

Zapojenie SHMÚ do modelovania kvality ovzdušia v projekte DEODE.

Dušan Štefánik*, Juraj Beňo, Jana Krajčovičová

Slovenský hydrometeorologický ústav, Jeséniova 2305/17, 831 01 Bratislava; *dusan.stefanik@shmu.sk

Destination Earth [1] je strategický projekt Európskej únie, ktorého cieľom je do roku 2030 vytvoriť digitálnu repliku, resp. digitálne dvojča našej planéty, ktoré bude simulovať správanie našej planéty s bezprecedentnou kvalitou a vo vysokom priestorovom rozlíšení, na miestach, kde sa prejavujú dopady extrémneho počasia a klimatickej zmeny. Technologickým základom digitálneho dvojčata je integrácia pokročilých numerických modelov atmosféry, hydrológie, kvality ovzdušia a rôznych iných dopadových modelov s rozsiahlymi pozorovacími dátami zo satelitov a pozemných meraní. Výpočty sú realizované na európskej infraštruktúre vysokovýkonného výpočtového výkonu (HPC). Výsledkom sú detailné a flexibilné výstupy, ktoré je možné prispôbiť potrebám rôznych používateľov, vrátane meteorologických služieb, orgánov civilnej ochrany, verejnej správy a ďalších zainteresovaných sektorov.

ECMWF buduje prvé dve digitálne dvojčatá:

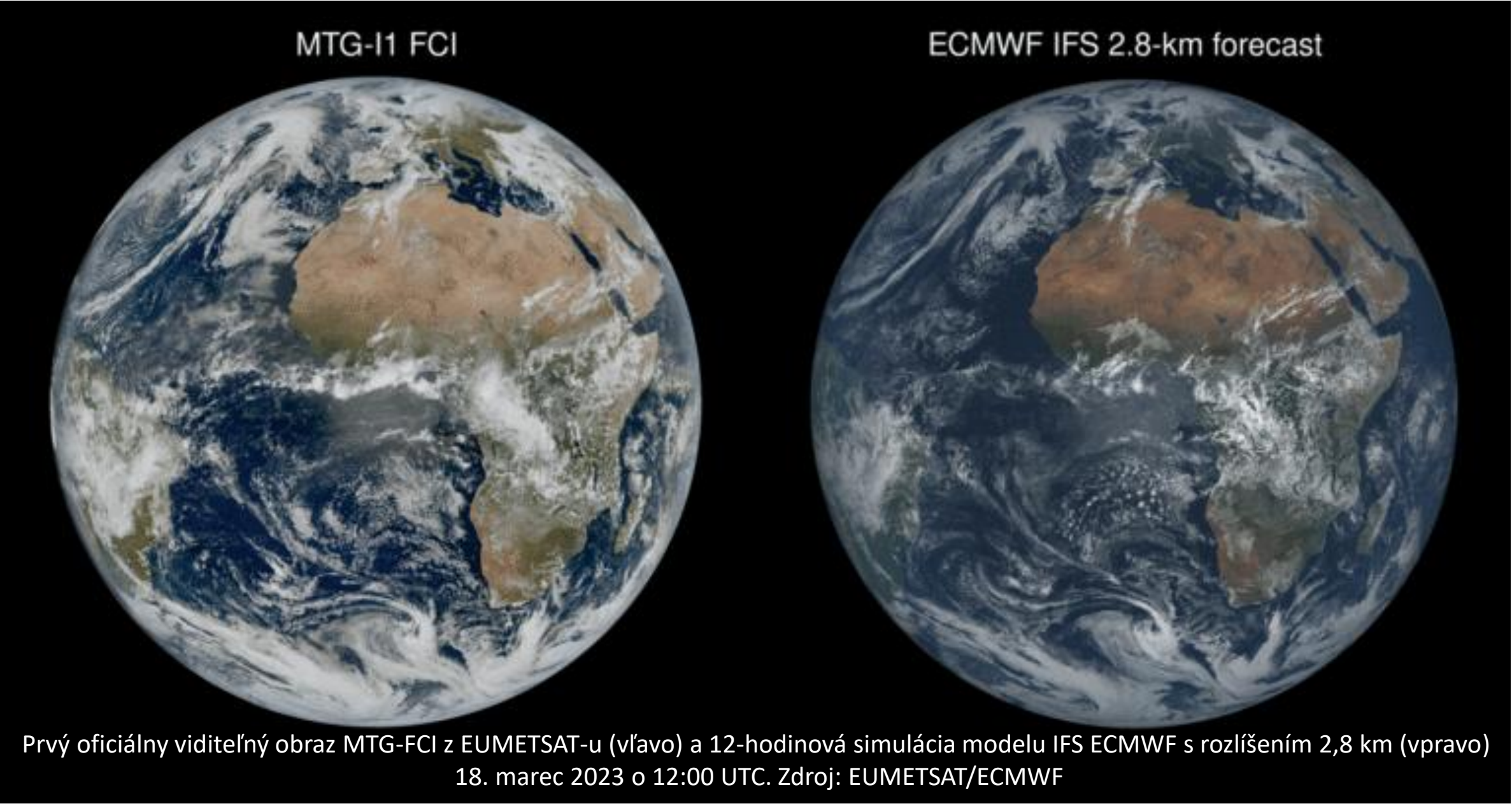
1. Digitálne dvojča extrémov spôsobených počasím (Weather-Induced Extremes Digital Twin)

Globálne kontinuálne digitálne dvojča extrémov

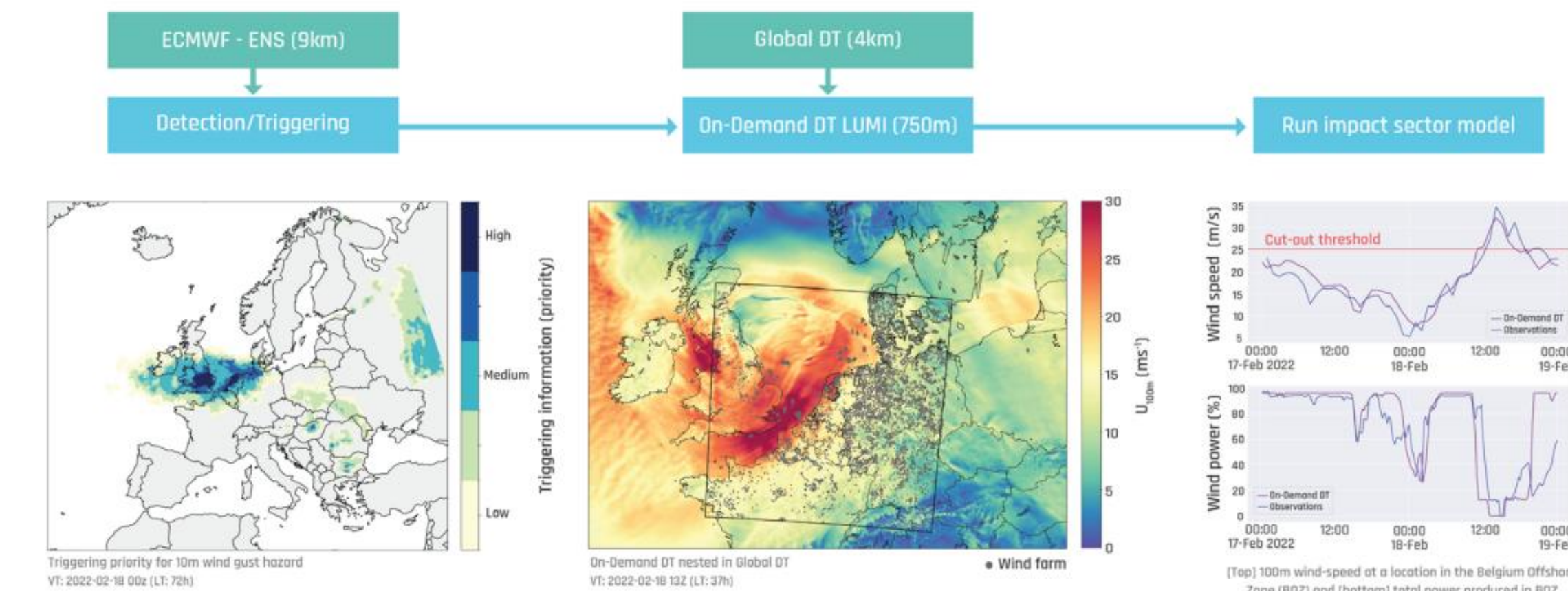
- vyvíjané interne v ECMWF
- globálna predpoveď počasia v krátkodobom horizonte s rozlíšením 4,4 km (2,8 km).
- založené na kľúčovom modeli ECMWF – Integrated Forecasting System (IFS)
- prvé experimentálne výsledky preukazujú výrazné zlepšenie v reprezentácii komplexných javov, ako sú tropické cyklóny a intenzívne zrážkové udalosti v horských oblastiach.

Regionálne digitálne dvojča extrémov na požiadanie (DEODE On-Demand Extremes DT)

- vyvíjané rozsiahlym európskym konzorciom vedeným Météo-France
- aktivuje sa pri výskyte extrémnych udalostí nad Európou.
- umožňuje hodnotenie dopadov extrémov vyvolaných počasím v sub-kilometrovom priestorovom rozlíšení s predpovedným horizontom niekoľkých dní.



Destination Earth On Demand Extremes (DEODE) v skratke:



Konzorcium digitálneho dvojčata extrémov (DEODE)

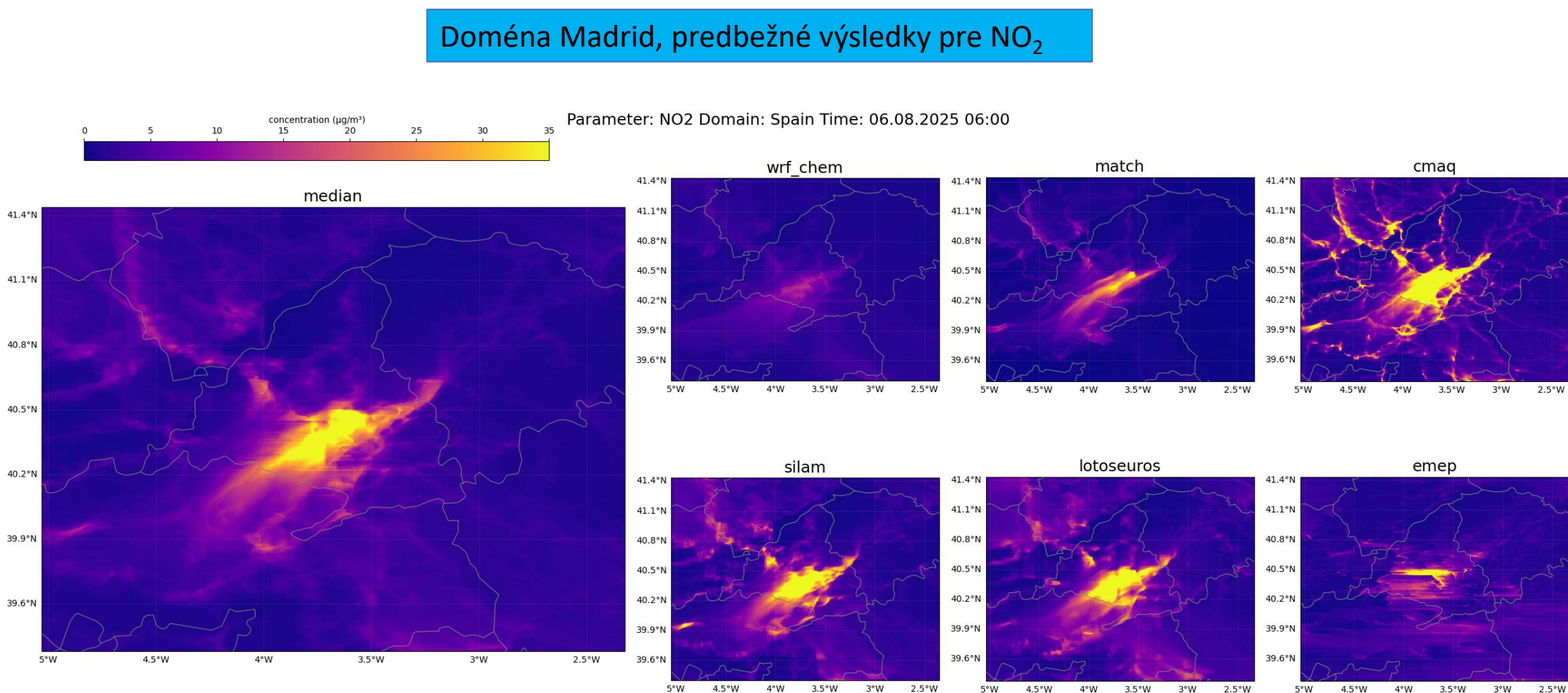
Globálnu zložku zabezpečuje ECMWF. Regionálnu zložku zabezpečuje konzorcium 29 partnerov vedené organizáciou Météo-France na základe zmluvy obstarávanej ECMWF

Modelovanie kvality ovzdušia v DEODE :

Sedem súčasne používaných chemicko-transportných modelov (CTM) je integrovaných do DEODE s cieľom poskytovať vysoko detailné simulácie znečistenia ovzdušia počas extrémnych udalostí:



- **Multimodelový ansámbl:** výsledky 7 CTM sú následne spracované pomocou ansámblových metód
- **Implementácia na EuroHPC:** integrácia do operačného systému digitálneho dvojčata
- **Dáta numerickej predpovede počasia (NWP, 750 m):** poskytované pre regionálnu NWP (konfigurácie HARMONIE-AROME, AROME, ALARO).
- **Paneurópske emisie sú zjemnené na rozlíšenie 250 m** pre relevantné zdroje emisií s využitím proxy dát dostupných na európskej úrovni.

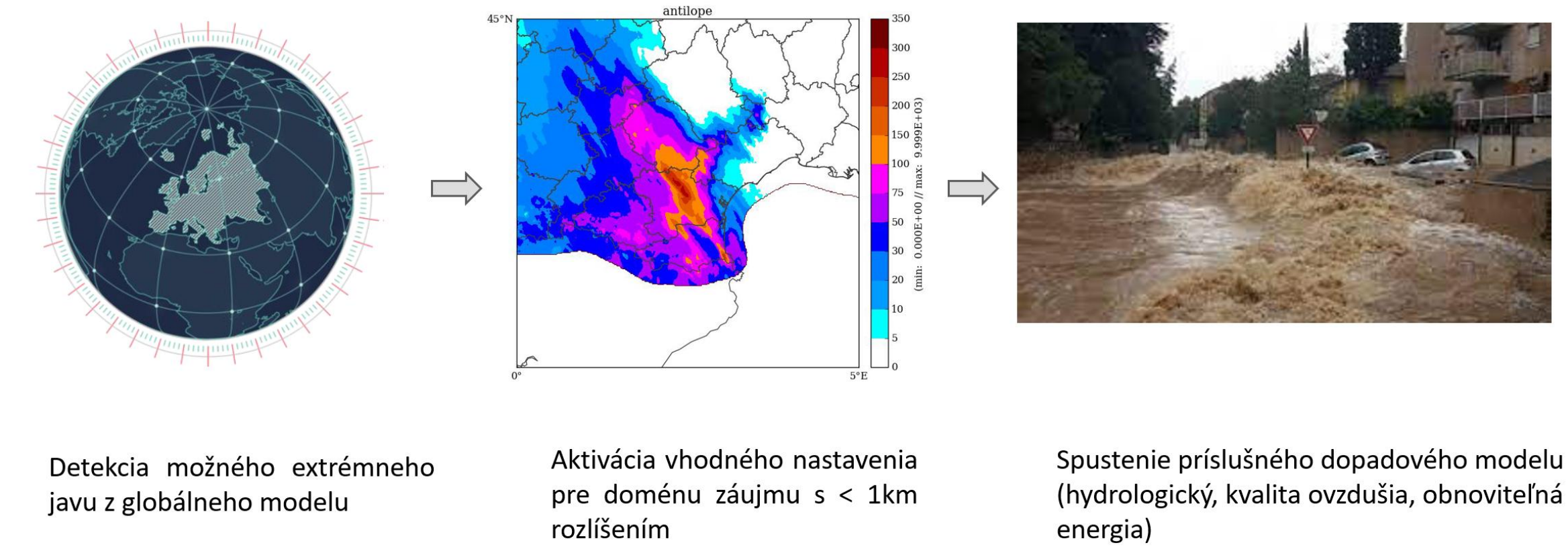


2. Digitálne dvojča adaptácie na zmenu klímy (Climate Change Adaptation Digital Twin – Climate DT)

- globálne konzistentné viacdekádne klimatické údaje s vysokým priestorovým a časovým rozlíšením (5–10 km namiesto > 100 km, hodinové výstupy)
- pravidelná každoročná operatívna aktualizácia klimatických simulácií s kontrolou kvality
- rámec pre „what-if“ klimatické simulácie na požiadanie (pre vybraných kľúčových používateľov)
- projekt nadväzuje na výsledky projektu nextGEMS a používa meteorologické modely ICON a ECMWF IFS previazané s oceánskymi modelmi.

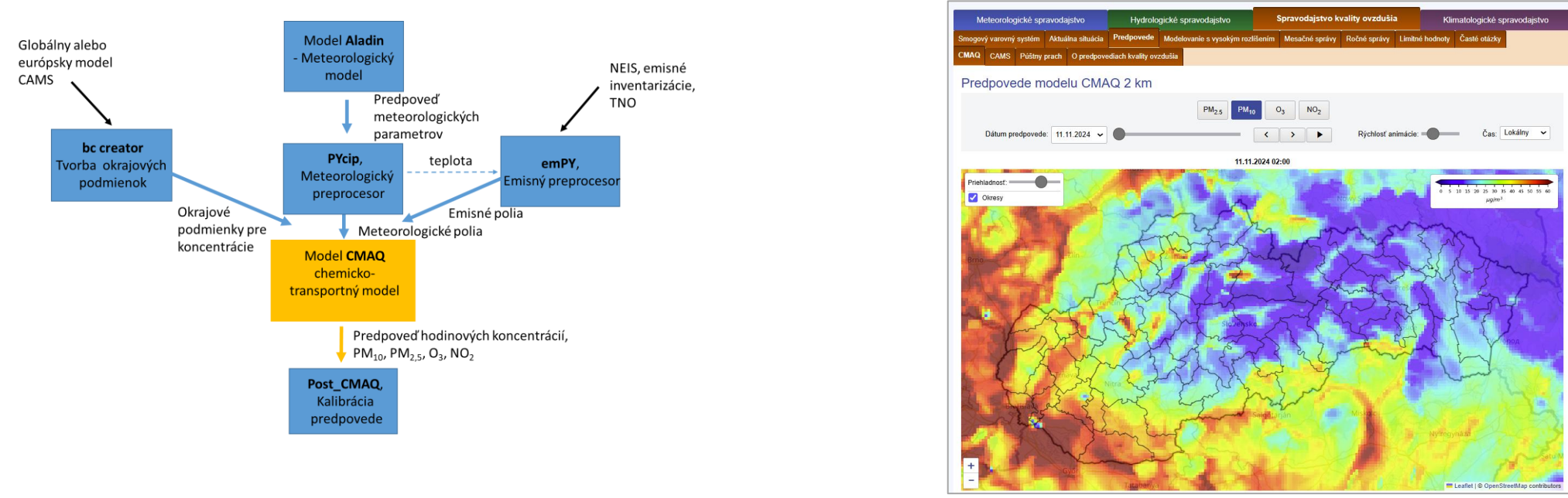
Climate DT: prototypové viacdekádové simulácie z prvej fázy DestinE, ktoré sú už dostupné v Data Lake a na platforme DestinE pre používateľov s rozšíreným prístupom.

Type of simulation	Model	Resolution	Period
Future projection	ICON	5km across Earth system components	2020-2039
Future projection	IFS-NEMO	4.4 km atmosphere, 1/12 ocean/sea-ice	2020-2039
Future projection	IFS-FESOM	4.4 km atmosphere, 5km ocean/sea-ice	2020-2039
Future projection (nextGEMS)	IFS-FESOM	9 km atmosphere, 5km ocean/sea-ice	2020-2049
Historical simulation	ICON	10km atmosphere, 5km ocean/sea-ice	1993-2019
Historical simulation	IFS-NEMO	9 km atmosphere, 1/12 ocean/sea-ice	1990-2001
Historical simulation (nextGEMS)	IFS-FESOM	9 km atmosphere, 5km ocean/sea-ice	1990-2019
Control simulation	IFS-NEMO	9 km atmosphere, 1/12 ocean/sea-ice	1990-2004
Control simulation	IFS-FESOM	9 km atmosphere, 1/12 ocean/sea-ice	1990-2006
Storyline simulation past climate	IFS-FESOM	9 km atmosphere, 5km ocean/sea-ice	2017-2024
Storyline simulation present climate	IFS-FESOM	9 km atmosphere, 5km ocean/sea-ice	2017-2024
Storyline simulation future climate	IFS-FESOM	9 km atmosphere, 5km ocean/sea-ice	2017-2024



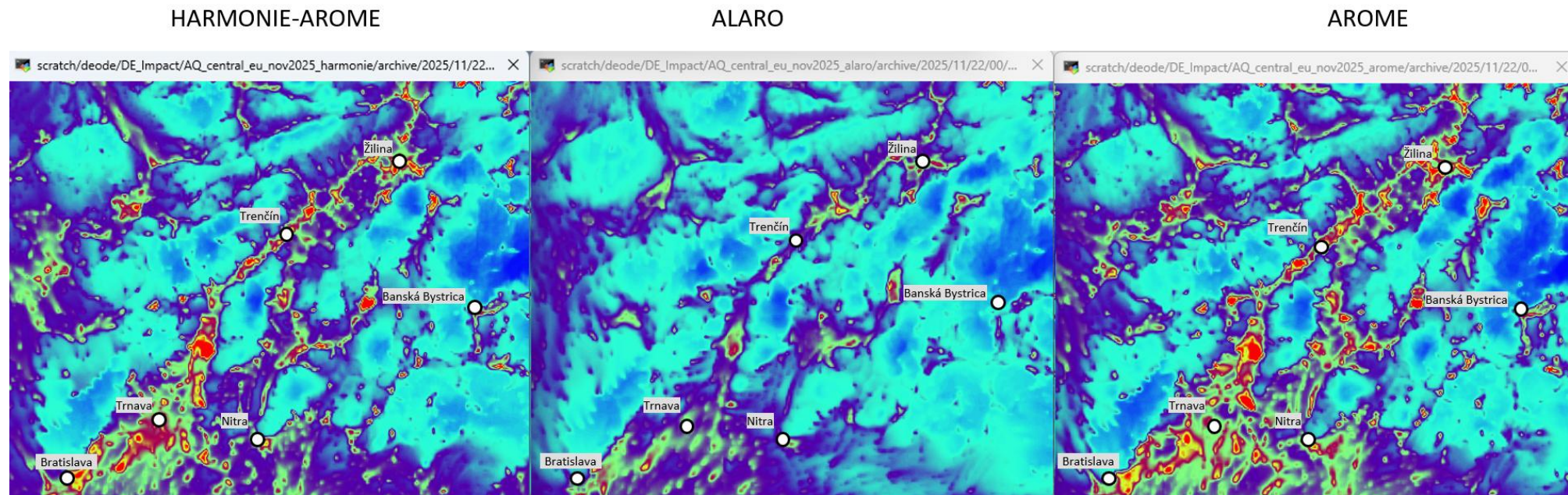
France	Météo-France	Latvia	LEGMC	Ireland	Met Éireann	Croatia	DHMZ	Belgium	KMI-IRM	Slovakia	SHMU
	INRAE	Slovenia	ARSO	Spain	AEMET		IMO	Austria	GeoSphere	Poland	IMGW
	CNRS	Portugal	IPMA		BSC		KNMI	Finland	FMI	Italy	CINECA
Norway	Met Norway	Estonia	TallTech	Czech Republic	CHMI		RIVM	Sweden	CSC	Germany	DLR
Denmark	DMI	Bulgaria	NIMH			Hungary	HungarMet		SMHI	Romania	NMA

Model CMAQ, predpovede kvality ovzdušia na 2 dni s rozlíšením 2 × 2 km, na webe SHMÚ



V oblasti kvality ovzdušia je úlohou SHMÚ implementovať model CMAQ [1,2] do celkového automatizovaného DEODE-AQ-WORKFLOW systému. Model CMAQ sme implementovali na HPC cluster ECMWF ATOS a súbežne so šiestimi modelmi z iných krajín sme otestovali systém na rôznych výpočtových doménach s rozlíšením 750 m.

Koncentrácie PM_{2,5} dňa 22.11.2025 18:00 UTC podľa modelu CMAQ. Simulácia spustená v systéme DEODE-AQ-WORKFLOW. Na rozdielne výsledky vplyva len rôzna konfigurácia NWP modelov.



- ✓ Model CMAQ bol implementovaný do DEODE-AQ-WORKFLOW
- ✓ Systém je nainštalovaný na HPC ATOS, ktorý spravuje ECMWF
- ✓ Model sa spúšťa poloaufomaticky v rámci DEODE-AQ-WORKFLOW
- ✓ Výsledky sa automaticky kombinujú spolu so 6 AQ modelmi do ansámblovej predpovedi
- Momentálne sa model implementuje na LUMI, ktorý je súčasťou EuroHPC
- Plánujú sa validácie s meranými dátami
- V ďalších fázach projektu plne automatizovať výpočet + vedecký výskum

[1] Byun, D., Schere, K., 2006. Review of the governing equations, computational algorithms, and other components of the Model-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System. Appl. Mech. Rev. 59 (2), 51–77. <https://doi.org/10.1115/1.2128636>.

[2] United States Environmental Protection Agency. (2020). CMAQ (Version 5.3.2)[Software]. Available from <https://doi.org/10.5281/zenodo.4081737>