

# Ewaluacja operacyjnych produktów wilgotności gleby: analiza porównawcza dla obszaru Polski

JAKUB STASZEL 

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Geologii,  
Geofizyki i Ochrony Środowiska, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

## Streszczenie

Operacyjne produkty wilgotności gleby, oparte na radiometrii satelitarnej czy skaterometrii mikrofalowej, reanalizy modelowe oraz zestawienia fuzyjne, różnią się fizyką pomiaru, rozdzielczością i strukturą błędów, co utrudnia ich bezpośrednią wymiennność. Nad obszarem Polski dotychczasowe analizy porównawcze pozostają fragmentaryczne. W pracy przeprowadzono porównanie międzyproduktowe (ang. *intercomparison*) pięciu operacyjnych zestawień wilgotności gleby – SMAP, SMOS, ASCAT, ERA5-Land oraz zintegrowanego produktu ESA CCI Soil Moisture – nad obszarem Polski w sezonie wegetacyjnym 2025 roku (245 dni, marzec-październik). Wszystkie pola przeniesiono na wspólną siatkę  $0.25^\circ$  i poddano standaryzacji z-score w każdej komórce, a następnie dla dziesięciu par obliczono współczynnik korelacji Pearsona, korelację anomalii, RMSE i błąd systematyczny, w ujęciu globalnym, przestrzennym i sezonowym.

SMOS nad Polską nie dostarczył w oknie analizy ani jednego dnia z danymi po filtrach jakościowych, a szereg ASCAT urywa się w połowie lipca. Spośród pozostałych par jedynie CCI COMBINED i ERA5-Land wykazują konsekwentnie wysoką zgodność ( $R = 0.622$ ;  $R > 0.5$  w 88% komórek), podczas gdy para SMAP-ASCAT pozostaje najsłabiej skorelowana ( $R = 0.314$ ). Zgodność wszystkich par jest najwyższa wiosną i wyraźnie spada latem, z towarzyszącym ujemnym biasem par z ASCAT (do  $-0.77$ ), co wskazuje na systematyczne niedoszacowanie suszy letniej przez skaterometr pasma C. Dla operacyjnego monitoringu wilgotności gleby w Polsce implikuje to praktyczną wymiennność CCI COMBINED i ERA5-Land, przy świadomym uwzględnieniu ograniczeń SMAP i ASCAT.

**Słowa kluczowe:** Wilgotność gleby; porównanie międzyproduktowe; SMAP; SMOS; ASCAT; ERA5-Land; ESA CCI; Polska

## 1. Wstęp

Wilgotność gleby (ang. soil moisture, SM) należy do kluczowych zmiennych stanu systemu Ziemi. Decyduje o podziale opadu na infiltrację, spływ powierzchniowy i ewapotranspirację, kształtuje wymianę strumieni energii w warstwie granicznej atmosfery oraz poprzez sprzężenia gleba-atmosfera wpływa na lokalną i regionalną pogodę i klimat (Vereecken i in., 2008; Babaeian i in., 2019). W ujęciu rolniczym wilgotność gleby strefy korzeniowej warunkuje zaopatrzenie roślin w wodę, intensywność stresu wodnego i ostatecznie plonowanie, dzięki czemu stanowi podstawowy sygnał wczesnego ostrzegania przed suszą glebowo-rolniczą (Vreugdenhil i in., 2022). Z perspektywy hydrologicznej pełni rolę zmiennej pamięciowej, która, obok retencji w strefie nasyconej, warunkuje odpowiedź zlewni na opad, kształtując formowanie się wzebrań oraz zasilanie wód podziemnych (Vereecken i in., 2008).

Pomiary in situ wilgotności gleby są nieliczne, słabo reprezentatywne przestrzennie i rzadko dostępne operacyjnie poza wybranymi sieciami badawczymi (Dorigo i in., 2021). Z tego względu od ponad dekady kluczową rolę w globalnym monitoringu odgrywają produkty satelitarne.

- 1) Pasywna radiometria w paśmie L (SMOS – ESA, SMAP – NASA) dostarcza oszacowań wilgotności górnej warstwy gleby ( $\sim 0-5$  cm) o rozdzielczości natywnej rzędu 25–40 km i czasie rewizyty  $\sim 2-3$  dni. Produkty SMAP w wersji Enhanced udostępniane są na siatce 9 km (Kerr i in., 2016; Colliander i in., 2022).

- 2) Aktywna teledetekcja w paśmie C (skaterometr ASCAT na satelitach Metop) dostarcza wskaźnika względnego nasycenia gleby przy rozdzielczości ok. 12.5 km, charakteryzującego się wysoką częstotliwością obserwacji oraz dobrą skutecznością nad obszarami o umiarkowanej pokrywie roślinnej (Brocca i in., 2017).
- 3) Produkty fuzyjne integrujące obserwacje pasywne oraz aktywne (ESA CCI Combined Soil Moisture) umożliwiają uzyskanie długoterminowego, spójnego czasowo szeregu wilgotności gleby. Dane udostępniane są na siatce  $\sim 0.25^\circ$  z krokiem dziennym i reprezentują wilgotność powierzchniowej warstwy gleby ( $\sim 0-5$  cm). Produkt Combined powstaje poprzez łączenie obserwacji z wykorzystaniem metod skalowania i harmonizacji, co pozwala na zwiększenie dostępności danych przy zachowaniu spójności czasowej oraz ograniczeniu wpływu pokrywy roślinnej i warunków atmosferycznych (Dorigo i in., 2017).
- 4) Niezależnym, modelowym źródłem danych jest reanaliza ERA5-Land (ECMWF), która przy rozdzielczości  $0.1^\circ$  i kroku godzinowym integruje obserwacje z modelem powierzchni lądu, zapewniając wilgotność w czterech warstwach (0-7, 7-28, 28-100, 100-289 cm) (Muñoz-Sabater i in., 2021).

Bezpośrednie porównanie tych produktów nie jest jednak proste. Różnice w (i) fizyce pomiaru (radiometria pasywna, aktywna skaterometria), (ii) w strukturze równań inwersji oraz (iii) w danych pomocniczych (temperatura powierzchni, wskaźniki wegetacji) prowadzą do systematycznych obciążań i odmiennych struktur błędów, które są dodatkowo modulowane przez pokrycie terenu i pionowy rozkład wilgotności w glebie (Kumar i in., 2018). Zróżnicowanie rozdzielczości natywnej oraz różne godziny przelotu wprowadzają błędy reprezentatywności i skali, które wymagają kontroli poprzez interpolację na wspólną siatkę i agregację czasową (Wanders i in., 2012; Mayr i in., 2019). Z kolei produkty łączone (np. ESA CCI SM) zapewniają ciągłość w czasie, ale wprowadzają zależności między źródłami i wymagają wyraźnego uwzględnienia niepewności wnoszonej przez procedurę fuzji (Dorigo i in., 2017; Enenkel i in., 2016).

Dotychczasowe badania nad obszarem Europy Środkowej wskazują, że żaden pojedynczy produkt nie dominuje konsekwentnie – względna skuteczność SMAP, SMOS i ASCAT zależy od pokrycia terenu, tekstury gleby oraz reżimu wilgotności (Thaler i in., 2018). Dla obszaru Polski liczba dedykowanych analiz porównawczych pozostaje ograniczona, a istniejące prace dotyczą głównie wybranych ekosystemów (np. mokradeł Biebrzy) lub korzystają z pojedynczych sensorów (Dąbrowska-Zielińska i in., 2012). Tworzy to wyraźną lukę, brakuje aktualnej, wieloźródłowej oceny spójności operacyjnych produktów wilgotności gleby w skali całego kraju, w okresie istotnym dla rolnictwa.

Celem niniejszej pracy jest porównanie pięciu operacyjnych produktów wilgotności gleby, SMAP, SMOS, ASCAT, ERA5-Land oraz ESA CCI Combined Soil Moisture, nad obszarem Polski w sezonie wegetacyjnym 2025 roku (marzec–październik). W odróżnieniu od klasycznej walidacji, prowadzonej względem pomiarów naziemnych, niniejsza analiza ma charakter porównania międzyproduktowego (ang. intercomparison): ocenia wzajemną zgodność produktów w zakresie zmienności czasowej, struktur przestrzennych oraz anomalii sezonowych, bez przyjmowania któregośkolwiek źródła jako odniesienia o charakterze „prawdy”. Takie podejście jest powszechnie stosowane w regionach o ograniczonej dostępności danych in situ (Al-Yaari i in., 2017; Chen i in., 2018), a dla użytkownika końcowego (rolnictwo precyzyjne, monitoring suszy, asymilacja danych) dostarcza praktycznej wskazówki, w jakim stopniu poszczególne źródła pozostają wymienne lub komplementarne.

## 2. Materiały i metody

### 2.1. Obszar i okres badań

Analizą objęto obszar Polski w granicach okna przestrzennego (ang. bounding box) o zasięgu  $49.0-55.0^\circ\text{N}$  i  $14.0-24.0^\circ\text{E}$ . Zakres ten obejmuje całe terytorium kraju oraz fragment Bałtyku i obszarów przygranicznych, co jest niezbędne ze względu na natywną rozdzielczość analizowanych produktów rzędu kilkudziesięciu kilometrów. Okres analizy obejmuje 245 dni od 1 marca do 31 października 2025 roku, co odpowiada pełnemu sezonowi wegetacyjnemu w Polsce, z wczesnowiosennym uwilgotnieniem profilu, letnimi epizodami suszy oraz jesiennym wyrównaniem bilansu wodnego. Wybór sezonu wegetacyjnego (a nie pełnego roku) podyktowany jest kontekstem rolniczym oraz znanym ograniczeniem produktów mikrofalowych nad obszarami pokrytymi śniegiem i przy zamrożonej powierzchni, gdzie odpowiedź dielektryczna gleby jest istotnie zaburzona (Mohanty i in., 2017).

## 2.2. Źródła danych

W analizie wykorzystano pięć zestawień produktów wilgotności gleby: dwa wykorzystujące pasywną radiometrię w paśmie L (SMAP, SMOS), aktywną skaterometrię w paśmie C (ASCAT), reanalizę modelową (ERA5-Land) oraz zintegrowany produkt satelitarny (ESA CCI / C3S COMBINED).

- 1) SMAP L3 Enhanced (SPL3SMP\_E v006, NASA) – wilgotność wolumetryczna warstwy 0-5 cm ( $m^3/m^3$ ), na siatce EASE-Grid 2.0 o nominalnej rozdzielczości 9 km, z częstotliwością obserwacji nad Polską ok. 2-3 dni (Colliander i in., 2022).
- 2) SMOS L3 (CATDS MIR\_CLF31A/D, strumień operacyjny OPER, ESA) – wilgotność wolumetryczna warstwy 0-5 cm ( $m^3/m^3$ ) na siatce geograficznej o nominalnej rozdzielczości ok. 25 km, z częstotliwością ok. 1-3 dni (Kerr i in., 2016). Dla obszaru Polski istotnym ograniczeniem jest silne zanieczyszczenie sygnału przez interferencję radiową (RFI) w paśmie 1.4 GHz (Oliva i in., 2012), co skutkuje znaczącą liczbą dni z brakami danych.
- 3) ASCAT NRT (EUMETSAT kolekcja EO:EUM:DAT:METOP:SOMO12, skaterometr na satelitach Metop-B/C) – w odróżnieniu od pozostałych zestawień dostarcza nie wilgotności wolumetrycznej, lecz względnego stopnia nasycenia gleby warstwy ok. 0-2 cm (w procentach, 0-100), na siatce pasa skanowania o oczku ok. 12.5 km i z obserwacjami o częstotliwości dziennej nad średnimi szerokościami (Brocca i in., 2017). W potoku przetwarzania danych przeskalowano je przez 100, uzyskując przedział [0, 1] kompatybilny z pozostałymi produktami. Różnica semantyki (stopień nasycenia vs wilgotność wolumetryczna) oznacza, że bezwzględne miary RMSE i błąd systematyczny między ASCAT a pozostałymi produktami bez standaryzacji byłyby fizycznie niespójne – rozwiązaniem jest z-score per komórka (p. 2.3).
- 4) ERA5-Land (zmienna swv11, Copernicus Climate Data Store) – pierwsza warstwa wilgotności wolumetrycznej gleby w modelu powierzchni HTESSEL (0-7 cm wg dokumentacji CDS,  $m^3/m^3$ ), godzinowa reanaliza na siatce  $0.1^\circ$  ( $\sim 9$  km), w potoku agregowana do średnich dziennych (Muñoz-Sabater i in., 2021).
- 5) ESA CCI / C3S COMBINED (CDS satellite-soil-moisture, wersja v202505) – globalny produkt fuzyjny łączący wejścia z wielu sensorów satelitarnych (m.in. SMAP, SMOS, ASCAT), dostarczany jako wilgotność wolumetryczna ( $m^3/m^3$ ) na siatce  $0.25^\circ$  z krokiem dziennym (Dorigo i in., 2017).

Przy interpretacji par produktów istotne są dwa rodzaje zależności. Po pierwsze, ERA5-Land jest offline land-surface simulation forsowanym polami atmosferycznymi z reanalizy ERA5, sam nie asymiluje wilgotności gleby, ale asymiluje operacyjnie ASCAT SM (oraz historycznie SMOS), zatem ERA5-Land jest sprzężony z ASCAT i SMOS pośrednio, przez forsowanie atmosferyczne, a nie bezpośrednią asymilacją. Po drugie, produkt COMBINED jest z definicji powiązany ze swoimi sensorami wejściowymi, pary CCI z SMAP, SMOS, ASCAT nie stanowią niezależnego porównania, w przeciwieństwie do pary CCI – ERA5-Land oceniającej zgodność modelu powierzchni z wyłącznie satelitarnym produktem złożonym. Charakter analizy pozostaje porównawczy, bez przyjętej wartości referencyjnej in situ.

## 2.3. Wstępne przetwarzanie danych

Wykorzystywane produkty różnią się siatką, geometrią obserwacji oraz krokiem czasowym. Dla zapewnienia bezpośredniej porównywalności w skali pojedynczej komórki zastosowano jednolitą procedurę wstępnego przetwarzania.

Wszystkie produkty interpolowano na regularną siatkę o oczku  $0.25^\circ$  (siatka cell-centered), o zasięgu odpowiadającym oknu analizy (24 wiersze  $\times$  40 kolumn = 960 komórek). Wybór rozdzielczości docelowej podyktowany jest najgrubszą rozdzielczością natywną wśród analizowanych źródeł (SMOS,  $\sim 25$  km  $\approx 0.225^\circ$ ). Zwiększanie rozdzielczości docelowej powyżej tej wartości skutkowałoby sztucznym dzieleniem pojedynczego piksela SMOS pomiędzy wiele komórek, bez fizycznego uzasadnienia (Wanders i in., 2012).

Wszystkie produkty zagregowano do wspólnej rozdzielczości dobowej i wyrównano do pełnego kalendarza okna, pozostawiając dni bez obserwacji jako NaN – bez interpolacji czasowej, która sztucznie uzupełniałaby luki.

Z uwagi na różnice jednostek i semantyki (wilgotność wolumetryczna  $m^3/m^3$  dla SMAP, SMOS, ERA5-Land i ESA CCI oraz stopień nasycenia po przeskalowaniu do [0, 1] dla ASCAT) bezwzględne miary błędu (RMSE, błąd systematyczny) na surowych wartościach między tymi zestawieniami mają ograniczoną

interpretację fizyczną. Zastosowano standaryzację (z-score) w każdej komórce niezależnie, wzdłuż osi czasu (Równanie 1):

$$\tilde{x}_{i,j,t} = \frac{x_{i,j,t} - \mu_{i,j}}{\sigma_{i,j}} \quad (1)$$

gdzie  $\mu_{i,j}$  i  $\sigma_{i,j}$  oznaczają odpowiednio średnią i odchylenie standardowe szeregu czasowego w komórce  $(i,j)$ , obliczone z dni z dostępną wartością. Standaryzacja ujednocila zakresy zmienności i pozwala interpretować RMSE oraz błąd systematyczny w spójnych jednostkach niemianowanych.

## 2.4. Metryki porównania międzyproduktowego

Z uwagi na brak referencyjnych pomiarów in situ analiza ma charakter porównania parami dla każdej z 10 par produktów (SMAP, SMOS, ASCAT, ERA5-Land, ESA CCI COMBINED) liczone są te same statystyki, bez przyjmowania któregoś z nich jako „prawdy” (Al-Yaari i in., 2017; Chen i in., 2018).

Wykorzystano następujące statystyki:

- 1) współczynnik korelacji Pearsona (R) – ocenia spójność dynamiki czasowej i jest niewrażliwy na różnice średniej oraz skali,
- 2) pierwiastek błędu średniokwadratowego (RMSE) – mierzy łączną wielkość rozbieżności (systematycznej i losowej),
- 3) błąd systematyczny (bias) – jako średnią różnicę wartości między dwoma produktami w danej komórce – charakteryzuje systematyczne przesunięcie poziomu sygnału,
- 4) korelacja anomalii (AC) – korelacja Pearsona na szeregach czasowych, z których w każdej komórce odjęto średnią dla danego miesiąca, mierząca zgodność dynamiki krótko- i średniookresowej w odebraniu od cyklu sezonowego; ponieważ w ośmiomiesięcznym oknie klimatologia pochodzi z tego samego okresu co same szeregi, AC należy traktować jako wskaźnik o ograniczonym charakterze, a nie pełnowartościową korelację anomalii klimatycznych.

## 2.5. Analiza przestrzenna i czasowa

Wszystkie metryki wygenerowane w wersji globalnej, a także lokalnej (pozwoliło to na wygenerowanie map). Metryki sezonowe policzono osobno dla MAM – marzec, kwiecień, maj, JJA – czerwiec, lipiec, sierpień i SON – wrzesień, październik, listopad; pora DJF – grudzień, styczeń, luty, nie występuje w oknie marzec-październik i nie pojawia się w plikach wyników.

## 3. Wyniki

Dla okna od 1 marca do 31 października 2025 roku (245 dni kalendarzowych) produkty różnią się istotnie pod względem kompletności szeregów czasowych nad Polską. ERA5 oraz CCI pokrywają całe okno czasowe, SMAP z pominięciem 2 dni. Problematycznymi źródłami są ASCAT oraz SMOS. ASCAT pokrywa jedynie 137 dni (seria urywa się 14 lipca), co związane jest z wycofaniem tego produktu w jego dotychczasowej wersji i zastąpienie go produktami dostępnymi jedynie przez okres ostatnich 30 dni. SMOS w analizowanym okresie nie dostarczył żadnych danych. Konsekwencje tych braków: (i) interpretacja porównań międzyproduktowych ogranicza się efektywnie do sześciu par pozostałych czterech produktów (wykluczając SMOS), (ii) zestaw statystyk dla pory jesiennej SON (wrzesień-październik) nie zawiera par z udziałem ASCAT, przez co hierarchia par w tej porze roku zbudowana jest tylko na trzech kombinacjach z ERA5, SMAP i CCI.

### 3.1. Zgodność par produktów – zestawienie globalne

Hierarchia par uporządkowuje się w trzy poziomy (Tabela 1). Najbardziej zgodna jest para CCI – ERA5, z  $R = 0.622$ ,  $AC = 0.543$ , najniższym RMSE (0.863) oraz praktycznie zerowym biasem (0.003). Ponieważ w niniejszej konfiguracji nie zastosowano CCI PASSIVE ani CCI ACTIVE, lecz zestaw COMBINED (który łączy SMAP i ASCAT), obie strony porównania nie są od siebie w pełni niezależne koncepcyjnie – niemniej

ERA5-Land nie asymiluje samego produktu CCI. Drugi poziom tworzą pary z bezpośrednim powiązaniem wejście-wyjście w procesie fuzji lub asymilacji: CCI – ASCAT ( $R = 0.481$ ) oraz ERA5 – ASCAT ( $R = 0.413$ ) – tu korelacja, choć nominalnie wyższa niż w parach z pełną niezależnością, nie może być interpretowana jako miara zgodności dwóch niezależnych estymacji wilgotności. Trzeci poziom stanowią pary z SMAP: para niezależna ERA5 – SMAP ( $R = 0.383$ ) oraz powiązana CCI – SMAP ( $R = 0.378$ ) wykazują niemal identyczną zgodność, a para radiometria pasywna L (SMAP) z aktywnym radarem C (ASCAT) zajmuje ostatnie miejsce z  $R = 0.314$  i najniższą AC (0.205).

Systematyczna różnica między R a AC (rzędu 0.08-0.11 jednostki) sygnalizuje, że znaczna część wspólnej wariancji w parach jest niesiona przez cykl sezonowy (wilgotna wiosna – sucha druga połowa lata – ponowne nawodnienie jesienne): po odjęciu średnich miesięcznych korelacja spada, co oznacza, że dynamika podsezonowa (zdarzenia opadowe, krótkie epizody osuszania profilu) jest już odwzorowywana znacznie mniej zgodnie niż długofalowy przebieg sezonu. Wyjątkowo mocno widać to w parze SMAP – ASCAT, gdzie AC spada do 0.205, czyli poza wspólnym trendem sezonowym te dwa typy pomiaru mikrofalowego nie noszą wspólnej informacji o zmienności dzień-do-dnia.

Wartości RMSE dla wszystkich par poza CCI – ERA5 przekraczają 1, co jest istotne interpretacyjnie: po lokalnej standaryzacji komórkowej typowa różnica między produktami w danej komórce jest większa niż typowa zmienność tej komórki w czasie. Innymi słowy, dwa produkty opisujące tę samą komórkę i ten sam dzień różnią się średnio o więcej niż dzienna fluktuacja sygnału – ograniczenie to nie dotyczy pary CCI – ERA5 (RMSE 0.863).

Tab. 1. Zestawienie par produktów dla całego okna analizy w kolejności malejącego R

Para	R	RMSE	bias	AC
CCI – ERA5	0.622	0.863	0.003	0.543
CCI – ASCAT	0.481	1.036	0.137	0.399
ERA5 – ASCAT	0.413	1.085	-0.070	0.354
ERA5 – SMAP	0.383	1.069	0.018	0.334
CCI – SMAP	0.378	1.109	-0.024	0.302
SMAP – ASCAT	0.314	1.146	0.077	0.205

### 3.2. Zróznicowanie przestrzenne

Przejście od pojedynczej liczby uśrednionej do pól  $24 \times 40$  komórek ujawnia, że zgodność par nie jest przestrzennie jednolita i zawiera istotną wariancję (Tab. 2).

Tab. 2. Rozkład współczynnika R

Para	p25	p50	p75	R > 0.5 [%]	R > 0.7 [%]
CCI – ERA5	0.57	0.64	0.69	88%	22%
ERA5 – SMAP	0.22	0.52	0.60	55%	3%
CCI – ASCAT	0.41	0.50	0.58	49%	2%
CCI – SMAP	0.26	0.46	0.57	43%	2%
ERA5 – ASCAT	0.33	0.43	0.53	32%	<1%
SMAP – ASCAT	0.20	0.35	0.46	17%	1%

Para CCI – ERA5 wyróżnia się nie tylko najwyższą wartością średnią, ale również najmniejszą zmiennością przestrzenną: w 88% komórek R przekracza 0.5, a w 22% przekracza 0.7. Odpowiada to zależnościom z porównania globalnego, najbardziej zgodna para jest również jednorodna w przestrzeni. Co więcej, najwyższe poziomy RMSE obserwowane są na terenach górzystych oraz pojezierzy (Fig. 1).

W przeciwieństwie do tego, w parach z SMAP obserwuje się silny kontrast między rozkładem kwartyli: p25 wynosi 0.22-0.26, podczas gdy p75 osiąga 0.57-0.60, część komórek jest zatem spójna czasowo, a w znacznej części (17% dla CCI – SMAP, 12% dla ERA5 – SMAP) korelacja jest nawet ujemna. Ponieważ liczba komórek z ujemnym R pomiędzy SMAP a ASCAT (77 komórek) oraz SMAP a CCI (104 komórki) jest rzędu kilku-kilkunastu procent kraju, efekt ten jest istotny – nie można go zredukować do szumu brzegowego.

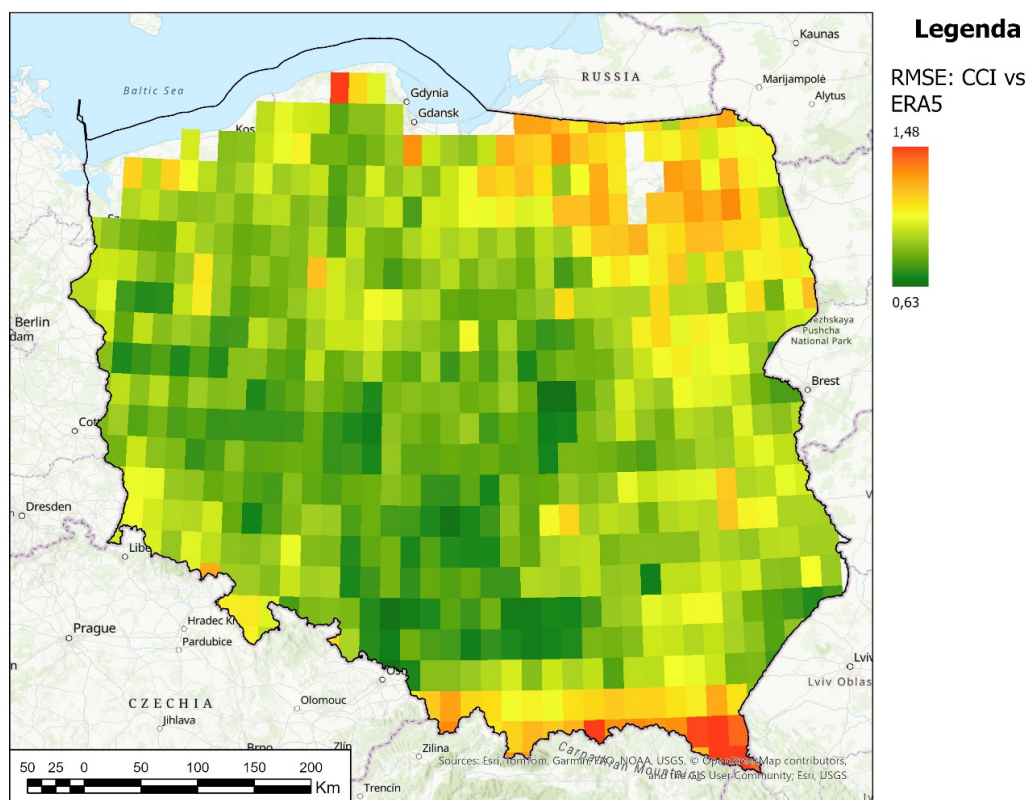


Fig. 1. RMSE dla pary CCI – ERA5

### 3.3. Zgodność w porach roku

Rozbicie metryk na pory meteorologiczne odsłania wyraźną sezonowość zgodności (Tab. 3). Dla czterech par, dla których dostępne są wartości w dwóch lub trzech porach (ERA5 – SMAP, ERA5 – ASCAT, CCI – ASCAT, CCI – ERA5), widoczny jest ten sam wzorzec: MAM daje najwyższe R, JJA spada wyraźnie, a tam, gdzie SON jest dostępne, wartość leży pomiędzy nimi (Tab. 3). W MAM wszystkie pary są najsilniej skorelowane, a różnice między parami są mniejsze niż w innych porach (zakres R od 0.42 do 0.71); dobrze wilgotny, chłodny profil z regularnym naprzemiennym nawilżaniem i osuszaniem tworzy wspólny sygnał łatwo rozpoznawalny przez wszystkie typy pomiaru. JJA skraca zakres zgodności do 0.16-0.53. To okres, w którym wzajemne różnice fizyki pomiaru dają odmienną odpowiedź na epizody nagłego osuszania profilu i punktowe deszcze konwekcyjne. Bias w JJA dla wszystkich par z ASCAT (oraz dla SMAP w parach z modelem/CCI) jest wyraźnie ujemny (od -0.16 do -0.77), co oznacza, że ASCAT (i w mniejszym stopniu SMAP) pozostaje wyżej po standaryzacji niż pozostałe produkty w okresie najgłębszej suszy. Reanaliza oraz produkt fuzyjny wykazują głębszy spadek lokalnego z-score podczas letniego osuszania, zgodnie z silniejszą reakcją modelu powierzchniowego na deficyt opadu.

Tab. 3. Sezonowe R i bias dla par; pory zdefiniowane jako MAM: mar-kwi-maj, JJA: cze-lip-sie, SON: wrz-paź

Para	MAM: R	MAM: bias	JJA: R	JJA: bias	SON: R	SON: bias
CCI – ERA5	0.707	0.159	0.534	-0.020	0.669	-0.197
ERA5 – ASCAT	0.653	0.292	0.326	-0.766	—	—
CCI – ASCAT	0.656	0.461	0.344	-0.468	—	—
ERA5 – SMAP	0.514	-0.012	0.378	-0.163	0.311	0.423
CCI – SMAP	0.517	0.116	0.278	-0.307	0.265	0.199
SMAP – ASCAT	0.419	0.303	0.161	-0.363	—	—

## 4. Wnioski

Porównanie międzyproduktowe pięciu operacyjnych zestawień wilgotności gleby nad Polską w sezonie wegetacyjnym 2025 (marzec-październik) wyłania hierarchię wzajemnej zgodności oraz odsiewa produkty

pod względem zdolności operacyjnej. SMOS nad obszarem kraju nie dostarczył w analizowanym oknie ani jednego dnia z pokryciem regionalnym, co oznacza, że bez dodatkowej korekcji zanieczyszczenia RFI produkt ten nie nadaje się do dziennego monitoringu w skali Polski. ASCAT urywa się w połowie lipca, przez co nie uczestniczy w porównaniach pory jesiennej. Wśród par, dla których metryki są w ogóle definiowalne, jedynym zestawieniem o konsekwentnie wysokiej spójności, zarówno w czasie ( $R = 0.622$ ,  $AC = 0.543$ ,  $RMSE = 0.863$ ), jak i w przestrzeni (88% komórek  $R > 0.5$ , mediana biasu  $\sim 0$ ), jest CCI – ERA5. Pozostałe pary pozostają poniżej tego poziomu, a para radiometrii pasywnego pasma L (SMAP) ze skaterometrem pasma C (ASCAT) wykazuje najslabszą zgodność ( $R = 0.314$ ,  $AC = 0.205$ ), co pokazuje, że różnice fizyki pomiaru w tych dwóch typach sensorów nie są maskowane nawet po lokalnej standaryzacji z-score.

Struktura sezonowa i przestrzenna tej hierarchii pogłębia obraz. We wszystkich parach zgodność jest najwyższa wiosną (MAM,  $R$  w zakresie 0.42-0.71) i spada o 0.2-0.3 jednostki latem (JJA), z towarzyszącym wyraźnym ujemnym biasem par z ASCAT – skaterometr pasma C osłabia amplitudę sygnału suszy letniej, podczas gdy ERA5 i CCI utrzymują ją głębiej, co sygnalizuje systematyczną różnicę w sposobie odwzorowania tego reżimu między rodzajami pomiaru. Dodatkowo zgodność nie jest jednorodna w kraju: w 12-17% komórek dla par z SMAP dynamika dzienna przyjmuje nawet charakter przeciwfazowy. Dla operacyjnego monitoringu wilgotności gleby nad Polską w sezonie wegetacyjnym implikuje to praktyczną wymienną CCI i ERA5 jako źródeł referencyjnych, natomiast użycie SMAP lub ASCAT wymaga świadomości ich ograniczeń, fazowych (letnie niedoszacowanie suszy) oraz lokalnych (znaczący udział komórek o niskiej lub ujemnej korelacji z pozostałymi produktami).

## Literatura

- Al-Yaari, A., Wigneron, J., Kerr, Y.H., Rodríguez-Fernández, N., O'Neill, P., Jackson, T.J., Lannoy, G.D., Bitar, A.A., Mialon, A., Richaume, P., Walker, J.P., Mahmoodi, A., Yueh, S. (2017). Evaluating soil moisture retrievals from ESA's SMOS and NASA's SMAP brightness temperature datasets. *Remote Sensing of Environment* **193**, 257-273. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.03.010>
- Babaeian, E., Sadeghi, M., Jones, S.B., Montzka, C., Vereecken, H., Tuller, M. (2019). Ground, Proximal, and Satellite Remote Sensing of Soil Moisture. *Reviews of Geophysics* **57** (2), 530-616. DOI: <https://doi.org/10.1029/2018rg000618>
- Brocca, L., Crow, W.T., Ciabatta, L., Massari, C., Rosnay, P. de, Enenkel, M., Hahn, S., Amarnath, G., Camici, S., Tarpanelli, A., Wagner, W. (2017). A Review of the Applications of ASCAT Soil Moisture Products. *Ieee Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* **10** (5), 2285-2306. DOI: <https://doi.org/10.1109/jstars.2017.2651140>
- Chen, F., Crow, W.T., Bindlish, R., Colliander, A., Burgin, M., Asanuma, J., Aida, K. (2018). Global-scale evaluation of SMAP, SMOS and ASCAT soil moisture products using triple collocation. *Remote Sensing of Environment* **214**, 1-13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.05.008>
- Colliander, A., Reichle, R.H., Crow, W.T., Cosh, M.H., Chen, F., Chan, S., Das, N.N., Bindlish, R., Chaubell, J., Kim, S.-B., Liu, Q., O'Neill, P., Dunbar, R.S., Dang, L.B., Kimball, J.S., Jackson, T.J., Al-Jassar, H.K., Asanuma, J., Bhattacharya, B.K., ... Yueh, S. (2022). Validation of Soil Moisture Data Products From the NASA SMAP Mission. *Ieee Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* **15**, 364-392. DOI: <https://doi.org/10.1109/jstars.2021.3124743>
- Dąbrowska-Zielińska, K., Budzyńska, M., Kowalik, W., Małek, I., Gatkowska, M., Bartold, M., Turlej, K. (2012). Biophysical Parameters Assessed from Microwave and Optical Data. *International Journal of Electronics and Telecommunications* **58** (2). DOI: <https://doi.org/10.2478/v10177-012-0013-7>
- Dorigo, W., Wagner, W., Albergel, C., Albrecht, F., Balsamo, G., Brocca, L., Chung, D., Ertl, M., Forkel, M., Gruber, A., Haas, E., Hamer, P., Hirschi, M., Ikonen, J., Jeu, R. de, Kidd, R., Lahoz, W. A., Liu, Y., Miralles, D. G., ... Lecomte, P. (2017). ESA CCI Soil Moisture for improved Earth system understanding: State-of-the art and future directions. *Remote Sensing of Environment* **203**, 185-215. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.07.001>
- Dorigo, W., Himmelbauer, I., Aberer, D., Schremmer, L., Petrakovic, I., Zappa, L., Preimesberger, W., Xaver, A., Annor, F., Ardö, J., Baldocchi, D., Bitelli, M., Blöschl, G., Bogena, H., Brocca, L., Calvet, J., Camarero, J. J., Capello, G., Choi, M., ... Sabia, R. (2021). The International Soil Moisture Network: serving Earth system science for over a decade. *Hydrology and Earth System Sciences* **25** (11), 5749-5804. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-25-5749-2021>
- Enenkel, M., Reimer, C., Dorigo, W., Wagner, W., Pfeil, I., Parinussa, R., Jeu, R. de. (2016). Combining satellite observations to develop a global soil moisture product for near-real-time applications. *Hydrology and Earth System Sciences* **20** (10), 4191-4208. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-20-4191-2016>
- Kerr, Y.H., Al-Yaari, A., Rodríguez-Fernández, N., Parrons, M., Molero, B., Leroux, D., Bircher, S., Mahmoodi, A., Mialon, A., Richaume, P., Delwart, S., Bitar, A.A., Pellarin, T., Bindlish, R., Jackson, T.J., Rüdiger, C., Waldteufel, P., Mecklenburg, S., Wigneron, J. (2016). Overview of SMOS performance in terms of global soil moisture monitoring after six years in operation. *Remote Sensing of Environment* **180**, 40-63. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.042>

- Kumar, S.V., Dirmeyer, P.A., Peters-Lidard, C.D., Bindlish, R., Bolten, J. (2018). Information theoretic evaluation of satellite soil moisture retrievals. *Remote Sensing of Environment* **204**, 392-400. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.10.016>
- Mayr, S., Kuenzer, C., Geßner, U., Klein, I., Rutzinger, M. (2019). Validation of Earth Observation Time-Series: A Review for Large-Area and Temporally Dense Land Surface Products. *Remote Sensing* **11** (22), 2616. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11222616>
- Mohanty, B.P., Cosh, M.H., Lakshmi, V., Montzka, C. (2017). Soil Moisture Remote Sensing: State-of-the-Science. *Vadose Zone Journal* **16** (1), 1-9. DOI: <https://doi.org/10.2136/vzj2016.10.0105>
- Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., Boussetta, S., Choulga, M., Harrigan, S., Hersbach, H., Martens, B., Miralles, D.G., Piles, M., Rodríguez-Fernández, N., Zsótér, E., Buontempo, C., Thépaut, J. (2021). ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. DOI: <https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>
- Oliva, R., Daganzo-Eusebio, E., Kerr, Y.H., Mecklenburg, S., Nieto, S., Richaume, P., Gruhier, C. (2012). SMOS Radio Frequency Interference Scenario: Status and Actions Taken to Improve the RFI Environment in the 1400-1427 MHz Passive Band. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **50** (5), 1427-1439. DOI: <https://doi.org/10.1109/tgrs.2012.2182775>
- Thaler, S., Eitzinger, J., Trnka, M., Možný, M., Hahn, S., Wagner, W., Hlavinka, P. (2018). The performance of Metop Advanced SCATterometer soil moisture data as a complementary source for the estimation of crop-soil water balance in Central Europe. *The Journal of Agricultural Science* **156** (5), 577-598. DOI: <https://doi.org/10.1017/s0021859618000011>
- Vereecken, H., Huisman, J.A., Bogena, H., Vanderborght, J., Vrugt, J.A., Hopmans, J.W. (2008). On the value of soil moisture measurements in vadose zone hydrology: A review. *Water Resources Research* **44** (4). DOI: <https://doi.org/10.1029/2008wr006829>
- Vreugdenhil, M., Greimeister-Pfeil, I., Preimesberger, W., Camici, S., Dorigo, W., Enenkel, M., Schalie, R. van der, Steele-Dunne, S., Wagner, W. (2022). Microwave remote sensing for agricultural drought monitoring: Recent developments and challenges. *Frontiers in Water* **4**. DOI: <https://doi.org/10.3389/frwa.2022.1045451>
- Wanders, N., Karssenber, D., Bierkens, M.F.P., Parinussa, R., Jeu, R. de, Dam, J.C. van, Jong, S.M. de. (2012). Observation uncertainty of satellite soil moisture products determined with physically-based modeling. *Remote Sensing of Environment* **127**, 341-356. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.09.004>

## Evaluation of operational soil moisture products over Poland: a comparative analysis

### Abstract

Operational soil moisture products, satellite passive microwave radiometers and scatterometers, model reanalyses, and data-fusion ensembles, differ in their measurement physics, spatial resolution, and error structure, which limits their direct interchangeability. Comparative analyses covering Poland specifically remain fragmentary. This study presents an intercomparison of five operational soil moisture datasets: SMAP L3 Enhanced, SMOS L3 (CATDS), ASCAT NRT, ERA5-Land, and the ESA CCI/C3S COMBINED merged product, over Poland during the 2025 growing season (245 days, March-October). All fields were remapped to a common 0.25° grid and z-score standardised at each grid cell; Pearson correlation coefficient (R), anomaly correlation (AC), RMSE, and systematic bias were then computed for all 10 pairwise combinations at global, spatial, and seasonal scales.

SMOS provided no valid data over Poland throughout the analysis window after quality filtering, and the ASCAT time series terminates in mid-July. Among the remaining pairs, only CCI COMBINED and ERA5-Land exhibit consistently high agreement ( $R = 0.622$ ;  $R > 0.5$  in 88% of grid cells), while the SMAP-ASCAT pair shows the weakest correlation ( $R = 0.314$ ). Agreement across all pairs peaks in spring and deteriorates markedly in summer, accompanied by a pronounced negative bias in pairs involving ASCAT (up to  $-0.77$  sd), indicating a systematic underestimation of summer drought conditions by the C-band scatterometer. For operational soil moisture monitoring in Poland, these results imply the practical interchangeability of CCI COMBINED and ERA5-Land, provided the known limitations of SMAP and ASCAT are explicitly acknowledged.

**Keywords:** Soil moisture; intercomparison; SMAP; SMOS; ASCAT; ERA5-Land; ESA CCI; Poland