

# Podstawy i zastosowania numerycznego modelu pogody WRF

Prof. dr hab. inż. Mariusz J. Figurski

IMGW-PIB Centrum Modelowania Meteorologicznego

Warsztaty naukowe „Modelowanie Pożarowe”, Warszawa 21-22.06.2023



- Co to jest model WRF?
- Zalety modelu WRF
- Podstawowych modelowania z wykorzystaniem modelu WRF
- Asymilacja danych w WRF
- Model WRF z punktu widzenia użytkownika
- Aplikacje modelu WRF
- Aplikacje wysokiej rozdzielczości
- Modelowanie zjawisk ekstremalnych

## Model badawczo-prognostyczny

**ARW (Advanced Research WRF)** z wieloma rdzeniami dynamicznymi i **NMM (Non-hydrostatic Numerical Model)** rdzeń dynamiczny rozwijany przez NCEP (obecnie zamknięty)

Wspierany przez społeczność międzynarodową "model społeczności międzynarodowej", bezpłatny ogólnodostępny, współdzielone zasoby z rozproszonym rozwojem i scentralizowanym wsparciem.

Rozwijany i wspierany przez NCAR, NOAA/ESRL and NOAA/NCEP/EMC we współpracy AFWA, FAA, DOE/PNNL i przy współpracy z uniwersytetami, instytutami badawczymi i innymi agencjami rządowymi w USA i na całym świecie.



**Model WRF** jest w stanie przeskalować modele o niskiej rozdzielczości do wysokiej  $<1\text{ km}$  z dynamiką niehydrostatyczną. Ponadto oferuje szereg zalet w porównaniu z innymi LAM (**L**imited **A**rea **M**odel)

- Oprogramowanie open source.** Istnieje możliwość ingerencji w kod źródłowy i modyfikowanie kodu.
- Elastyczność:** duża liczba różnych konfiguracji w zależności od celu modelowania i obszaru kuli ziemskiej (fizyka, dynamika, warunki początkowe) z możliwością elastycznego dostosowania mniejszych lub wysokich rozdzielczości przestrzennych, symulacji długoterminowych, klimatycznych lub krótkoterminowych.
- Wsparcie online** rozbudowana dokumentacja, forum użytkowników

- Zaprojektowany do badań i celów operacyjnych
  - Numeryczna prognoza pogody
  - Symulacje atmosfery, warunki wyidealizowane itd.
- Dwie wersje
  - ARW – zaawansowana wersja badawcza modelu WRF
  - NMM – niehydrostatyczny model mezoskalowy
- Elastyczny i przenośny kod
  - Sekwencyjny
  - Równoległy (MPI) bez lub z wielowątkowością
- Obsługuje dwa poziomy dekompozycji domen.
  - Podział na podobszary (prostokąty) w pamięci rozproszonej
  - Następnie w obrębie każdego wielowątkowego podobszaru jest stosowany podział dla pamięci współdzielonej.

Badania parametryzacji, studia przypadków, prognozy krótkoterminowe, asymilacja danych, badania jakości powietrza, prognozy produkcji energii odnawialnej i ocena potencjału energii odnawialnej, modelowanie klimatu w skali regionalnej.

**Najczęściej wykonywane symulacje** dotyczą czułości modelu na odtwarzanie rzeczywistych zjawisk meteorologicznych, pozwalają:

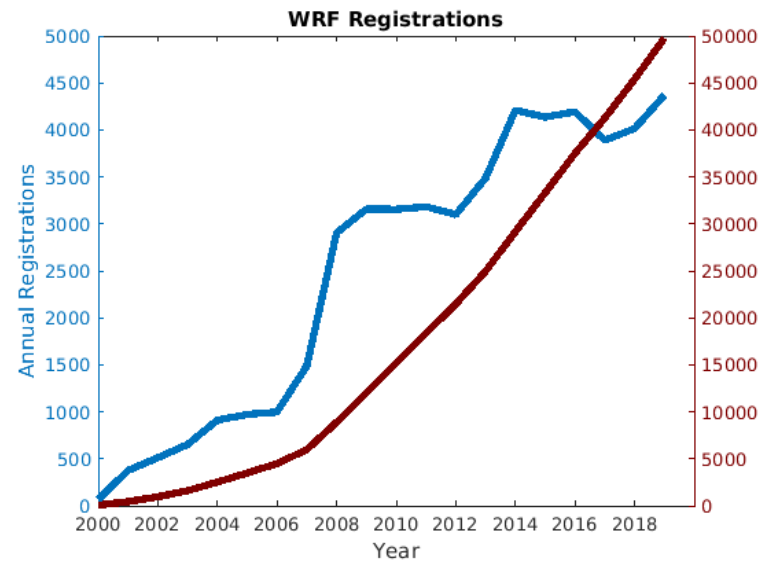
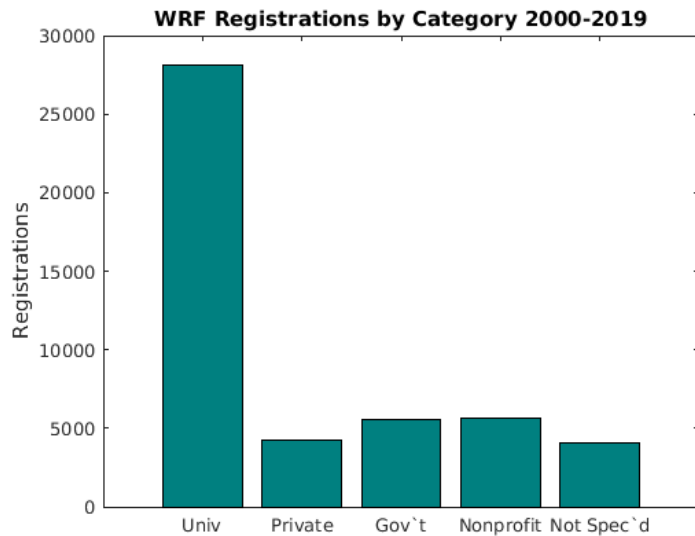
- Lepsze zrozumienie fizyki i jej wad
- Zmniejszyć błędy modelu i ocenę niepewności prognozy.



- Wersja 1.0 WRF pierwsza wersja Grudzień 2000
- Wersja 2.0: Maj 2004 (dodane zagnieżdżanie)
- Wersja 3.0: Kwiecień 2008 (dodana globalna wersja ARW)
- ... (główne wydania w kwietniu każdego roku, małe poprawki pomiędzy wersjami głównymi)
- Wersja 3.9: Kwiecień 2017 (dodane współrzędne hybrydowe)
  - Version 3.9.1 (Sierpień 2017)
- Wersja 4.0 (Czerwiec 2018)
  - Wersja 4.0.1 (Październik 2018) – poprawki błędów
  - Wersja 4.0.2 (Listopad 2018) – poprawki błędów
  - Wersja 4.0.3 (Grudzień 2018) – poprawki błędów
- Version 4.1 (Kwiecień 2019) – kolejna wersja
  - Wersja 4.1.1 (Czerwiec 2019) – poprawki błędów
  - Wersja 4.1.2 (Lipiec 2019) – poprawki błędów
- Wersja 4.2 (Kwiecień 2020) – nowa wersja
- Wersja 4.3 (kwiecień 2021) - nowa wersja
- Wersja 4.4 (Kwiecień 2022) – nowa wersja (solar ens)
- **Wersja 4.5** (Kwiecień 2023) – nowa wersja (nowe dane urbanistyczne)

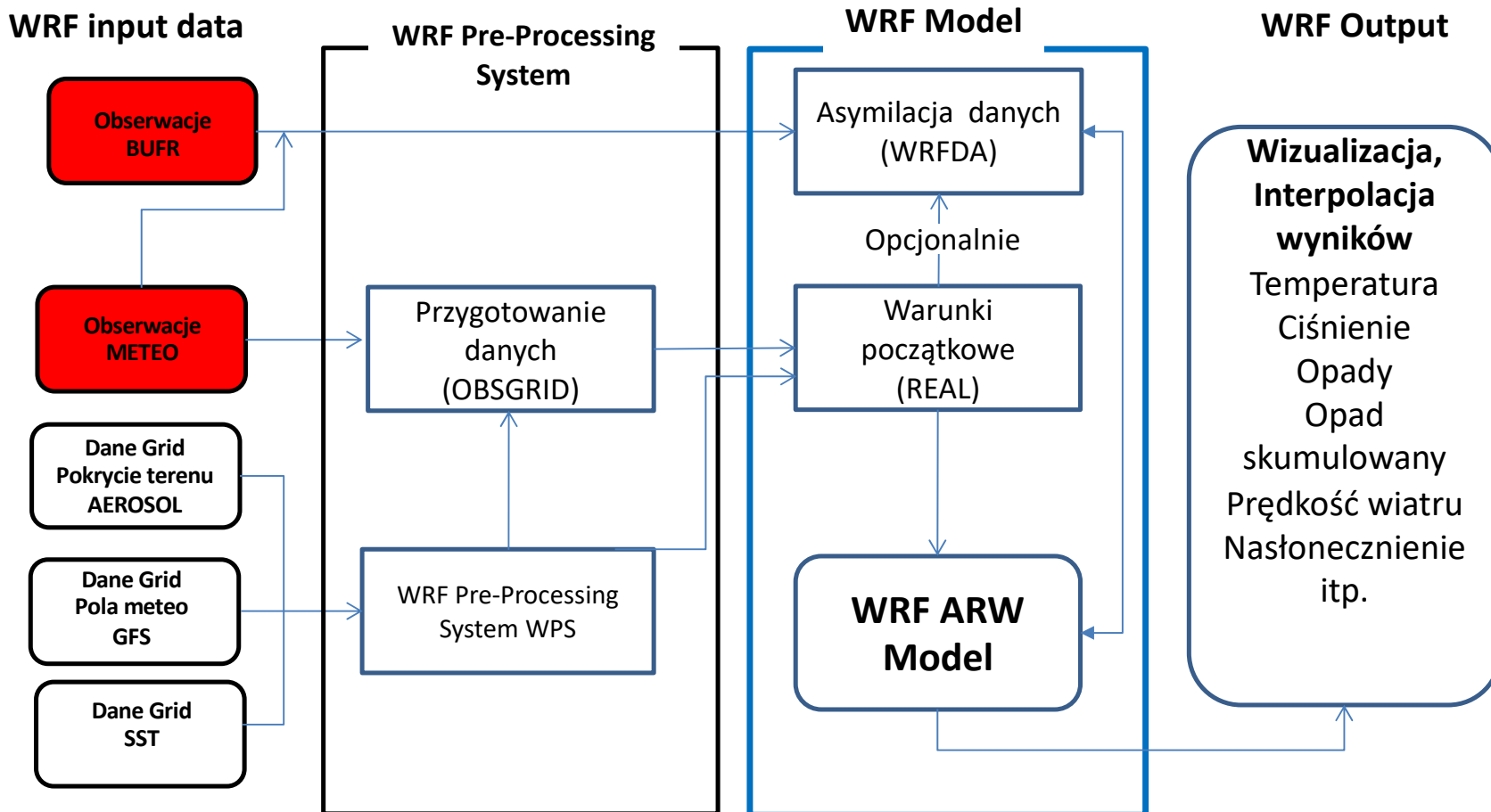
Państwa: 185  
Liczba użytkowników: 47.700  
USA: 1.276  
Pozostali: 34.935

Dane z czerwca 2019

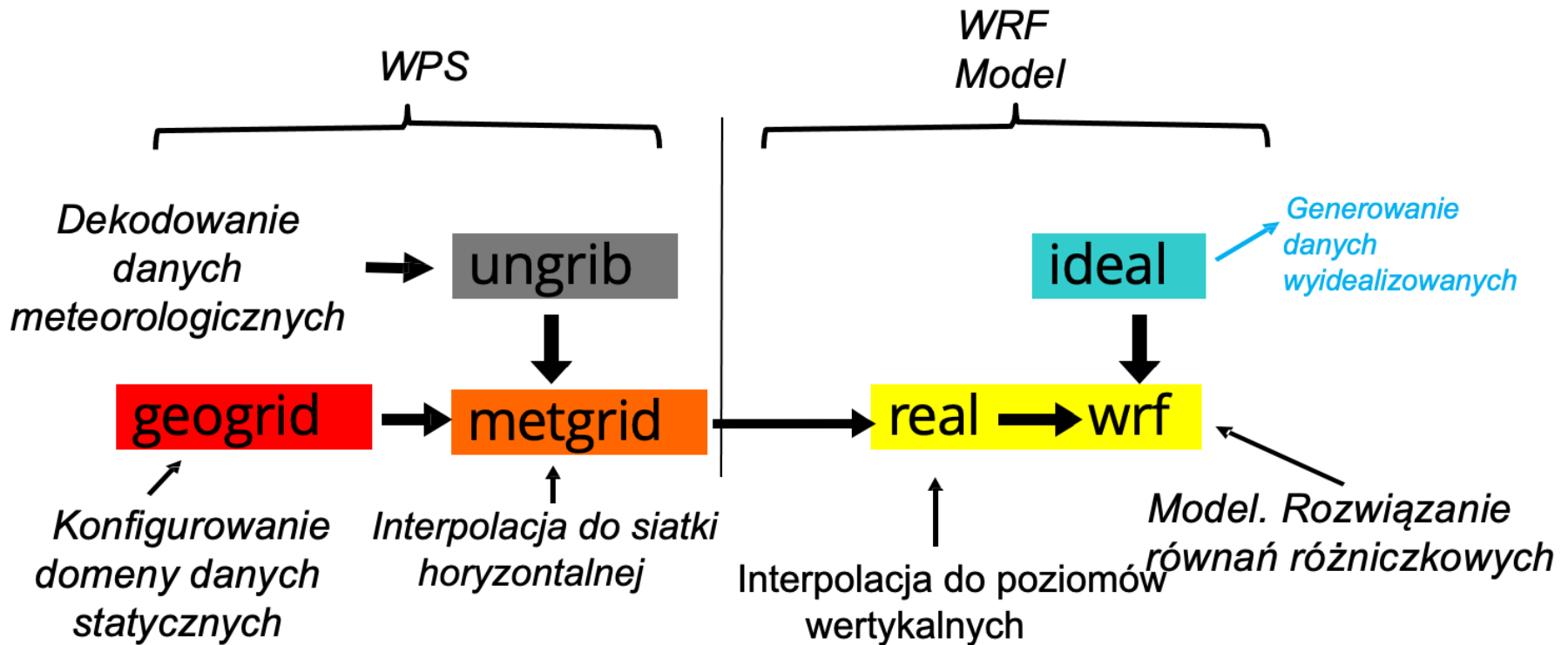




# Przeływ danych w modelu WRF



# Model WRF – dane rzeczywiste i wyidealizowane



## Wybranie odwzorowania dla definicji domen obliczeniowych. **co to robimy?**

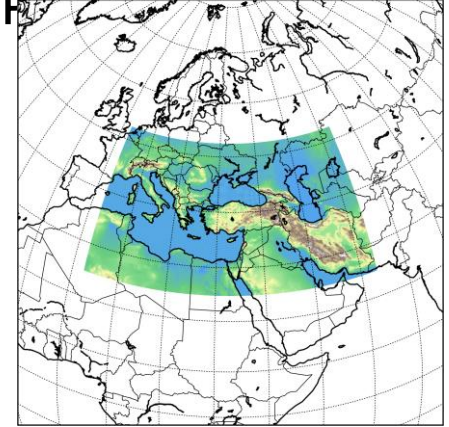
- Ziemia nie jest kulą tylko w przybliżeniu elipsoidą
- Domeny obliczeniowe modelu WRF są zdefiniowane przez prostokąty na płaszczyźnie

## W modelu WRF ARW można użyć jednego z poniższych odwzorowań:

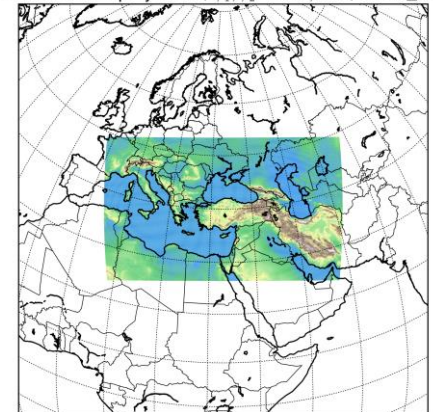
- Równokątne Lamberta (zalecana dla średnich szerokości geograficznych)
- Mercatora (zalecane dla obszarów okołorównikowych)
- Biegunowe stereograficzne (okolice okołobiegunowe)
- Szerokość i długość geograficzna (w przypadku domen globalnych jedyne dozwolone odwzorowanie)

- Przykład definicji domeny w Europie o rozdzielczości 12ki...**
  - o Odwzorowanie równokątne Lamberta daje odległości od 11.7km do 12.1km
  - o Odwzorowanie Mercatora daje odległości od 9.9km do 14.6km

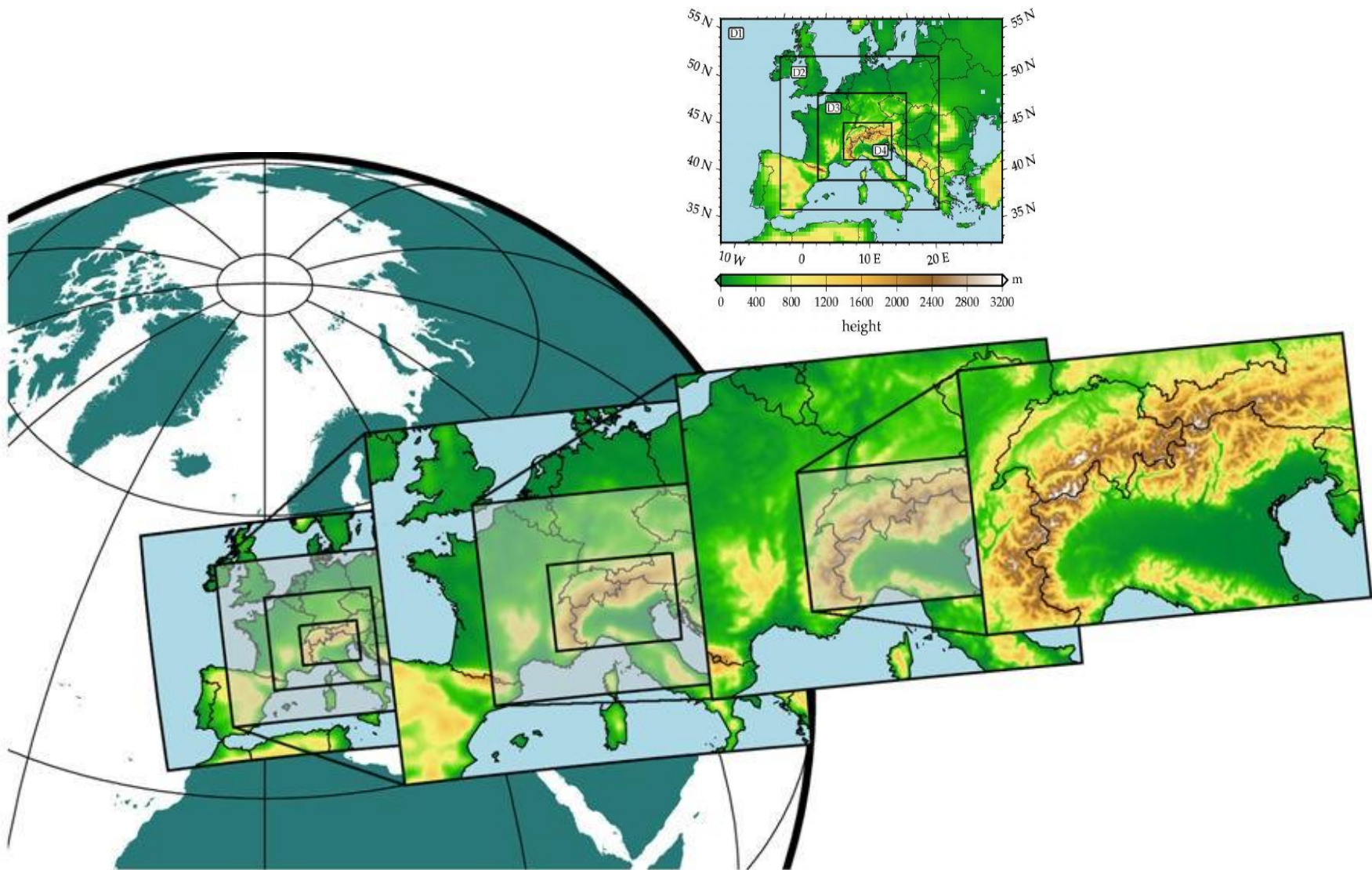
Mercator projection,  $\phi_1 = 42.0, 0.819 \leq m \leq 1.218$



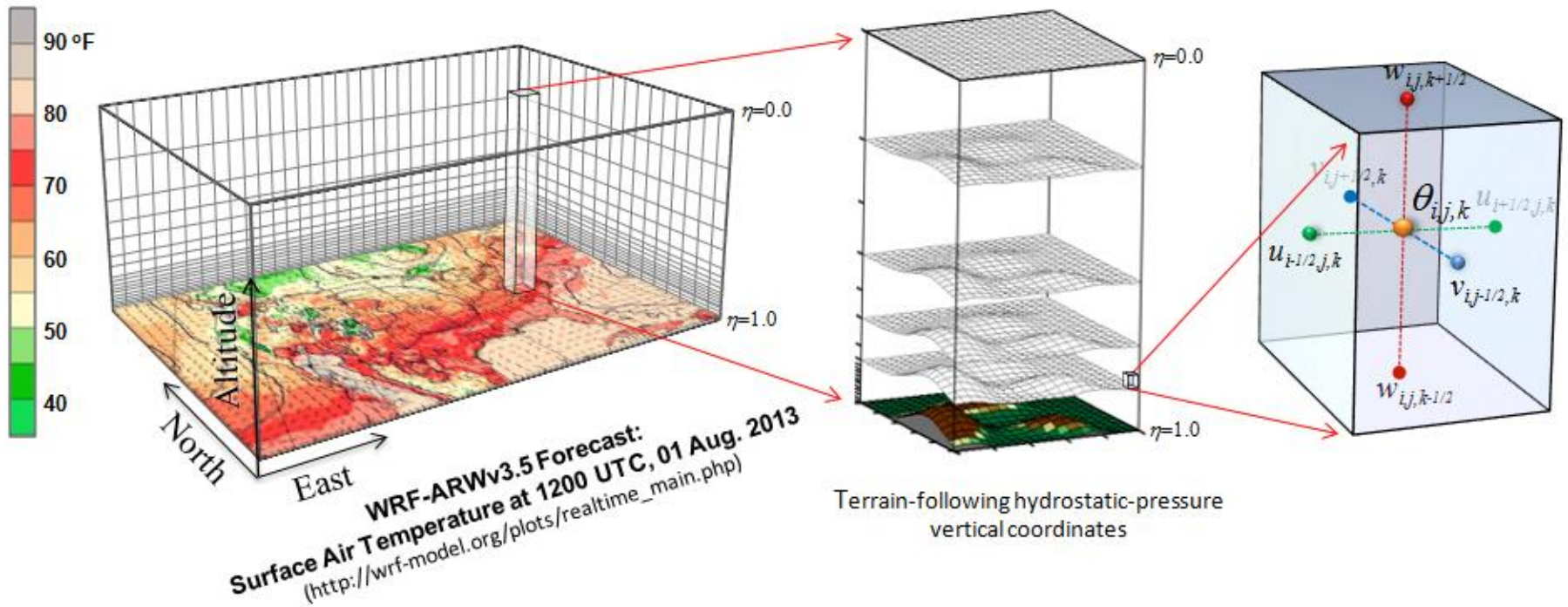
Lambert conformal projection,  $\phi_1, \phi_2 = 30.0, 47.5, 0.988 \leq m \leq 1.023$



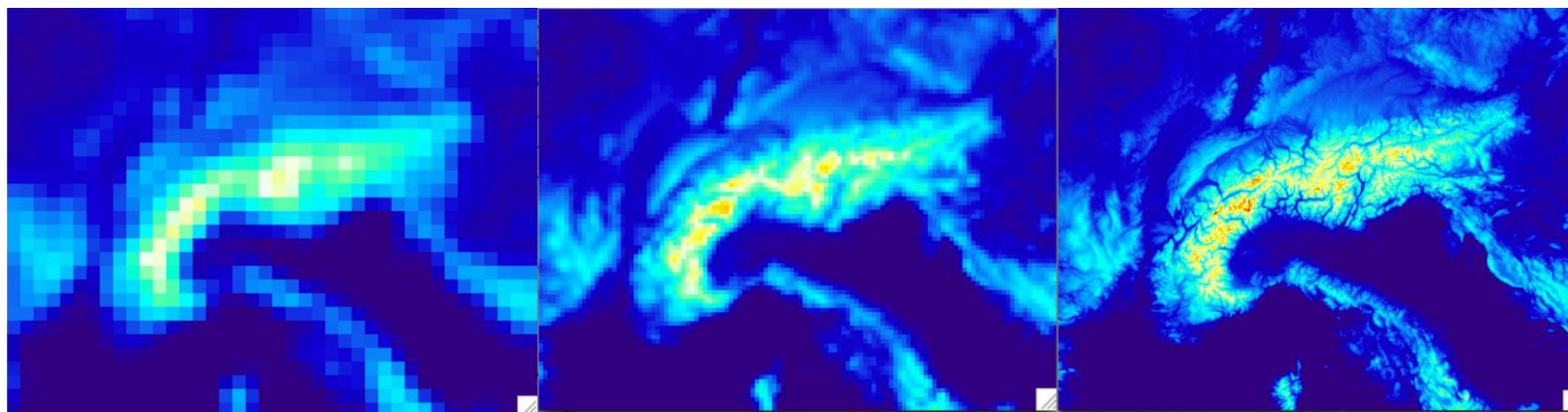
## Zagnieżdżanie siatek na ograniczonym obszarze (nesting)



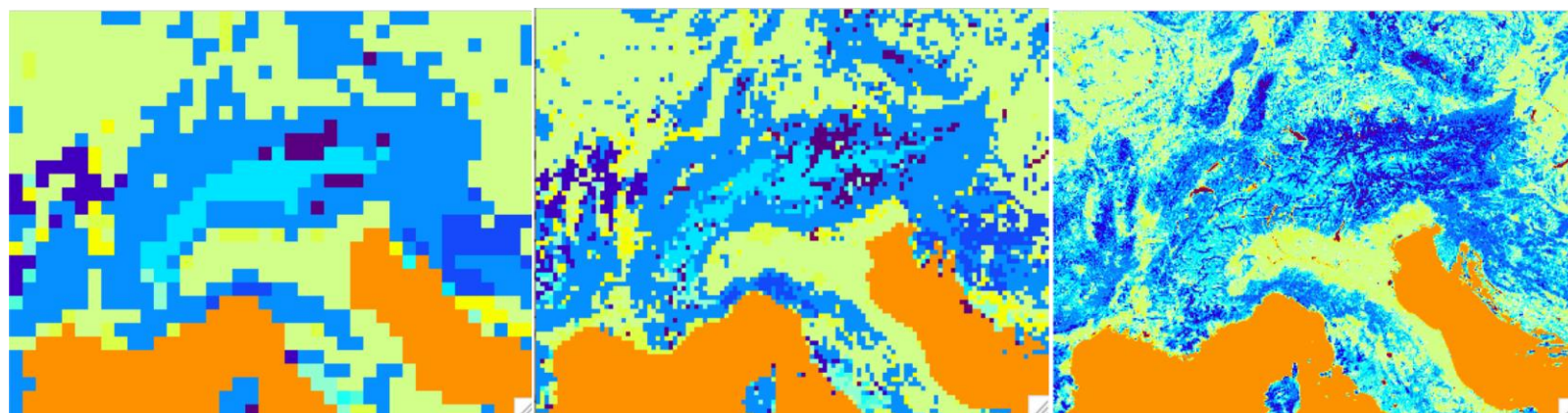




### Model terenu



### Model zagospodarowania terenu

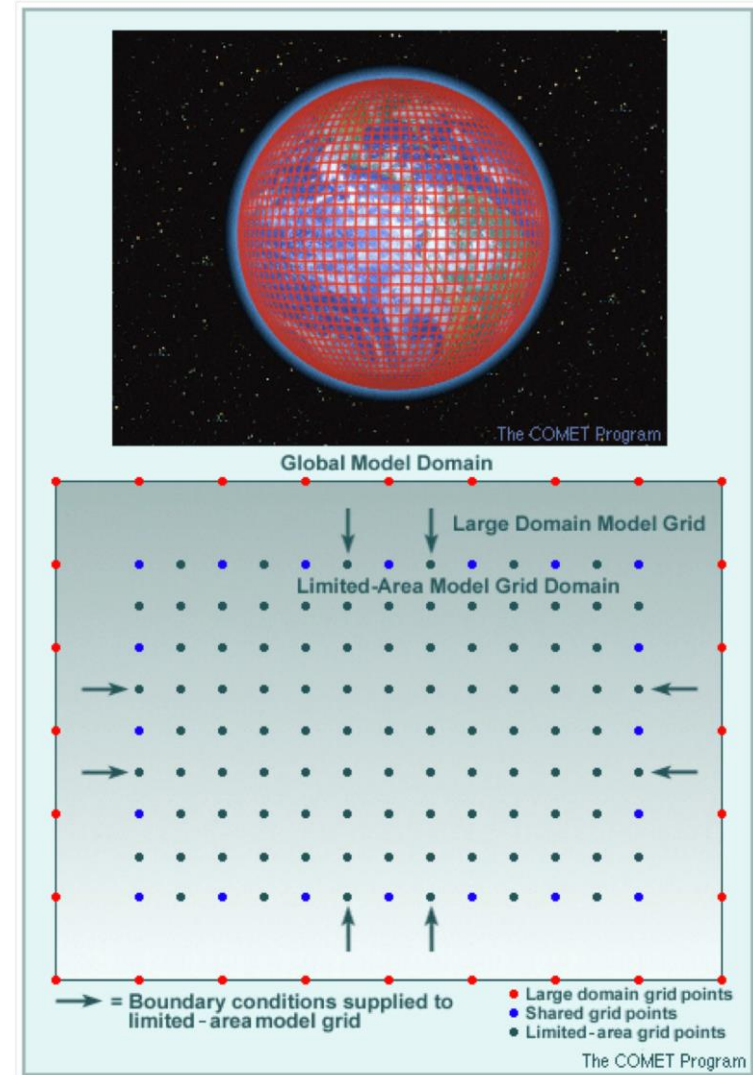
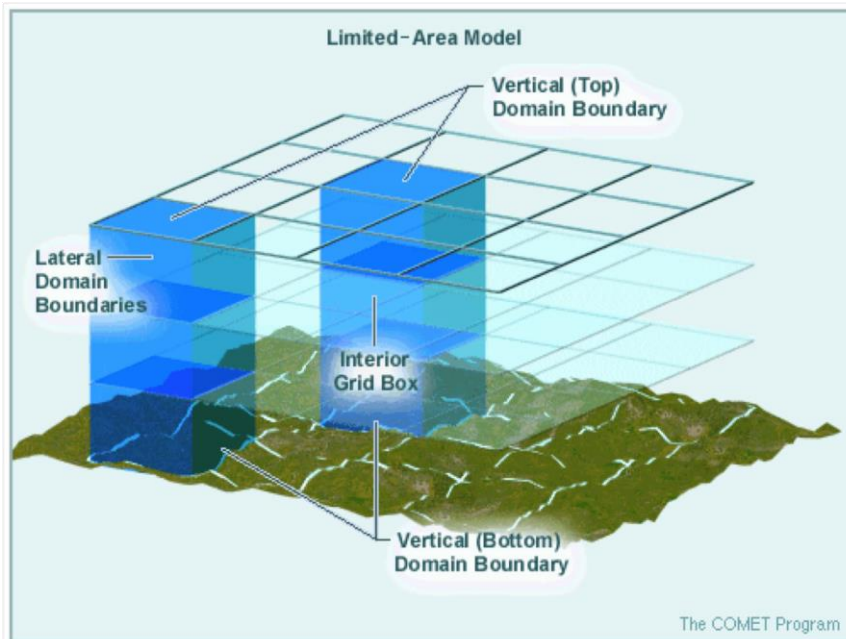




## LBC (lateral boundary condition), IC – initial condition

W regionalnym systemie modelowania warunki początkowe i boczne uzyskuje się z modeli globalnych, modeli regionalnych lub z danych pomiarowych.

- Ważna rozdzielczość czasowa i przestrzenna
- Rozdzielczość czasowa LBC istotna podczas symulacji trudnych zjawisk pogodowych



## **3DVAR**

Różne opcje wyboru dla różnych danych

## **4DVAR**

czterowymiarowa metoda wariacyjna

## **Hybrid-3D/4DEnVar**

Hybrydowa metoda 3D-VAR i 4D-VAR

## **Ensemble analysis**

- ETKF (Ensemble Transform Kalman Filter) w/o covariance localization
- EDA: Ensemble of hybrid-EnVar with perturbed observations

**FDDA** (czterowymiarowa asymilacja metodą relaksacji Newtona)



## WRFDA Observations

- **In-Situ:**
  - SYNOP
  - METAR
  - SHIP
  - BUOY
  - TEMP
  - PIBAL
  - AIREP, AIREP humidity
  - TAMDAR
- **Remotely sensed retrievals:**
  - Atmospheric Motion Vectors (geo/polar)
  - SATEM thickness
  - Ground-based GPS **TPW or ZTD**
  - SSM/I oceanic surface wind speed and TPW
  - Scatterometer oceanic surface winds
  - Wind Profiler
  - **Radar data (reflectivity/retrieved rainwater, and radial-wind)**
    - **V3.9: No-rain echo radar DA (from KNU)**
  - Satellite temperature/humidity/thickness profiles
  - GPS refractivity (e.g. COSMIC)
  - **Stage IV precipitation/rain rate data (4D-Var only)**
- **Radiances (Var BC, RTTOV & CRTM, All-sky radiance):**
  - HIRS NOAA-16, NOAA-17, NOAA-18, NOAA-19, METOP-A
  - AMSU-A NOAA-15/16/18/19, EOS-Aqua, METOP-A, METOP-B
  - AMSU-B NOAA-15, NOAA-16, NOAA-17
  - MHS NOAA-18, NOAA-19, METOP-A, METOP-B
  - AIRS EOS-Aqua
  - SSMIS DMSP-16, DMSP-17, DMSP-18
  - IASI METOP-A, METOP-B
  - ATMS Suomi-NPP
  - **MWHS2 from FY-3 C/D (new in 4.1)**
  - SEVIRI METEOSAT
  - **AMSR2 GCOM-W1 (all-sky microwave radiance DA)**
  - **GOES-Imager, Himawari-AHI (new in 4.1)**

WRFDA is flexible to allow assimilation of different formats of observations:

- **Little\_r (ascii), HDF, Binary**
- **NOAA MADIS (netcdf),**
- **NCEP PrepBuf,**
- **NCEP radiance buf**

## **Jako narzędzie badawcze:**

- opracowanie i testowanie parametryzacji fizycznych modelu
- analiza studiów przypadków zjawisk pogodowych
- regionalne studia klimatyczne
- w badaniach w połączeniu chemia, ogień i i zjawiska hydrologiczne
- badania nad asymilacją danych
- nauczanie modelowania i NMP

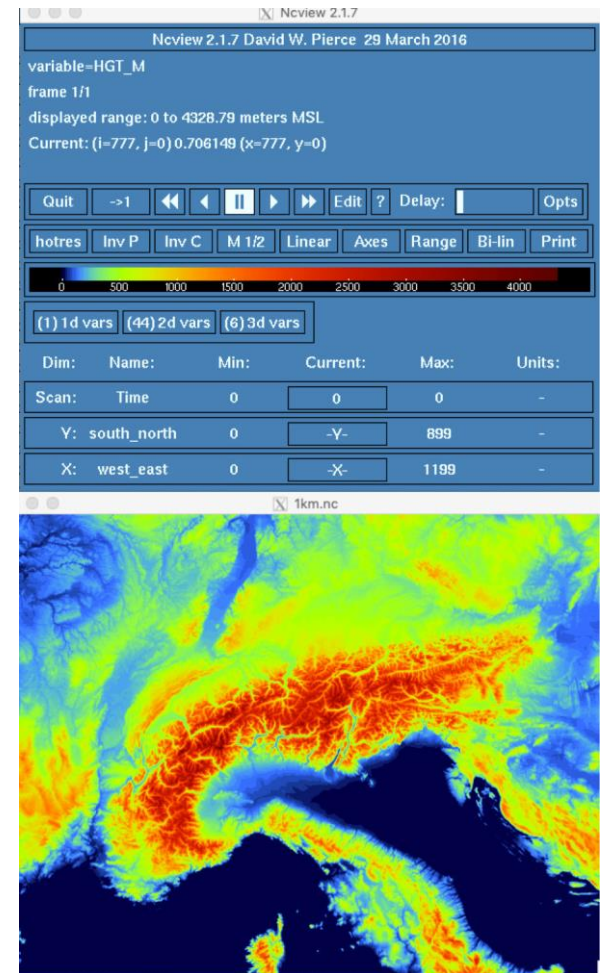
## **Jako narzędzie do numerycznego prognozowania pogody:**

- prognozowanie wsteczne
- prognozowanie w czasie rzeczywistym (operacyjne)
- prognozowanie jakości wiatru, nasłonecznienia, powietrza (w trybie online i offline)

Model WRF oferuje zestaw programów (głównie w języku Fortran) i plików wykonawczych:

- brak interfejsu graficznego
- sterowanie z wiersza poleceń
- tylko proste narzędzia graficzne do postprocessingu

```
wind-turbine-1.tbl
> tar -xf WRF-4.1.2.tar.gz
> cd WRF-4.1.2
> configure
> compile em_real >& compile.log &
> cd run/
> ln -s ../../WPS-4.1/met_em.d01.* .
> mpirun -np 4 real.exe
> ls -l wrfinput* wrfbdy*
> mpirun -np 8 wrf.exe
```





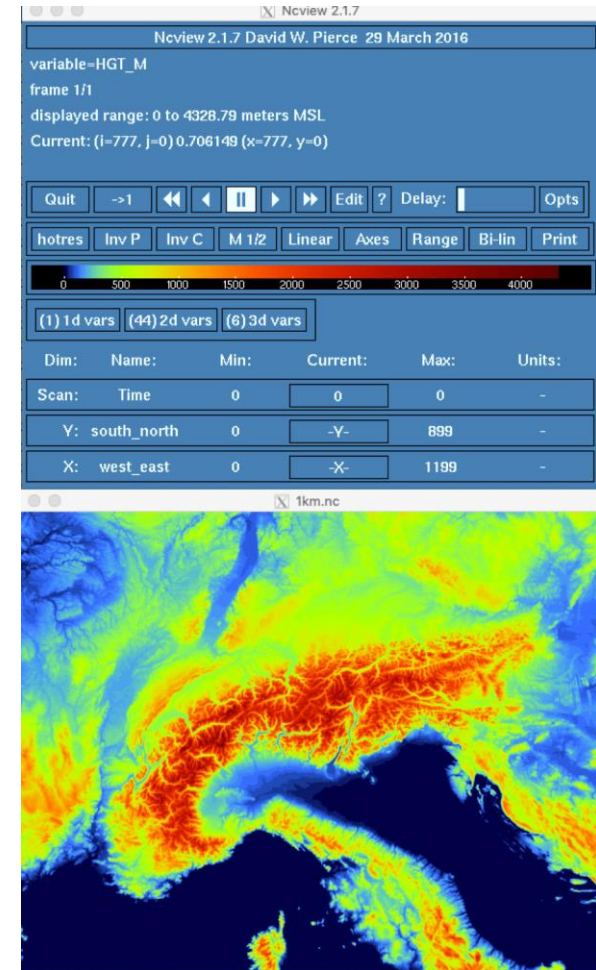
# Jak wygląda WRF z punktu widzenia użytkownika?



Programy modelu WRF posiadają wiele funkcjonalności:

- istnieje wiele różnych sposobów możliwości uruchomienia modelu
- na każdym etapie wymagane jest niezależne definiowanie parametrów modelu
- scenariusze symulacyjne

```
wind-turbine-1.tbl
> tar -xf WRF-4.1.2.tar.gz
> cd WRF-4.1.2
> configure
> compile em_real >& compile.log &
> cd run/
> ln -s ../../WPS-4.1/met_em.d01.* .
> mpirun -np 4 real.exe
> ls -l wrfinput* wrfbdy*
> mpirun -np 8 wrf.exe
~
```





## WRF namelists:

Namelists to pliki ASCII, które służą do definiowania listy parametrów konfiguracji modelu WRF.

WPS → namelist.wps

WRF → namelist.input

Oinne pliki konfiguracyjne :  
GEOGRID.TBL, METGRID.TBL,  
Vtables, itp.

```
&time_control
run_days           = 0,
run_hours          = 12,
run_minutes        = 0,
run_seconds        = 0,
start_year         = 2000, 2000, 2000,
start_month        = 01, 01, 01,
start_day          = 24, 24, 24,
start_hour         = 12, 12, 12,
start_minute       = 00, 00, 00,
start_second       = 00, 00, 00,
end_year           = 2000, 2000, 2000,
end_month          = 01, 01, 01,
end_day            = 25, 25, 25,
end_hour           = 12, 12, 12,
end_minute         = 00, 00, 00,
end_second         = 00, 00, 00,
interval_seconds   = 21600
input_from_file    = .true.,.true.,.true.,
history_interval   = 180, 60, 60,
frames_per_outfile = 1000, 1000, 1000,
restart            = .false.,
restart_interval   = 5000,
io_form_history    = 2
io_form_restart    = 2
io_form_input      = 2
io_form_boundary   = 2
debug_level        = 0
/

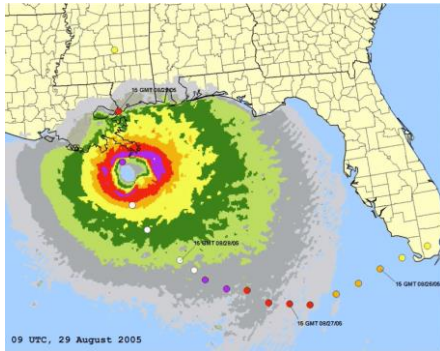
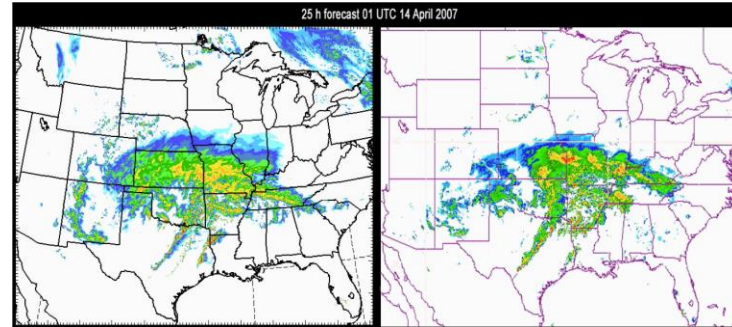
&domains
time_step          = 180,
time_step_fract_num = 0,
time_step_fract_den = 1,
max_dom            = 1,
e_we               = 74, 112, 94,
e_sn               = 61, 97, 91,
e_vert             = 28, 28, 28,
p_top_requested    = 5000,
--
```

# Aplikacije modelu WRF



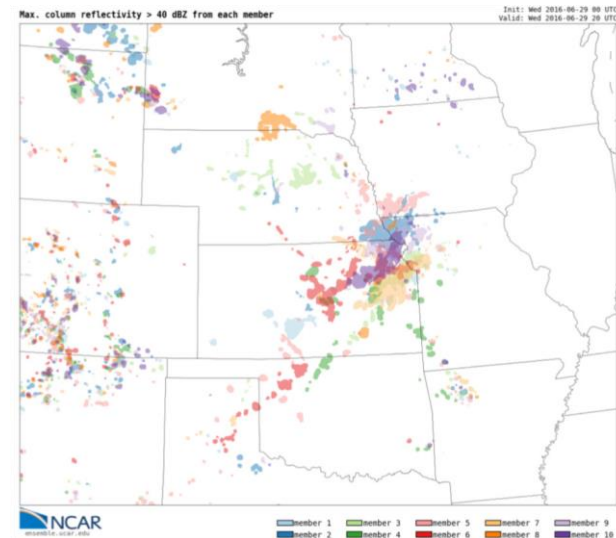
## Wersja badawcza WRF:

Prognoza zjawisk konwekcyjnych →



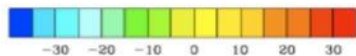
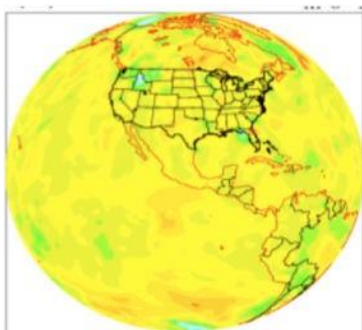
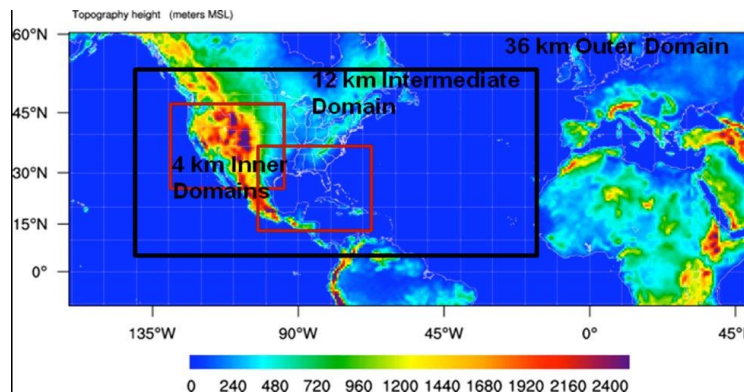
← Symulacje huraganów w wysokiej rozdzielczości

Rozwój technologii prognoz wiązkowych →



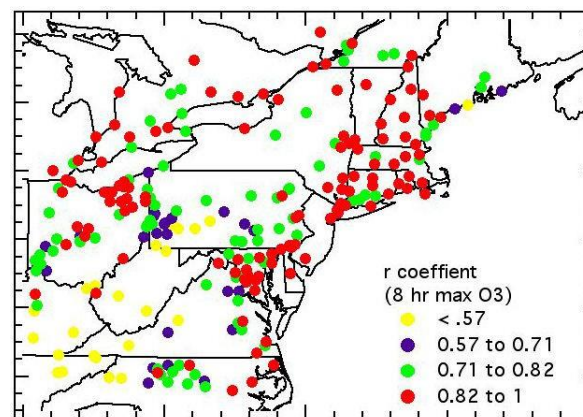
## Wersja badawcza WRF:

Regionalne modelowanie klimatu



Asymilacja danych

WRF-Chem





CLWRF to zestaw modyfikacji kodu WRF mający na celu wykonywanie bardziej elastycznych regionalnych symulacji scenariuszy klimatycznych za pomocą WRF-ARW.

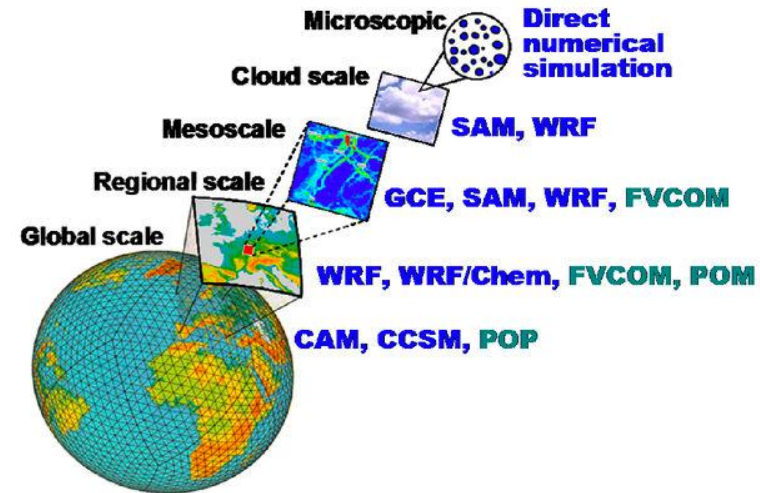
CLWRF dodaje do modelu dwie główne możliwości:

- Elastyczne wykorzystanie scenariusza dotyczącego gazów cieplarnianych
- Generowanie średnich i ekstremalnych statystyk zmiennych powierzchniowych np.: czas nasłonecznienia, maksymalny dzienny wskaźnik opadów, porywy wiatru itp.
- Wykorzystany w CORDEX

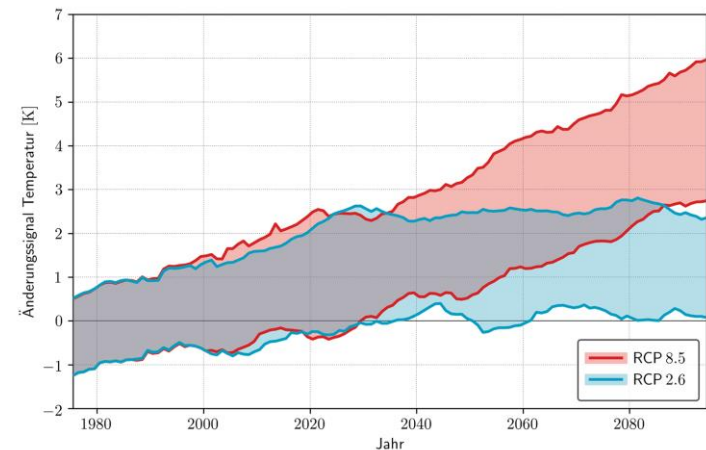
Dostępne dane z modeli GCM z CMIP5 i CMIP6 w formacie pośrednim WRF do definiowania warunków początkowych i brzegowych, wymagane dodatkowe narzędzia.

**Zalety:**

Dostępne duże ilości sprawdzonych parametryzacji dla regionalnych scenariuszy klimatycznych wysokiej rozdzielczości.



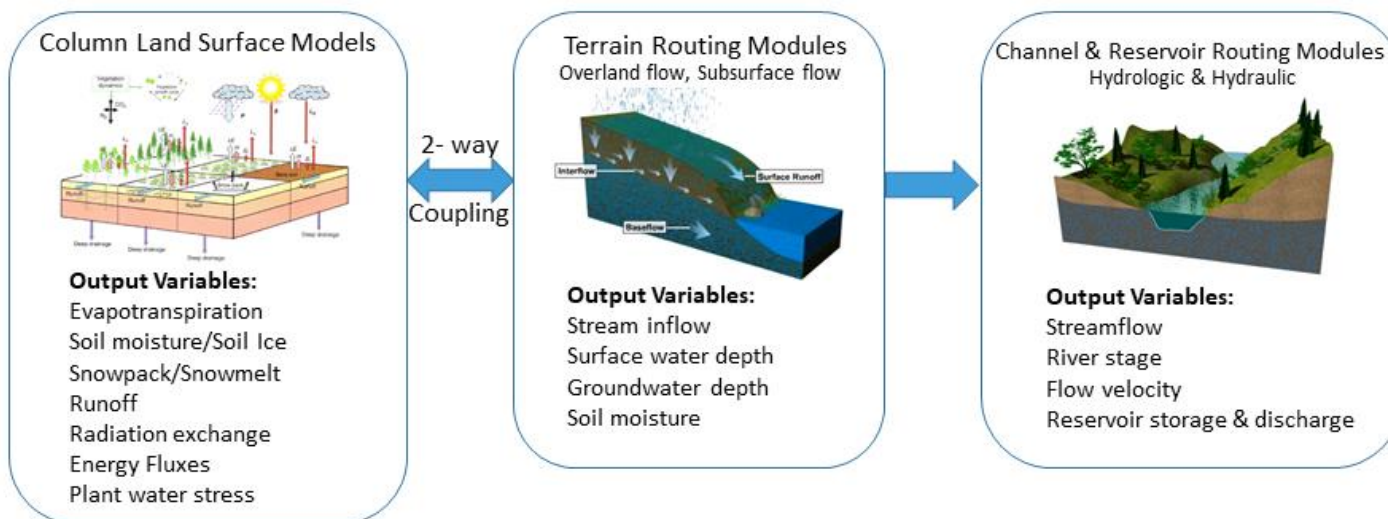
Zmiany średniej rocznej zmiany temperatury w scenariuszach RCP8.5 (czerwony – rozwój przemysłu) i RCP2.6 (niebieski, „ochrona klimatu”) obliczone dla Niemiec, domeny 12km lata 1958-2100.



WRF-Hydro®, model o otwartym kodzie źródłowym, jest używany w szeregu projektach, w tym w prognozowaniu gwałtownych powodzi, regionalnej ocenie wpływu na hydro-klimat, prognozowaniu sezonowym zasobów wodnych i badaniach sprzężenia ziemi z atmosferą.

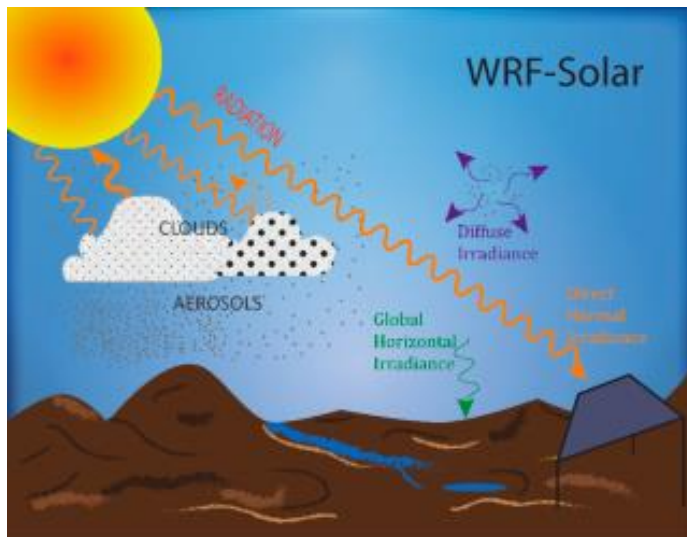
Podstawowym celem rozwoju WRF-Hydro® jest poprawa umiejętności przewidywania prognoz hydrometeorologicznych przy użyciu naukowych narzędzi do prognozowania numerycznego.

## WRF-Hydro Physics Components – Output Variables





WRF-Solar® to pierwszy numeryczny model prognozowania pogody zaprojektowany specjalnie w celu zaspokojenia rosnącego zapotrzebowania na specjalistyczne numeryczne produkty prognostyczne do zastosowań związanych z energetyką słoneczną



- Farmy wiatrowe wpływają na lokalną pogodę i mikroklimat
- Parametryzacje ich efektów muszą być włączone do numerycznych modeli prognozowania pogody
- Parametryzacje farm wiatrowych (WFP) obejmują efekty oporu farm wiatrowych. modele uwzględniają dodatkowe źródło turbulentnej energii kinetycznej (TKE) w parametryzacjach w celu zasymulowania wpływu farm wiatrowych na warstwę graniczną

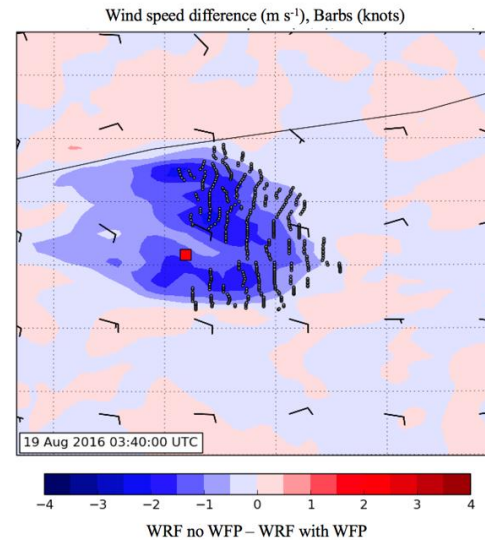
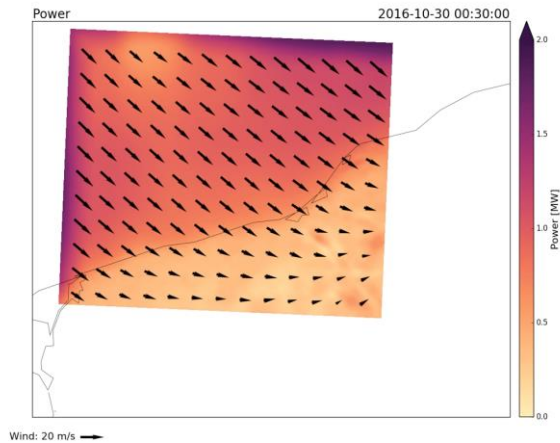
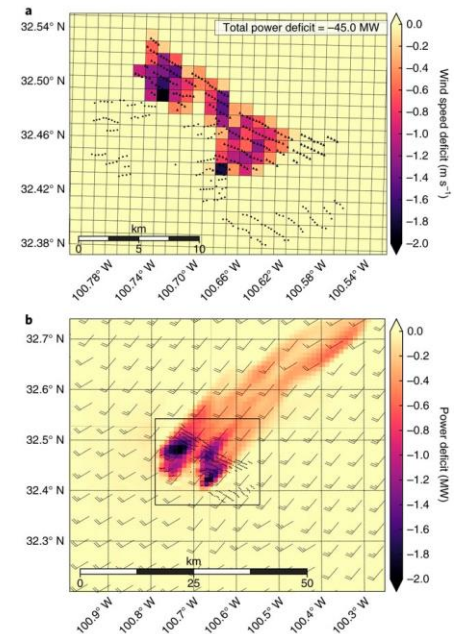
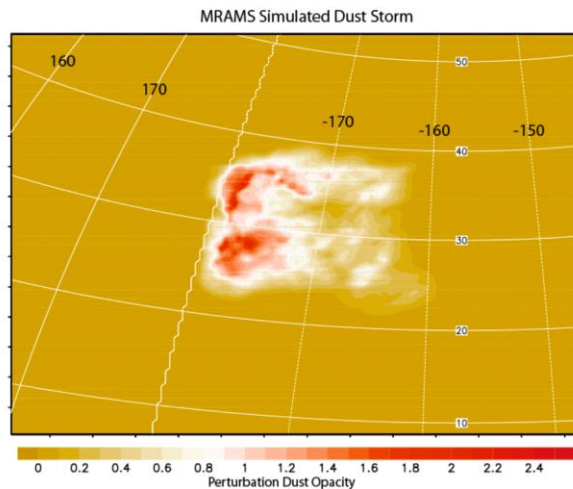


Figure 1. Wind speed difference (colored contours) between WRF simulations with and without the Wind Farm Parameterization (WFP) turned on. Overlaid are wind barbs from the simulation with the WFP turned on to illustrate the direction of the wind turbine inflow and general trajectory of the waked region (blue-shaded region within and behind the wind farm). The location of individual wind turbines within the wind farm (circles) and the location of our instrument site (red square) are displayed.

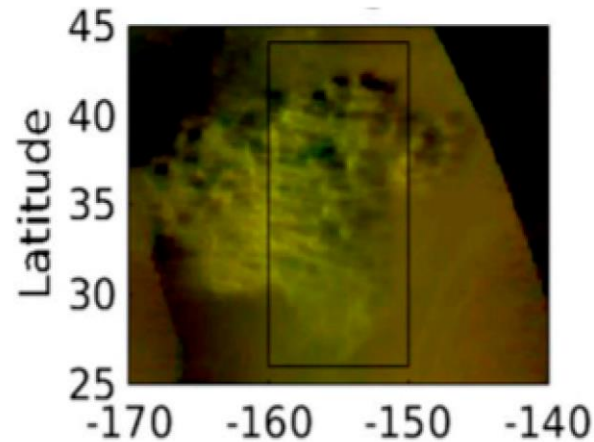




PlanetWRF zastosowano na Marsie, Tytanie, Jowiszu / Saturnie, Plutonie i Wenus. W przypadku Marsa model został wykorzystany do symulacji struktur konwekcyjnych w warstwie granicznej w skali do kilkudziesięciu metrów oraz systemów cyrkulacji w skali globalnej w trybie General Circulation Model (GCM). W przypadku Tytana bada się powstawanie chmur metanu i deszczu, a także globalną cyrkulację atmosfery.



(a)



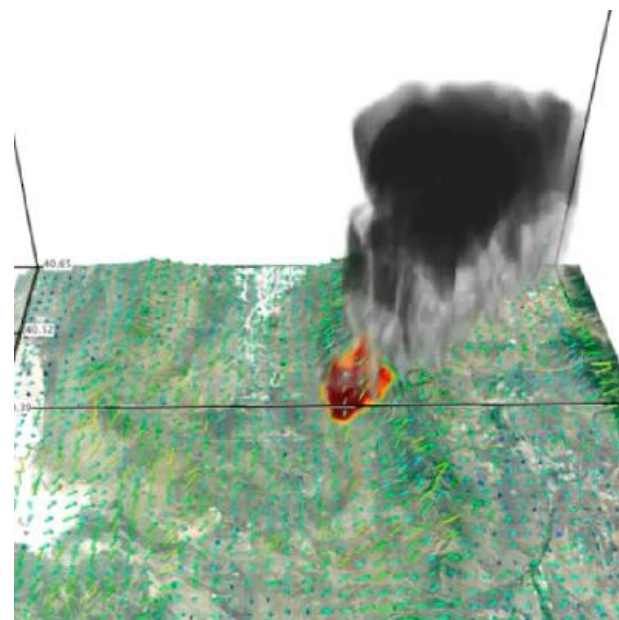
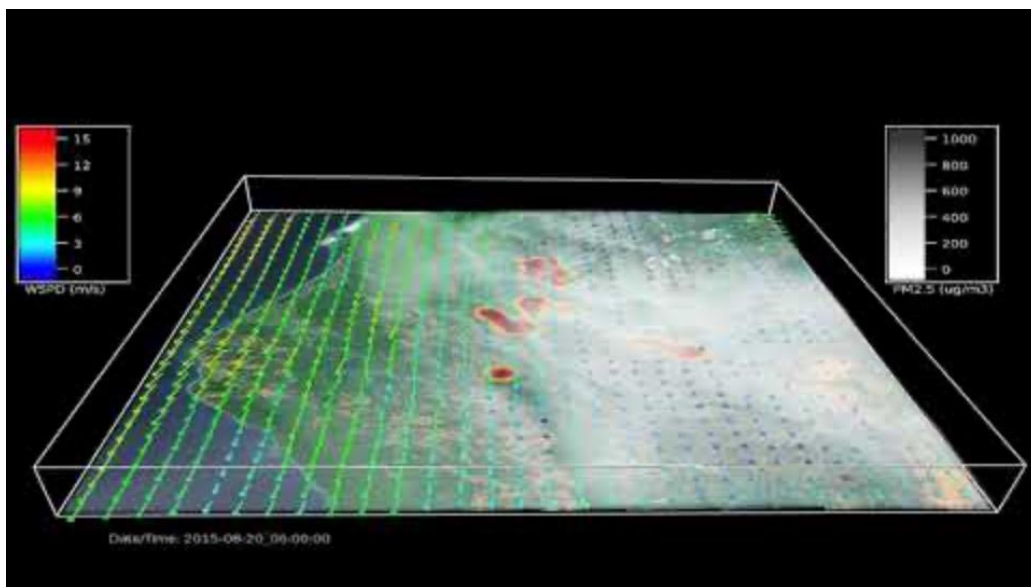
(b)

Symulacja burzy piaskowej na Marsie: (a) symulacja (b) rzeczywista burza

WRF SFIRE umożliwia wyznaczenie dobowych zmian aktywności pożarowej związanych z odzyskiem wilgoci paliwa w nocy, a także zmian w zachowaniu podczas pożaru spowodowanych długoterminowymi zmianami wilgotności paliwa. WRF-SFIRE jest połączony z WRF-CHEM. W tej konfiguracji strumienie emisji związków chemicznych i aerozoli kompatybilnych z WRF-CHEM są obliczane na podstawie wskaźnika zużycia paliwa i wchłaniania do atmosfery.

## Symulacje pożarów:

- Wyidealizowane symulacje pożarów
- Symulacja emisji i dyspersji dymu
- Symulacja wpływu dymu na jakość powietrza





## Model WRF METEOPG

- 3 siatki zanurzone: 12.5, 2.5 i 0.5 km
- 62 warstwy do wysokości 50mb
- Modelowanie lokalnych zjawisk meteorologicznych w czasie i przestrzeni.
- Wysoka rozdzielczość modelu w czasie i przestrzeni.

## Meteorologiczne warunki początkowe i brzegowe:

- Globalny model GFS 0.25°
- Model ICON-EU + ICON
- ERA-Interim/ERA5 (tylko analizy klimatyczne).

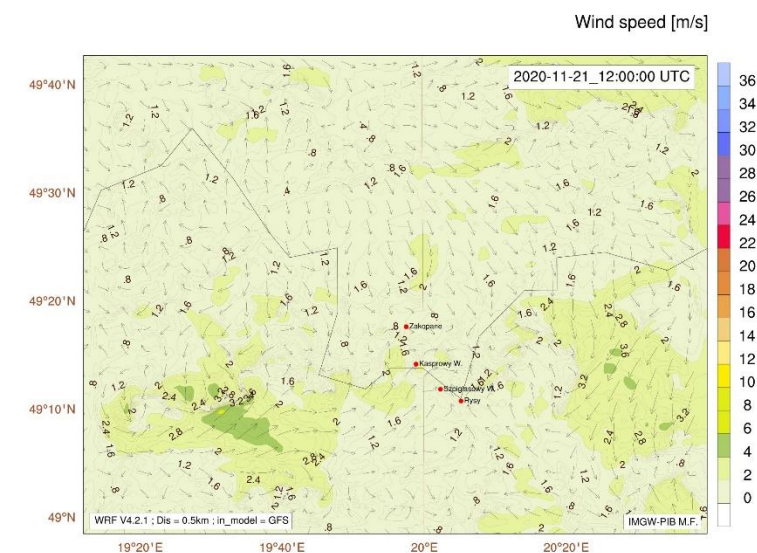
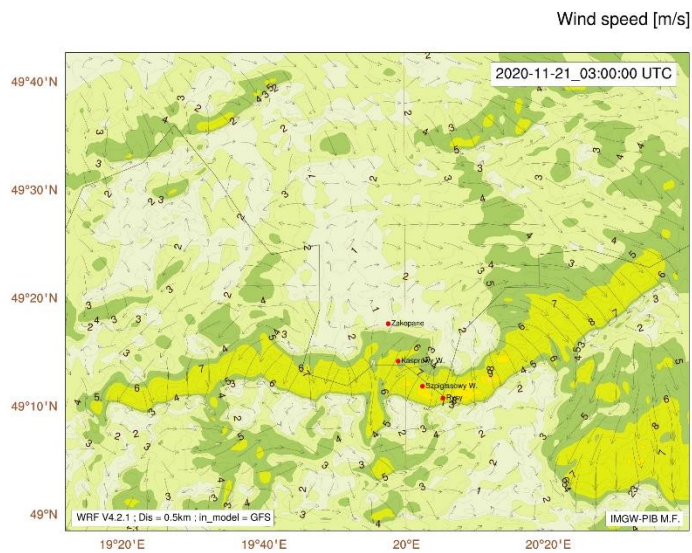
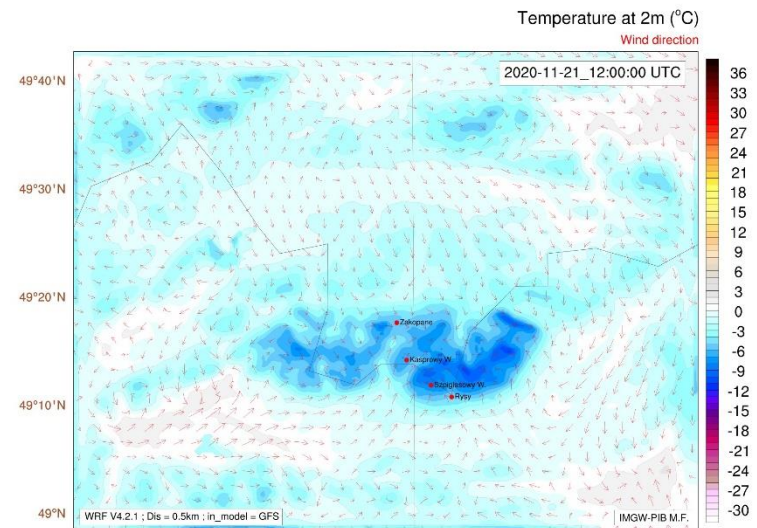
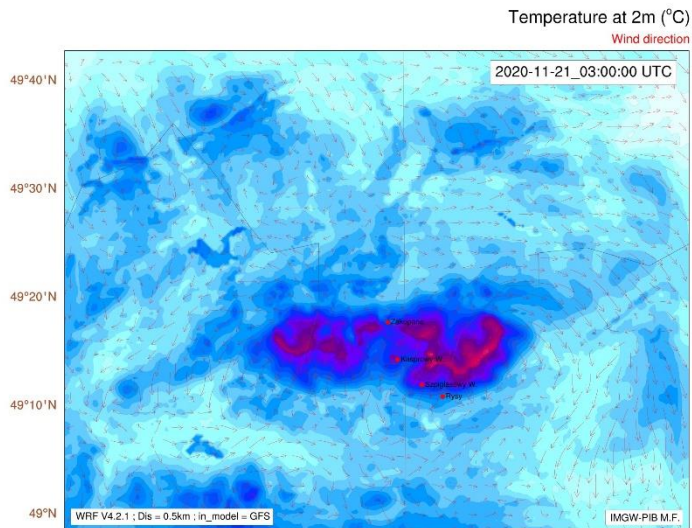
Wysokorozdzielcze modele DTM (30m) i zagospodarowania terenu (100m).



Rozdzielczość	Liczba węzłów
12.5 km	146x146x62 = 1.27 mln
2.5 km	306x306x62 = 5.9 mln
500 m	245x245x62 = 3.7 mln

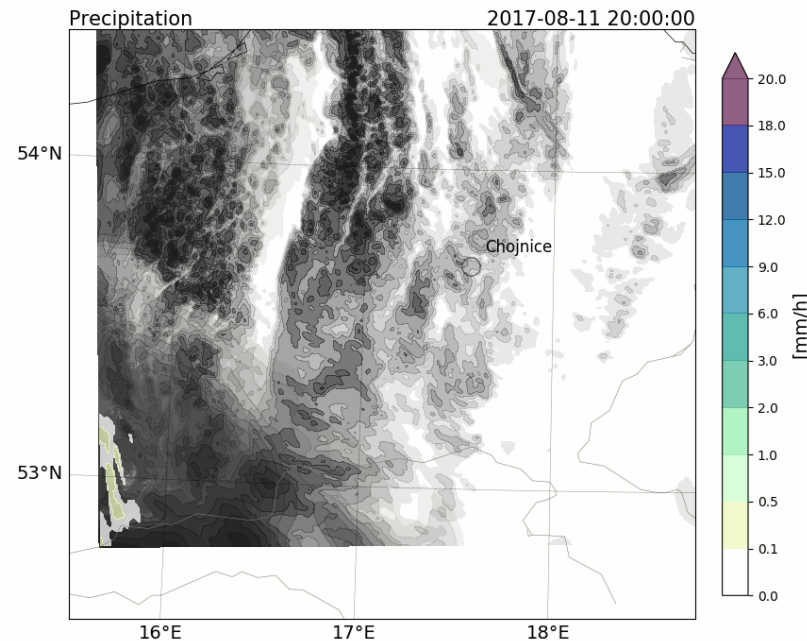
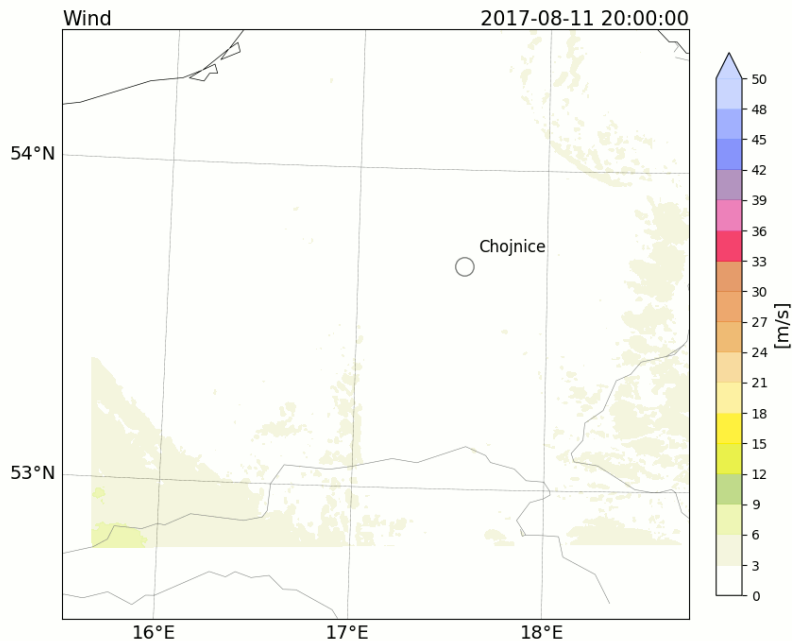


# Kierunek przyszłość - modelowanie wysokiej rozdzielczości



11 sierpnia 2017 roku gwałtowna burza uderzyła w północną Polskę. Spowodowała śmierć 5 osób i znaczne szkody w drzewostanie. W sumie ucierpiało około 340 tys. gospodarstw. Burza był spowodowana mezoskalowym systemem konwekcyjnym (MSC). Obserwacje zjawiska w między 00 a 23 UTC wykazały, że podmuchy wiatru przekraczały 30 m/s, a niektórych miejscach nawet powyżej 35m/s. Huragan nad Pomorze dotarł około godz. 22:00 – największe szkody zarejestrowano na obszarze: Człuchów-Łeba-Wejherowo-Kościerzyna-Czersk.

Symulacja zjawiska wykonana z modelem WRF METEOPG, widać tworzącą się strukturę bow echo.





„Nie chcemy nikomu modelować życia, ale chcemy  
coraz lepiej modelować pogodę, aby żyło się lepiej”

Prof. dr hab. inż. Mariusz J Figurski

Laboratorium Zaawansowanych Metod Modelowania Meteorologicznego IMGW-PIB

