



Państwowy Instytut Geologiczny  
Państwowy Instytut Badawczy

państwowa służba geologiczna  
państwowa służba hydrogeologiczna



## Interferometryczny Monitoring Terenu Polski etap I

Zakres możliwości wykorzystania map koherencji do detekcji  
nielegalnej eksploatacji  
RAPORT TECHNICZNY

**Nadzorujący:**

Minister Klimatu i Środowiska  
ul. Wawelska 52/54, 00-922 Warszawa

**Finansujący:**

Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska  
i Gospodarki Wodnej  
02-673 Warszawa, ul. Konstruktorska 3A



Sfinansowano ze środków  
Narodowego Funduszu  
Ochrony Środowiska  
i Gospodarki Wodnej

**Wykonawca:**

Państwowy Instytut Geologiczny –  
Państwowy Instytut Badawczy  
00-975 Warszawa, ul. Rakowiecka 4



**Osoba sporządzająca raport:**

**Zbigniew PERSKI**

Imię i nazwisko

.....  
Podpis

**Kierownik komórki organizacyjnej:**

**Dyrektor/Dyrektor pionu:**

.....  
Pieczątką i podpis

.....  
Pieczątką i podpis

Warszawa, dn. 30.12.2020 r.

Szczegóły dokumentu:

EFEKT RZECZOWY Z REALIZACJI ZADANIA  
Z ZAKRESU PAŃSTWOWEJ SŁUŻBY GEOLOGICZNEJ  
*za okres: od 1 stycznia 2018 r do 31 grudnia 2020 r.*

w ramach umowy dotacji 194/2018/Wn-07/FG-go-dn/D z dnia 23.08.2018 r.

Autorzy	Dr Zbigniew Perski Dr Maria Przyłucka Mgr Dorota Jania Mgr inż. Zbigniew Kowalski Dr Tomasz Wojciechowski Dr Piotr Nescieruk Mgr Sylwester Kamieniarz
Konsultacja	Mgr Inż. Paweł Kuć
Uwagi	Raport sporządzono w lipcu 2020 r. Aktualizacja: grudzień 2020 r.

## Spis treści

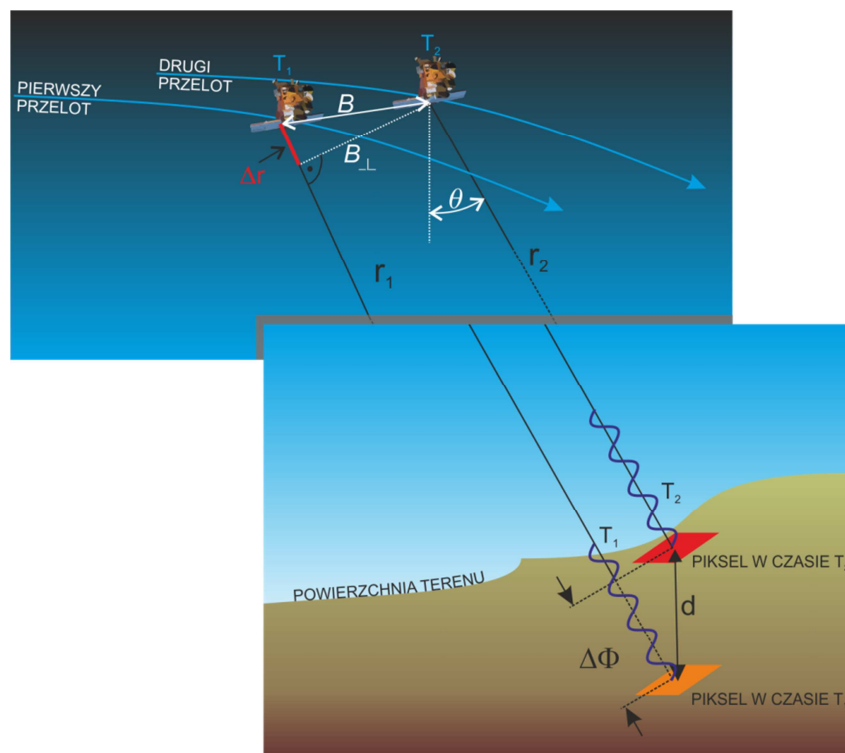
1	Wstęp.....	4
2	Satelitarna interferometria radarowa i koherencja interferometryczna.....	5
2.1	Czym jest koherencja.....	5
2.2	Czynniki wpływające na jakość koherencji.....	8
2.3	Zastosowanie koherencji .....	12
3	Analiza wieloczasowa koherencji danych Sentinel-1 dla określenia możliwości jej zastosowania dla wykrywania nielegalnej eksploatacji .....	16
3.1	Obszar badań .....	16
3.2	Dane SAR użyte w opracowaniu i generowanie map koherencji.....	17
3.3	Metodyka przetwarzania i wizualizacji map koherencji .....	18
3.4	Otrzymane wyniki .....	18
3.4.1	Metoda I: RGB (wskaźników interferometrycznych).....	19
3.4.2	Metoda II HSV (wskaźników koherencji) .....	20
3.4.3	Metoda III Różnic bezwzględnych .....	20
3.4.4	Metoda IV: „odchylenie standardowe vs średnia” .....	21
4	Wnioski .....	25
5	Literatura .....	27

## 1 Wstęp

Celem niniejszego raportu jest podsumowanie etapu prac, w którym poddano analizie obrazy koherencji interferometrycznej pod kątem ich przydatności do wykrywania miejsc i obszarów, na których miała miejsce nielegalna eksploatacja surowców mineralnych. Analiza taka ma uzasadnienie, gdyż obrazy koherencji są generowane przy okazji przetwarzania serii wieloczasowych zobrażeń SAR (*Synthetic Aperture Radar*) a stanowią produkt dotychczas słabo wykorzystany. W pierwszej części raportu zostanie przedstawiona czym jest obraz koherencji (mapa koherencji), jak powstaje i jak należy go interpretować. Omówione zostaną wcześniejsze opracowania serii wieloczasowych obrazów koherencji, które stanowiły podstawę do przedstawionych tu rozważań. W dalszej części opracowania przedstawione zostaną wyniki analiz serii wieloczasowych obrazów koherencji dla wybranego obszaru.

## 2 Satelitarna interferometria radarowa i koherencja interferometryczna

Interferometria SAR (InSAR) to technika służąca do uzyskiwania informacji dotyczących danych wysokościowych (Goldstein et al., 1988) o charakterze względnym. Wykorzystuje ona różnice fazy sygnałów radarowych pochodzących z dwóch obserwacji mikrofalowych typu SAR (*Synthetic Aperture Radar*) tego samego obszaru (Rys. 1). Dobry przegląd podstaw metodyki, potencjału i obszarów zastosowań InSAR można znaleźć w szeregu prac o charakterze podstawowym: (Bamler and Hartl, 1998; Bürgmann et al., 2000; Massonnet and Feigl, 1998; Perski, 1999). Tradycyjna technika InSAR opiera się na wykorzystaniu interferogramów tj. rastrowych zbiorów przedstawiających różnice fazy pomiędzy dwoma rejestracjami SAR. Nazywana jest ona metodą D-InSAR (*Differential – InSAR*) dla odróżnienia od technik wykorzystujących jednoczesne rejestracje przy użyciu dwóch anten SAR (Bistatic-InSAR). Podsumowując, D-InSAR wykorzystuje rejestracje SAR wykonywane sekwencyjnie za pomocą jednej anteny SAR w czasie kolejnych przelotów satelity nad tym samym obszarem.

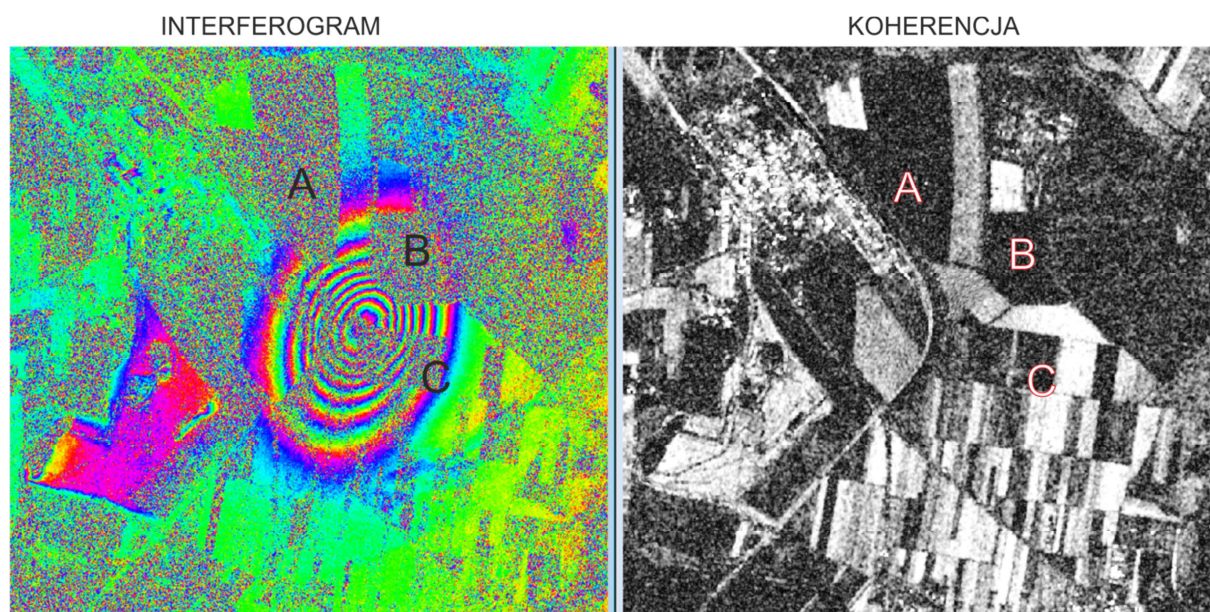


Rys. 1. Geometria i zasada działania D-InSAR

### 2.1 Czym jest koherencja

Największe ograniczenia metody InSAR wiążą się z tzw. dekorelacją czasową (stopniową utratą koherencji w czasie). Zmienną opisującą dekorelację jest tzw. koherencja interferometryczna. Jest to wielkość współczynnika korelacji zespolonych wartości sygnału SAR. Największy problem stanowi tzw. dekoherencja czasowa, która związana jest ze zmianami właściwości elektromagnetycznych lub/i pozycją obiektów odbijających fale wewnątrz komórki rozdzielczości czy typem rozpraszania (Perski et al. 2006). Koherencja określa bezpośrednio stopień zgodności fazy sygnałów SAR. Jej wielkość jest zależna bezpośrednio od zakłóceń fazy interferogramu (Cattabeni et al. 1994; Villasenor & Zebker 1992).

Wartość koherencji warunkuje bezpośrednio czytelność generowanego interferogramu: dla obszarów o wysokiej koherencji możliwa jest interpretacja zmian fazy interferogramu (jako np. efektu deformacji, różnic topografii itp.) jak również dalsze jego wykorzystanie w metodyce serii czasowych; dla obszarów o niskiej bądź zerowej koherencji interpretacja interferogramu jest utrudniona bądź często niemożliwa, gdyż pierwotna faza sygnału uległa degradacji przez czynniki techniczne lub środowiskowe (Rys. 2).



*Rys. 2. Wpływ koherencji na jakość interferogramu. Interferogram i koherencja dla obszaru górniczego KWK Bogdanka obliczone na podstawie wysokorozdzielczych danych TerraSAR-X. Zaszumione obszary A, B, C o niewidocznych prążkach interferometrycznych na interferogramie odpowiadają obszarom o słabej koherencji (ciemne). Opracowanie: autor*

Koherencja dotyczy ustalonej relacji pomiędzy falami promienia promieniowania elektromagnetycznego. Dwie grupy fal o równej lub zbliżonej długości fali, skierowane w tym samym kierunku, są koherentne (spójne), tzn. gdy powstaje stały w czasie obraz interferometryczny w wyniku superpozycji fal składowych. W technice InSAR koherencja wykorzystywana jest do opisu systemów, które zachowują „fazę”, tzn. sygnał powracający do anteny jest koherentny.

Jak już wspomniano, wysoka wartość koherencji związana jest z dobrej jakości interferogramem. Przyjęty zakres wartości koherencji dla systemów interferometrycznych to: od 0 (gdy faza interferometryczna jest całkowicie zakłócona) do 1 (przy całkowitym braku zakłóceń fazy tj. pełnej korelacji).

Wartość koherencji szacowana jest jako tzw. „lokalna koherencja” pary obrazowań wykorzystywanych w technice interferometrycznej (Closson et al., 2017) Jest to zakłócenie fazy wyznaczone pomiędzy dwoma obrazowaniami SAR wykorzystywanymi do wykonania obrazowania interferometrycznego.

Szacowana wartości „lokalnej koherencji”:

$$\gamma \cong \frac{|\sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^M \mathbf{Im}_1(\mathbf{x}_i, \mathbf{z}_j) \mathbf{Im}_2^*(\mathbf{x}_i, \mathbf{z}_j)|}{\sqrt{\sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^M |\mathbf{Im}_1(\mathbf{x}_i, \mathbf{z}_j)|^2 \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^M |\mathbf{Im}_2(\mathbf{x}_i, \mathbf{z}_j)|^2}}$$

Gdzie:  $\mathbf{Im}_1$  – sygnał złożony (ang. *complex signal*) obrazowania „*master*”,  $\mathbf{Im}_2^*$  – sygnał złożony obrazowania „*slave*”, koherencja w obrębie piksela wyznaczana jest w środku „okna” w obrębie pikseli (LxM).

Lokalna koherencja jest to więc współczynnik korelacji krzyżowej pary obrazowań SAR wyznaczany w małym oknie (kilka pikseli w kierunku zasięgu i azymutu), z uwzględnieniem wszystkich deterministycznych komponentów fazowych (m. in. ukształtowanie terenu). Komponenty te, w tak małym oknie, w pierwszym przybliżeniu są liniowe zarówno w kierunku azymutu jak i w kierunku skośnym obrazowania satelity. Mapa koherencji dla konkretnej pary scen jest utworzona przez obliczenie absolutnej wartości koherencji na ruchomym oknie obejmującym całe obrazowanie SAR (Ferretti et al., 2007).

Dokładna relacja pomiędzy rozproszaniem fazy interferometrycznej i koherencją może być przedstawiona poprzez skomplikowane obliczenia matematyczne. Jednakże, jeżeli liczba tzw. scen elementarnych (*numer of looks* - NL) składających się na zbiór danych SAR

w kierunku azymutu jest większa od 4, wtedy niezależne piksele z taką samą koherencją są uśrednione dzięki wpływowi powierzchni terenu i prostej aproksymacji (Rosen et al., 2006):

$$\sigma\phi = \frac{1}{\sqrt{2NL}} \frac{\sqrt{1-\gamma^2}}{\gamma}$$

Jednakże, dla większości praktycznych zastosowań w interferometrii SAR, wzór przybliżenia może być wykorzystywany dla wartości koherencji większej niż 0.2 i  $NL > 4$  (Ferretti i in., 2007).

W metodzie satelitarnej interferometrii radarowej (InSAR), na jakość interferogramu ma wpływ wiele czynników, takich jak różnica centroidy Dopplera (ang. *Doppler Centroid difference*), odległość bazowa (dystans pomiędzy pozycjami satelity w momencie wykonywania obrazowań), efekty atmosferyczne, geometria obrazowania, błędy w przetwarzaniu, zakłócenia termiczne, itd. (Zhang and Prinet, 2004).

## 2.2 Czynniki wpływające na jakość koherencji

Na jakość koherencji wpływa geometria obrazowania oraz w większym stopniu zmiany środowiskowe (pogodowe, klimatyczne, geomorfologiczne jak i wegetacyjne). Obserwuje się następujące zależności pomiędzy poszczególnymi czynnikami a jakością koherencji:

- Tereny zurbanizowane, obiekty przemysłowe czy infrastruktury przesyłowej oraz obszary na których występują odsłonięcia skał zwięzłych wykazują wysoki poziom koherencji, nawet po kilku latach;
- Obszary rzadko porośnięte roślinnością oraz pola uprawne wykazują zwykle wysoką koherencję w krótkim interwale czasowym (1 dzień) oraz znacznie niższą w interwale 35-dniowym;
- Obszary z pokrywą leśną (w szczególności w klimacie tropikalnym) oraz obszary z pokrywą śnieżną nie wykazują wystarczającego poziomu koherencji nawet w interwale powyżej 1 dnia;
- Obszary wykazujące skróty perspektywiczne (tj. nachylone prostopadle do kierunku padania sygnału), stają się niekoherentne gdy prostopadła odległość bazowa jest większa niż kilka metrów (Ferretti et al., 2007);



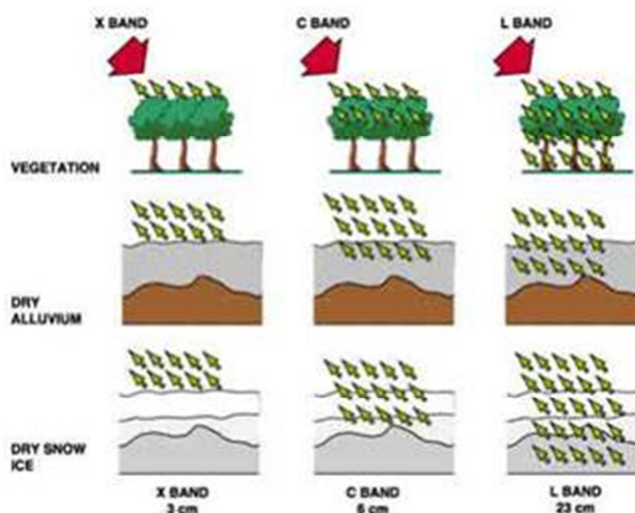
- Obszary, na których występuje intensywna roślinność narażone są na występowanie zjawiska tzw. rozpraszania objętościowego, które w zależności od długości fali może zachodzić w obrębie listowia lub gałęzi. Rozpraszanie objętościowe skutkuje niemal całkowitą utratą koherencji na obszarach leśnych;
- Powierzchnie zbiorników wodnych i cieków charakteryzują się zerową koherencją (wpływ właściwości obrazowanej powierzchni – falowania oraz stałej dielektrycznej wody);
- Obszary, które na zobrazeniu przedstawiają przeciwległe stoki (tj. nachylone w kierunku przeciwnym do wiązki sygnału) wykazują najlepszą koherencję, gdy nie są zacienione.
- Na wartość koherencji bardzo wpływa lokalna pogoda. Unika się zobrażeń wykonanych podczas opadów deszczu, śniegu lub silnego wiatru. Czynniki te zazwyczaj powodują silne obniżenie koherencji fazy sygnału radarowego (Ferretti et al., 2007)
- Nocne, wieczorne pozyskiwanie zobrażeń wpływa na podwyższenie koherencji. Takie pozyskiwanie zobrażeń jest zazwyczaj mniej narażone na negatywne skutki efektów atmosferycznych (Hanssen, 1998);
- Odrzuca się zazwyczaj zobrażenia wykonywane podczas bardzo ciepłych dni – gorące powietrze może zawierać znacznie więcej pary wodnej od zimnego powietrza. Para wodna jest znaczącym czynnikiem atmosferycznym wpływającym negatywnie w badaniach interferometrycznych;
- Interferogramy z bardzo małą wartością prostopadłej odległości bazowej (w zakresie pomiędzy 150 m a 300 m), które są łatwiejsze w wykonaniu procesu rozwinięcia fazy, są najczęściej bezużyteczne z powodu ich wysokiej wrażliwości na zakłócenia fazowe i efektów atmosferycznych (Ferretti et al., 2007);
- Interferogramy z odległością bazową o wartościach wyższych niż 450 m są praktycznie niemożliwe do rozwinięcia, jeśli brak jest dostępnego *a priori* numerycznego modelu terenu i topografia obszaru nie jest bardzo łagodna. Dodatkowo, koherencja jest generalnie mała, co jest spowodowane wysoką geometrycznie i objętościowo dekorelacją odbicia promieniowania radarowego (Gatelli et al., 1994, Zebker and Villasenor, 1992, Rodriguez and Martin, 1992);
- Większy interwał czasowy pomiędzy wykonywaniem zobrażeń wykorzystanych do utworzenia interferogramu powoduje zwiększenie zmienności dystrybucji rozpraszaczy wewnątrz komórki rozdzielczości i ma wpływ na spadek koherencji;
- Optymalna prostopadła odległość bazowa mieści się w zakresie pomiędzy 150 a 300 metrów, jednakże najlepsze rezultaty osiągnąć można poprzez wykorzystanie więcej niż jednego interferogramu: interferogramy z małą odległością bazową mogą być wykorzystane przy

rozwinięciu fazy interferogramów z wysoką odległością, dodatkowo, różne interferogramy mogą być łączone w celu redukcji artefaktów atmosferycznych (Ferretti et al., 2007);

- Ponowne próbkowanie (ang. *resampling*) może skutkować niższą koherencją (Closson et al., 2017);
- Inne przyczyny utraty koherencji mogą również być brane pod uwagę, np. siła wiatru, dane meteorologiczne, itd.

Na poziom koherencji wpływ mają również czynniki warunkujące rozpraszanie sygnału radarowego. Generalnie poziom rozpraszania wstecznego lub moc sygnału powracającego (*backscatter coefficient*) zależy od:

- parametrów obserwacji tj. częstotliwości, geometrii zobrazowania, rodzaju polaryzacji i kąta padania wiązki radarowej
- parametrów powierzchni od której odbija się wiązka radarowa tj. szorstkości powierzchni, kształtu obiektu oraz stałej dielektrycznej.



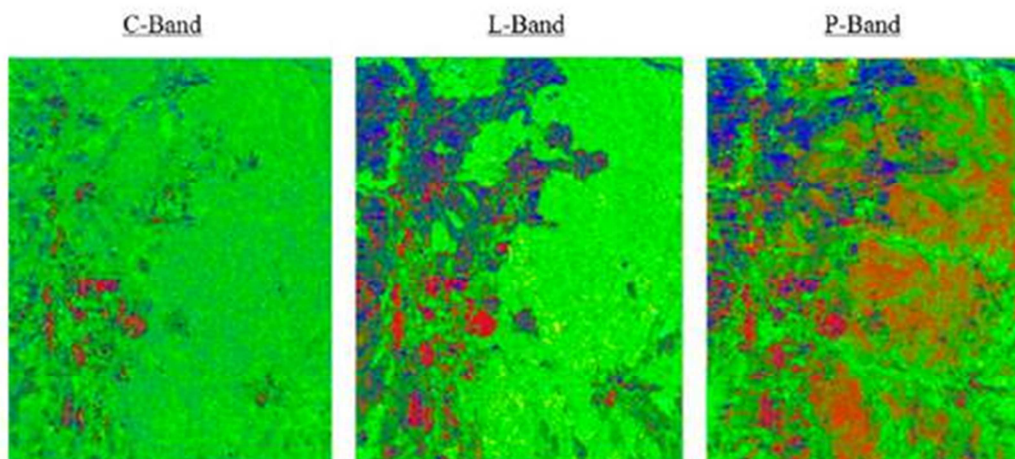
Rys.3. Rozpraszanie wsteczne w zależności od pasma radarowego i rodzaju obiektu.

Na Rys. 3 pokazano w jaki sposób zachowuje się wiązka fali w odniesieniu do obiektu na który pada. W paśmie X (3 cm, np. TerraSAR-X, COSMO-SkyMed) w przypadku drzewostanu wiązka odbija się od górnej powierzchni koron drzew, w paśmie C (5cm, np. ERS, Envisat, Sentinel 1) występuje głównie efekt rozpraszania objętościowego. Dla pasma L (23 cm, np. ALOS) widzimy w przypadku drzewostanu rozpraszanie objętościowe oraz podwójne odbicie (*double-bounce*) od pni, konarów i powierzchni terenu.

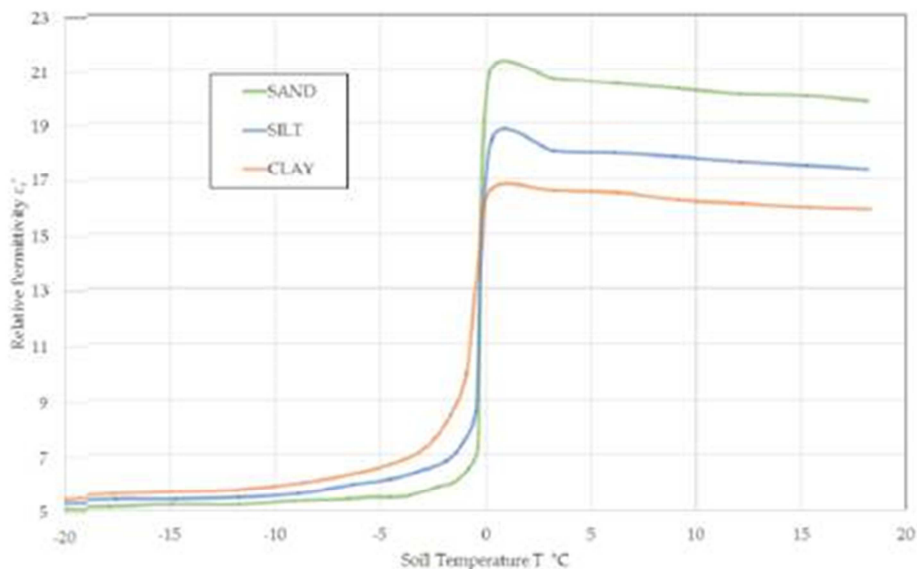
Inaczej sytuacja wygląda w przypadku gleby czy kopalin (piasek, żwir). Dla pasma X następuje odbicie wiązki od powierzchni a dla pasma C i L obserwujemy zarówno odbicie promieniowania oraz penetrowanie obiektu. W przypadku powierzchni gładkich tj. woda w stanie spoczynku (zbiorniki wodne) czy gładkiego lodu nie następuje odbicie energii w kierunku anteny (*surface backscatter*).

Na Rys. 4 widzimy w jaki sposób zmienia się obraz radarowy oraz jaki rodzaj odbicia (*volume scattering, double-bounce scattering, ground scattering*) dominuje w zależności od pasma radarowego.

Z kolei rysunek Rys. 5 przedstawia jak zmienia się stała dielektryczna dla piasku, iltu i gliny w zależności od temperatury ośrodka. Dla kopalin zmrożonych (okres zimowy) współczynniki są bardzo niskie a w przypadku przekroczenia wartości 0°C (wiosna) stała dielektryczna gwałtownie wzrasta. Widać wówczas duże zróżnicowanie pomiędzy odbiciem wstecznym od piasku czy gliny. Dlatego też przy badaniu koherencji pomiędzy dwoma zobrazeniami należy szczególnie uważać na datę zobrażenia.



Rys. 4. Obraz radarowy w zależności długości pasma (P, C, L)



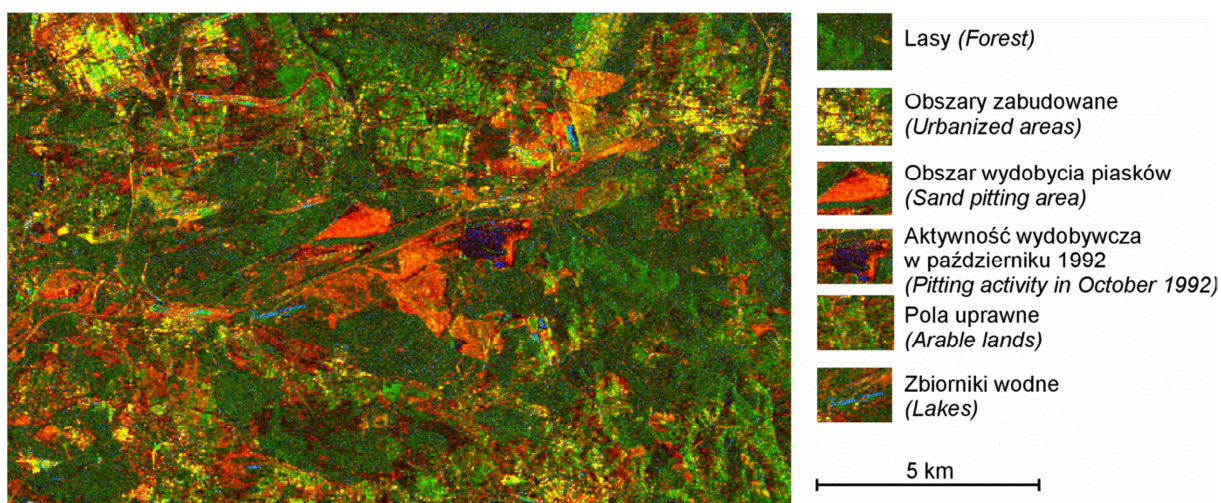
Rys. 5. Stała dielektryczna dla kopalin w zależności od temperatury.

### 2.3 Zastosowanie koherencji

Z powyższych rozważań widać wyraźnie, że koherencja interferogramu posiada istotną funkcję diagnostyczną. Połączenia obrazowań koherencji oraz amplitudy odbicia fali radarowej pozwalają na lepszą segmentację obrazowania. Kiedy amplituda fali powrotnej zależy od struktury elektromagnetycznej i geometrii obiektu, koherencja jest głównie odnoszona do jego stabilności mechanicznej. Np. na otwartym obszarze wegetacyjnym, poziom koherencji może być aproksymowany liniowo w relacji do biomasy i wysokości upraw. Inne przykłady wykorzystania koherencji to: segmentacja obszarów zalesione/niezalesione, np. w celu znalezienia rozprzestrzeniania się pożarów lasów, rozróżnianie obszarów wiecznej zmarzliny i odwilży., podział obszaru na występowanie lasów liściastych i iglastych. Wykorzystując efekt objętościowy oraz zmianę koherencji wraz z bazą odległościową może być szacowana penetracja promieniowania radarowego przez suchy lód (Weydahl et al., 2001). Generalnie, wykorzystując regularne serie obrazowań radarowych dostępnych na wybranym obszarze możliwe jest szacowanie zmian sezonowych, (Wegmüller et al., 1997). Dodatkowo techniki wieloczasowe umożliwiają identyfikację okresów, gdy wielkość koherencji jest łączona ze wzrostem roślin i widocznością terenu w tle. Prowadzą one do technik segmentacji z rezultatami nie tak odległymi od tych uzyskiwanych wykorzystywanych technik optycznych w dobrych warunkach pogodowych (Askne et al., 1997, Dammert et al., 1999).

Pierwszym z pomysłów wykorzystania map koherencji w połączeniu z radarowymi obrazami amplitudowymi była metoda tzw. wskaźników interferometrycznych (ang. *interferometric signatures*, Wegemüller et al. 1995). Metoda ta polega na wytworzeniu kompozycji barwnej RGB z następujących składowych: w kanale czerwonym przedstawiono koherencję interferometryczną, a w kanale zielonym, uśrednioną amplitudę pary obrazowań SAR użytych do wytworzenia koherencji, w kanale niebieskim różnicę obrazowań amplitudowych. W kompozycji takiej, barwy zbliżone są do naturalnych (lasy zielone, wody niebieskie itd.).

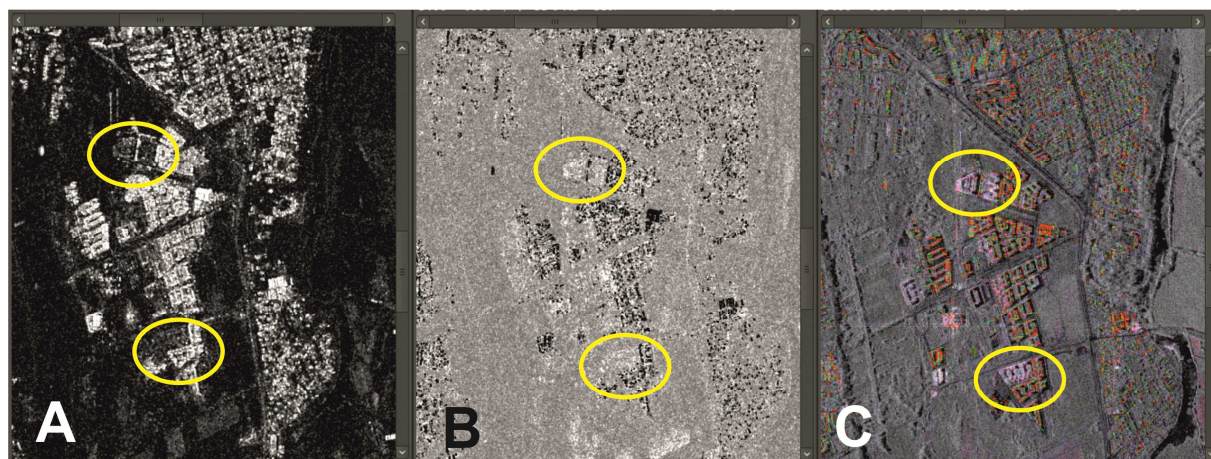
Pierwszą analizę obrazu wskaźników interferometrycznych z terenów Polski przeprowadzono dla obszaru kopalni Jaworzno-Szczakowa (Perski 2001) na bazie obrazowań ERS-1/2. W otrzymanym obrazie ujawnia się zasięg wyrobiska, oraz bardzo ciekawe strefy aktywności wydobywczej - charakteryzujące się słabą koherencją, oraz zasięg zalewisk i podmokłości poeksploatacyjnych (Rys. 6). Opracowanie to, pokazało wysoki potencjał wykorzystania obrazów koherencji dla detekcji zmian w środowisku.



Rys. 6. Obraz wskaźników interferometrycznych obszaru kopalni piasku podsadzkiowego Jaworzno-Szczakowa. Obraz wygenerowano w oparciu o dane InSAR obejmujące okres 04. 10.92 – 08.11.92 (Perski,2001)

Wieloczasowe analizy interferometryczne koherencji i amplitudy odbicia promieniowania mogą być wykorzystane w detekcji i klasyfikacji zalesienia i wegetacji (Koskinen et al., 2001). Obrazy wskaźników interferometrycznych pozwalają na lepszą segmentację zobrazenia. Składowa amplitudowa zobrazenia SAR struktury elektromagnetycznej obiektu, którą warunkuje jego szorstkość i geometria, koherencja może być natomiast odnoszona do stabilności mechanicznej. Np. na otwartym obszarze upraw, zmienność koherencji w czasie może być aproksymowana liniowo w relacji do wielkości biomasy i wysokości upraw. Inne wykorzystanie koherencji to segmentacja obszarów zalesione/niezalesione, np. w celu znalezienia rozprzestrzeniania się pożarów lasów. Dodatkowo, mogą być rozróżnialne obszary wiecznej zmarzliny i odwilży w regionach ich występowania. Można także wykonać podział obszaru na występowanie lasów liściastych i iglastych. Penetracja promieniowania radarowego przez suchy lód może być szacowana wykorzystując efekt objętościowy oraz zmianę koherencji wraz z bazą odległościową (Weydahl et al., 2001). Generalnie, szacowane mogą być zmiany sezonowe, wykorzystując regularne serie zobrażeń radarowych dostępnych na wybranym obszarze (Wegmüller et al., 1997). Dodatkowo techniki wieloczasowe umożliwiają identyfikację okresów, gdy wielkość koherencji jest łączona ze wzrostem roślin i widocznością terenu w tle. Prowadzą one do technik segmentacji z rezultatami nie tak odległymi od tych uzyskiwanych wykorzystywanych technik optycznych w dobrych warunkach pogodowych (Askne et al., 1997, Dammert et al., 1999).

Dla łatwiejszej interpretacji i segmentacji zaproponowano metodę tzw. wskaźników koherencji (ang. *coherence signatures*, Perski, 2011). W metodzie tej tworzy się kompozycję HSV (ang. *Hue, Saturation, Value*) gdzie w kanale H występuje odchylenie standardowe dla serii wieloczasowej obrazów koherencji, w kanale S, średnia arytmetyczna dla koherencji serii wieloczasowej koherencji, w kanale V, średniej arytmetycznej amplitudy dla serii zobrażeń SAR użytych do wygenerowania map koherencji (Rys. 4). Obraz wskaźników koherencji dla serii zobrażeń TerraSAR-X dla obszaru południowej części Warszawy (Powsin) umożliwił łatwe zlokalizowanie obszarów nowej zabudowy. Obszary te charakteryzowały się niską średnią koherencją, wysokim odchyleniem standardowym koherencji i wysoką wartością średniej amplitudy (rys. 7).



Rys. 7. Detekcja obszarów nowej zabudowy za pomocą wskaźników koherencji. A: średnia arytmetyczna dla serii 26 map koherencji, B: odchylenie standardowe dla serii 26 map koherencji, C: mapa wskaźników koherencji (Perski, 2011)

### **3 Analiza wieloczasowa koherencji danych Sentinel-1 dla określenia możliwości jej zastosowania dla wykrywania nielegalnej eksploatacji**

W rozdziale tym przedstawione zostaną wyniki przeprowadzonych eksperymentów z różnego typu metodyką opracowania danych dla serii wieloczasowej danych Sentinel-1, które są łatwo dostępne i stanowią podstawę opracowań interferometrycznych w projekcie InMoTeP.

#### **3.1 Obszar badań**

Do eksperymentu wytypowano młodo glacialny obszar południowo-zachodniej części województwa warmińsko-mazurskiego. Warto podkreślić, że na obszarze tym wykryto i zweryfikowano w terenie miejsca nielegalnej eksploatacji innymi, niesatelitarnymi metodami. Punkty te zostały skatalogowane przez PIG-PIB (eksploatacja w latach 2011 – 2019). Do najczęstszych naruszeń prawa geologiczno-górniczego na tym obszarze zaliczyć można:

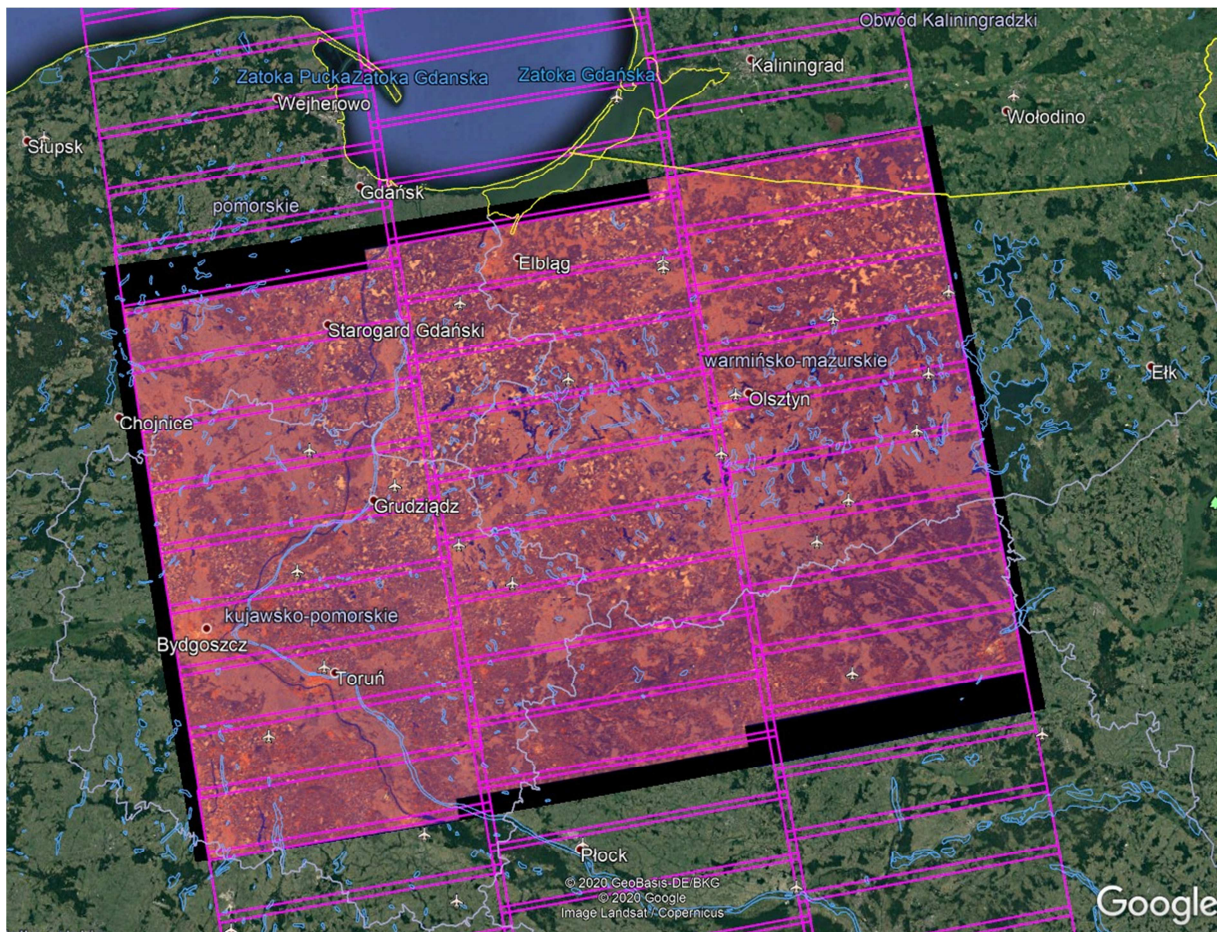
- tworzenie nielegalnych wyrobisk;
- eksploatację hałd;
- przekroczenie granic obszarów górniczych objętych koncesją;
- nielegalne wydobycie piasków oraz żwirów;

Testy stosowalności koherencji wykonano również dla obszaru GZW (Górnośląskiego Zagłębia Węglowego) z uwagi na dostępne dla tego obszaru archiwalne zobrazowania radarowe wysokorozdzielcze TerraSAR-X.



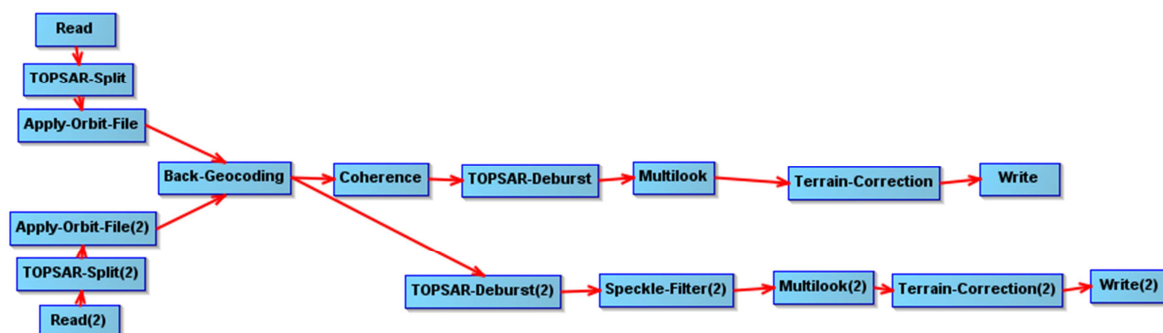
### 3.2 Dane SAR użyte w opracowaniu i generowanie map koherencji

W opracowaniu wykorzystano pary obrazów Sentinel-1 z lat 2015-2019 z okresu letniego (lipiec), łącznie 10 obrazów tworzących łącznie 9 kombinacji interferometrycznych (Rys. 8). Dla każdej ze scen obliczeń dokonywano dla obu dostępnych polaryzacji (VV oraz VH).



Rys. 8. Zasięg scen Sentinel-1 użytych w opracowaniu

Dla każdej z par generowano mapę koherencji oraz obraz uśrednionej amplitudy. Oba zbiory podlegały następnie przepróbowaniu (multilooking 8 x 1) oraz ortorektyfikacji do układu współrzędnych 1992. Całość operacji zaprogramowano w narzędziu Graph Builder oprogramowania SNAP. Sposób postępowania przedstawia graf na Rys. 9.



Rys. 9. Graf przedstawiający szczegóły przetwarzania danych Sentinel-1 dla wygenerowania map koherencji (ciąg górny) i uśrednionej amplitudy (ciąg dolny)

### 3.3 Metodyka przetwarzania i wizualizacji map koherencji

W ramach projektu testowano 6 różnych metod wizualizacji danych celem wizualnej detekcji potencjalnych miejsc nielegalnej eksploatacji. Wszystkie metody zostały testowane na obszarach, na których wykryto nielegalną eksploatację innymi metodami (w tym terenowymi):

- Metoda I: RGB (Wegemüller et al. 1995) – koherencja + amplituda
- Metoda II: HSV (Perski 2011) – koherencja + amplituda
- Metoda III: „różnic bezwzględnych” – koherencja
- Metoda IV: „odchylenie standardowe vs średnia” - koherencja

### 3.4 Otrzymane wyniki

Poniżej przedstawiono przykładowe wyniki jakie otrzymano dla każdej z testowanych metod .. Obrazy poniżej są wybranymi i powiększonymi przykładami stanowiącymi fragmenty całości opracowania dla poszczególnych miejsc stwierdzonej nielegalnej eksploatacji.

### 3.4.1 Metoda I: RGB (wskaźników interferometrycznych)

Przedstawione wizualizacje to klasycznie kompozycje RGB zaproponowane przez Wegemüller et al. 1995:

R: koherencja wybranych zobrażeń (coh)

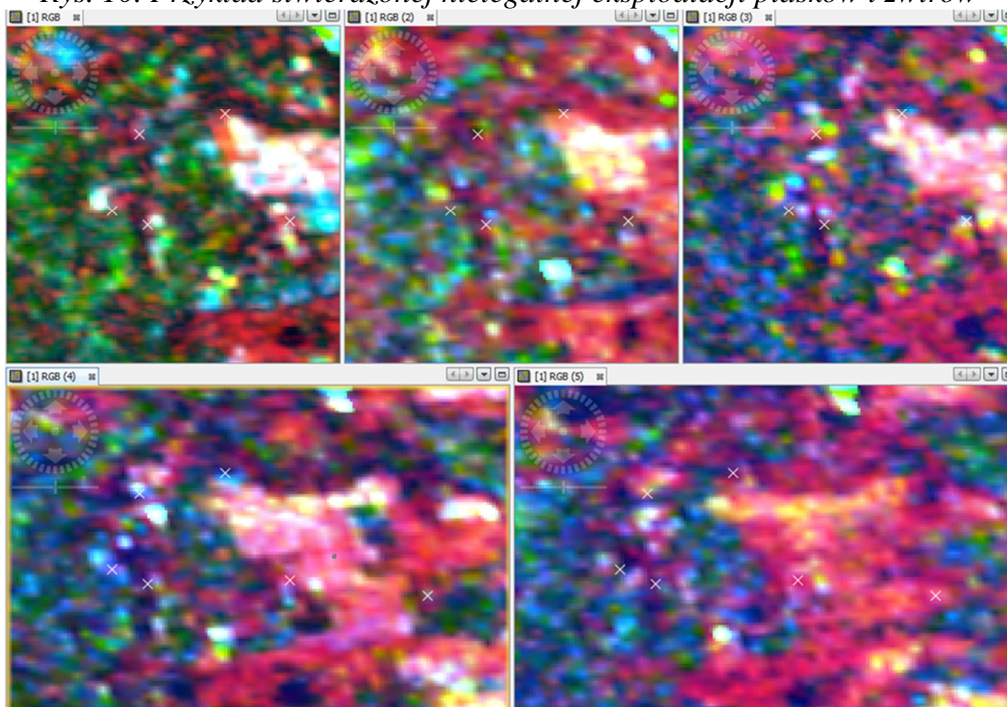
G: średnia arytmetyczna amplitudy dwóch zobrażeń (avg\_sigma)

B: różnica amplitudy dwóch zobrażeń (diff\_sigma)

Wyniki zestawiono na Rys. 10 i 11.



Rys. 10. Przykład stwierdzonej nielegalnej eksploatacji piasków i żwirów



Rys. 11. Porównanie wybranych punktów nielegalnej eksploatacji w latach 2015-2019 (Sentinel-1 – metoda I)

### 3.4.2 Metoda II HSV (wskaźników koherencji)

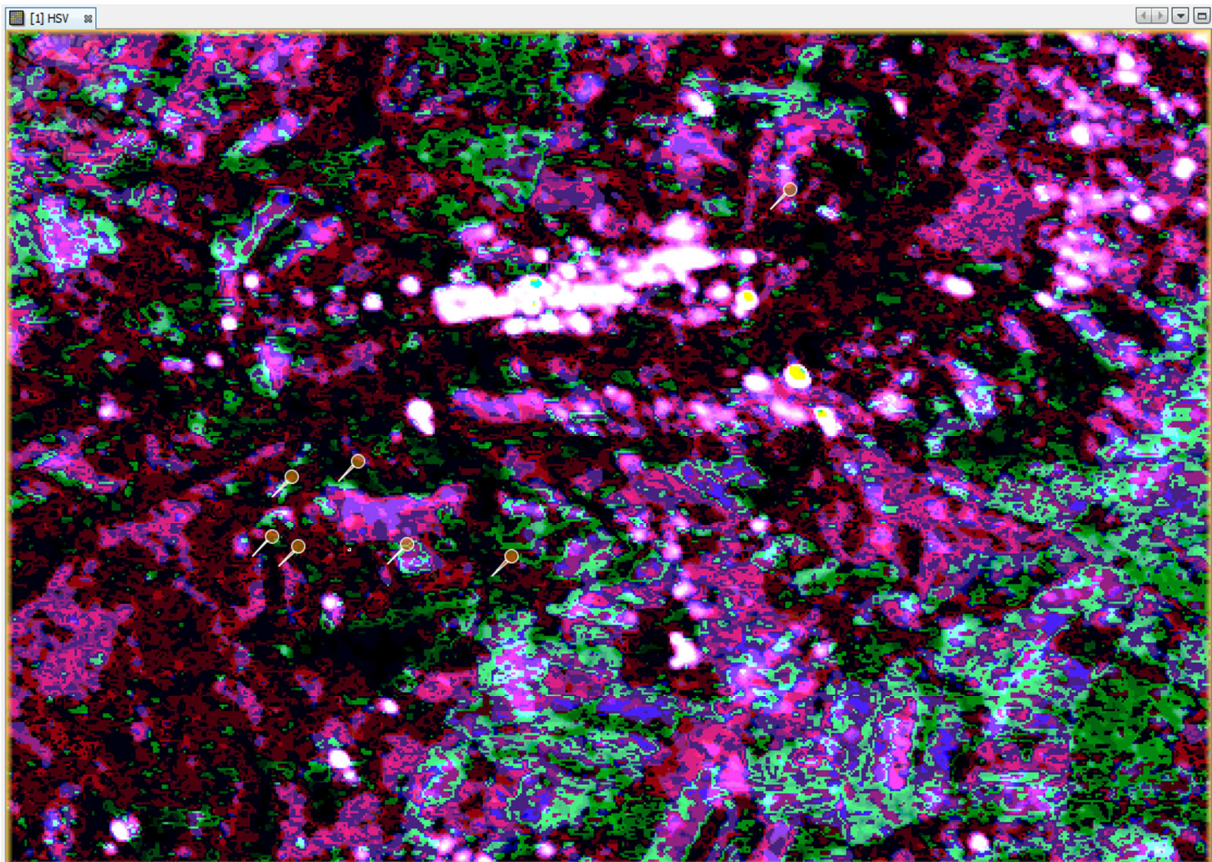
Wizualizacja danych tą metodą to podejście zaproponowane przez Perskiego (2011):

H: odchylenie standardowe serii obrazów koherencji

S: średnia arytmetyczna koherencji

V: średnia arytmetyczna amplitudy

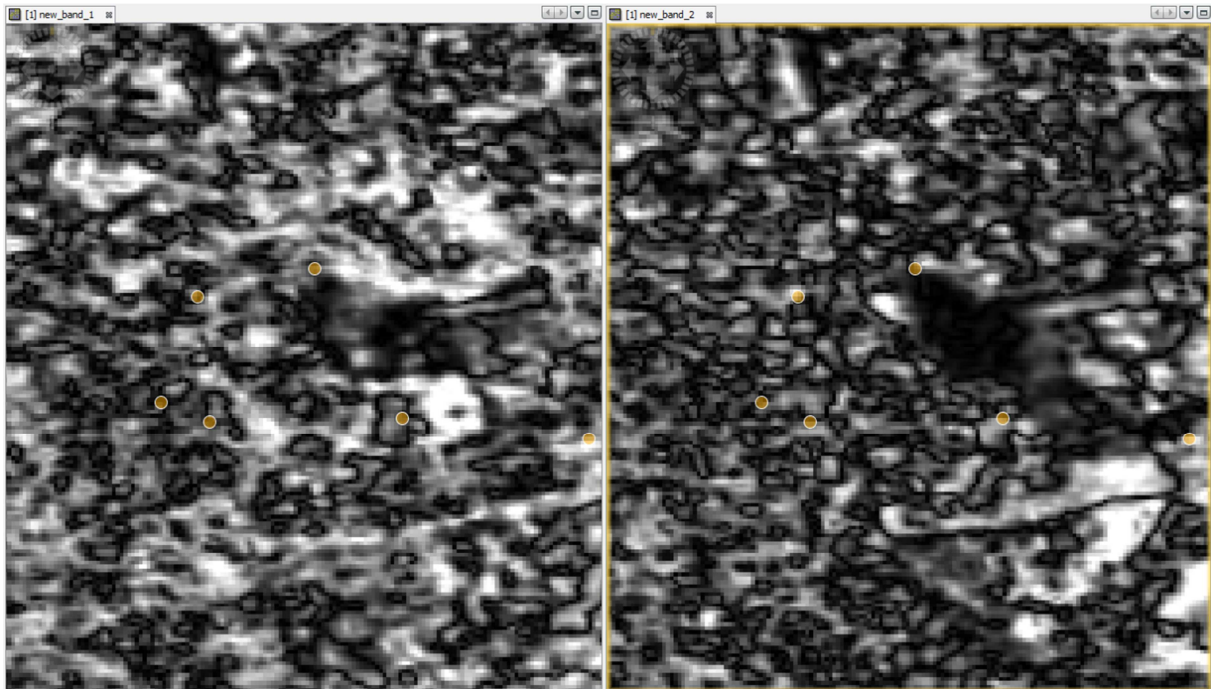
Wyniki przedstawiono na Rys. 12.



Rys.12. Mapa wskaźników koherencji (metoda II) dla danych Sentinel-1. Pinezkami zaznaczono obszary nielegalnej eksploatacji

### 3.4.3 Metoda III Różnic bezwzględnych

W metodzie tej analizowano różnice bezwzględne (czyli mapy wartości bezwzględnej różnic) pomiędzy poszczególnymi mapami koherencji. Analizowano w ten sposób zmienność koherencji z poszczególnych lat. Przykładowe wyniki przedstawia Rys. 13.



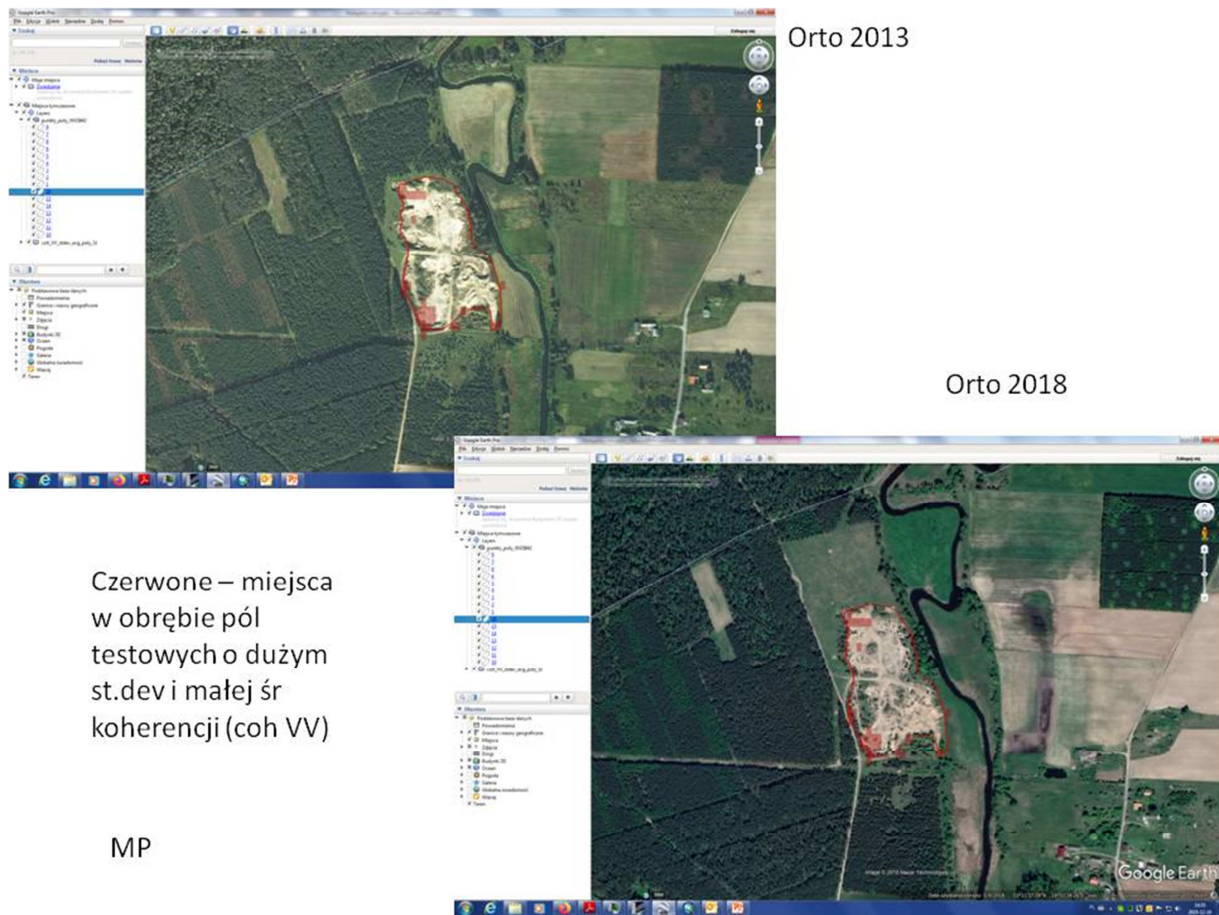
Rys. 13. Mapa różnic bezwzględnych koherencji (Metoda III) dla 2015 roku (lewa) i 2016 r. (prawa). Dane Sentinel-1. Pinezkami zaznaczono obszary nielegalnej eksploatacji

#### 3.4.4 Metoda IV: „odchylenie standardowe vs średnia”

Dla danych obliczanych tą metoda przeprowadzono segmentację według następującej procedury:

- Krok 1: Import rastrów img st.dev i avg koherencji jednej polaryzacji do ArcGiS.
- Krok 2: Przeliczenie wartości w „Raster Calculator” obu rastrów tak, aby główne znaczące liczby były przed przecinkiem (np. razy 100 lub 1000).
- Krok 3: Zamiana rastrów na wartości integer (funkcja „Int”).
- Krok 4: Clip rastrów z kroku3 do poligonów testowych.
- Krok 5: Zamiana wyciętych rastrów z kroku 4 na poligony shp (funkcja „Raster to polygon”).
- Krok6: Złączenie obu shp z kroku 5 (ze st.dev i avg) w jeden przy użyciu „Spatial Join”.
- Krok 7: Definicja klas wartości w kolumnie st.dev i avg shp z kroku 6 (np. podział przy użyciu classify w Symbology na 10 naturalnych klas).
- Krok 8: Wyłonienie tylko tych poligonów, które mają wysoka klasę st.dev i niska klasę avg. .

Wstępne wyniki metody IV jak również metody IV w porównaniu do metody III przedstawiono na Rys. 14 – 19.



Rys. 14. Wyniki metody IV dla konkretnego wyrobiska 1

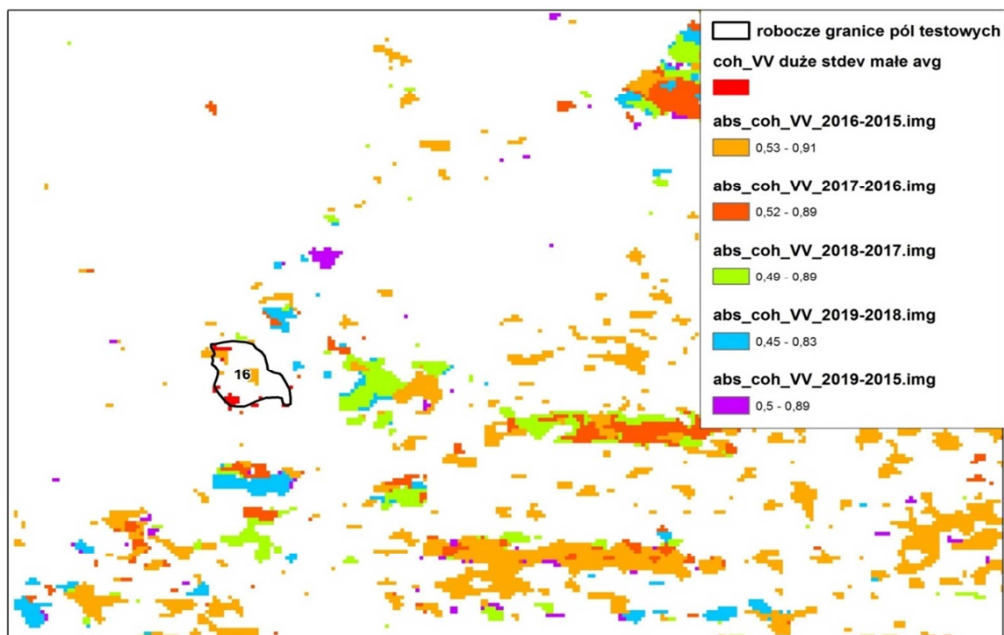
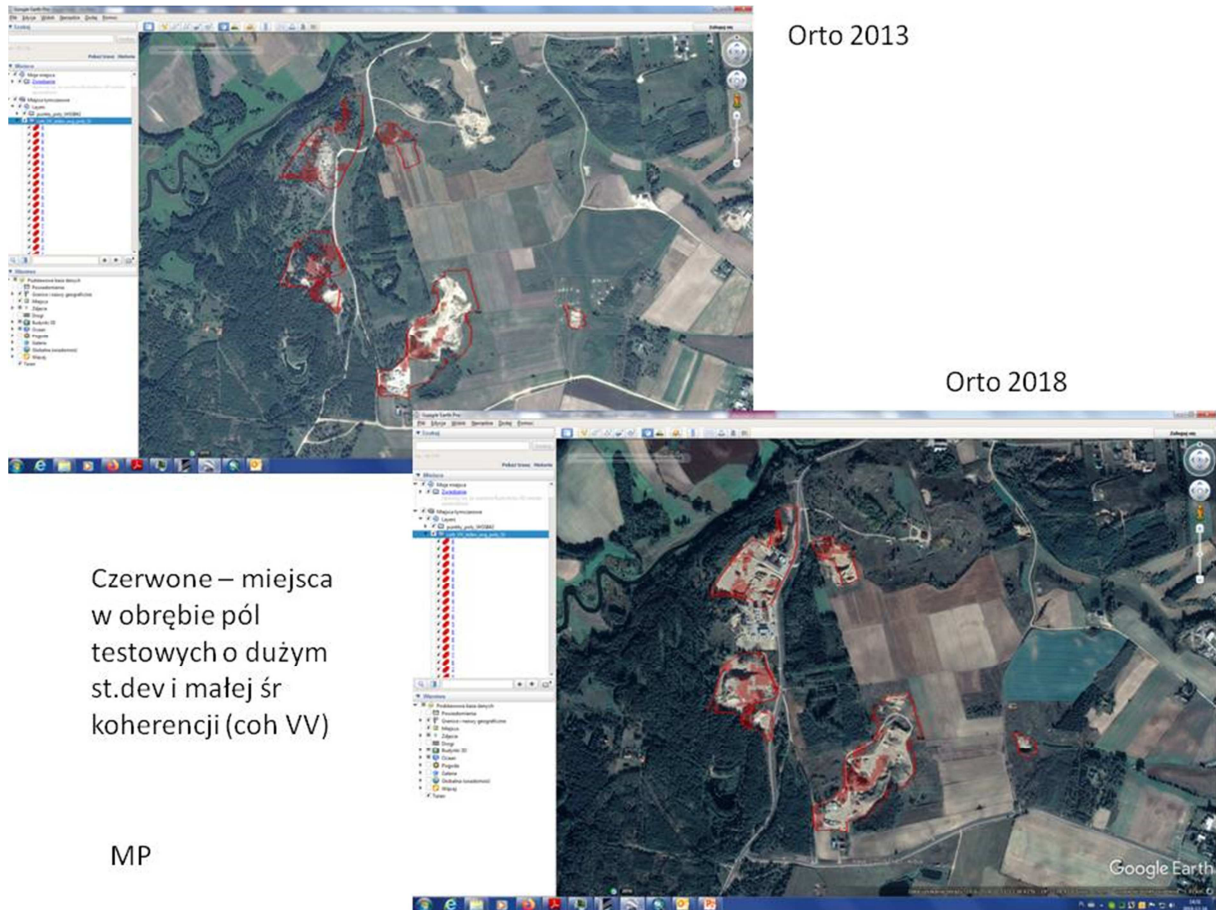


Fig. 15. Porównanie wyników metody III i IV po segmentacji



Rys. 16. Wyniki metody IV dla konkretnego wyrobiska2

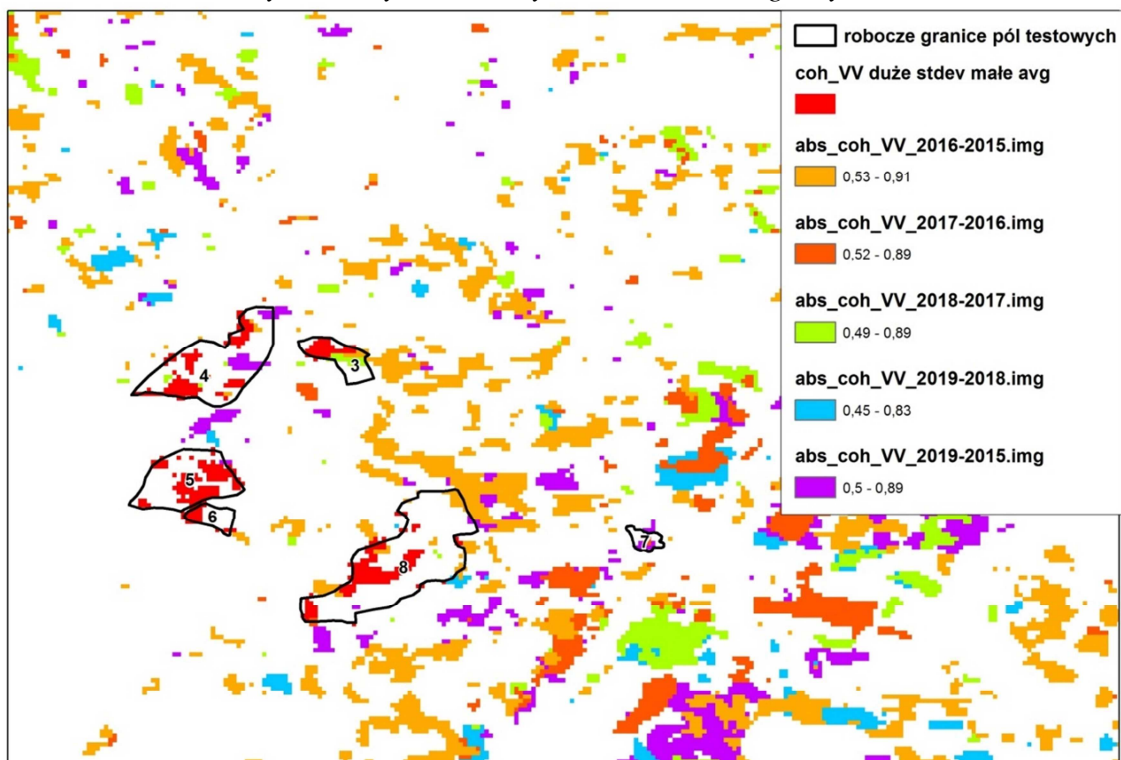
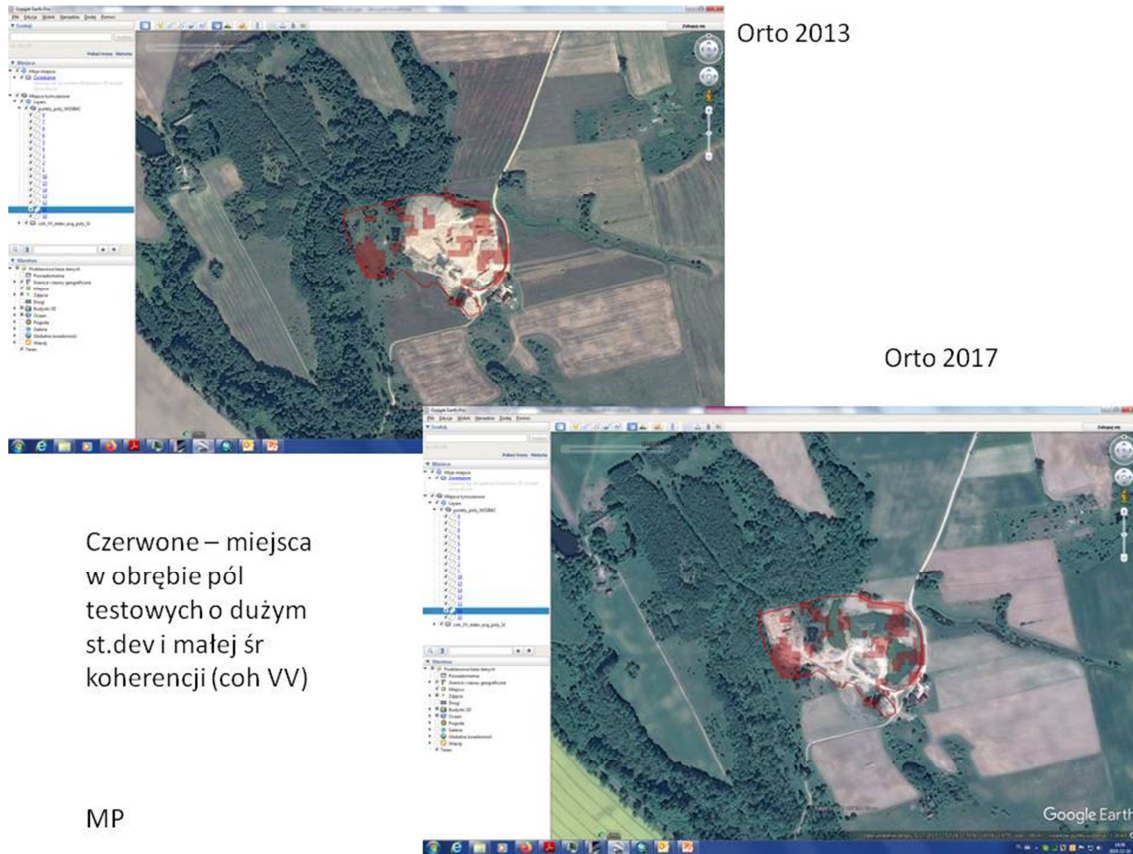


Fig. 17. Porównanie wyników metody III i IV po segmentacji



Rys. 18. Wyniki metody IV dla konkretnych wyrobisk rejon 3

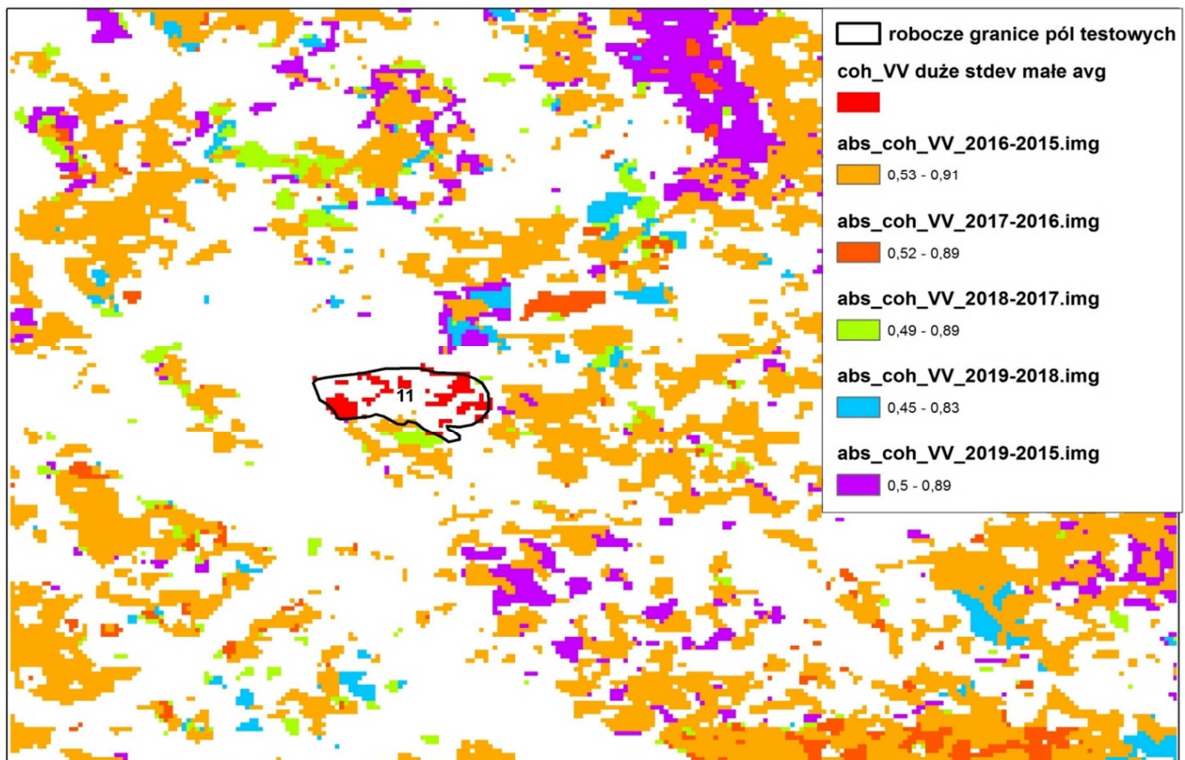


Fig. 19. Porównanie wyników metody III i IV po segmentacji



## 4 Wnioski

Z przedstawionych analiz wynika, że w warunkach klimatu umiarkowanego o bardzo zmiennych stanach pogody koherencja nie jest dobrym wyznacznikiem dla szybko zmieniających się obszarów jakimi są powstające i szybko zanikające wyrobiska nielegalnej eksploatacji. Najlepsze wyniki otrzymano dla metody IV ale nie dla każdego obszaru okazały się one jednoznaczne. Kolejnym zagadnieniem jest rozdzielczość przestrzenna danych. W przypadku zobrazowań Sentinel-1 mamy do czynienia z rozdzielczością, która w terenie odpowiada powierzchni ok. 25 x 25 m co niejednokrotnie przewyższa rozmiary odkrywki. Powoduje to, że wyniki są obarczone znacznie większymi błędami (przez wpływ sąsiednich pikseli) aniżeli można by się spodziewać.

Z przedstawionych analiz wynika, że na dzień dzisiejszy można stwierdzić, że mapy koherencji nie nadają się do operacyjnego wykrywania miejsc potencjalnej nielegalnej eksploatacji. Początkowo wysoki potencjał tych danych wynikał z szukania zastosowań dla konkretnych produktów, które udało się pozyskać dla innych celów aniżeli z poszukiwań produktów, które mogą być generowane rutynowo. Zdaniem autora, wykazany w przeprowadzonych analizach brak możliwości wykorzystania map koherencji dla detekcji miejsc nielegalnej eksploatacji nie przekreśla do końca ich stosowności. Być może w toku dotychczasowych doświadczeń zbyt słabo rozumiemy zagadnienia wpływu środowiska na dekorelację sygnału radarowego lub (co bardziej prawdopodobne) użyte do testów metody były nieodpowiednio dobrane. Możliwe, że użycie większej ilości danych, z dłuższych interwałów czasowych (a ilość danych rejestrowanych przez Sentinel-1 cały czas przyrasta) pozwoli wypracować nowe podejścia statystyczne, które to pozwolą zbliżyć się do rozwiązania problemu. W ocenie autora, mapy koherencji, cały czas w niewielkim stopniu wykorzystywane i doceniane, zachowują swój potencjał zastosowań. Trzeba stwierdzić, że na dzień dzisiejszy nie znamy metody jak je wykorzystać do rozwiązania problemu detekcji miejsc nielegalnej eksploatacji ale ich potencjał w tym zakresie wydaje się być niewątpliwy.

Głównymi czynnikami wpływającymi negatywnie na identyfikację nielegalnej eksploatacji są:

- Nieciągłe przekształcenie środowiska (nieciągła eksploatacja w czasie);
- Występowanie nielegalnej eksploatacji zazwyczaj na niewielkim obszarze – rozdzielczość zobrażeń Sentinel może być za duża;
- Znaczące zmiany wilgotności;
- Zmiany pokrywy roślinnej (charakterystyczne dla klimatu w Polsce);
- Niestabilność odbicia promieniowania elektromagnetycznego wydobywanych kopalin (brak jednoznacznej identyfikacji);
- Możliwość występowania pokrywy śnieżnej;

## 5 Literatura

- Askne, J. I. H., P. B. G. Dammert, L. M. H. Ulander and G. Smith, 1997, "C-band repeat-pass interferometric SAR observations of the forest.", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 35(1): 25-35.
- Bamler, R., Hartl, P., 1998. Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse Probl.* 14, R1–R54.
- Bürgmann, R., Rosen, P.A., Fielding, E.J., 2000. Synthetic Aperture Radar interferometry to measure Earth's surface topography and its deformation. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 28, 169–209.
- Cattabeni, M., Monti-Guarnieri, A., Rocca, F., 1994. Estimation and Improvement of Coherence in SAR Interferograms. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1994. IGARSS '94*, 720–722.
- Closson, D., Milisavljevic, N., 2017, "InSAR Coherence and Intensity Changes Detection", W: Beumier C., Closson, D., Lacroix, V., Milisavljevic, N., Yvinec. Y. , 2017, "Mine Action - The Research Experience of the Royal Military Academy of Belgium", INTECH
- Dammert, P. B. G., J. I. H. Askne and S. Kuhlmann, 1999, "Unsupervised segmentation of multitemporal interferometric SAR images." *IEEE, Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 37(5): 2259-2271.
- Ferretti, A., Monti-Guarnieri, A., Prati, C., Rocca, F., 2007, Massonnet, D., "InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation.", *ESA Publications, TM-19. ISBN 92-9092-233-8*
- Gatelli, F., A. Monti-Guarnieri, F. Parizzi, P. Pasquali, C. Prati and F. Rocca (1994), "The wavenumber shift in SAR interferometry." *IEEE, Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 32(4): 855-865.
- Goldstein, R.M., Zebker, H.A., Werner, C.L., 1988. Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping. *Radio Sci.* 23, 713–720.
- Hanssen, R., 1998, "Assessment of the role of atmospheric heterogeneities in ERS tandem SAR interferometry", *Eur. Space Agency, Paris*
- Hanssen, R., 2001, "Radar Interferometry-Data Interpretation and Error Analysis", *Kluwer Academic Publishers*
- Koskinen, J. T., J. T. Pulliainen, J. M. Hyypä, M. E. Engdahl and M. T. Hallikainen, 2001, "The seasonal behavior of interferometric coherence in boreal forest." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(4): 820-829.
- Massonnet, D., Feigl, K.L., 1998. Radar interferometry and its application to changes in the

- earth's surface. *Rev. Geophys.* 36, 441–500.
- Perski, Z., 1999. Osiadania terenu GZW pod wpływem eksploatacji podziemnej określane za pomocą satelitarnej interferometrii radarowej (InSAR). *Przegląd Geol.* 2, 171–174.
- Perski, Z., 2001. Zastosowanie satelitarnej interferometrii radarowej w badaniach środowiska Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. *Teledetekcja Środowiska* 32, 78-86.
- Perski Z., 2011. Final report on Synthetic Aperture Radar (SAR) data utilization. Implementation and broader usage of satellite monitoring techniques for geospatial analyses within the processes of development of Metropolitan Areas of Poland on the basis of Warsaw Metropolitan Area "UrbanSAT". Niepublikowane
- Perski, Z., Ketelaar, G., Mróz, M., 2006. Interpretacja danych ENVISAT/ASAR o przemiennej polaryzacji na obszarach zurbanizowanych w kontekście charakterystyki stabilnych rozpraszaczy (Persistent Scatterers). *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji* 16, 467 – 482.
- Rodriguez, E. and J. M. Martin (1992), "Theory and design of interferometric synthetic aperture radars." *IEE Proceedings F* 139(2): 147-159
- Rosen, P.A.; Hensley, S.; Zebker, H.A.; Webb, F.H.; Fielding, E.J., 1996, "Surface deformation and coherence measurements of Kilauea Volcano, Hawaii, from SIR-C radar interferometry.", *J. Geophys. Res.* 101, 23109–23125
- Simons, M.; Fialko, Y.; Rivera, L., 2002, "Coseismic deformation from the 1999 Mw 7.1 Hector Mine, California, Earthquake as Inferred from InSAR and GPS Observations.", *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 92, 1390–1402
- Weydahl, D. J., 2001, "Analysis of ERS SAR coherence images over vegetated areas and urban features." *International Journal of Remote Sensing* 22(14): 2811-2830.
- Wegmüller U., Werner c.l., Nüesch D., Boreaud M., 1995. Land-Surface analysis using ERS-SAR Interferometry. *ESA bull.* No. 81, Paris, 30-37.
- Wegmüller, U. and C. Werner, 1997, "Retrieval of vegetation parameters with SAR interferometry." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 35(1): 18-24.
- Zebker, H.A., Villasenor, J., 1992. Decorrelation in interferometric radar echoes. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 30, 950–959.
- Zhang, Y., Prinet V., 2004, "InSAR coherence estimation", *IEEE*, DOI: 10.1109/IGARSS.2004.1370422