

## FELSZÍNI FOLYAMATOK ÉS ADATASSZIMILÁCIÓS ELJÁRÁSOK FEJLESZTÉSE MEZOSKÁLÁJÚ NUMERIKUS ELŐREJELZŐI MODELLBEN

Tóth Helga <sup>(1,2)</sup> , Szintai Balázs <sup>(2,3)</sup> , Breuer Hajnalka <sup>(1)</sup> 

<sup>(1)</sup> ELTE Eötvös Loránd Tudományegyetem, Földrajz- és Földtudományi Intézet,  
Meteorológiai Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A

<sup>(2)</sup> HungaroMet Magyar Meteorológiai Szolgáltató Nonprofit Zrt,  
1024 Budapest, Kitaibel Pál utca 1.

<sup>(3)</sup> European Centre for Medium-Range Weather Forecasts,  
Robert-Schuman-Platz 3, 53175 Bonn, Németország  
e-mail: toth.h@met.hu, szintai.b@met.hu, breuer.hajnalka@ttk.elte.hu

### Bevezetés

A felszín közeli légrétegek meteorológiai viszonyainak pontos előrejelzéséhez elengedhetetlen a felszín-légkör kölcsönhatás lehető legátfogóbb és legpontosabb leírása. A megfigyelések megbízhatósága és a korábbi modell-előrejelzés (background vagy first guess) alapján statisztikailag optimális módon kombinálják azokat adatasszimilációs technikák alkalmazásával a numerikus időjárás-előrejelző modellekben. A felszíni adatasszimilációt a légköri 3D-Var-tól függetlenül és azzal párhuzamosan végzik, mivel a két rendszer eltérő fizikai elvek alapján eltérő időskálákon működik, és eltérő típusú megfigyeléseket igényel. Ez a két analízis szolgáltatja az AROME-SURFEX (Seity et al., 2011) rendszer rövid távú előrejelzésének kezdeti feltételeit. A felszíni asszimiláció leggyakrabban Optimális Interpolációt használ (Mahfouf et al., 2000), bár a kiterjesztett Kalman-filter (EKF) és az egyszerűsített kiterjesztett Kalman-filter (SEKF) változatai egyre népszerűbbek (Mahfouf et al., 2009; de Rosnay et al., 2013; Fairbrain et al., 2019).

Az SEKF az időjárástól függő, dinamikusabb leírást tesz lehetővé, valamint alkalmas mind a konvencionális, mind a nem-konvencionális (pl. műholdas) mérések asszimilációjára. A jelenlegi operatív AROME változatban a 2 méteres hőmérséklet- és relatív nedvesség-méréseket használjuk az SEKF-alapú felszíni adatasszimiláció során (Tóth et al., 2025).

A MetOp ASCAT talajnedvesség- és SPOT/VGT levélfelület-index (LAI) műholdas adatok asszimilációjának előnyeit a talajmodell hosszú távú futtatásával igazolták, függetlenül a légköri modelltől (Barbu et al., 2014; Albergel et al., 2017; Tóth & Szintai, 2021).

A műholdas mérések integrálásával elvárjuk, hogy az AROME modell minél pontosabban leírja a talaj nedvességének idő- és térbeli változását, főleg azokban a régiókban, ahol kevés a mérési adat. Ezenkívül a műholdas mérések reprezentativitása is jobb, mint a felszíni méréseké, ami tovább növelheti az analízisek és előrejelzések pontosságát.

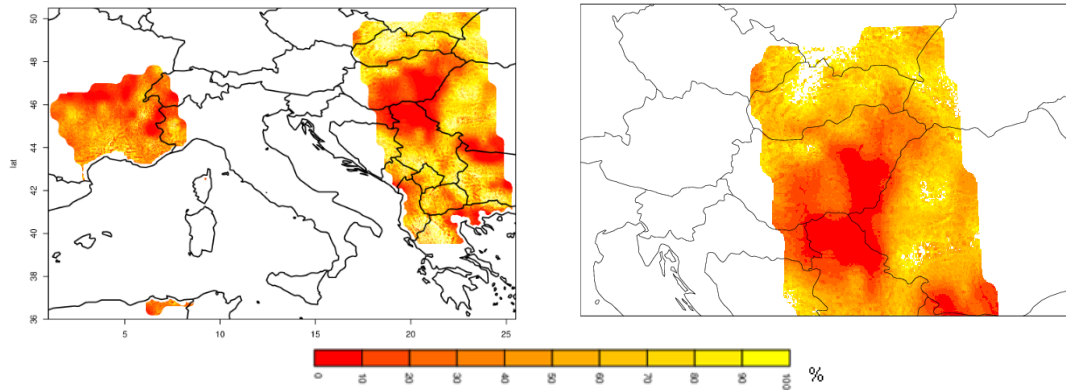
A beszámolóban bemutatjuk a MetOp-B műhold ASCAT talajnedvesség méréseinek beépítését az AROME-SURFEX adatasszimilációs rendszerébe.

### Műholdas talajnedvesség asszimilációjának előkészítése

A MetOp B kvázipoláris műhold, kb. 800 km magasságban, kering és 2012-től végez méréseket [1]. A műholdon található az Advanced SCATterometer (ASCAT) műszer, amely visszaszórást mér, 5.255 GHz frekvencián. Európa felett napi kétszer halad át, 7 és 19 UTC körül. Az EUMETSAT készít belőle valós idejű talajnedvesség adatokat a H-SAF (Satellite Application Facility on Support to Operational Hydrology and Water Management) együttműködés keretében [2]. Ebben a tanulmányban a H08-as nevű produktumot használtuk, felszíni talajnedvesség értékeket százalékban kifejezve, európai tartományon, 1 km-es

horizontális felbontáson. Az ASCAT talajnedvesség értékek asszimilációjával számos cikk foglalkozik (Gómez et al., 2020; Herbert et al., 2024), bizonyítva az analízisre és az előrejelzésre vonatkozó pozitív hatását.

Az adatok előkészítése a munka fontos része. Első lépésként a nyers adatokat kell interpolálni az AROME modell által használt Lambert-rácsra (1. ábra).



1. ábra: Nyers H-SAF talajnedvesség produktum (bal oldal),  
AROME rácsra interpolált talajnedvesség (jobb oldal).

Az AROME számára nem százalékos talajnedvesség érték (SM), hanem volumetrikus talajnedvesség szükséges (SSM).

$$SSM = SM \cdot (w_{max} - w_{min}) + w_{min} \quad (1)$$

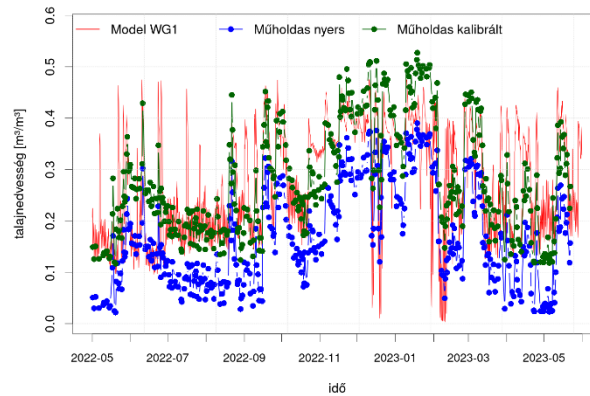
ahol  $w_{max}$  és  $w_{min}$  modellből számolt, több évre vonatkozó volumetrikus talajnedvesség értékek.

Az ASCAT mért talajnedvesség és az AROME modell talajnedvességének szisztematikus hibája (bias) eltér, ezért a műholdas megfigyelési adatokat kalibrálni kell az adatasszimiláció végrehajtása előtt. Erre a célra CDF matching technikát alkalmazunk azzal a céllal, hogy eltüntessük a két adatsor közötti inkonzisztenciát (Scipal et al., 2008):

$$SSM'_{sat} = p_1 + p_2 \cdot SSM_{sat} \quad (2)$$

ahol  $p_1 = SSM_{mod} - p_2 \cdot SSM_{sat}$ , és  $p_2 = \frac{stdev(SSM_{mod})}{stdev(SSM_{sat})}$  együtthatók,  $SSM_{mod}$  jelenti a modellre vonatkozó talajnedvesség értékeket, míg  $SSM_{sat}$  az eredeti, a  $SSM'_{sat}$  pedig a korrigált műholdas méréseket. A CDF matchinghez az átlagot és a szórást mind a megfigyelésekre, mind a modell adatokra meg kell határozni, lehetőleg minél hosszabb időszakra, ezt mi a 2018.11.01.–2023.05.31. időszakra határoztuk meg.  $p_1$  és  $p_2$  értéke meghatározható a teljes időszakra vonatkozóan, illetve évszakosan is.

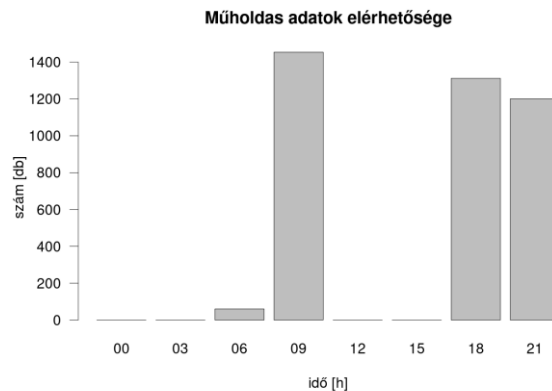
A szisztematikus hiba korrekcióját követően az adatok további szűrésére van szükség, pl. elvetjük azokat az adatokat, melyek esetében a műholdas mérésre vonatkozó  $SM_{error} > 8\%$ , de további lehetőség lehet pl. a túl komplex topográfia, vagy vízfelületek feletti mérések kiszűrése is. A CDF matching eredményét mutatja be a 2. ábra a dávidi rácspontban (é. sz. 46,00°; k. h. 18,94°). A CDF matching eredményeként a kalibrált műholdas talajnedvesség értékek közelebb kerülnek a modell talajnedvességéhez.



2. ábra: Modellezett, mért és CDF matching eredményeként előállított talajnedvesség a talaj felső 2-3 cm-es rétegében, Dávod állomásra, 2022.05.01.–2023.05.31. időszakra.

### Műholdas talajnedvesség asszimilációja

Az adatasszimilációs futtatásokat az AROME modell 43-as ciklusával végeztük, 2,5 km-es felbontáson, 60 vertikális szinten (Tóth et al., 2021). A tesztidőszak 2023.05.01.–10.31. közötti időszak volt, melyet egy egyhetes felpörgési időszak előzött meg. A magaslégkörben és a felszínen is 3 órás asszimilációs ablakot alkalmaztunk, ugyanakkor fontos megjegyezni, hogy az ASCAT SM adatok 9, 18 és 21 UTC-kor álltak rendelkezésünkre (3. ábra), ezért asszimilációjuk csak ezekben az időpontokban történt meg, a többi időpontban csak a 2 méteres megfigyeléseket használtuk.



3. ábra: ASCAT SM adatok elérhetősége a kárpát-medencei tartományon a 2020–2023 közötti időszakra.

Adatasszimiláció mellett előrejelzéseket is futtattunk, hogy lássuk, az új adatok beépítése milyen módon és mennyire befolyásolja azok minőségét. A tesztfuttatások beállításai az 1. táblázatban láthatók.

A táblázatból kiolvasható, hogy készült referencia futás, amit az operatív beállításokkal futtattunk, illetve készültek eltérő megfigyelési- és modellhibákkal készített futtatások. A talajnedvességre vonatkozó megfigyelési- és modell hibát korrigáljuk ( $w_{fc} - w_{wilt}$ ) különbséggel, ahol a  $w_{fc}$  és a  $w_{wilt}$  teljes térfogati víztartalom a szántóföldi kapacitásnál, illetve a hervadási ponton, melyek a talaj textúrájától függenek. A különbség kb.  $0,1 \text{ m}^3/\text{m}^3$  a kárpát-medencei tartományon. Látható továbbá az is, hogy az EXP1 és EXP2 között tízszeres

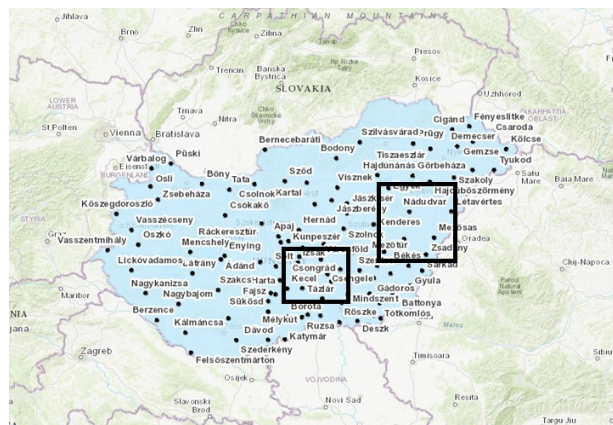
az eltérés a talajnedvességre vonatkozó modell- és megfigyelési hibák értékei között, amiből az asszimiláció érzékenységre vonatkozóan kaphatunk információt.

1. táblázat: Az ASCAT SM adatok asszimilációval kapcsolatos vizsgálatok különböző beállításai. A WG1 és WG2 a felszíni és gyökérszóna talajnedvességét jelenti, míg a TG1 és TG2 a felszíni és gyökérszóna talajhőmérsékletét.

Kísérletek	REF	EXP1	EXP2
Megfigyelések	SYNOP T2M & HU2M	SYNOP T2M, HU2M, ASCAT SM	SYNOP T2M, HU2M, ASCAT SM
Kontroll változók.	WG1, WG2, TG1, TG2	WG1, WG2, TG1, TG2	WG1, WG2, TG1, TG2
Megfigyelési hibák	1 K, 7%	1 K, 7%, $0.05 (w_{fc}-w_{wilt}) m^3/m^3$	1 K, 7%, $0.4 (w_{fc}-w_{wilt}) m^3/m^3$
Modell hibák	$0,1 (w_{fc}-w_{wilt}) m^3/m^3$ , $0,15 (w_{fc}-w_{wilt}) m^3/m^3$ , 2 K, 2K	$0,04 (w_{fc}-w_{wilt}) m^3/m^3$ , $0,02 (w_{fc}-w_{wilt}) m^3/m^3$ , 1,5 K, 1,5 K	$0,4 (w_{fc}-w_{wilt}) m^3/m^3$ , $0,2 (w_{fc}-w_{wilt}) m^3/m^3$ , 2 K, 2 K
Analízisek időpontjai (UTC)	00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21	00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21	00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21
Előrejelzések időpontja és hossza	00 UTC + 24h	00 UTC + 24h	00 UTC + 24h

## Eredmények

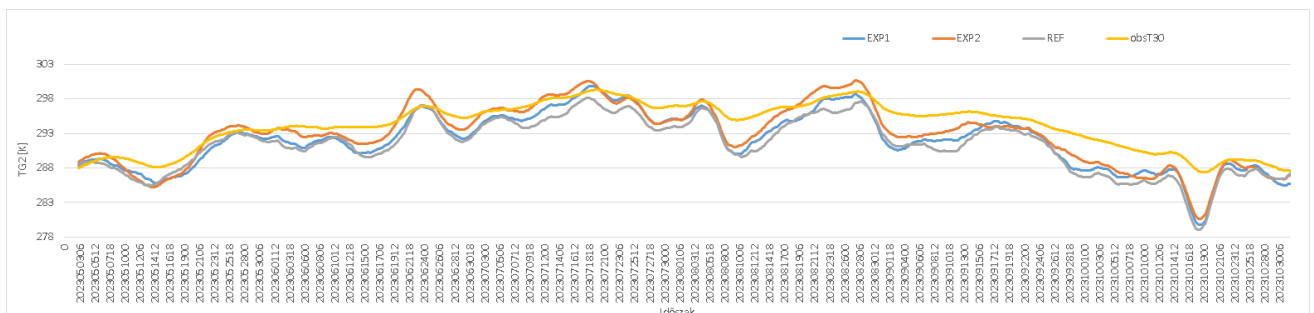
A talajnedvesség és –hőmérséklet méréseket az [aszalymonitoring.vizugy.hu](http://aszalymonitoring.vizugy.hu) oldalról töltöttük le, amelyek órás időbeli felbontásban állnak rendelkezésre 2017 óta, 116 állomásra (Fiala et al., 2018). A kiértékelés során kiválasztottunk két területet, az egyik a Duna-Tisza közén homokos terület, míg a másik a Tiszántúlon egy agyagos-vályogos terület (4. ábra).



4. ábra: Az [aszalymonitoring.vizugy.hu](http://aszalymonitoring.vizugy.hu) állomáshálózata a két kiválasztott területtel.

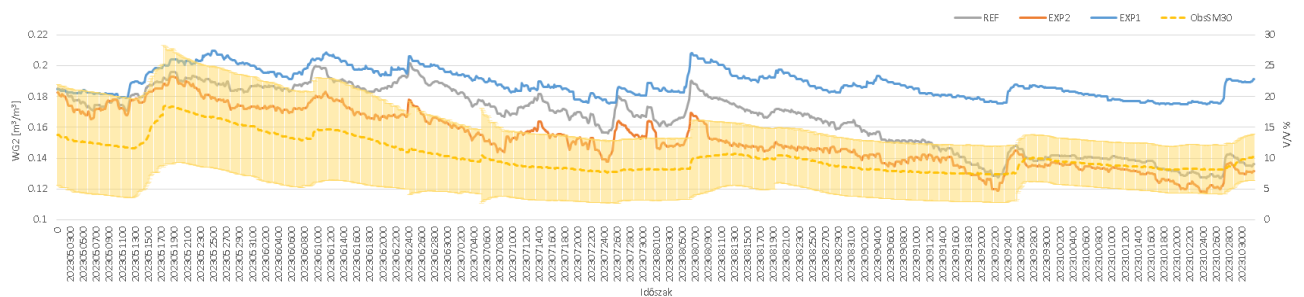
Az 5. ábrán a talajhőmérséklet analízisek időbeli fejlődését jelenítettük meg a homokos területen a 2023. május–októberi időszakra vonatkozóan. A modellfuttatások elég jól követték

a hőmérséklet változásait a gyökérzónában, ugyanakkor voltak olyan időszakok, amikor a modellfuttatások dinamikusabban szimulálták a melegedés vagy hűlés mértékét, mint ahogy azt a valóságban, 30 cm mélységben tapasztaltuk. Az őszi időszakban a modellkísérletek erőteljesebben alulbecsülték a hőmérsékletet, mint nyáron és tavasszal. A mérések és a modellfuttatások közötti korreláció mértéke az EXP2 esetében bizonyult a legnagyobbnak, 0,89, míg EXP1-re 0,86, a REF-re 0,83 adódott. A mérések és modell analízisek között számított bias és RMSE értékeket tekintve is az EXP2 kísérlet bizonyult a legpontosabbnak, és az EXP1 kísérlet ismét jobb volt, mint a REF. Ez azt jelenti, hogy a műholdas talajnedvesség asszimilációja javítja az analízisek minőségét, de az asszimilációs beállításoknak fontos szerepe van, ezt korábbi vizsgálataink is bizonyították (Tóth et al., 2025).



5. ábra: Gyökérzóna talajhőmérséklet analízisek (TG2) a homokos területen a 2023. május–októberi időszakra.

A talajnedvesség tekintetében az EXP2 és a REF futtatások az időszak folyamán, de főleg augusztustól fokozatosan csökkentik a talajnedvesség értékét, míg az EXP1 kísérletben ezt a csökkenő tendenciát nem látjuk. A mérések is a talajnedvesség csökkenését mutatják. Mivel a mérések és a modell által használt talajnedvesség eltér egymástól, csak a köztük lévő korrelációt tudjuk meghatározni. Itt is az EXP2 kísérlet adta a nagyobb értéket, 0,83-at, EXP1 esetében 0,73-at kaptunk, míg a REF esetén 0,71-et.

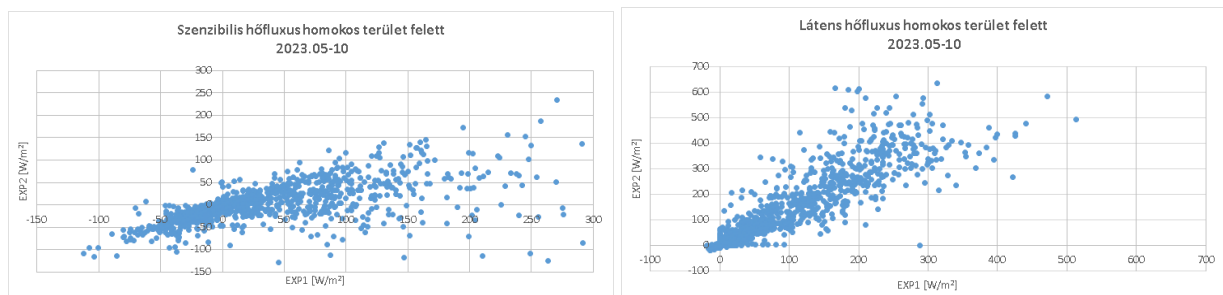


6. ábra: Gyökérzóna talajnedvesség analízisek (WG2) a homokos területen 2023. május–októberi időszakra. A bal oldali tengely a modellben használt teljes víztartalom  $[m^3/m^3]$ -ben, míg a jobb oldali tengely a mérések esetén használt térfogat százalékban kifejezett talajnedvesség tartalmat jelöli.

Az agyagos-vályogos területre hasonló eredményeket kaptunk, ugyanis, mind a talajnedvességre mind a talajhőmérsékletre számolt korrelációk nagyobbak bizonyultak az EXP2 kísérlet esetében, bár a nyári időszakban az EXP1 futtatás túlszárnyalta a másik két kísérlet eredményét. Az EXP2 és a REF kísérletek túlzottan kiszárították a gyökérzónát, míg a mérések nem adtak ilyen mértékű szárítást.

A látens- és szenzibilis hőfluxusokkal kapcsolatos vizsgálataink nagy különbséget mutattak a kétféle kísérlet között (7. ábra). Szenzibilis hőáram EXP1 kísérlet esetén jóval

magasabbnak adódott, mint EXP2-re, míg a látens hőáram EXP2 esetén volt magasabb, mint EXP1-é. Ez azt jelenti, hogy a szárazabb talaj, amit EXP2 adott, jobban is párolgott, fokozatosan szárazabb és melegebb lett az időszak folyamán.



7. ábra: Szenzibilis- és látens hőáramok a homokos terület felett 2023. május–októberi időszakra.

Agyagos-vályogos talaj esetén fordított eredményt kaptunk, és jóval kisebb különbségek adódtak a kétféle kísérlet között: Szenzibilis hőáram EXP2 esetén magasabbnak adódott, míg a látens hőáram EXP1 esetén lett nagyobb, azaz a nedvesebb talaj jobban párolgott.

## Tervek

- Tervezzük, hogy a kísérleteket a téli időszakra is kiterjesztjük.
- A kiértékelés során felhasználjuk a 45 cm-es és 60 cm-es talajnedvesség és talajhőmérséklet méréseket is. Valamint újabb, alapvetően vályogos talajú területre is elvégezzük a kiértékeléseket, így átfogóbb képet kaphatunk a modell és az adatasszimiláció viselkedéséről a különböző szemcsézettségű talajokra vonatkozóan.
- Mivel az ASCAT H08 adatokat előreláthatóan 2025 második felében újabb adatbázisra (ASCAT H28) cserélik, a kísérleteket ezekkel az új mérésekkel is megismételjük.

## Hivatkozások

- Albergel, C., Munier, S., Leroux, D. J., Dewaele, H., Fairbairn, D., Barbu, A. L., ... & Calvet, J.-C., 2017: Sequential assimilation of satellite-derived vegetation and soil moisture products using SURFEX\_v8.0: LDAS-Monde assessment over the Euro-Mediterranean area. *Geoscientific Model Development*, 10(10): 3889–3912. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-3889-2017>
- Barbu, A. L., Calvet, J.-C., Mahfouf, J.-F., Lafont, S., 2014: Integrated ASCAT surface soil moisture and GEOV1 leaf area index into the SURFEX modelling platform: A land data assimilation application over France. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(1): 173–192. <https://doi.org/10.5194/hess-18-173-2014>
- Fairbairn, D. P., de Rosnay, P., Browne, P., 2019: The New Stand-Alone Surface Analysis at ECMWF: Implications for Land–Atmosphere DA Coupling. *Journal of Hydrometeorology*, 20(10): 2023–2042. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-19-0074.1>
- Fiala, K., Barta, K., Benyhe, B., Fehérváry, I., Lábdy, J., Sipos, Gy., Györfly, L., 2018: Operatív aszály- és vízhiánykezelő monitoring rendszer. *Hidrológiai Közlöny*, 98(3): 14–24.
- Gómez, B., Charlton-Pérez, C. L., Lewis, H., Candy, B., 2020: The Met Office Operational Soil Moisture Analysis System. *Remote Sensing*, 12(22): 3691. <https://doi.org/10.3390/rs12223691>

- Herbert, C., de Rosnay, P., Weston, P., Fairbairn, D., 2024: Towards unified land data assimilation at ECMWF: Soil and snow temperature analysis in the SEKF. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 150(764): 4133–4155.  
<http://dx.doi.org/10.1002/qj.4808>
- Mahfouf, J.-F., Viterbo, P., Douville, H., Beljaars, A., Saarinen, S., 2000: A Revised land-surface analysis scheme in the Integrated Forecasting System. *ECMWF Newsletter*, 88.
- Mahfouf, J.-F., Bergaoui, K., Draper, C., Bouyssel, F., Taillefer, F., Taseva, L., 2009: A comparison of two off-line soil analysis schemes for assimilation of screen level observations. *Journal of Geophysical Research*, 114, D08105.  
<http://dx.doi.org/10.1029/2008JD011077> .
- de Rosnay, P., Drusch, M., Vasiljevic, D., Balsamo, G., Albergel, C., Isaksen, L., 2013: A simplified Extended Kalman Filter for the global operational soil moisture analysis at ECMWF. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 139(674): 1199–1213.  
<https://doi.org/10.1002/qj.2023>
- Scipal, K., Drusch, M., Wagner, W., 2008: Assimilation of a ERS scatterometer derived soil moisture index in the ECMWF numerical weather prediction system. *Advances in Water Resources*, 31(8): 1101–1112. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2008.04.013>
- Seity, Y., Brousseau, P., Malardel, S., Hello, G., Bénard, P., Bouttier, F., ... & Masson, V., 2011: The AROME-France Convective-Scale Operational Model. *Monthly Weather Review*, 139(3): 976–991. <https://doi.org/10.1175/2010MWR3425.1>
- Tóth, H., Szintai, B., 2021: Assimilation of Leaf Area Index and Soil Water Index from Satellite Observations in a Land Surface Model in Hungary. *Atmosphere*, 12(8): 944.  
<https://doi.org/10.3390/atmos12080944>
- Tóth, H., Homonnai, V., Mile, M., Várkonyi, A., Kocsis, Zs., Szanyi, K., ... & Szépszó, G., 2021: Recent developments in the data assimilation of AROME/HU numerical weather prediction model. *Időjárás*, 125(4): 521–553. <https://doi.org/10.28974/idojaras.2021.4.1>
- Tóth, H., Szintai, B., Breuer, H., 2025: Development of Surface Data Assimilation Using Simplified Extended Kalman Filter in AROME Model in Hungary. *Atmosphere*, 16(6): 709. <https://doi.org/10.3390/atmos16060709>

### Internetes hivatkozások

[1 – ESA, MetOp-B]

[https://www.esa.int/Newsroom/Press\\_Releases/New\\_launch\\_date\\_confirmed\\_for\\_Metop-B](https://www.esa.int/Newsroom/Press_Releases/New_launch_date_confirmed_for_Metop-B)

[2 – HSAF] [https://hsaf.meteoam.it/Products/ProductsList?type=soil\\_moisture](https://hsaf.meteoam.it/Products/ProductsList?type=soil_moisture)

---

### ORCID

Tóth H.  <https://orcid.org/0000-0001-6610-9621>

Szintai B.  <https://orcid.org/0000-0002-4111-9396>

Breuer H.  <https://orcid.org/0000-0002-0271-095X>