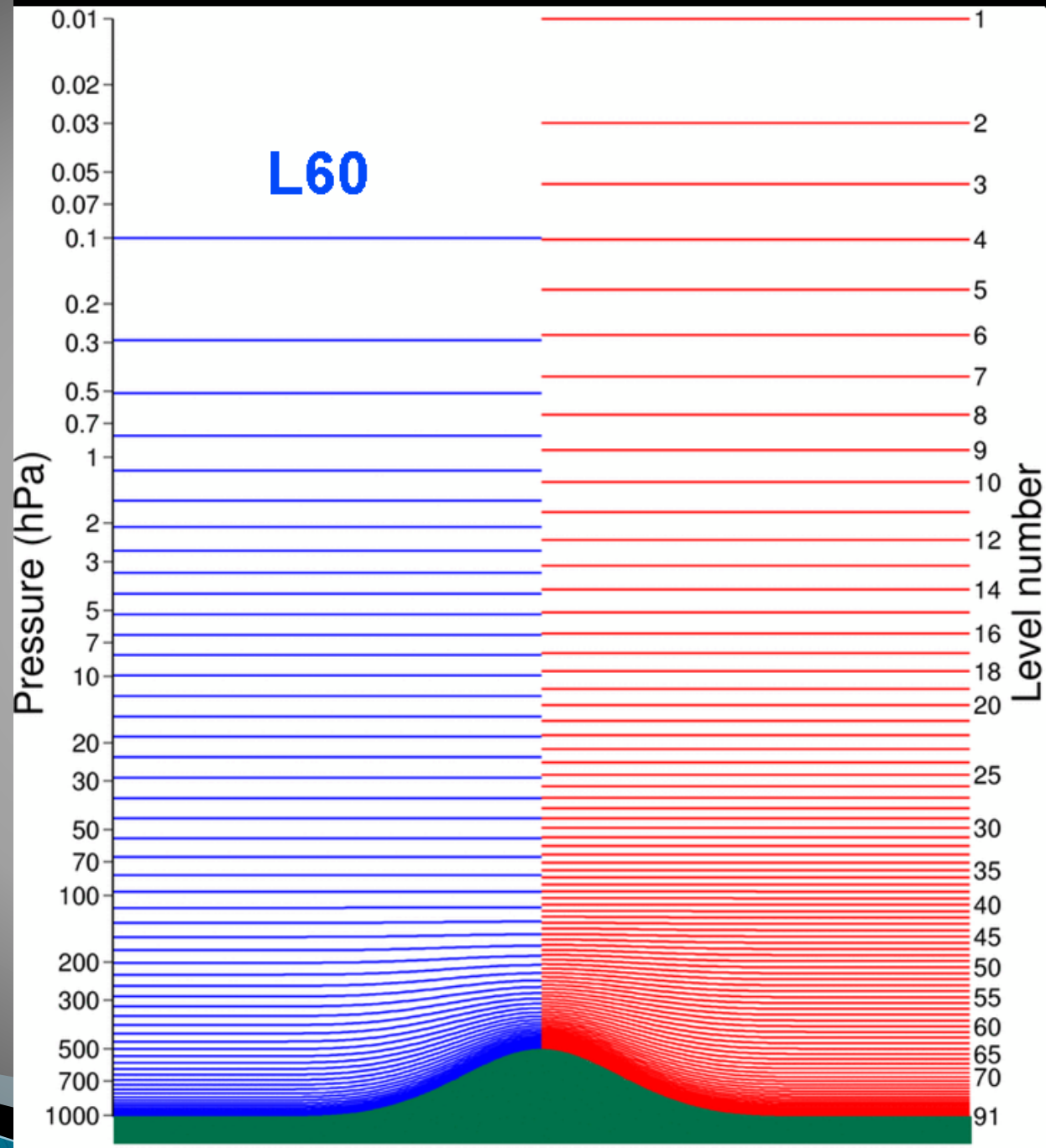
*N400 (T799) 25km grid spacing  
(843490 grid points)*



*N640 (T1279) 16km grid spacing  
(2140704 grid points)*



Vertikální  
rozlišení před a  
po změně  
ECMWF modelu  
v roce 2006  
(nyní 137  
hladin)



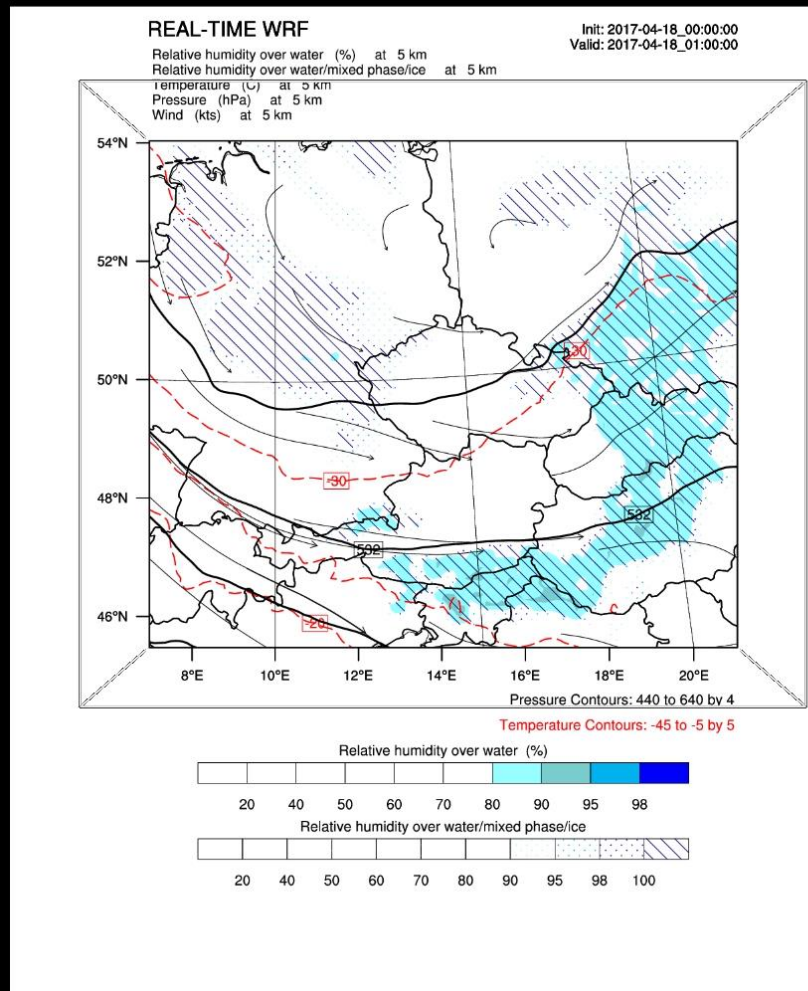
# Srážky v numerickém modelu

– srážky „velkoprostorové“ se počítají z vertikálních rychlostí a vlhkosti vzduchu „odstraněním“ specifické vlhkosti, která přesáhla určitou kritickou velikost (vlhkost, při které je vzduch nasycen vodní parou). Takto „odstraněná“ voda propadává níže a podle konkrétních podmínek v níže ležících hladinách se vypařuje nebo narůstá a výsledné množství se na zemi počítá jako srážky.

# Srážky v numerickém modelu

– srážky konvektivní („subgridové“) jsou počítány pomocí tzv. konvektivní parametrizace, což je schéma, které se snaží zjednodušeněji zachytit velmi komplexní jevy spojené s konvekcí – např. přenos vlhkosti, tepla, interakce mezi jednotlivými konvektivními proudy apod.

# 3D vizualizace modelu WRF



# Deterministický chaos

- ▶ Důležitou vlastností základních (parciálních diferenciálních) rovnic popisujících dynamiku a termodynamiku atmosféry je jejich **nelinearita**, jejíž výsledkem je citlivá závislost na počátečních podmínkách
- ▶ efekt **motýlích křídel**, tzn., že o málo **pozměněné** vstupní údaje (např. pole tlaku, teploty apod.) se mohou promítnout do **zcela rozdílných scénářů vývoje** (takto vznikla v 60. letech též díky meteorologu E. Lorenzovi teorie chaosu).

# Deterministický chaos

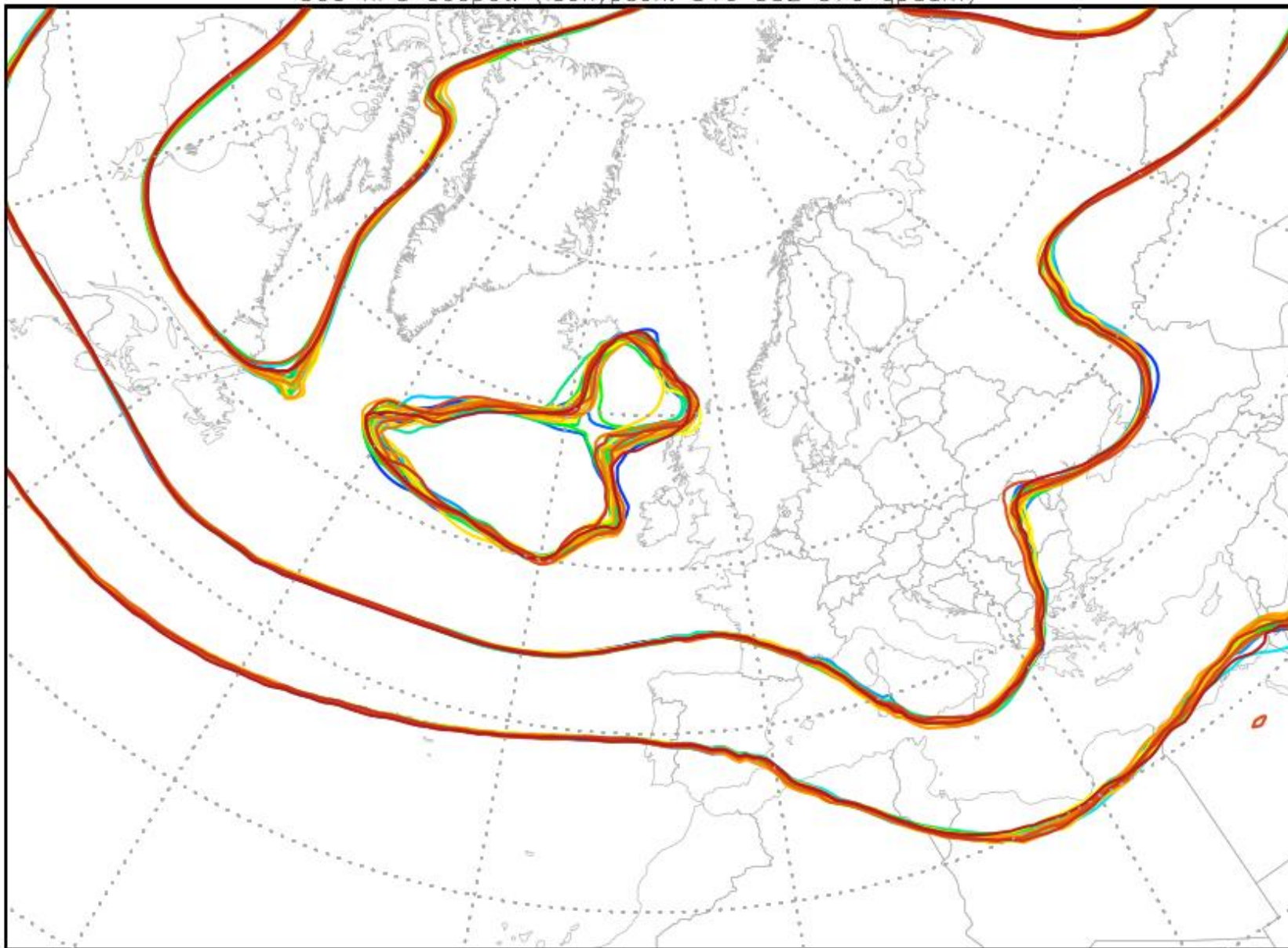
Zmíněná vlastnost těchto modelů vedla k postupům, kdy více modelových výpočtů s lehce pozměněnými (perturbovanými) vstupními údaji podává informaci o pravděpodobnosti scénářů vývoje počasí. Takto získané předpovědi získaly jméno **skupinové** (slangově ansámblové). Z praktických výpočtů pak vyplývá, že model (modely) je vhodné počítat pouze na nejvýše 10–15 dnů dopředu.

# Ukázka výsledku skupinové předpovědi

Na následujících obrázcích jsou křivky, které přibližně představují proudnice ve výšce asi 5,5 km nad Evropou

Přesněji: předem stanovené hodnoty izohyps geopotenciálu hladiny 500 hPa: 516, 556, 572

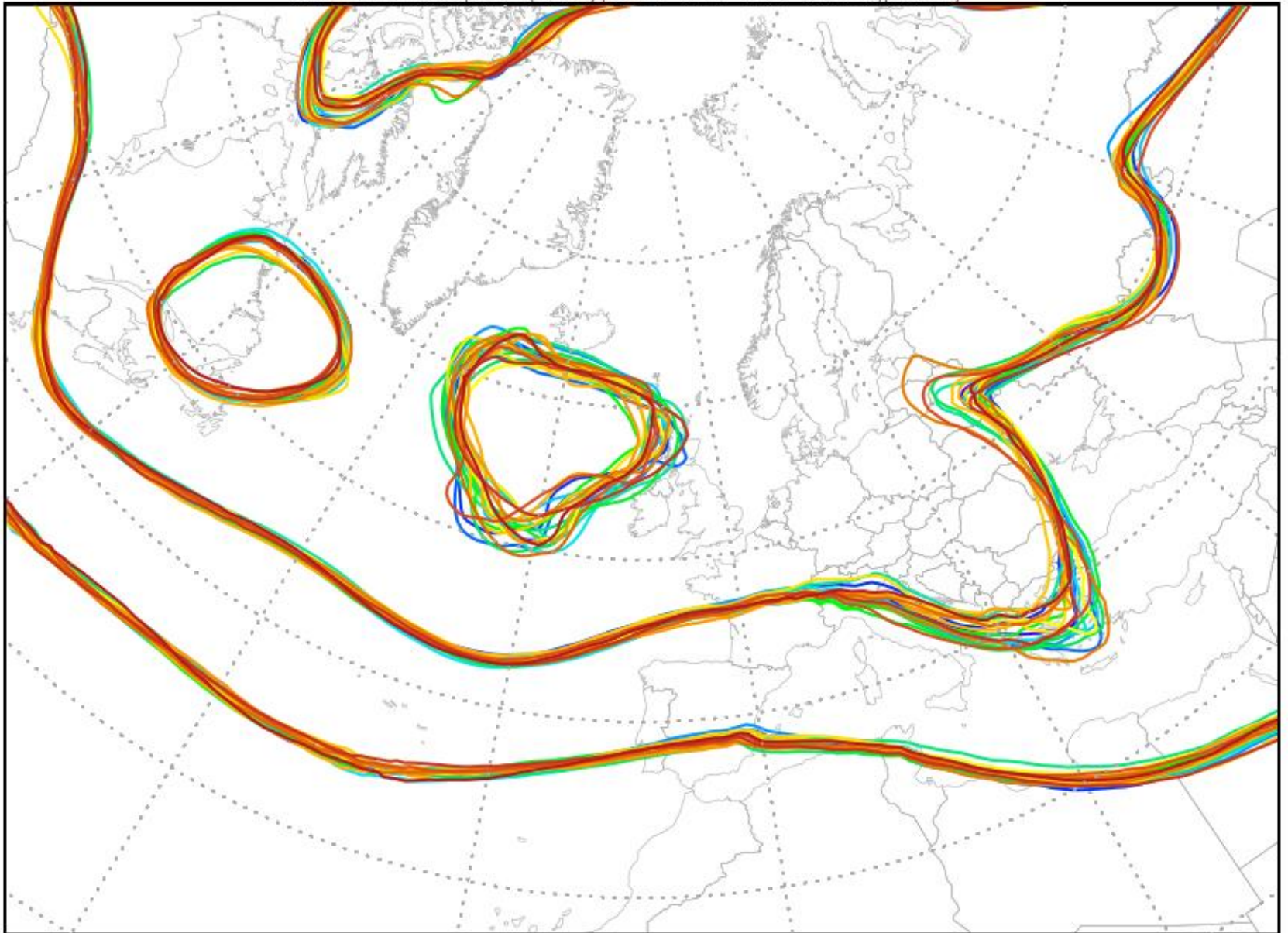
500 hPa Geopot. (Isohypsens: 516 552 576 qpdam)



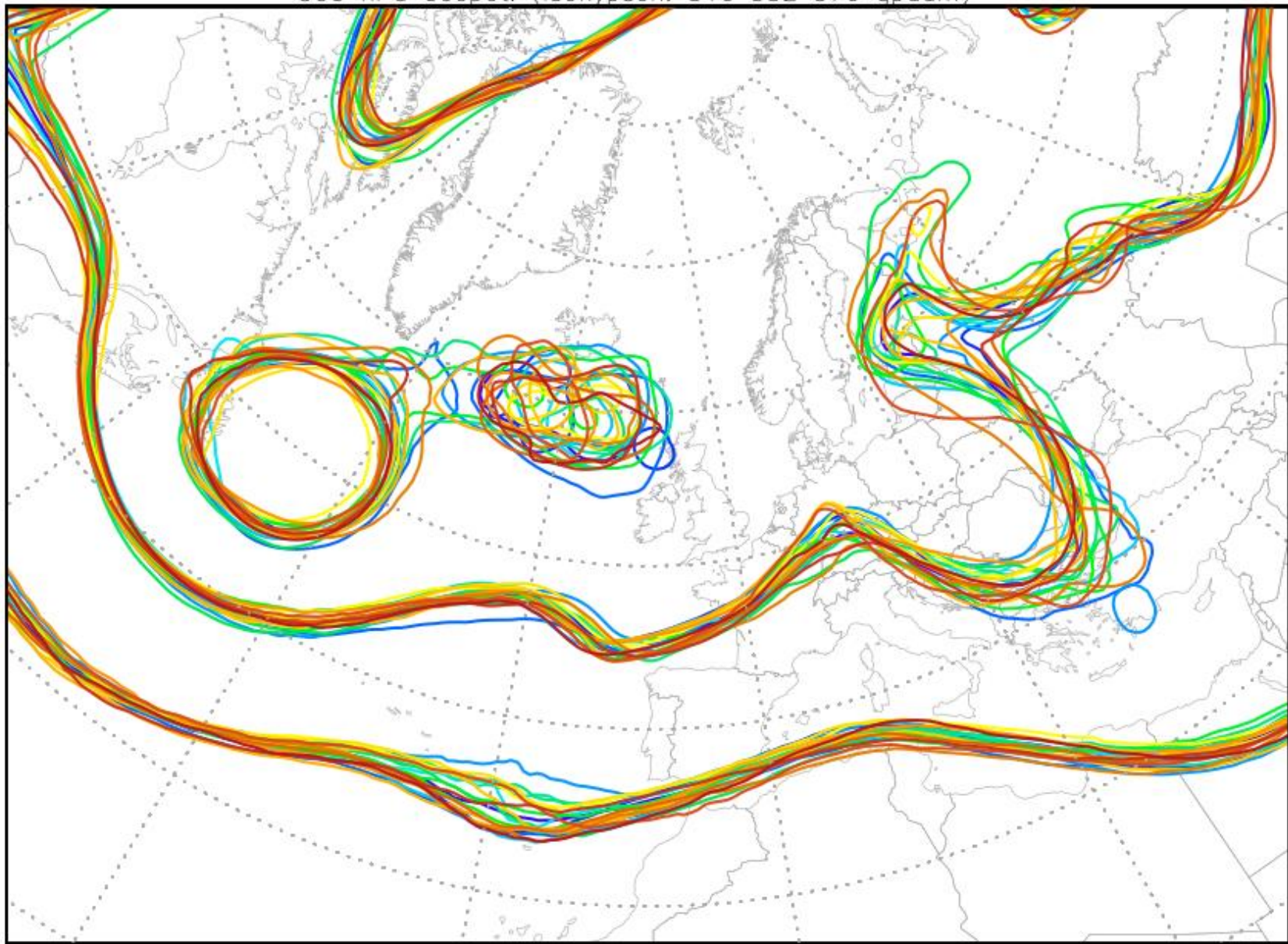
Data: GFS ENS  
(C) Wetterzentrale  
[www.wetterzentrale.de](http://www.wetterzentrale.de)



500 hPa Geopot. (Isohypsens: 516 552 576 qpdam)

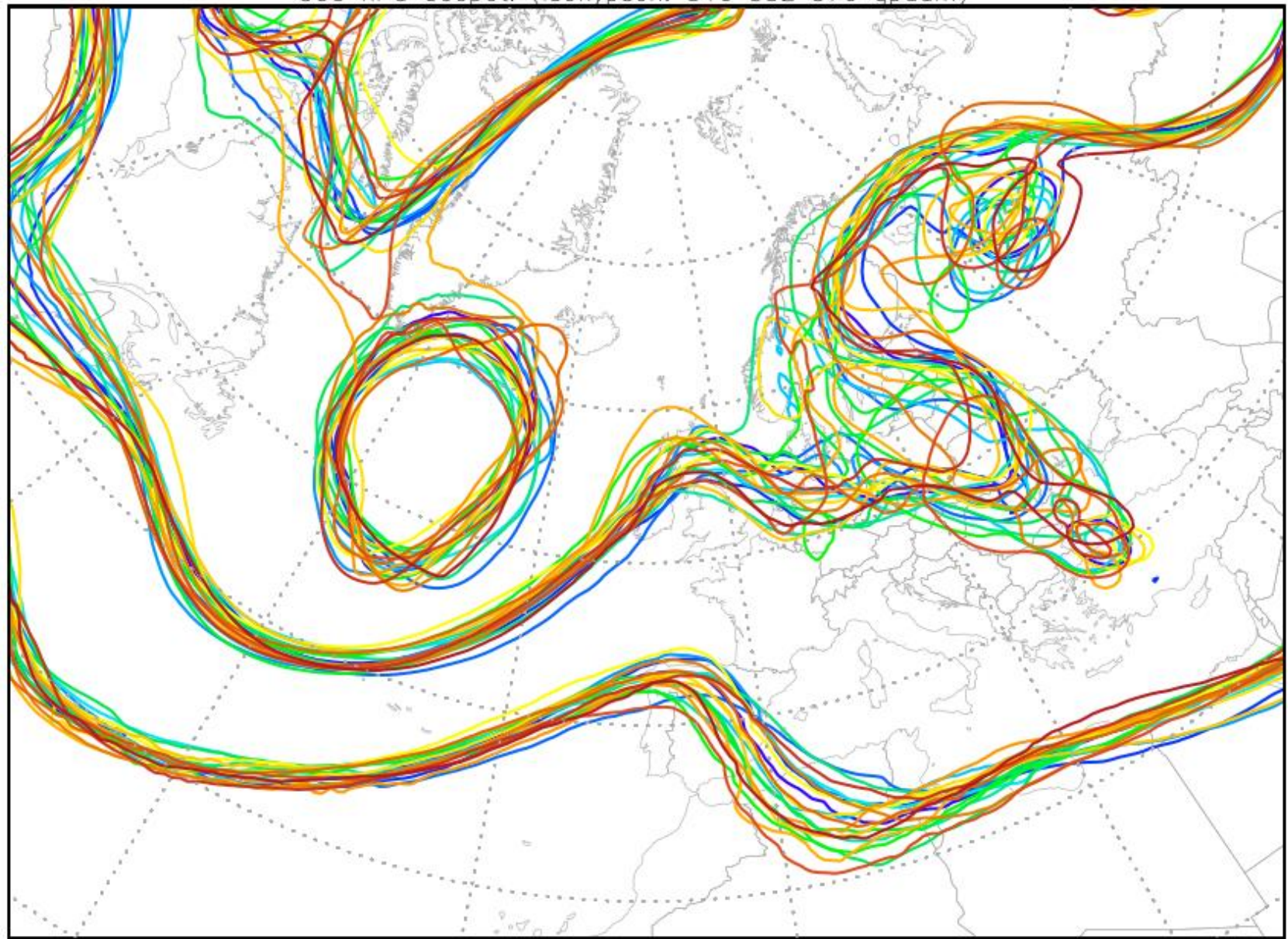


500 hPa Geopot. (Isohypsens: 516 552 576 apdam)

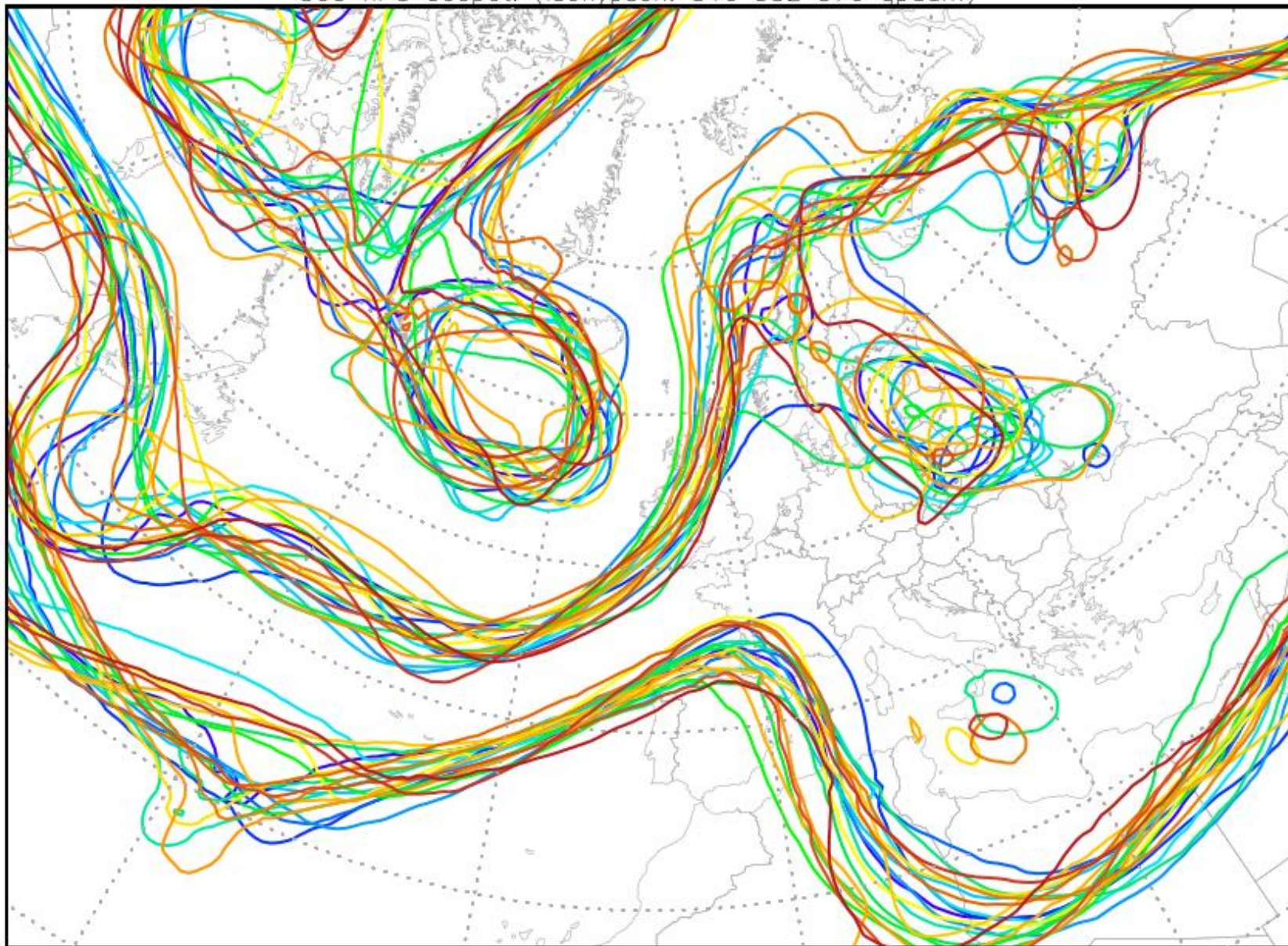


Data: GFS ENS  
(C) Wetterzentrale  
[www.wetterzentrale.de](http://www.wetterzentrale.de)

500 hPa Geopot. (Isohypsens: 516 552 576 qpdam)

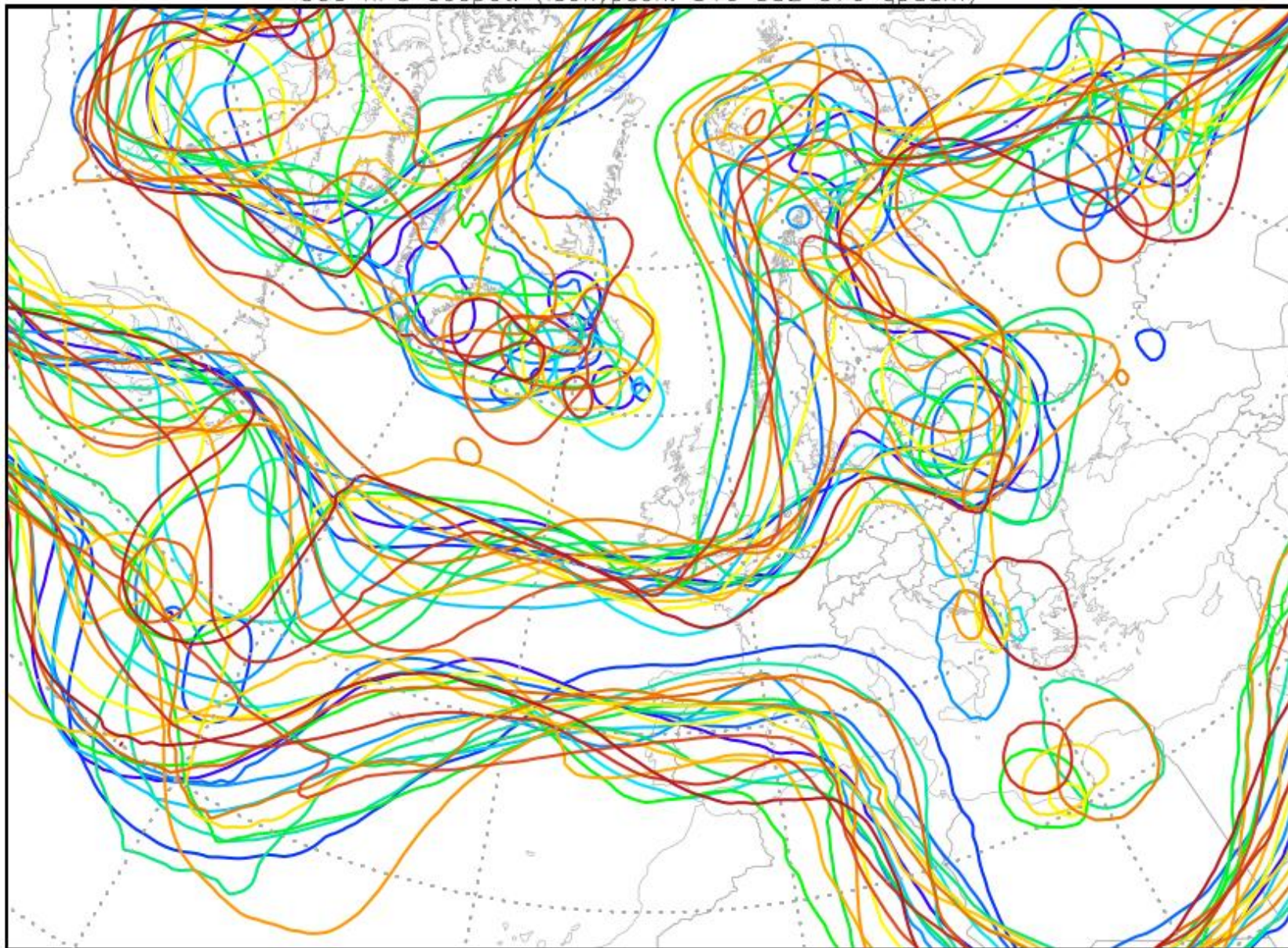


500 hPa Geopot. (Isohypsen: 516 552 576 qpdam)



Data: GFS ENS  
(C) Wetterzentrale  
[www.wetterzentrale.de](http://www.wetterzentrale.de)

500 hPa Geopot. (Isohypsen: 516 552 576 qdam)



Data: GFS ENS  
(C) Wetterzentrale  
[www.wetterzentrale.de](http://www.wetterzentrale.de)

500 hPa Geopot. (Isohypsens: 516 552 576 qdam)



500 hPa Geopot. (Isohypsens: 516 552 576 gpdam)



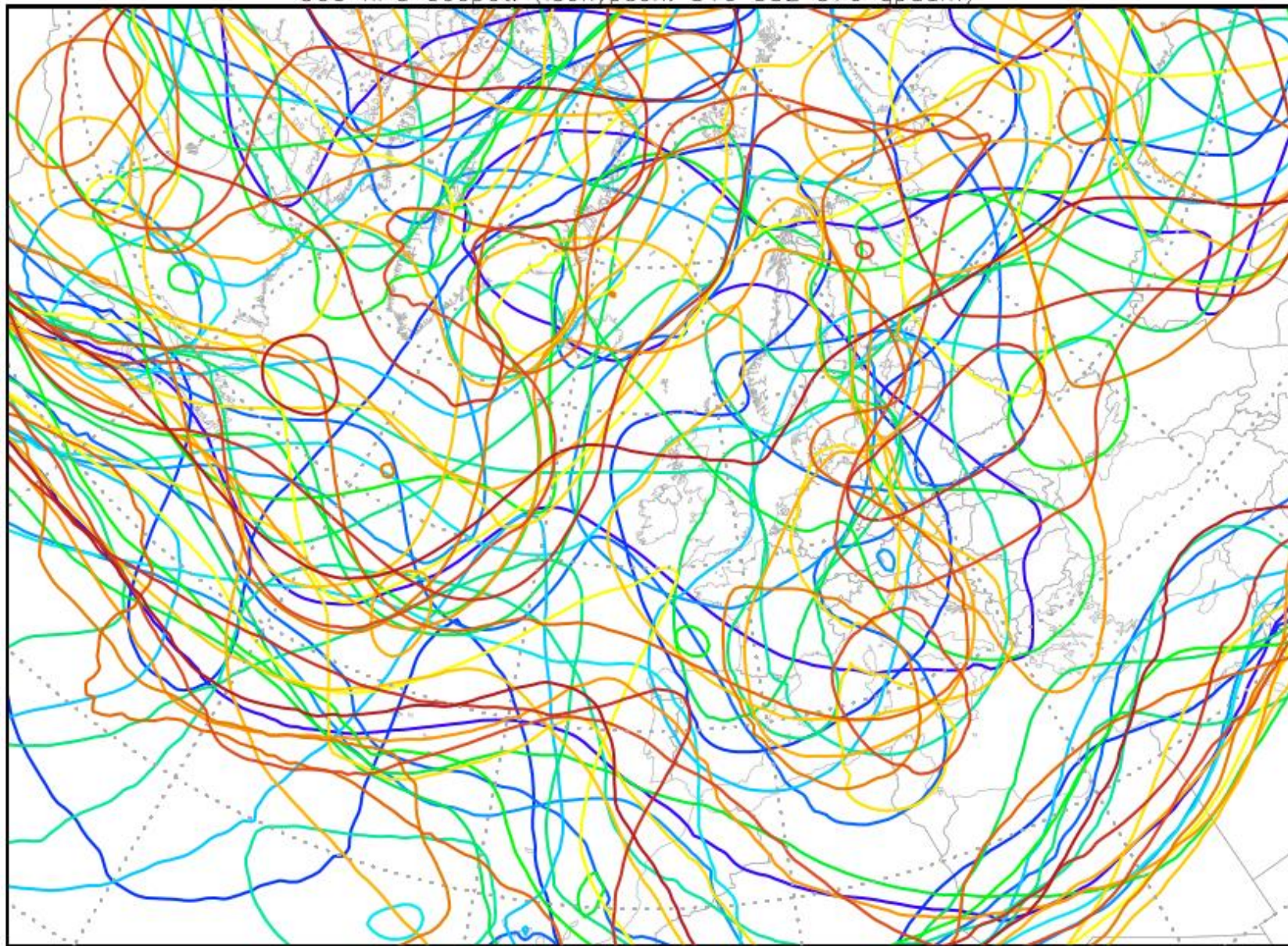
Data: GFS ENS  
(C) Wetterzentrale  
[www.wetterzentrale.de](http://www.wetterzentrale.de)

500 hPa Geopot. (Isohypsens: 516 552 576 qdam)



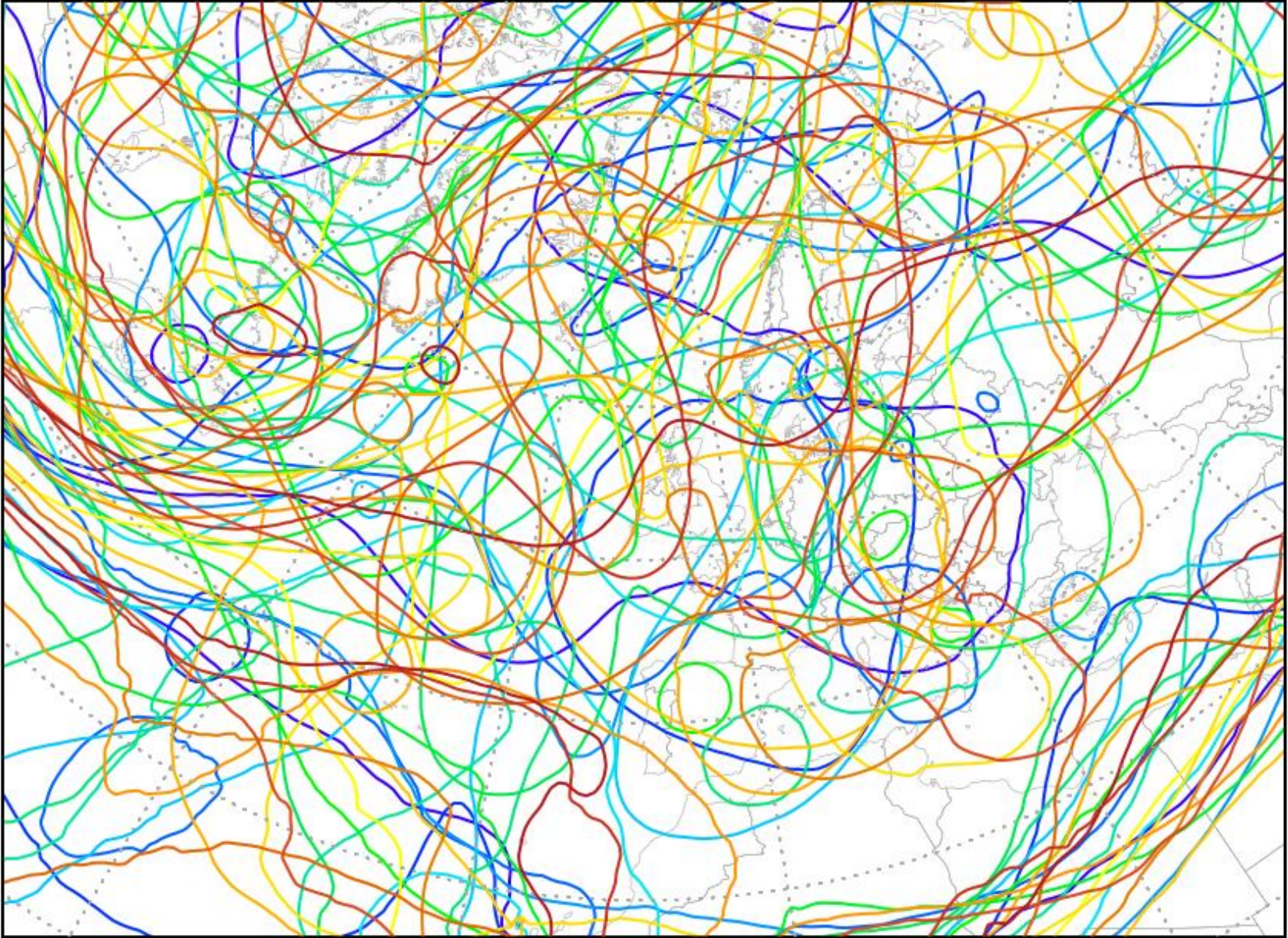


500 hPa Geopot. (Isohypsen: 516 552 576 apdam)



Data: GFS ENS  
(C) Wetterzentrale  
[www.wetterzentrale.de](http://www.wetterzentrale.de)

500 hPa Geopot. (Isohypsen: 516 552 576 gpdam)



500 hPa Geopot. (Isohypsen: 516 552 576 gpdam)



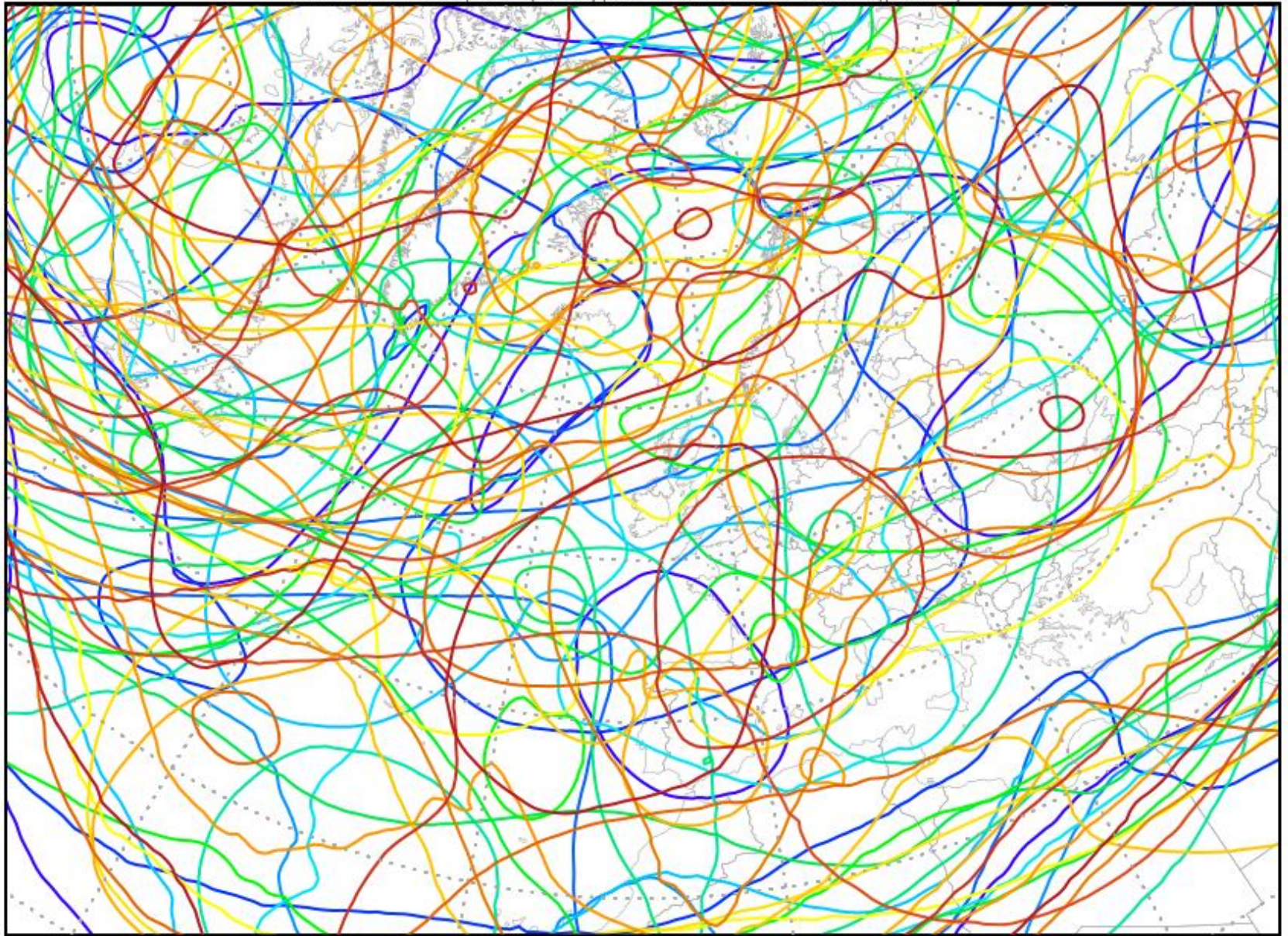
Data: GFS ENS  
(C) Wetterzentrale  
[www.wetterzentrale.de](http://www.wetterzentrale.de)

500 hPa Geopot. (Isohypsen: 516 552 576 gpdam)



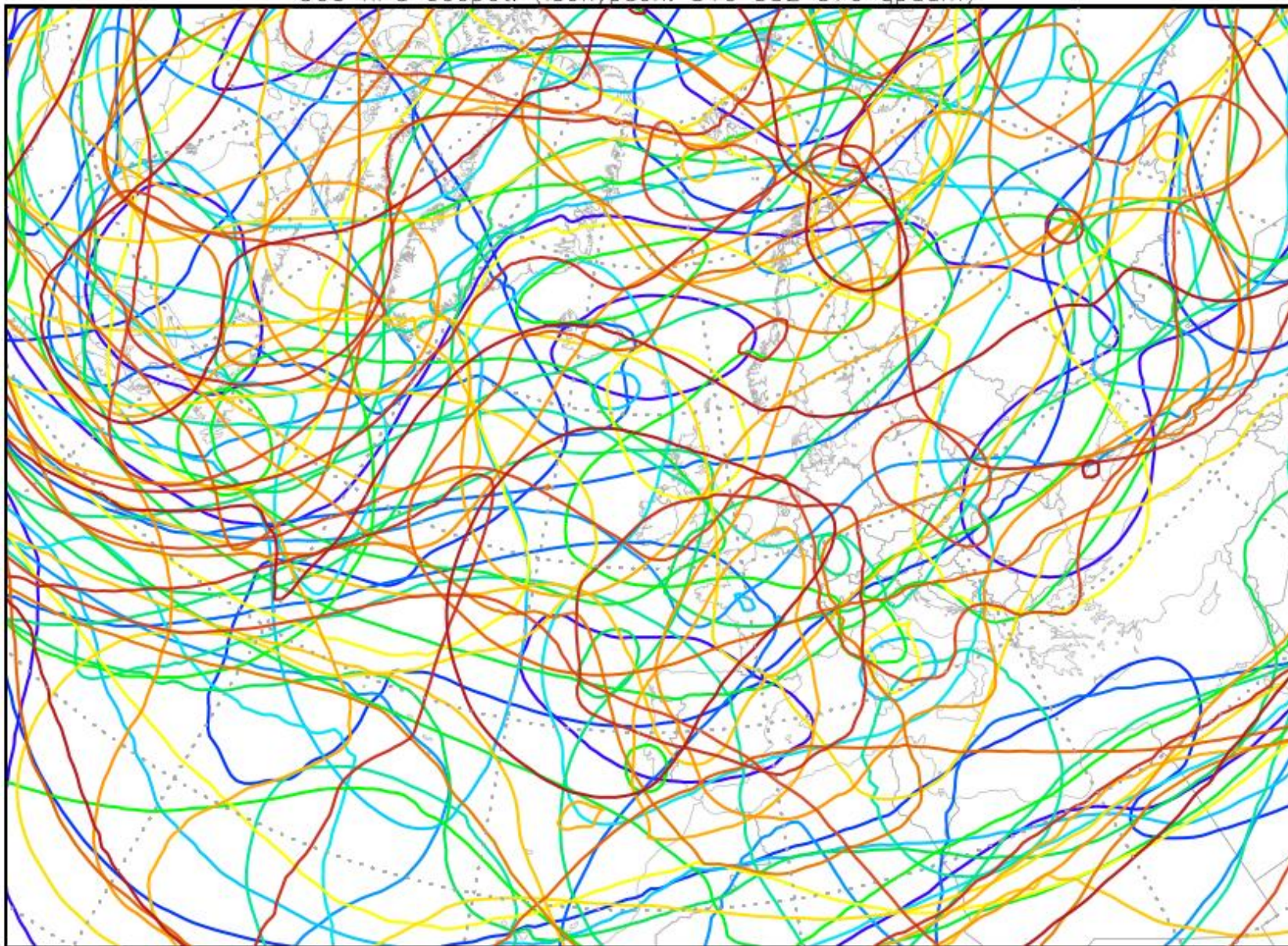
Data: GFS ENS  
(C) Wetterzentrale  
[www.wetterzentrale.de](http://www.wetterzentrale.de)

500 hPa Geopot. (Isohypsens: 516 552 576 apdam)



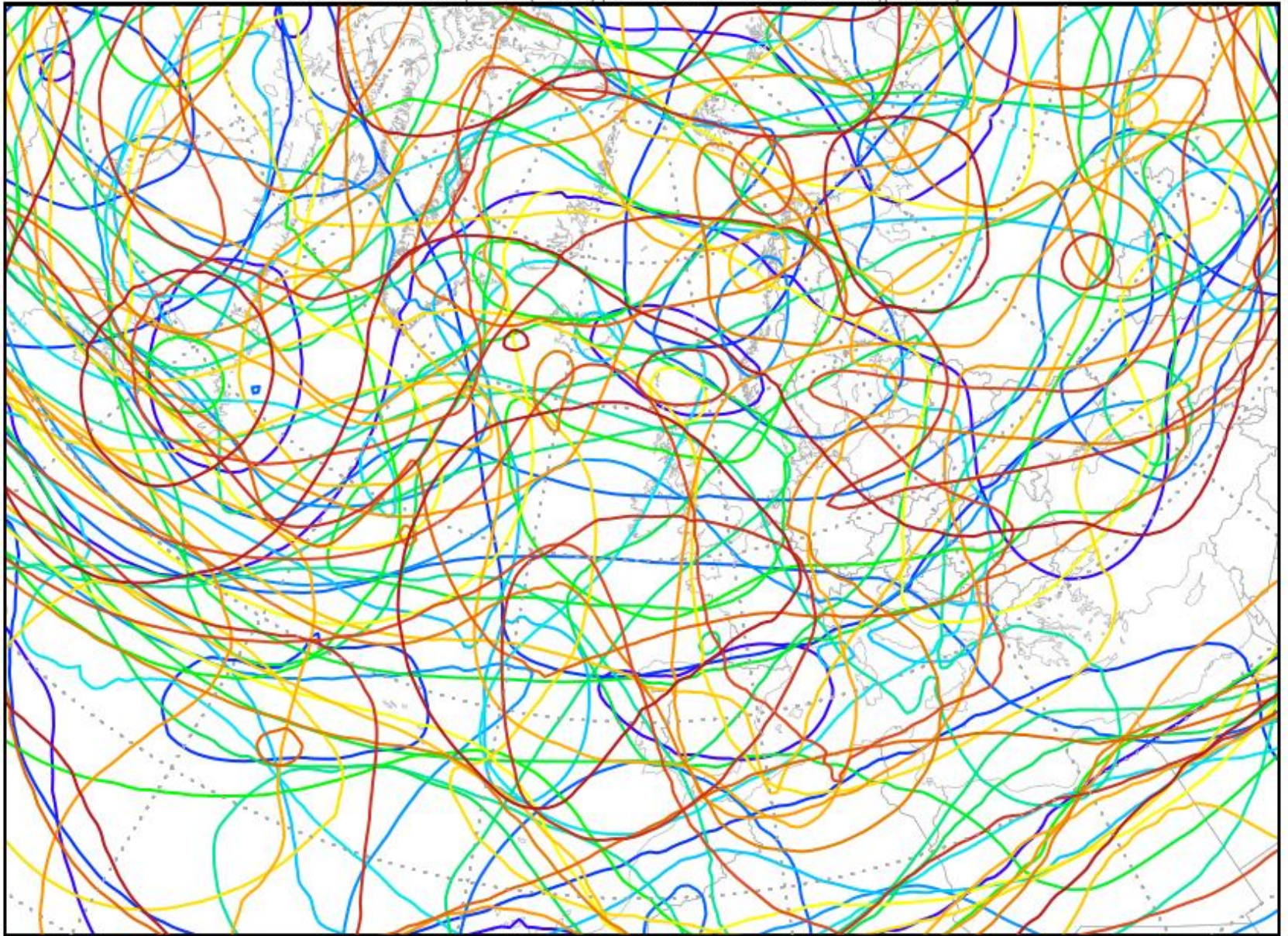
Data: GFS ENS  
(C) Wetterzentrale  
[www.wetterzentrale.de](http://www.wetterzentrale.de)

500 hPa Geopot. (Isohypsen: 516 552 576 qpdam)

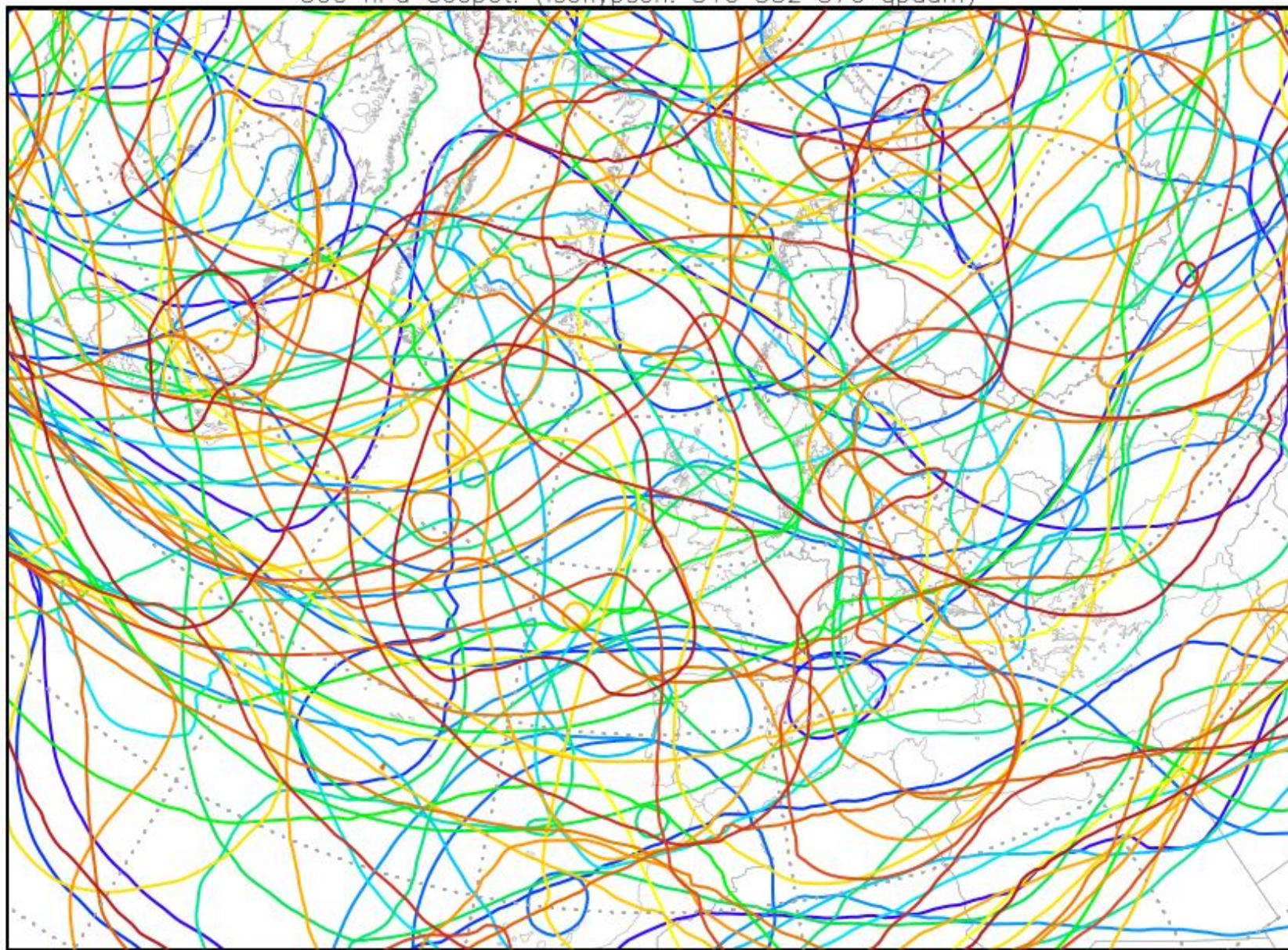


Data: GFS ENS  
(C) Wetterzentrale  
[www.wetterzentrale.de](http://www.wetterzentrale.de)

500 hPa Geopot. (Isohypsen: 516 552 576 qpdam)



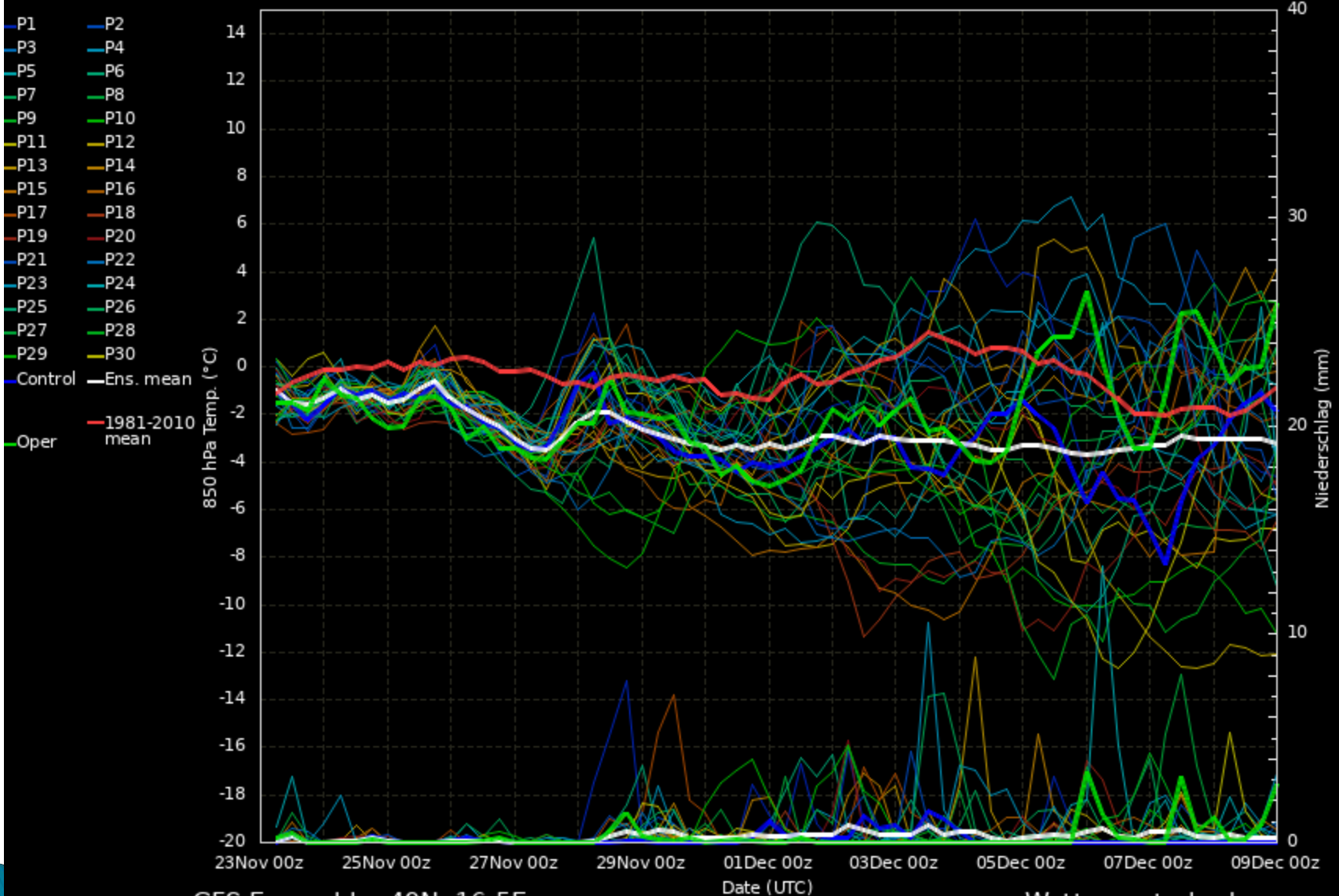
500 hPa Geopot. (Isohypsen: 516 552 576 apdam)



Data: GFS ENS  
(C) Wetterzentrale  
[www.wetterzentrale.de](http://www.wetterzentrale.de)



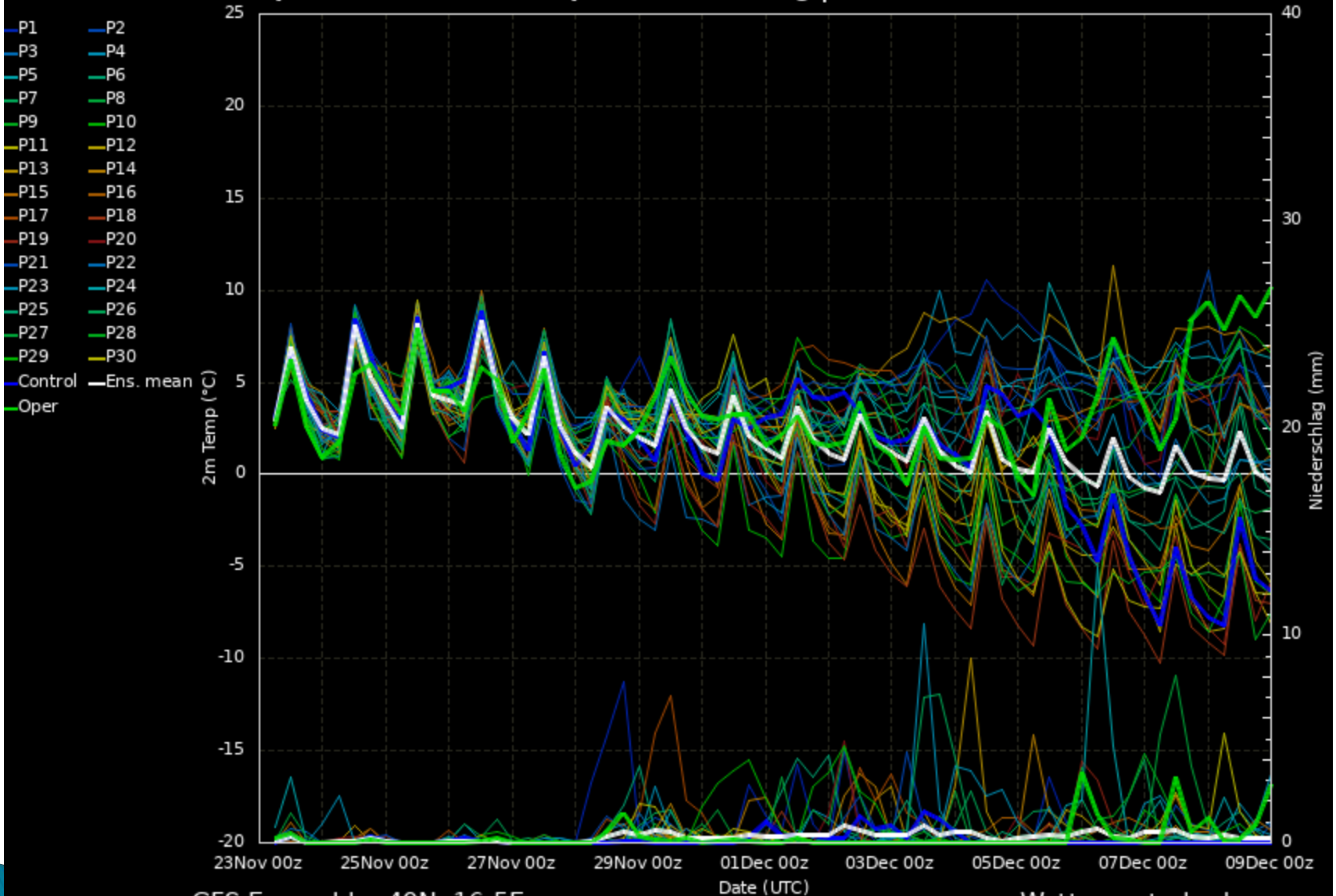
# Šlapanice (CZ) 850 hPa Temp. & Niederschlag | Wed, 23Nov2022 00Z



GFS Ensemble, 49N, 16.5E

Wetterzentrale.de

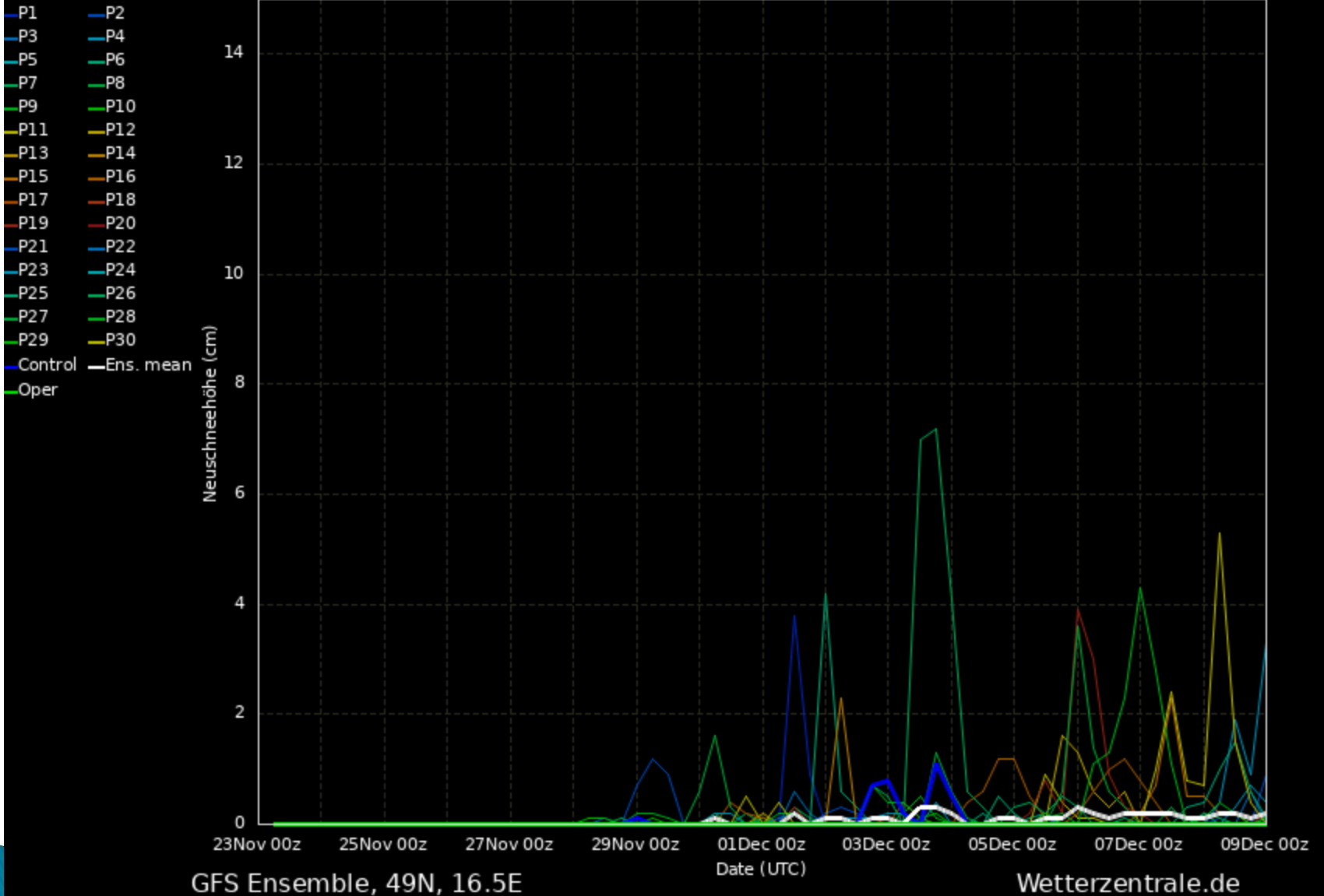
# Šlapanice (CZ) 2m Temp & Niederschlag | Wed, 23Nov2022 00z



GFS Ensemble, 49N, 16.5E

Wetterzentrale.de

# Šlapanice (CZ) Neuschneehöhe | Wed, 23Nov2022 00Z



GFS Ensemble, 49N, 16.5E

Wetterzentrale.de

# Ukázky výstupů skupinových předpovědí

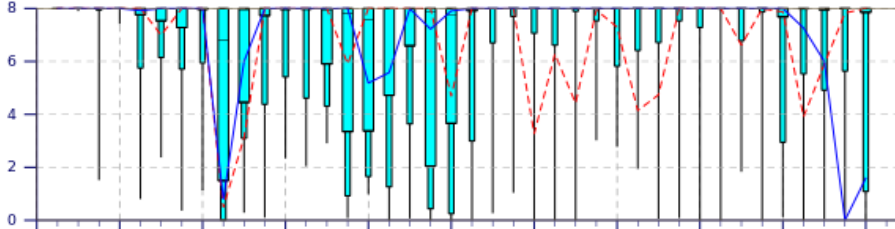
Z 50 předpovědí s perturbovanými počátečními podmínkami, počítanými v Evropském středisku pro střednědobou předpověď (ECMWF), je možno odhadnout rozdělení pravděpodobností meteorologických prvků. Následují ukázky těchto předpovědí.

# ENS Meteorogram

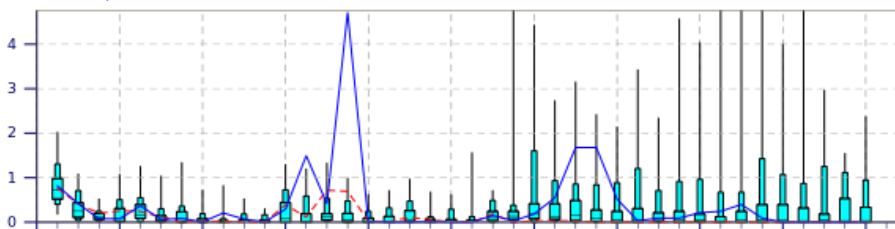
49.27°N 16.53°E (ENS land point) 290 m

High Resolution Forecast and ENS Distribution Wednesday 23 November 2022 00 UTC

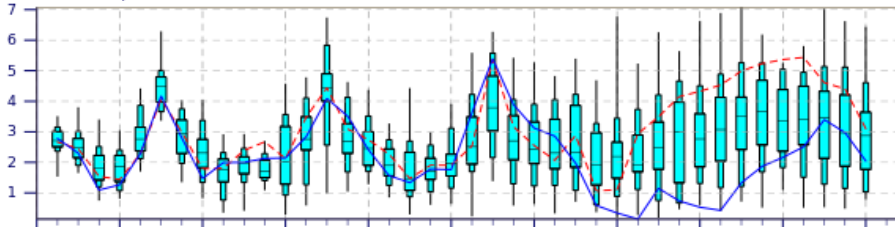
Total Cloud Cover (okta)



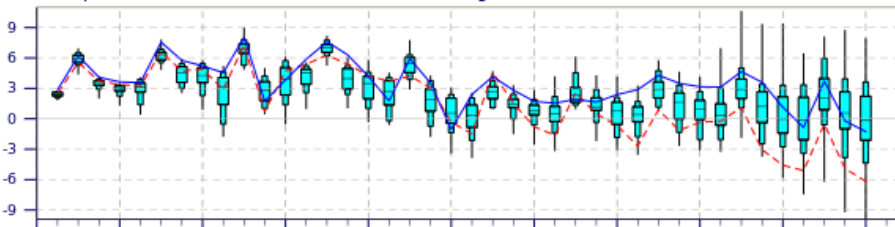
Total Precipitation (mm/6h)



10m Wind Speed (m/s)



2m Temperature(°C) reduced to 290 m (station height) from 386 m (HRES) and 331 m (ENS)



Wed23  
Nov  
2022

Thu24

Fri25

Sat26

Sun27

Mon28

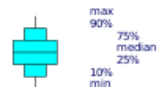
Tue29

Wed30

Thu 1  
Dec

Fri 2

Sat 3



ENS Control(16 km)

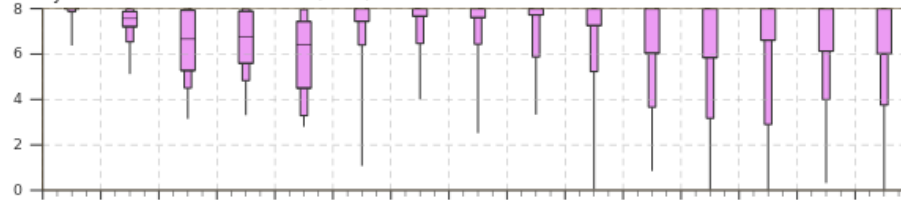
High Resolution (8 km)

# ENS Meteogram

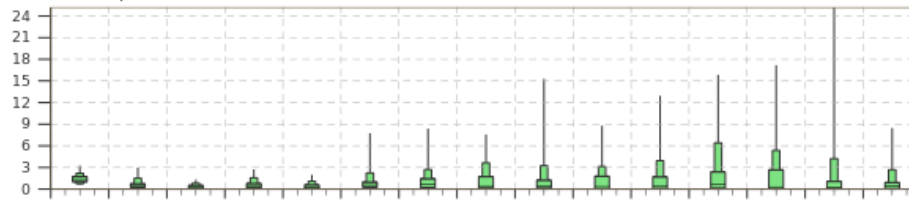
49.27°N 16.53°E (ENS land point) 290 m

Forecast based on ENS distribution Wednesday 23 November 2022 00 UTC

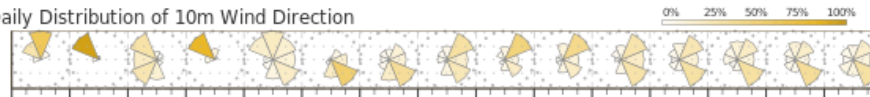
### Daily mean of Total Cloud Cover (okta)



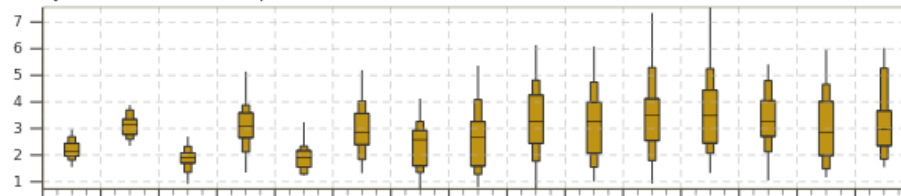
### Total Precipitation (mm/24h)



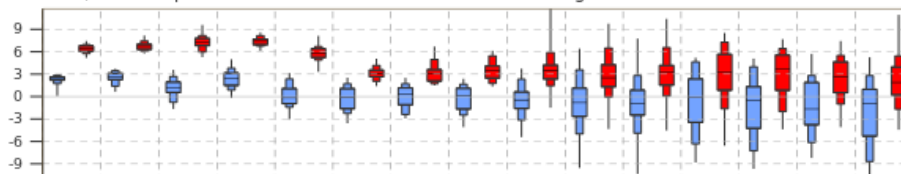
### Daily Distribution of 10m Wind Direction



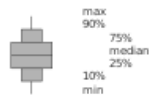
### Daily mean of 10m Wind Speed (m/s)



### 2m min/max Temperature (°C) reduced to 290 m (station height) from 386 m (ENS)



Wed23 Thu24 Fri25 Sat26 Sun27 Mon28 Tue29 Wed30 Thu 1 Fri 2 Sat 3 Sun 4 Mon 5 Tue 6 Wed 7  
Nov Dec  
2022



# Dlouhodobá předpověď (odhad pravděpodobnosti krajních tercilů) pro prosinec

ECMWF Seasonal Forecast

Prob(most likely category of 2m temperature)

Forecast start is 01/11/22, climate period is 1993-2016

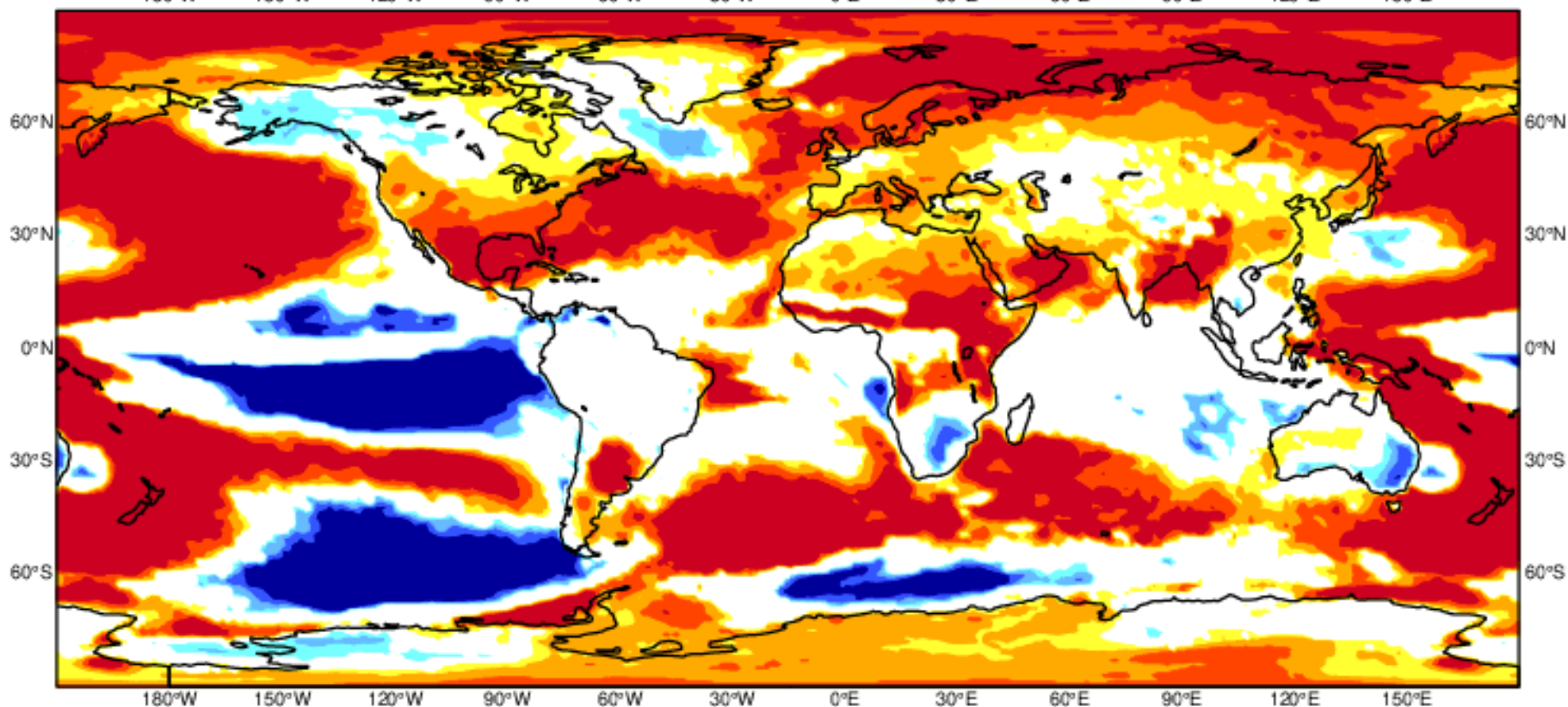
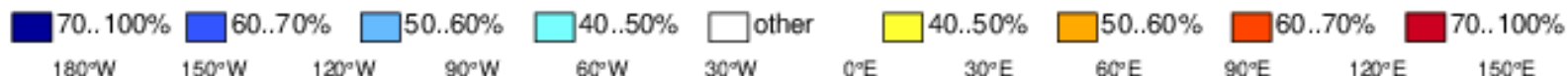
Ensemble size = 51, climate size = 600

System 5

DJF 2022/23

<---- Prob(below lower tercile)

Prob(above upper tercile) ---->



# Dlouhodobá předpověď (odhad pravděpodobnosti krajních tercilů) pro leden

ECMWF Seasonal Forecast

Prob(most likely category of 2m temperature)

Forecast start is 01/11/22, climate period is 1993-2016

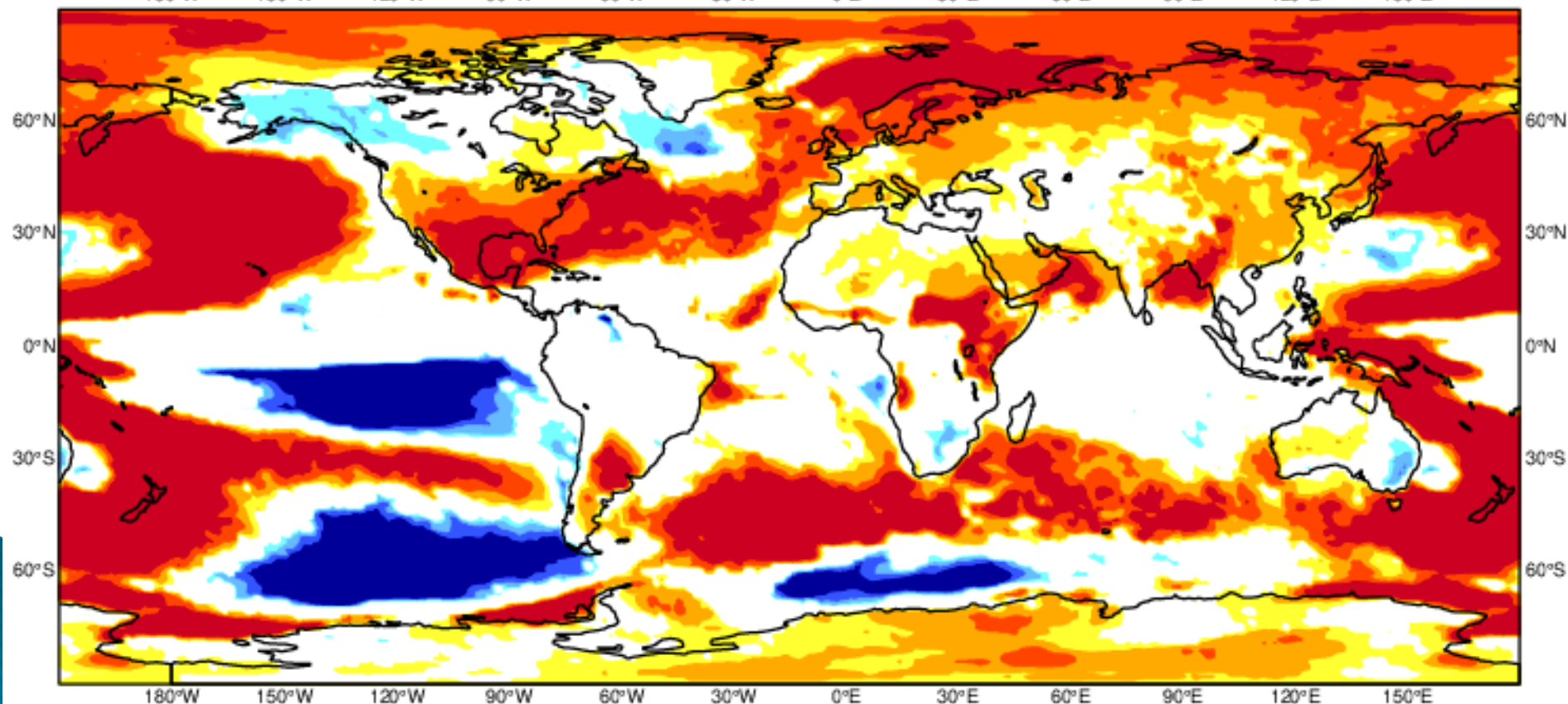
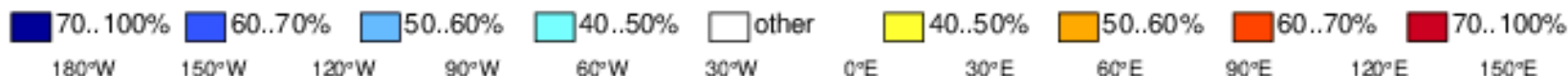
Ensemble size = 51, climate size = 600

System 5

JFM 2023

<---- Prob(below lower tercile)

Prob(above upper tercile) ---->





# Dlouhodobá předpověď (odhad pravděpodobnosti krajních tercilů) pro únor

ECMWF Seasonal Forecast

Prob(most likely category of 2m temperature)

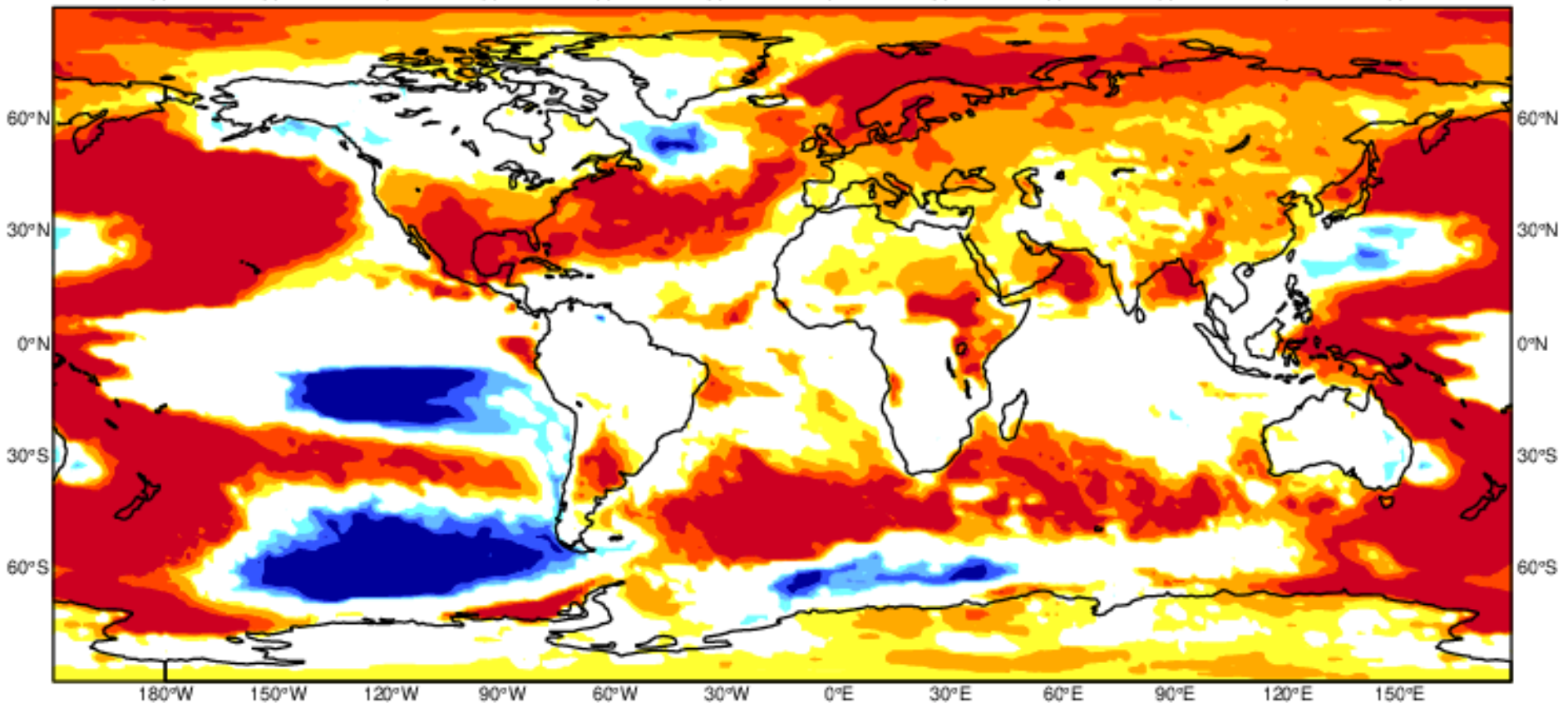
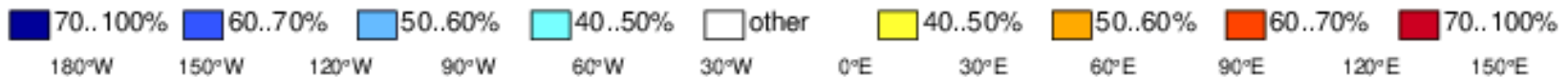
Forecast start is 01/11/22, climate period is 1993-2016

Ensemble size = 51, climate size = 600

System 5  
FMA 2023

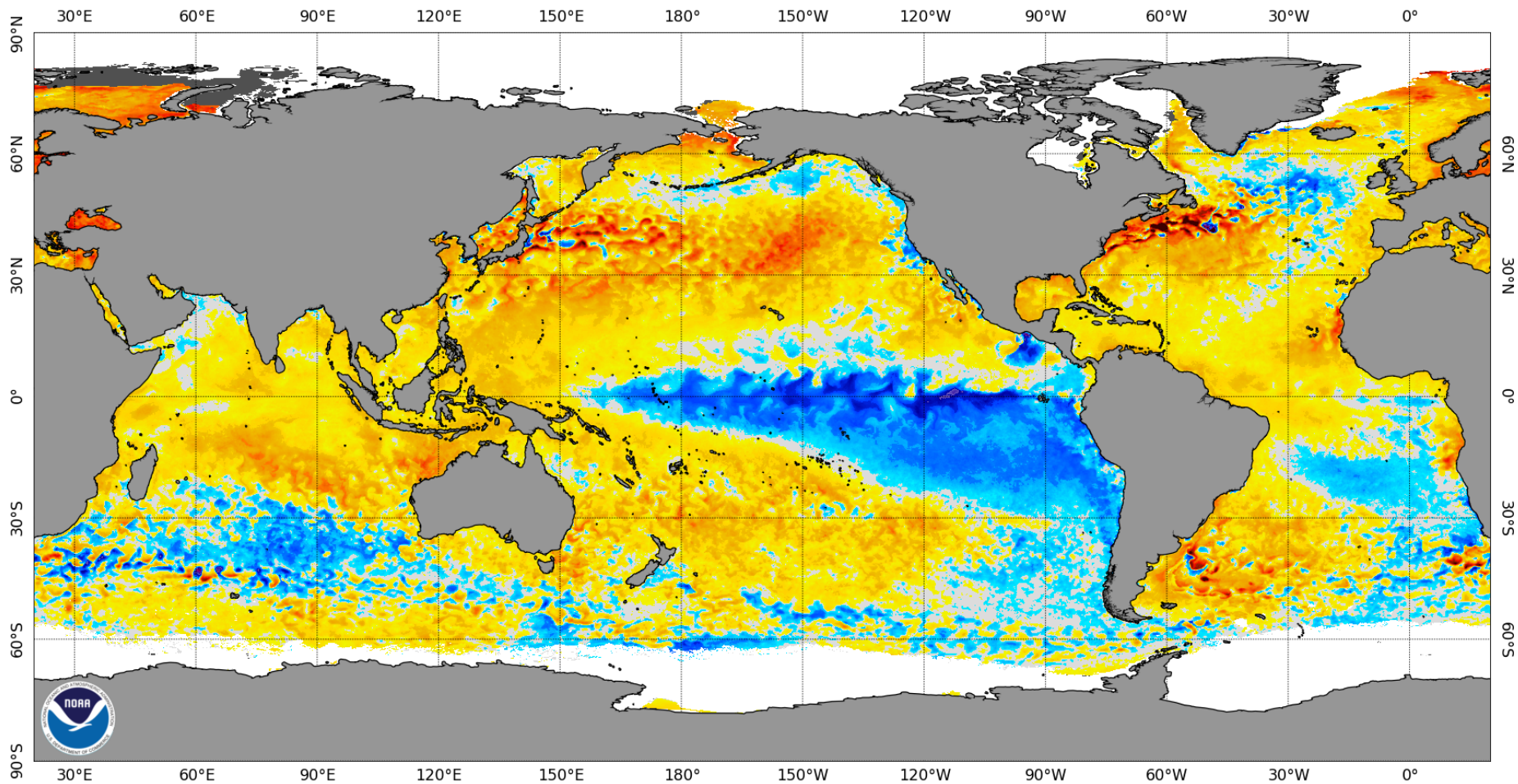
<---- Prob(below lower tercile)

Prob(above upper tercile) ---->



# Rozdíl aktuální teploty moře a klim. průměru

NOAA Coral Reef Watch Daily 5km SST Anomalies (v3.1) 30 Nov 2020



No data



# Úspěšnost sezónních předpovědí ECMWF

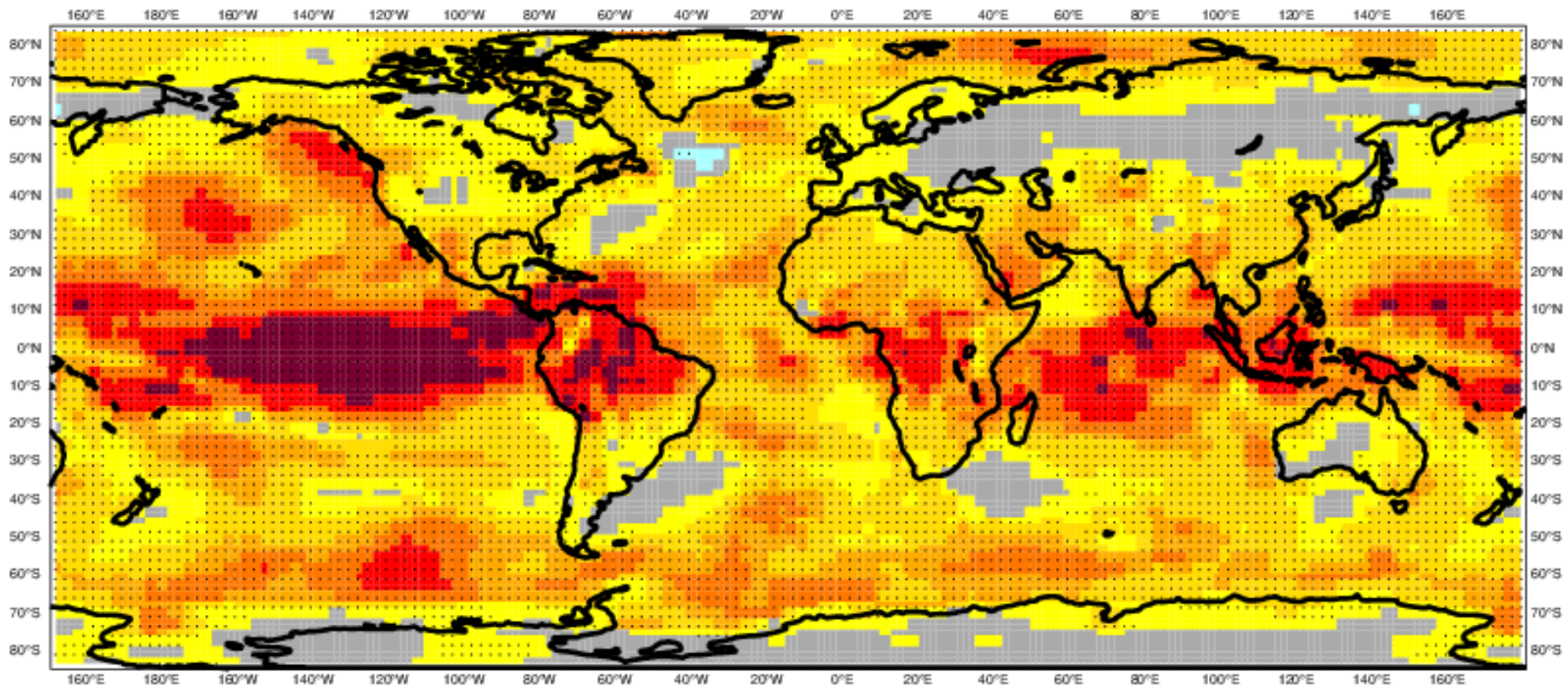
## Předpověď na 30–60 dní

Anomaly Correlation Coefficient for 0001 with 25 ensemble members

Near-surface air temperature

Hindcast period 1981-2016 with start in December average over months 2 to 4

Black dots for values significantly different from zero with 95% confidence ( 1000 samples)



# Úspěšnost sezónních předpovědí ECMWF

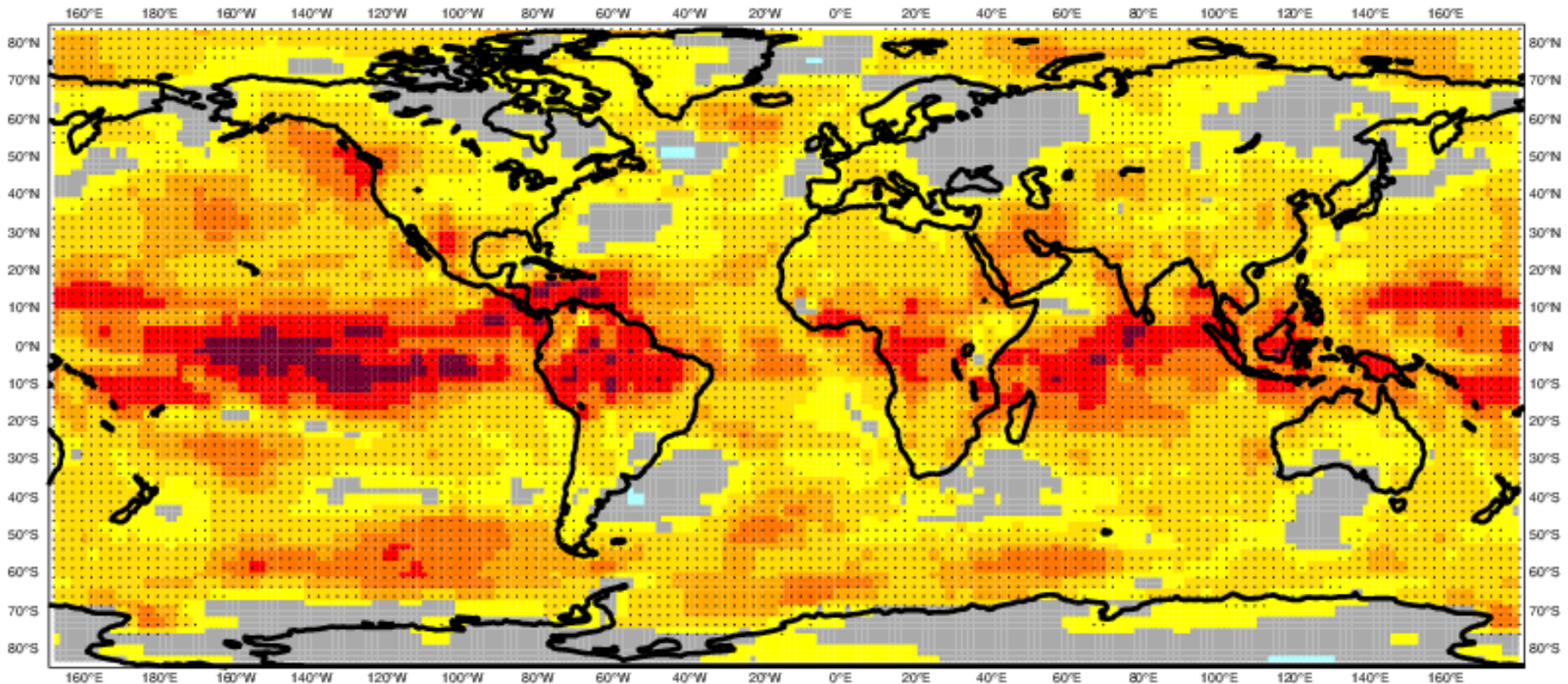
## Předpověď na 60–90 dní

Anomaly Correlation Coefficient for 0001 with 25 ensemble members

Near-surface air temperature

Hindcast period 1981–2016 with start in December average over months 3 to 5

Black dots for values significantly different from zero with 95% confidence (1000 samples)



# Úspěšnost sezónních předpovědí ECMWF

## Předpověď na 90–120 dní

Anomaly Correlation Coefficient for 0001

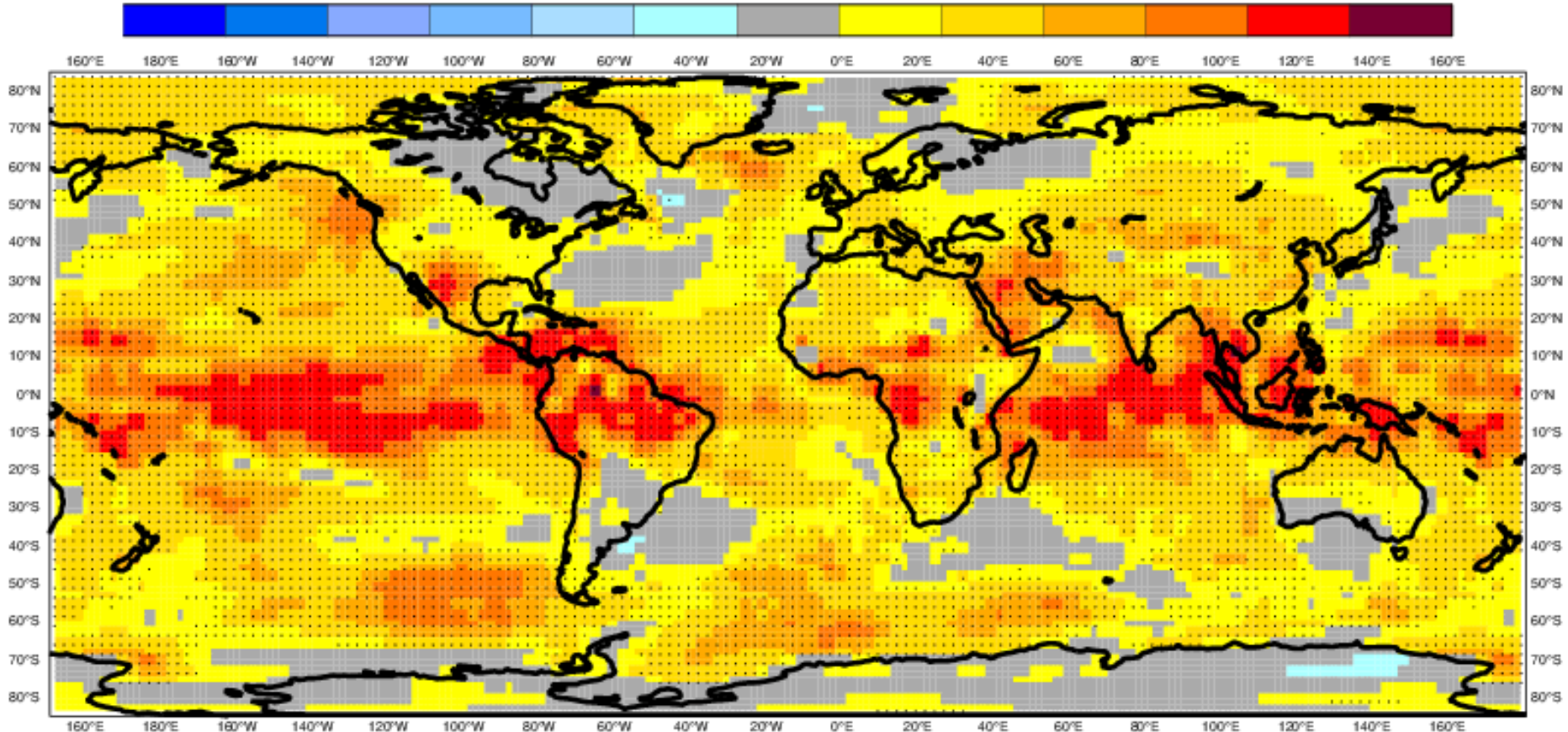
with 25 ensemble members

Near-surface air temperature

Hindcast period 1981-2016 with start in December average over months 4 to 6

Black dots for values significantly different from zero with 95% confidence ( 1000 samples)

-1 -0.9 -0.8 -0.7 -0.6 -0.4 -0.2 0.2 0.4 0.6 0.7 0.8 0.9 1



# Předpověď ENSO

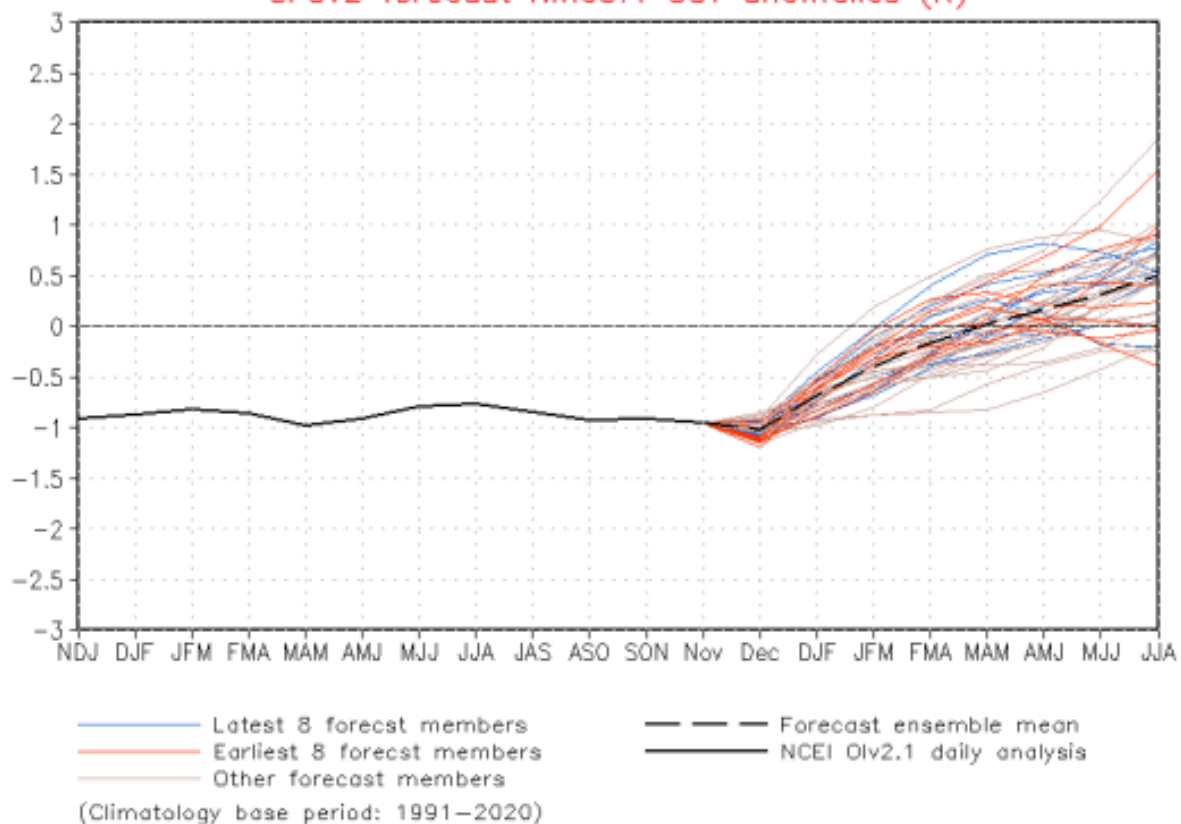
(anomálie teploty hladiny moře rovníkového Pacifiku pomocí různých běhů modelů)



NWS/NCEP/CPC

Last update: Sat Nov 19 2022  
Initial conditions: 9Nov2022-18Nov2022

CFSv2 forecast Nino3.4 SST anomalies (K)



# Velmi krátkodobá předpověď, (nowcasting)

- ▶ předpověď na 0–12 hodin (nowcasting 0–2 h)
  - extrapolační předpovědi; Nowcasting pro předpověď srážek je založen na detekci srážkově významné oblačnosti (radarem, družicí) a extrapolaci jejich pohybu pomocí vektoru větru z numerického modelu nebo podle jejich předchozího pohybu
  - Nyní větší využívání umělé inteligence

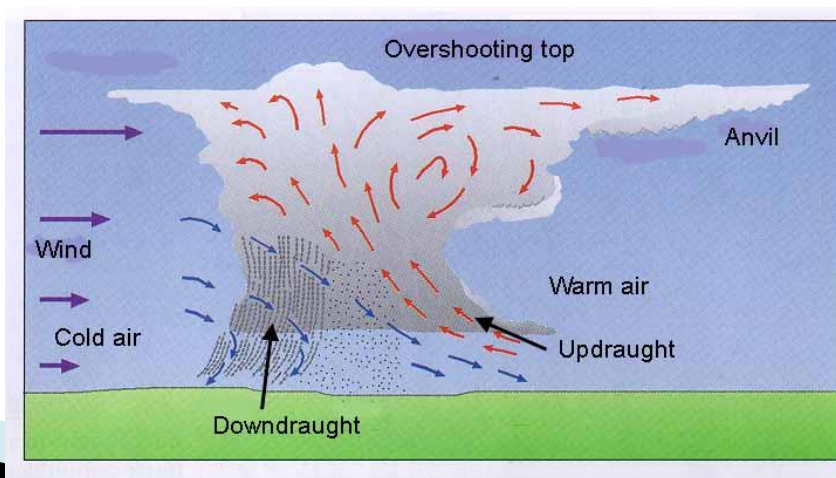
# Velmi krátkodobá předpověď, nowcasting

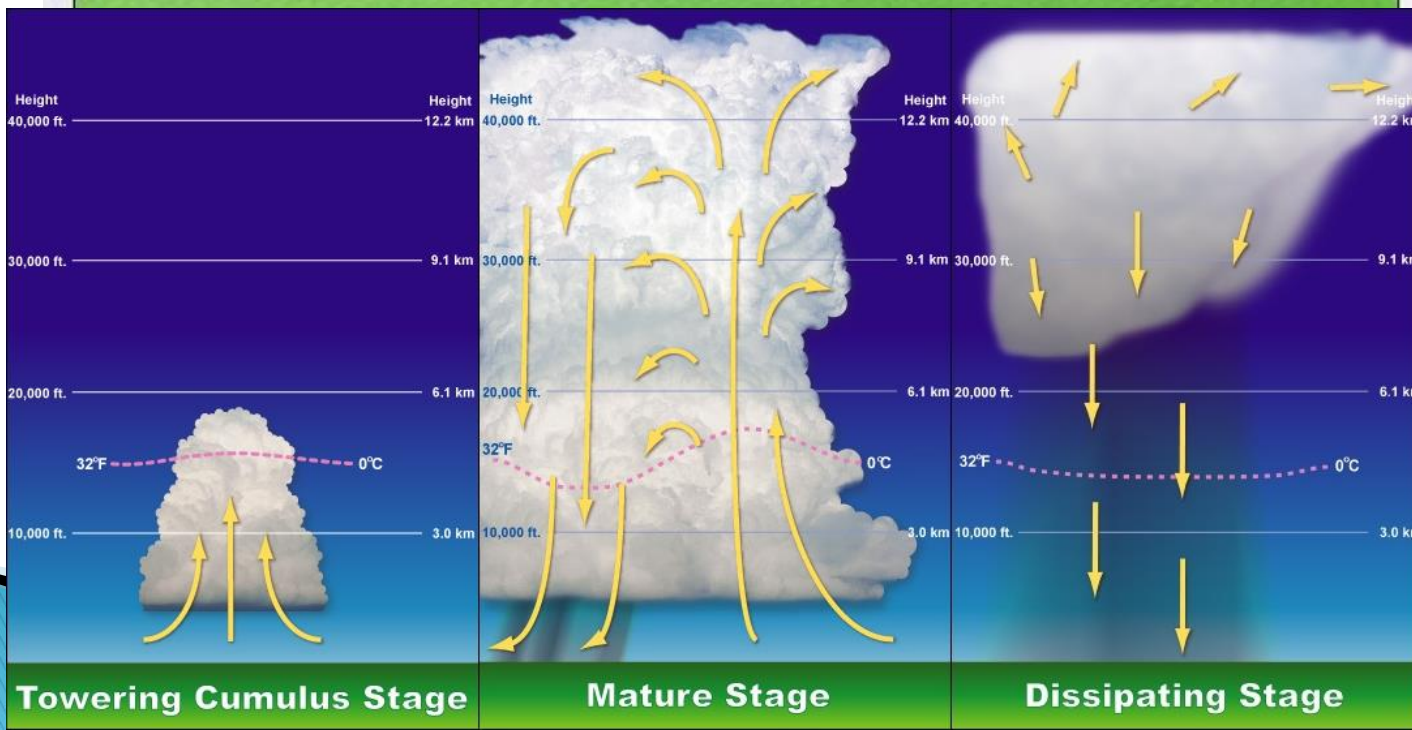
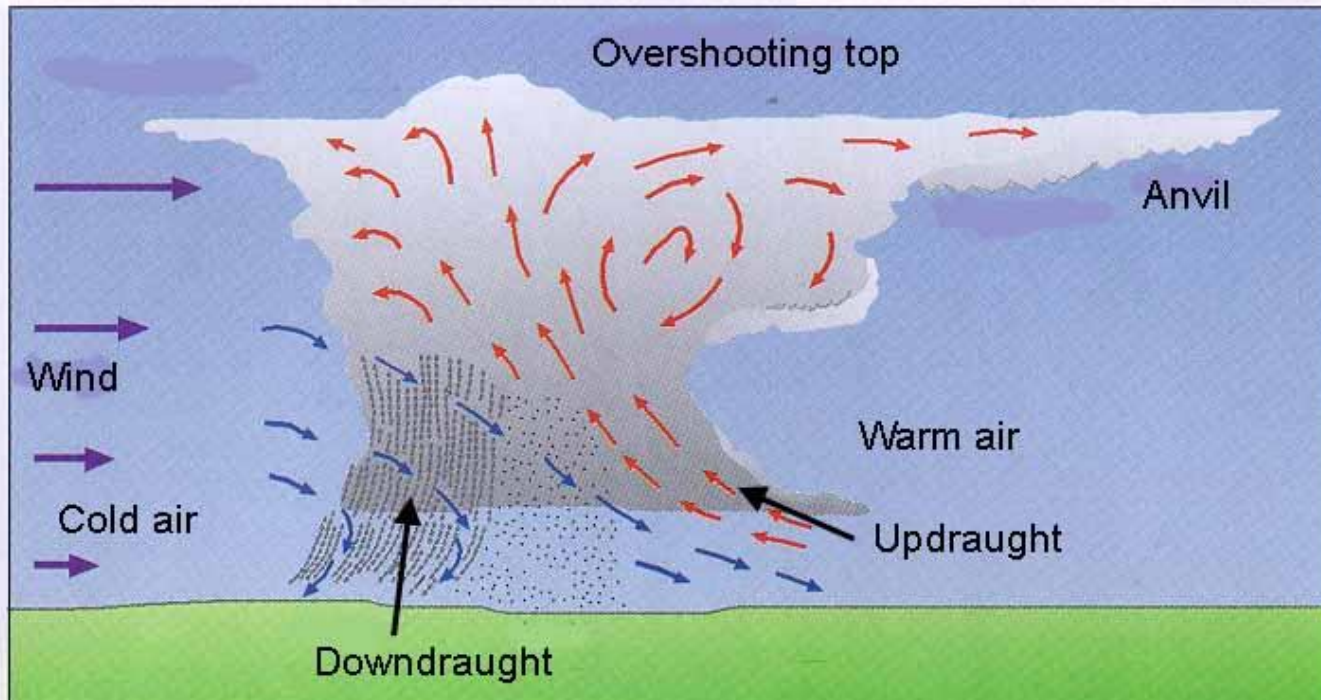
- Problémy: nerovnoměrnost (nelinearita) pohybu význačných oblaků, zejména konvektivních buněk; bouřky mohou vznikat a zanikat velmi rychle.
- Využitelný předstih předpovědi bouřek: do 30–60 minut, u větších komplexů bouřek hodiny
- Výsledky extrapolčního nowcastingu jsou nyní i v některých [mobilních aplikacích](#)



# Konvektivní bouře, bouřky

Základem bouřky je lokální výstupný proud (na obrázku bude označen červeně), který „zavede“ teplejší vzduch do větších výšek, kde se ochladí a vlhkost v něm obsažená kondenzuje. Srážky při svém pádu „strhávají“ a ochlazují vzduch pod sebou a vytvářejí sestupný proud (modře). Ten se může při zemi projevit silnými nárazy větru (húlavou).





# Vývoj bouřkového oblaku

Vývoj bouřkového oblaku v oblasti Zlatých Hor (severního okraje Jeseníků); od počátku do plného rozvoje bouřkového oblaku uplynulo pouhých dvacet minut.

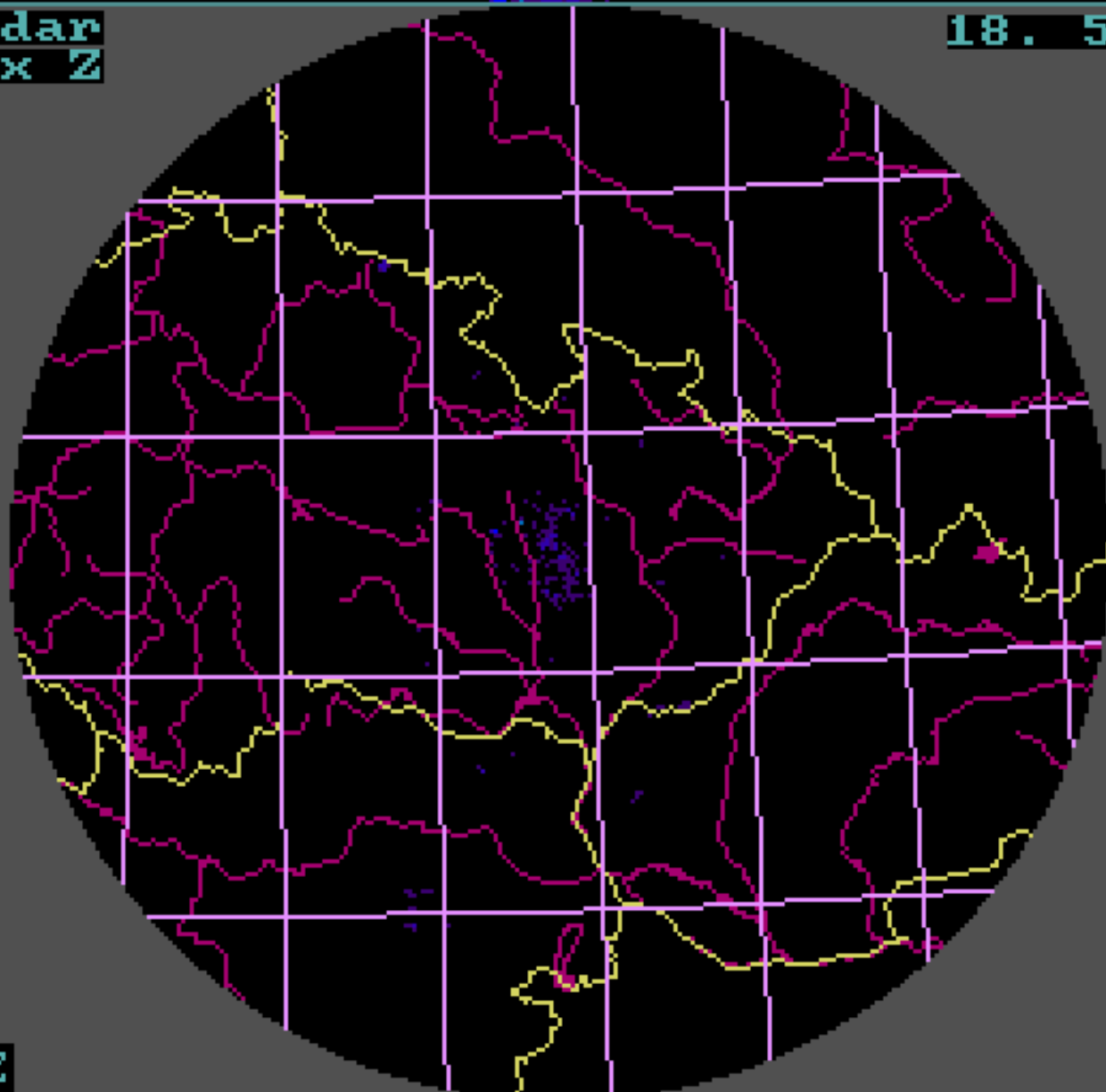
Radar  
Max Z

18. 5.96

Sk 09:20

60  
56  
52  
48  
44  
40  
36  
32  
28  
24  
20  
16  
12  
8  
4

dBZ



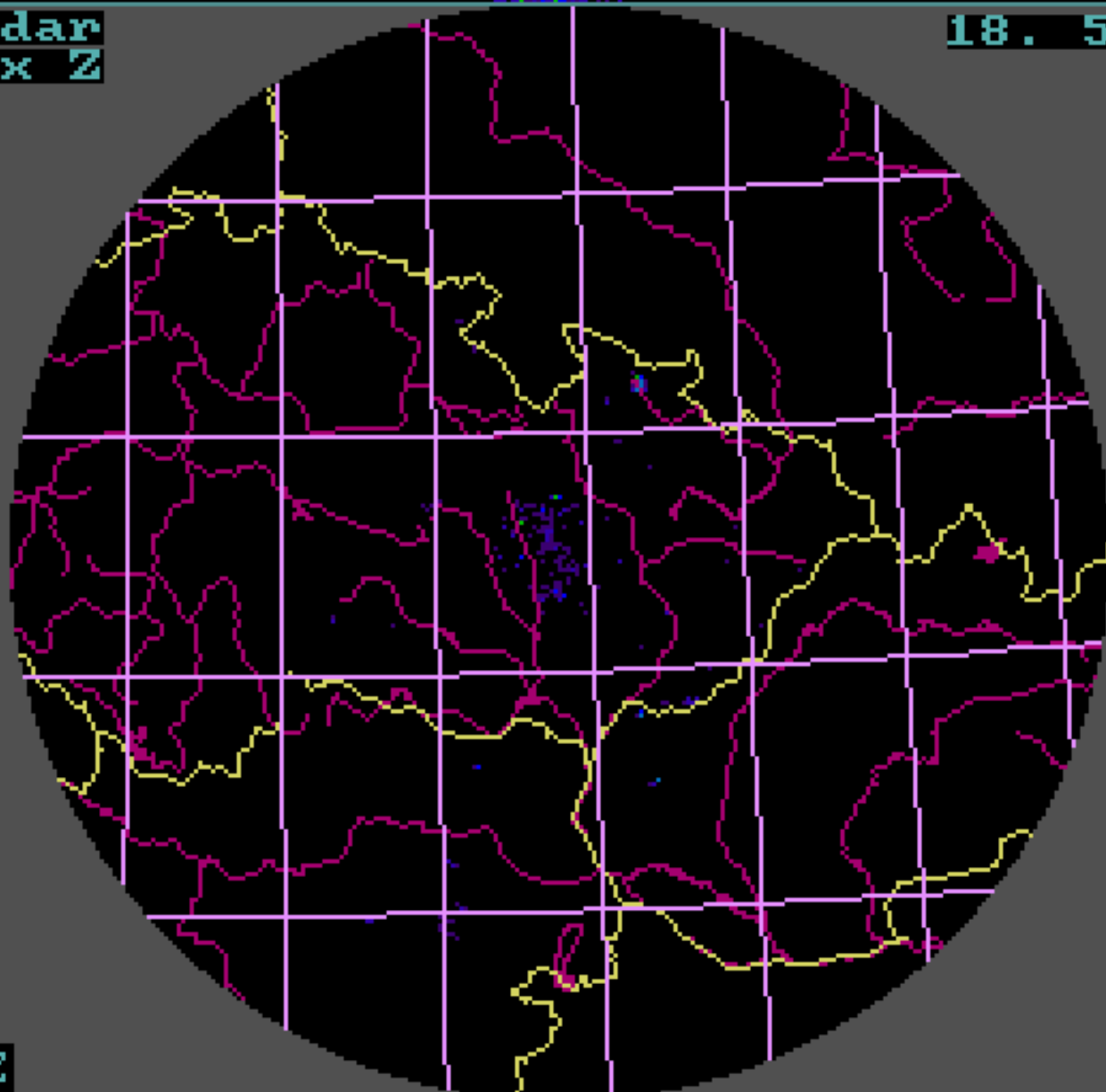
Radar  
Max Z

18. 5.96

Sk 09:30

60  
56  
52  
48  
44  
40  
36  
32  
28  
24  
20  
16  
12  
8  
4

dBZ



Radar  
Max Z

18. 5.96

Sk 09:40

60

56

52

48

44

40

36

32

28

24

20

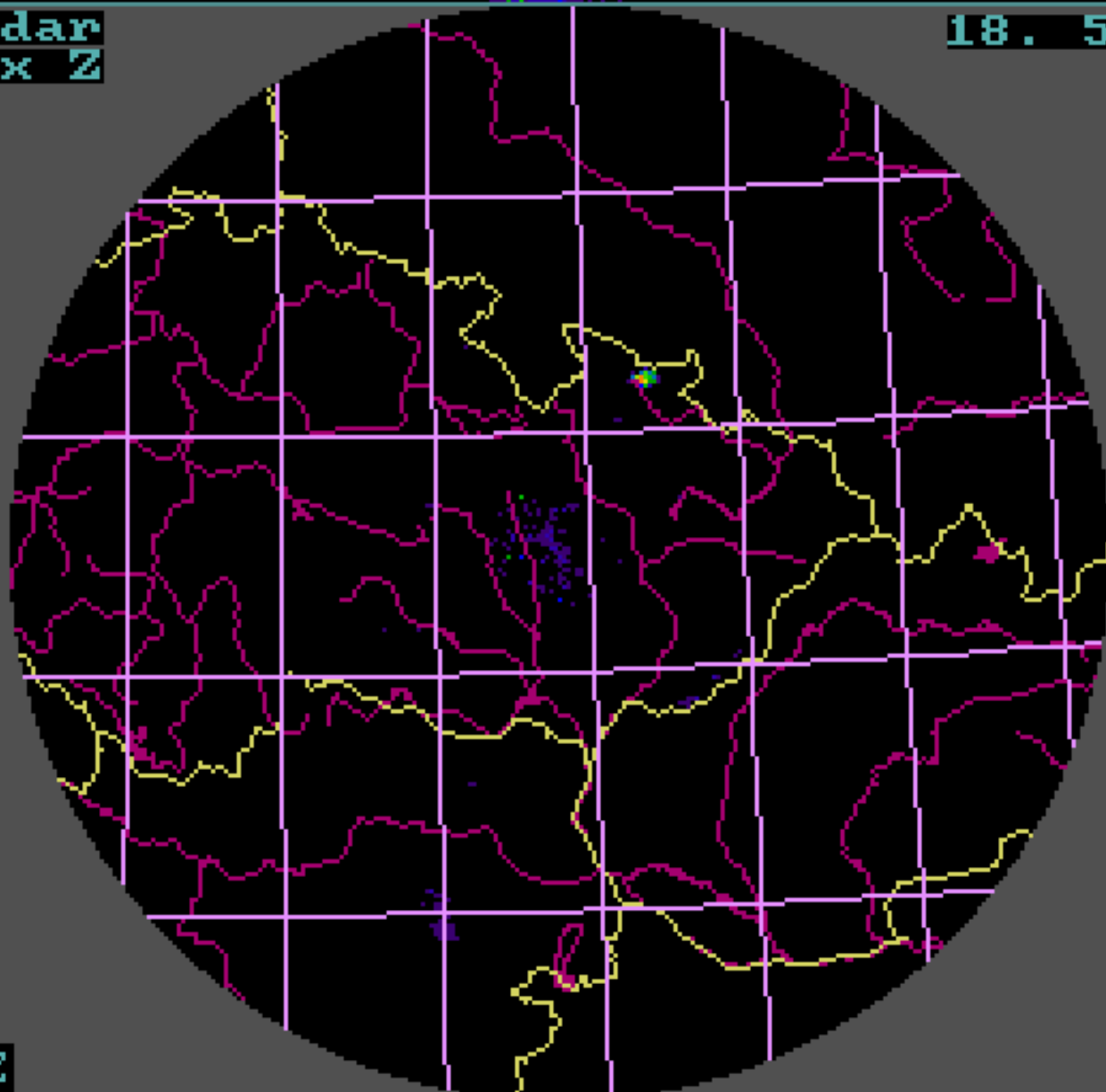
16

12

8

4

dBZ



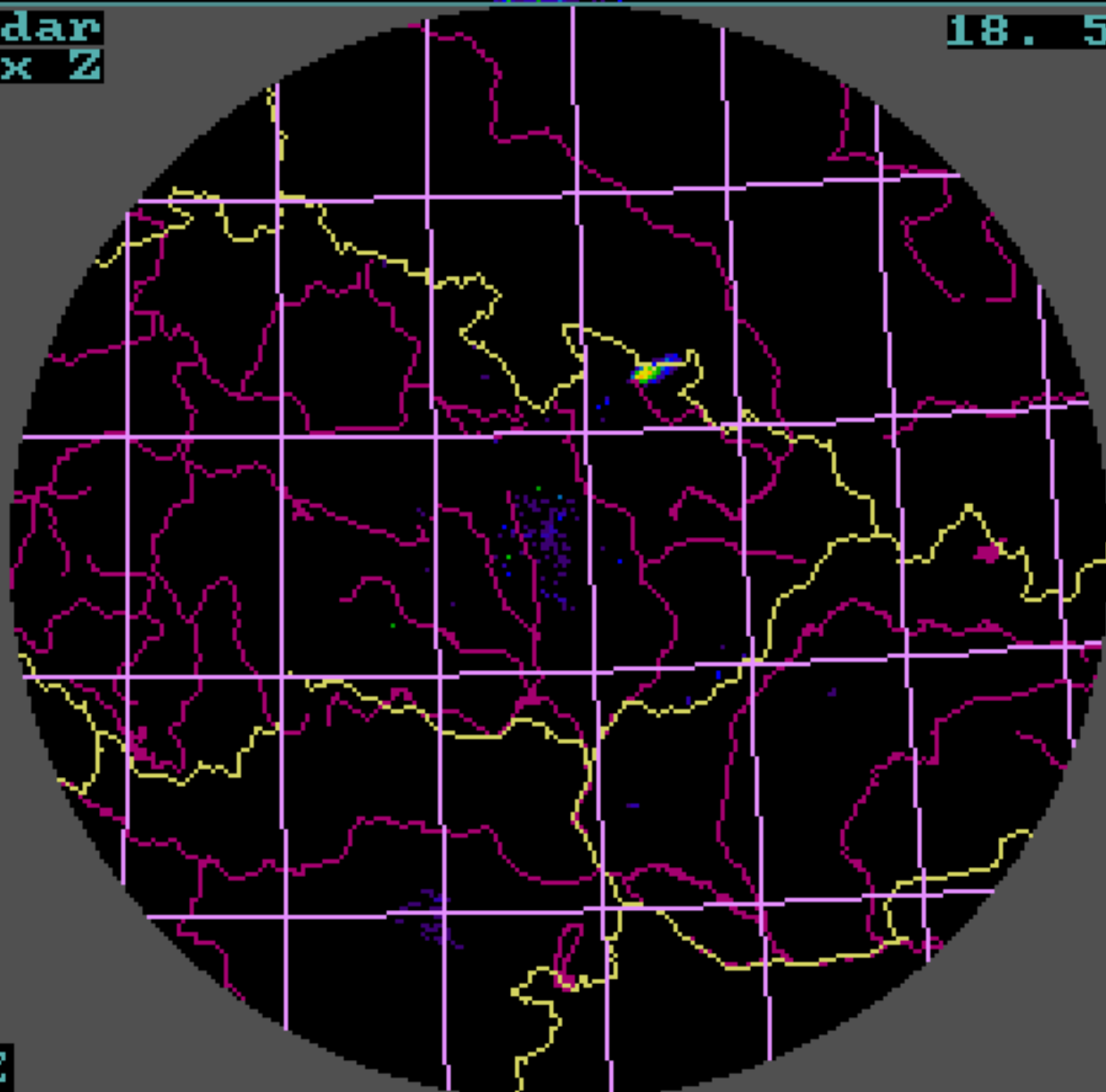
Radar  
Max Z

18. 5.96

Sk 09:50

60  
56  
52  
48  
44  
40  
36  
32  
28  
24  
20  
16  
12  
8  
4

dBZ



# O několik hodin později:

Bouřkové buňky byly již dostatečně vyvinuté, jejich prediktabilita vyšší, jejich pohyb se v některých případech odchyloval od řídicího jihozápadního proudění:



Radar  
Max Z

18. 5.96

Sk 17:00

60

56

52

48

44

40

36

32

28

24

20

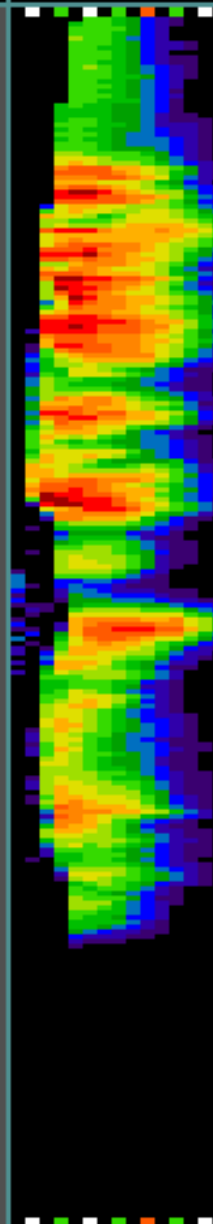
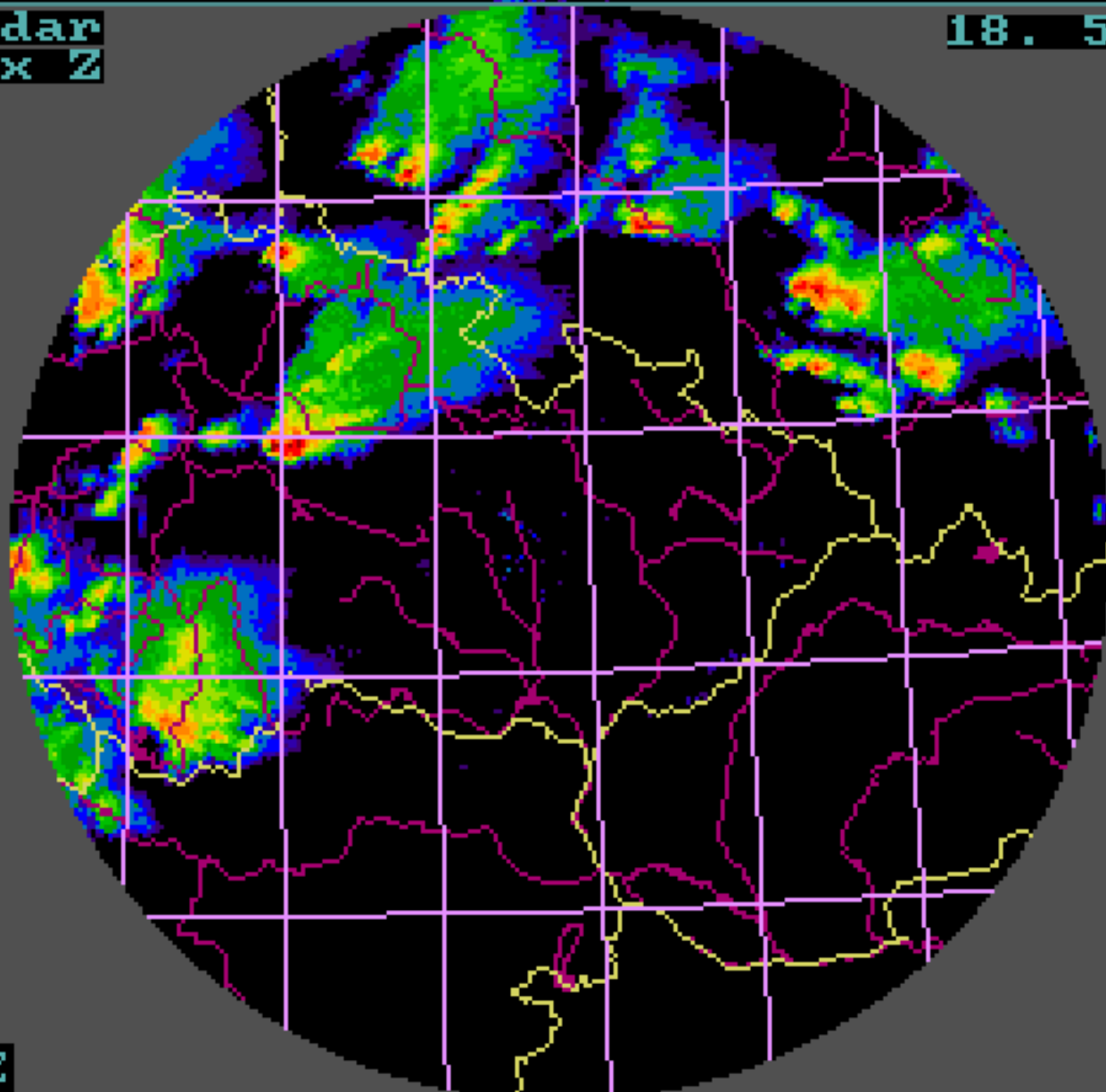
16

12

8

4

dBZ



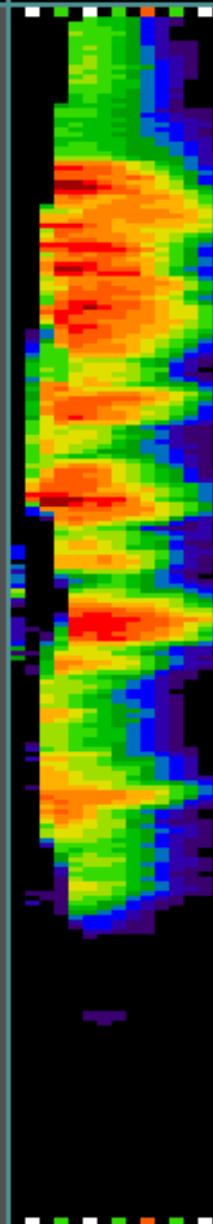
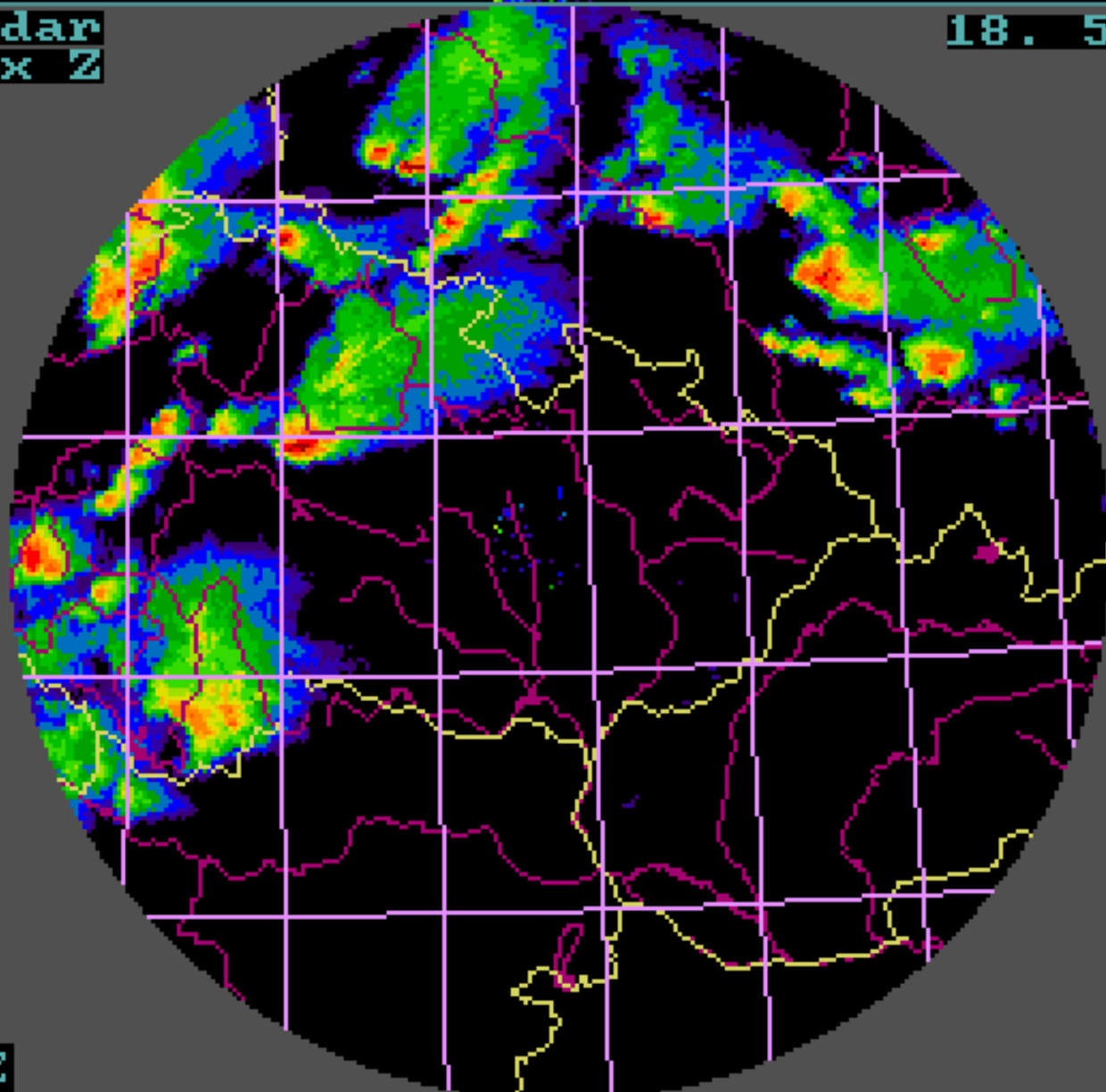
Radar  
Max Z

18. 5.96

Sk 17:10

60  
56  
52  
48  
44  
40  
36  
32  
28  
24  
20  
16  
12  
8  
4

dBZ



Radar  
Max Z

18. 5.96

Sk 17:20

60

56

52

48

44

40

36

32

28

24

20

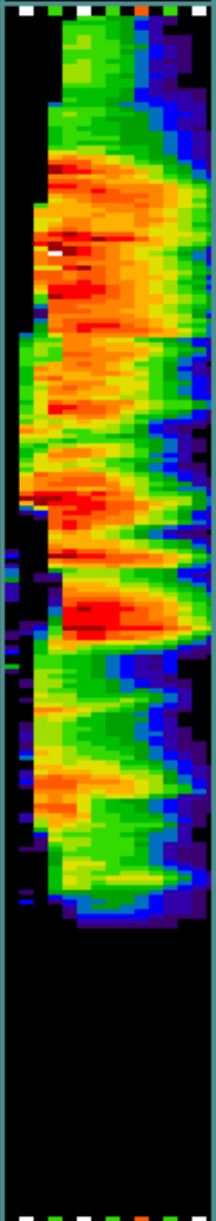
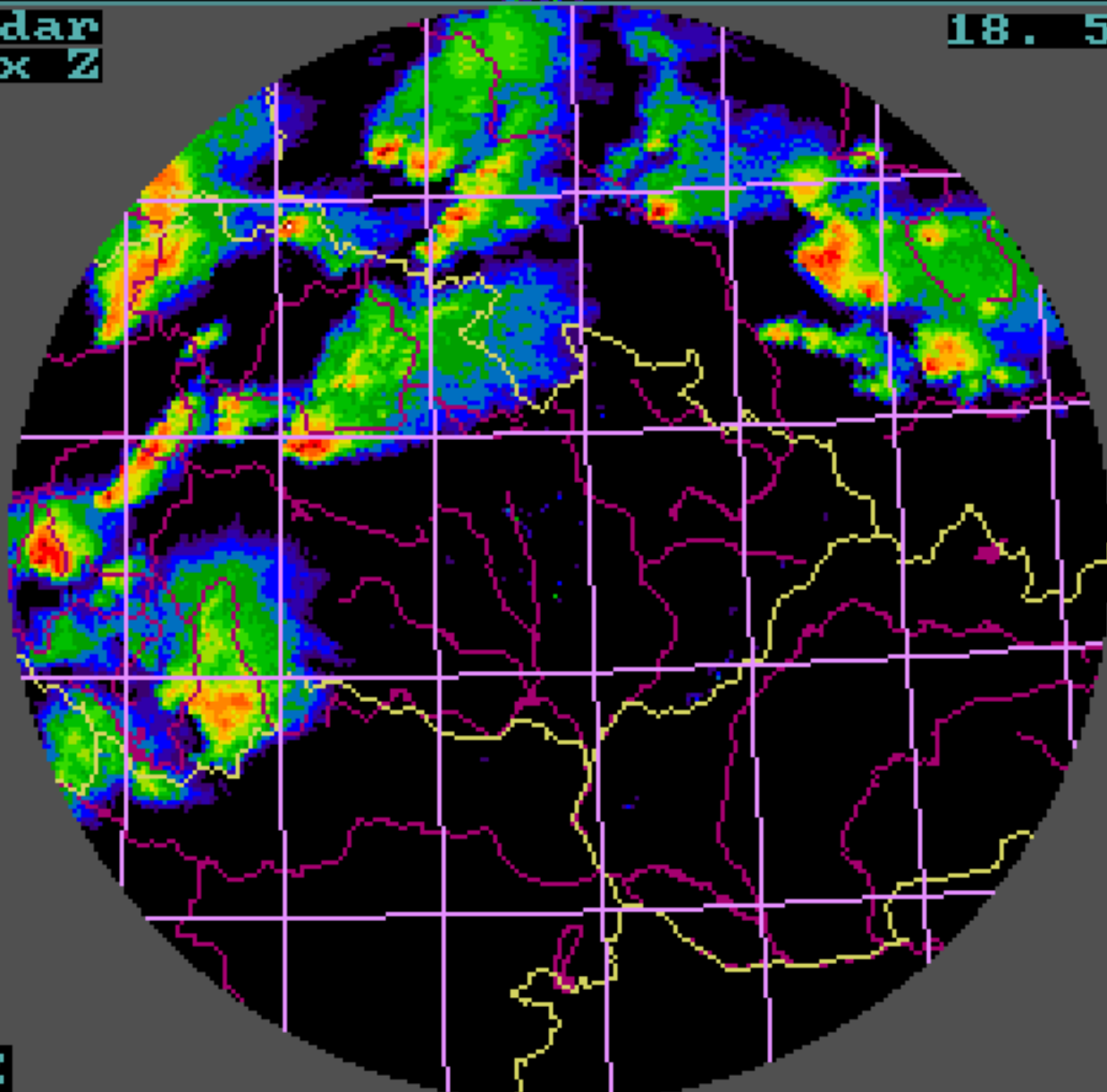
16

12

8

4

dBZ



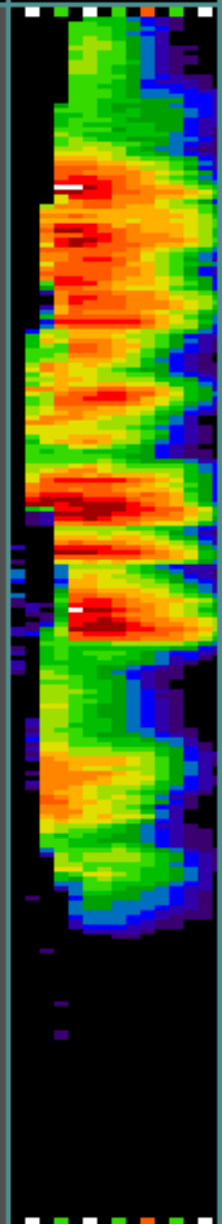
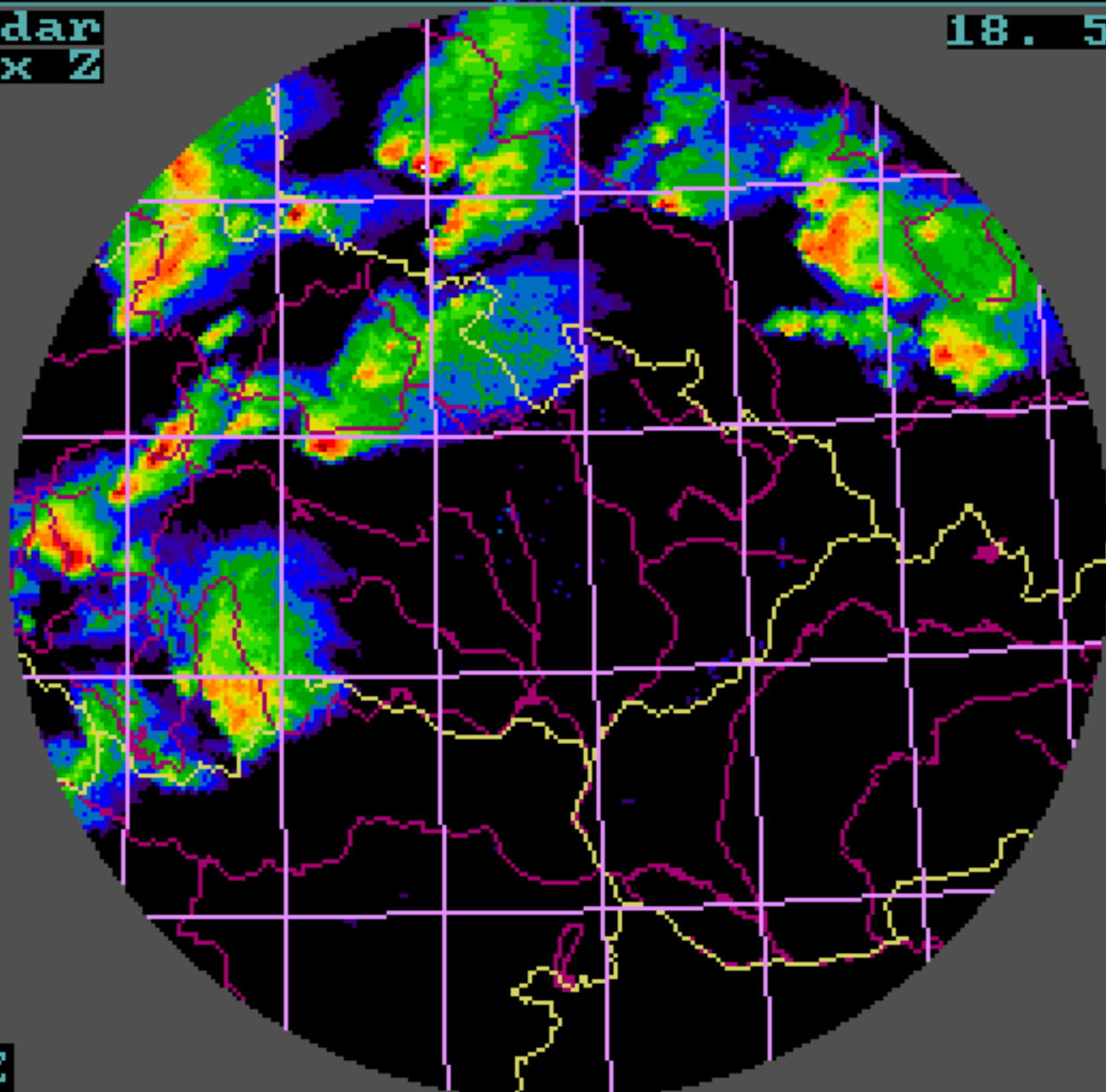
Radar  
Max Z

18. 5.96

Sk 17:30

60  
56  
52  
48  
44  
40  
36  
32  
28  
24  
20  
16  
12  
8  
4

dBZ



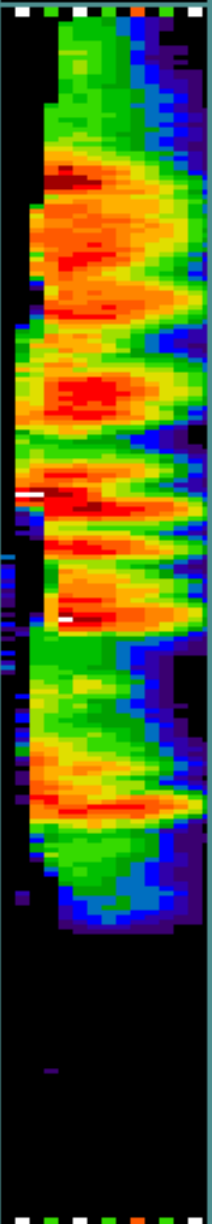
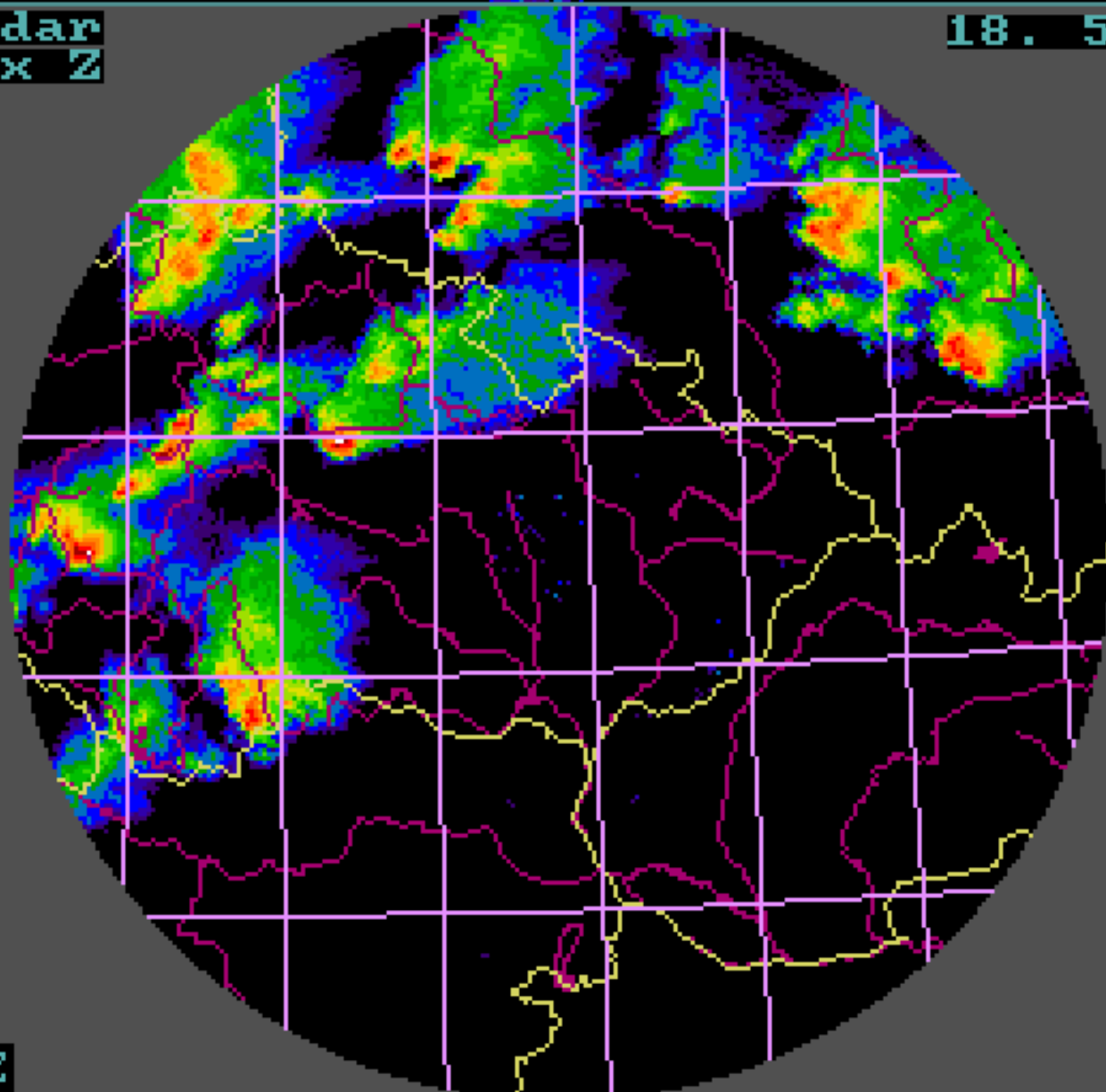
Radar  
Max Z

18. 5.96

Sk 17:40

60  
56  
52  
48  
44  
40  
36  
32  
28  
24  
20  
16  
12  
8  
4

dBZ



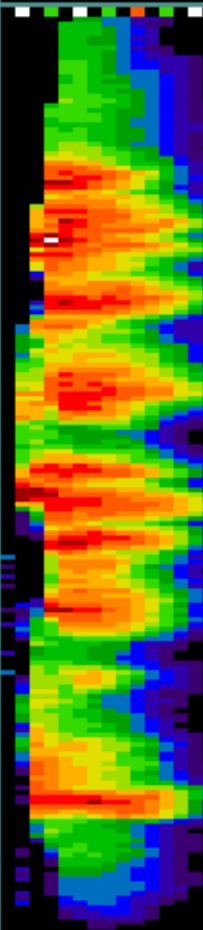
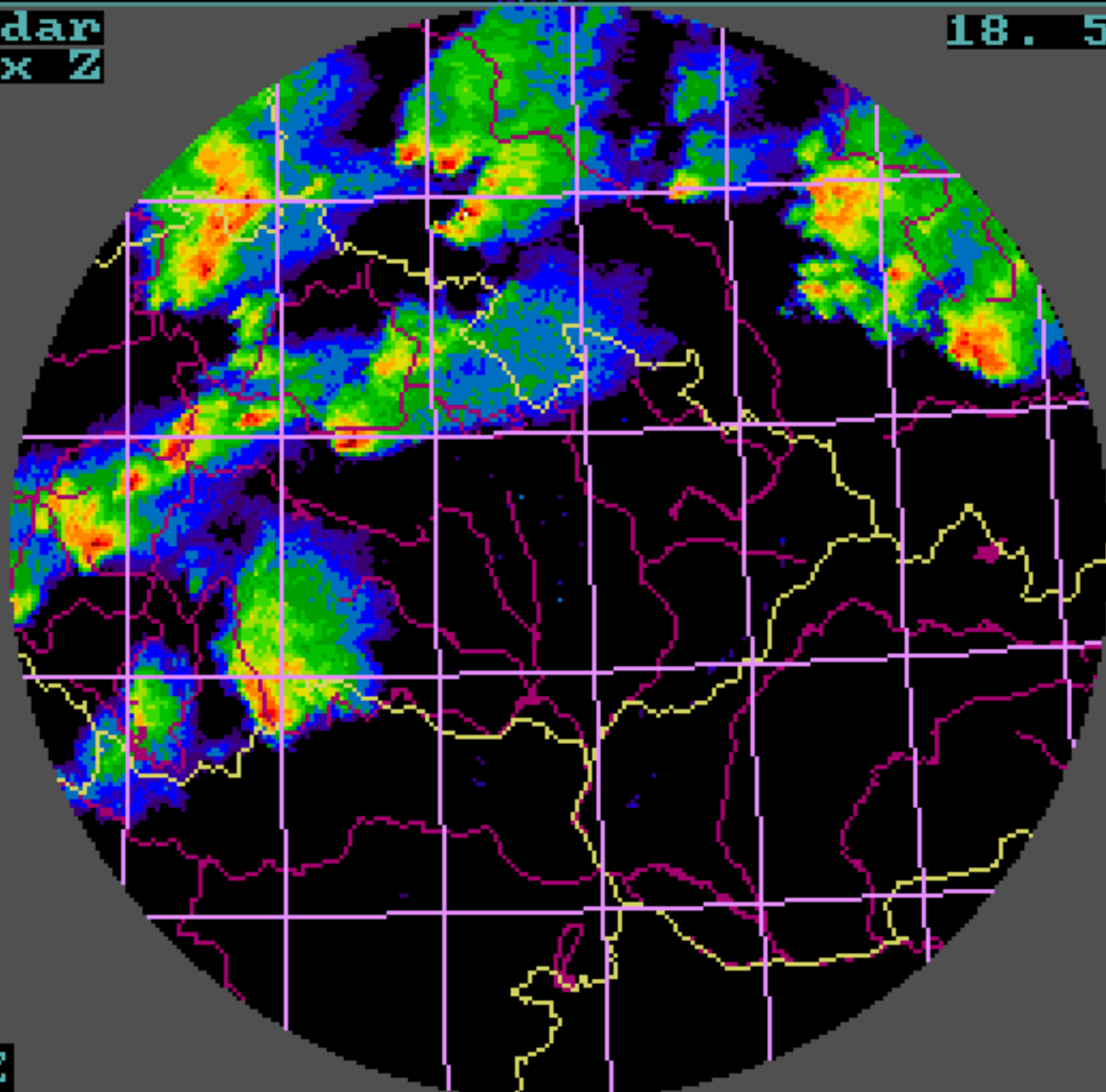
Radar  
Max Z

18. 5.96

Sk 17:50

60  
56  
52  
48  
44  
40  
36  
32  
28  
24  
20  
16  
12  
8  
4

dBZ



# Závěr – výhledy v oblasti meteorologie

- ▶ Trendem v meteorologii je nyní současné využívání (integrace) více informačních zdrojů (např. měření + NWP modely + dálková detekce)
- ▶ Automatizace rutinních činností (robotizace duševní práce, nástup strojového učení)
- ▶ Rychlá aktualizace údajů, nowcasting
- ▶ Pravděpodobnostní výstupy
- ▶ Přejít na místní předpovědi, vliv používání chytrých telefonů a tabletů

# Zajímavosti

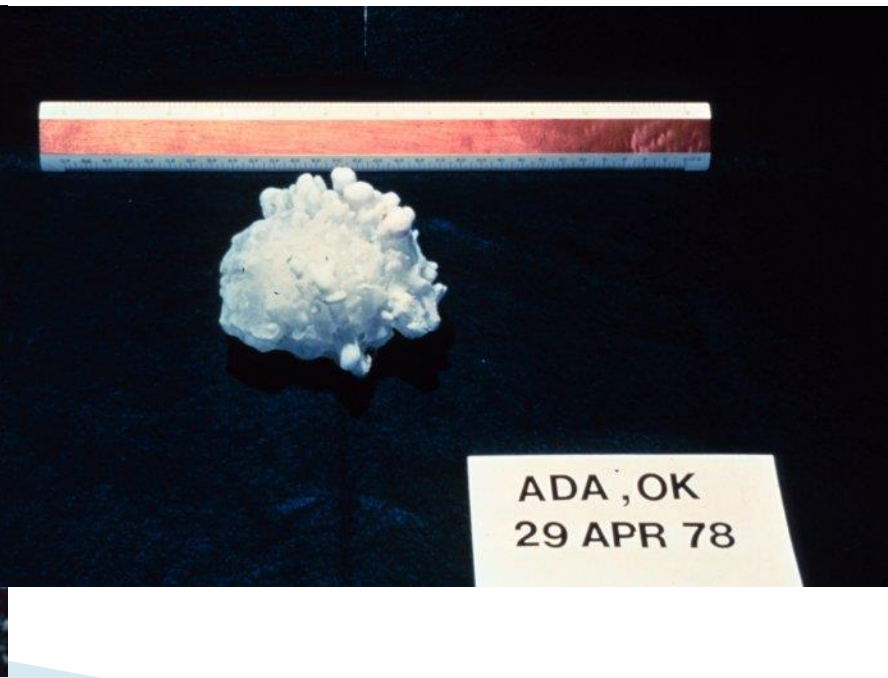
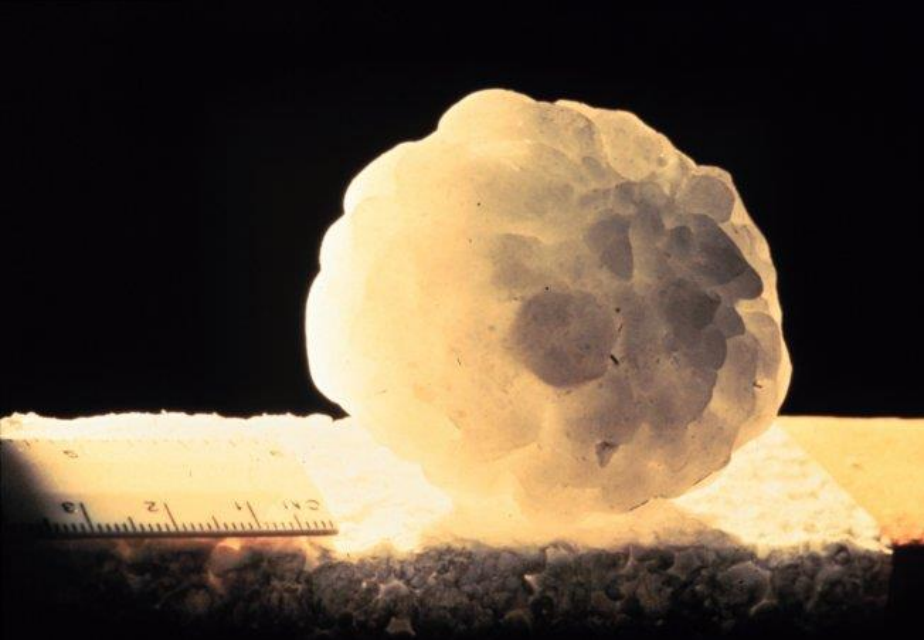
## Silné bouřky

Následují obrázky krup ze 30.6.1997 u Žďáru nad Sázavou a jejich následků.









# Tornáda

- ▶ Tornáda jsou atmosférické víry o typickém rozměru několik **desítek m až stovek m**. Vznikají při silných bouřích v oblastech subtropů a mírných šířek. Nejvíce tornád na km<sup>2</sup> je hlášeno z **Velké Británie**, ale nejsilnější tornáda vznikají v oblasti Spojených států amerických.





# Čertíci, rarášci

- ▶ Malý (a většinou neškodný) příbuzný tornád je tzv. čertík (=rarášek), což je vír s vertikální osou vznikající za málo oblačné oblohy v jarních, případně letních měsících, kdy se přehřátý vzduch z přízemních vrstev atmosféry „zavrtává“ do horních chladnějších vrstev.







# Tornáda v České republice?

Ano, též u nás se tornáda vyskytují, ale naštěstí většinou nejsou příliš silná. Přesto mohou způsobit velké škody, jak ukáží další snímky. První dva snímky se týkají tornáda v Lanžhotě 26.5.1994, další popisují následky tornáda v polesí Teplá (západní Čechy) 21. 7. 1998.



# Tornádo u Světlé nad Sázavou 31. 5. 2001





Tornádo u  
Světlé nad  
Sázavou 31. 5.  
2001



31. května 2001

video závěrečné fáze tornáda, savé víry













konec dubna 2004 – tři roky „poté“...











# Tornádo u Brna 20. 7. 2002





# Tornádo u Brna 20. 7. 2002



# Tornádo 19. dubna 2000 u obce Studnice, okres Vyškov

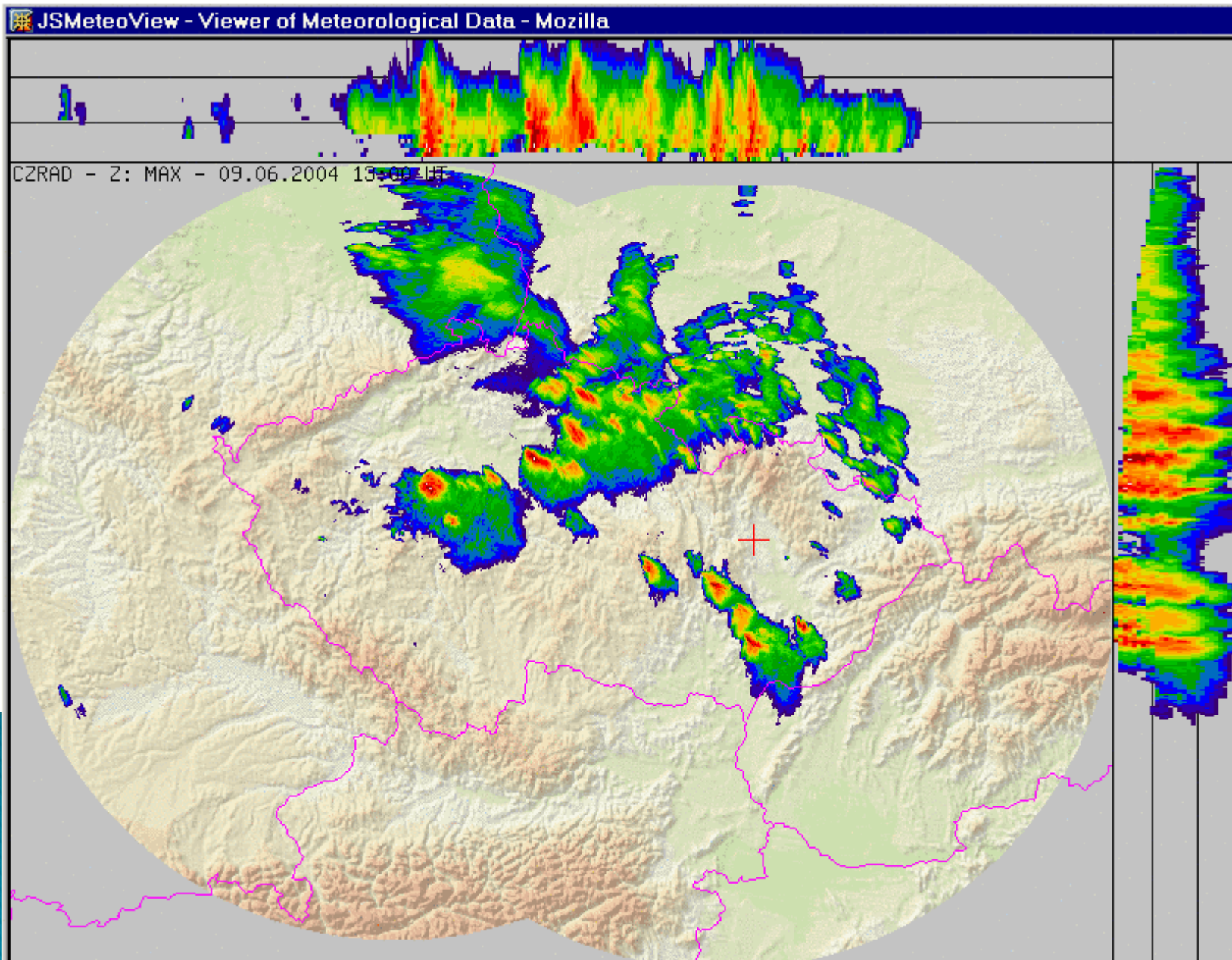


Litovel, 9. 6. 2004





Litovel, 9. 6. 2004





Litovel, 9. 6. 2004





Litovel, 9. 6. 2004



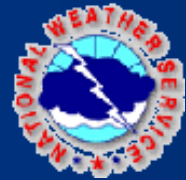
Litovel, 9. 6. 2004



# Předpovědi tornád

Předpověď tornáda je jeden z nejsložitějších úkolů meteorologie. V praxi se děje pouze u povětrnostní služby USA, která využívá vysoce výkonné dopplerovské radary detekující radiální složky proudění v měřítku stovek metrů. Takto se podařilo detekovat pravděpodobný vznik tornáda a varovat veřejnost v Oklahomě 3.5.1999 20–30 minut před vlastním příchodem ničivého víru.





# Tornadoes in the United States

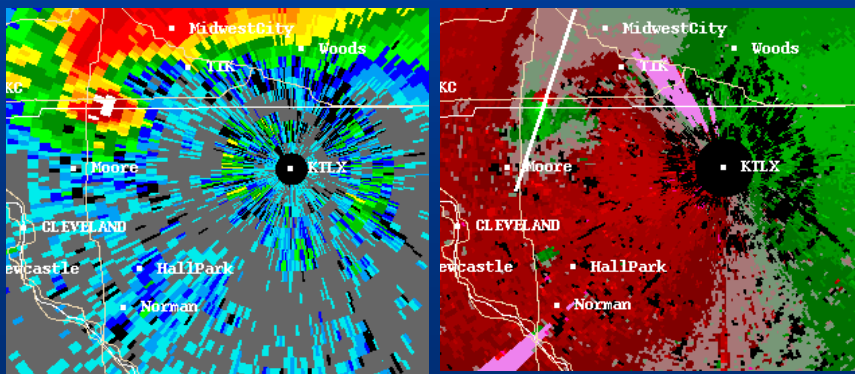
On May 3rd 1999 an F-5 tornado struck Oklahoma City

-2 km wide

-500 km/hr doppler measured winds near the surface

-42 deaths

-7000 homes destroyed











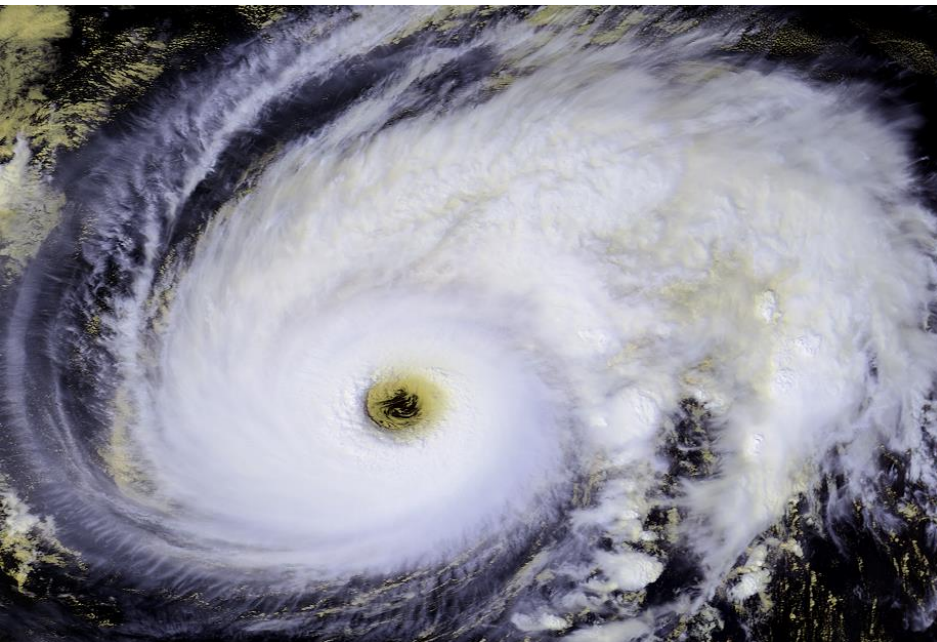




# Tropické cyklóny

Velikost: stovky km

Trvání: několik dnů



Karibik: hurikán

Pacifik: tajfun

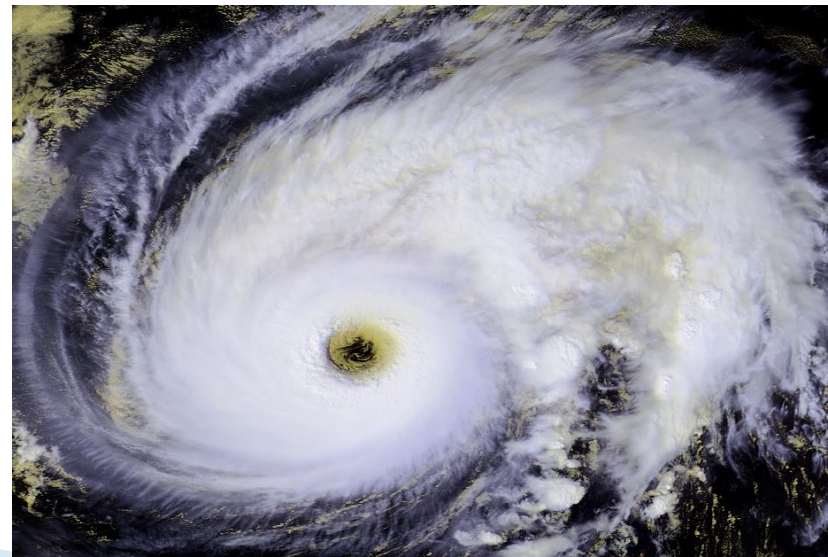


# Tropické cyklóny

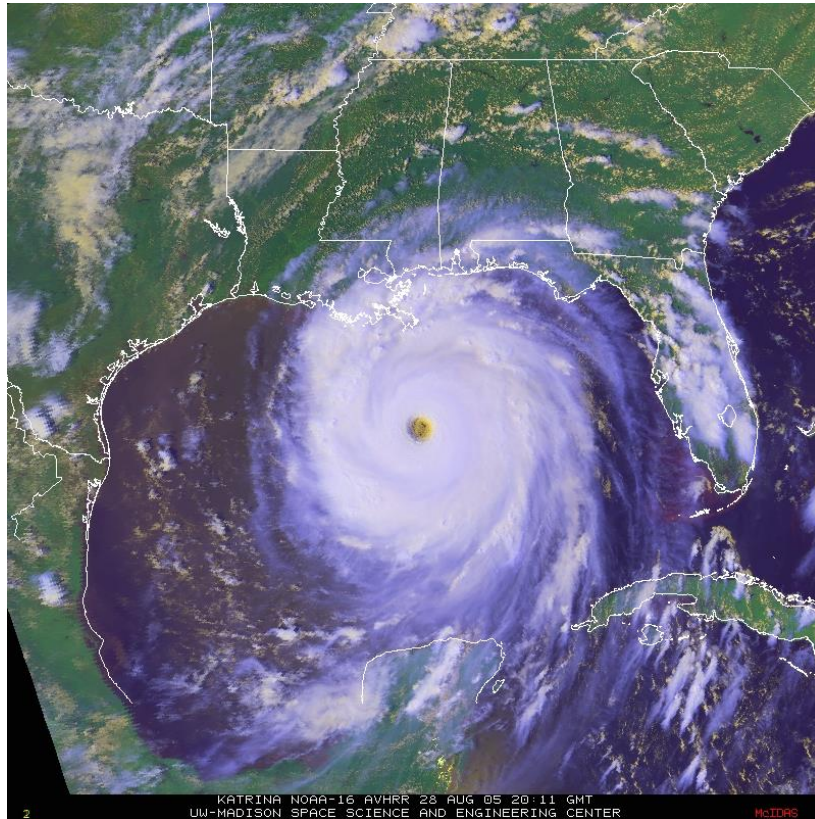
Vznikají v subtropických mořích při teplotě povrchu oceánu nad 26 st. a ohrožují zejména oblasti Karibského moře a tropického Pacifiku i oblasti Afriky.

Indický oceán: cyklon

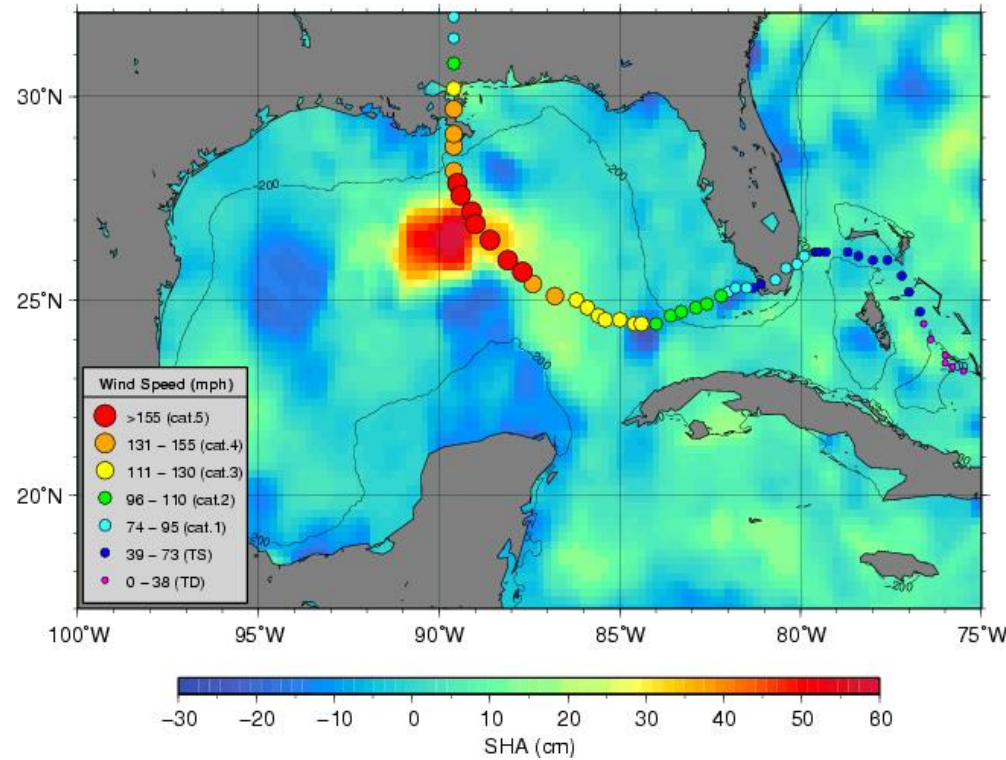
Austrálie: willy-wily



# Hurikán Katrina



Gulf of Mexico – Sea height anomaly (SHA) 08/28/2005



# Oko hurikánu Katrina

