



Państwowy Instytut Geologiczny
Państwowy Instytut Badawczy
państwowa służba geologiczna
państwowa służba hydrogeologiczna

EFEKT RZECZOWY Z REALIZACJI PRZEDSIĘWZIĘCIA Z ZAKRESU PAŃSTWOWEJ SŁUŻBY GEOLOGICZNEJ

za okres: od 1 kwietnia 2024 r. do 30 czerwca 2024 r.

„Interferometryczny Monitoring Powierzchni Terenu Polski (InMoTeP) – etap II”

343/2021/Wn-07/FG-go-dn/D z dnia 06.05.2021r

Raport 1

Przygotowanie serwisu informacyjnego o deformacjach powierzchni terenu kraju na bazie danych EGMS wraz z bazą danych rastrowych

Nadzorujący:

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

Dotujący:

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



Sfinansowano ze środków
**NARODOWEGO FUNDUSZU
OCHRONY ŚRODOWISKA
i GOSPODARKI WODNEJ**

Wykonawca:

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



Osoba sporządzająca raport:

dr inż. Maria Przyłucka

Kierownik zadania:

dr inż. Maria Przyłucka

Kierownik komórki organizacyjnej:

dr Tomasz Wojciechowski

Dyrektor/Dyrektor pionu:

dr Olimpia Kozłowska
Zastępca dyrektora
ds. służby geologicznej
/podpisana cyfrowo/

prof. dr hab. Stanisław Mikulski
Zastępca dyrektora
ds. badań i rozwoju
/podpisany cyfrowo/

Warszawa, czerwiec 2024 r.

pgi.gov.pl

ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa
tel. (+48) 22 45 92 000, biuro@pgi.gov.pl

Sąd Rejonowy dla m. st. Warszawy w Warszawie
XIII Wydział Gospodarczy KRS, Nr 0000122099
NIP 525-000-80-40

Zespół wykonawców
Państwowego Instytutu Geologicznego – Państwowego Instytutu Badawczego

(kolejność alfabetyczna)

Adamski Marek, Balicki Leszek, Bartyzel Katarzyna, Borysiuk Rafał, Chodak Emilia, Cisło Michalina, Cudnik Beata, Dacka Jacek, Derda Bartosz, Drożdżewski Mateusz, Frydel Jerzy, Górka Konrad, Jureczka Janusz, Kamieniarz Sylwester, Karczewska Katarzyna, Karkowska Kamila, Konarska Iwona, Kos Jarosław, Kowalska Iwona, Kowalski Zbigniew, Krieger Włodzimierz, Kutyla-Olesiuk Anna, Ługiewicz-Mołas Izabela, Łukowska Renata, Łyjak Marta, Markiewicz Krzysztof, Mazurek Sławomir, Maślanka Remigiusz, Nadłonek Weronika, Nescieruk Piotr, Parafiniuk Mateusz, Perski Zbigniew, Pojawa Joanna, Posłajko Jolanta, Przyłucka Maria, Psujek Maksymilian, Rolka Michał, Romanowicz Anna, Rycio Edyta, Rzeźnik Mateusz, Siwek Mariola, Strzezińska Katarzyna, Suszka Grzegorz, Ulatowska Adrianna, Warmuz Bartłomiej, Wojciechowski Tomasz, Zając Mariusz, Zych Piotr

Szczegóły dokumentu:

EFEKT RZECZOWY Z REALIZACJI ZADANIA

Z ZAKRESU PAŃSTWOWEJ SŁUŻBY GEOLOGICZNEJ

w ramach umowy dotacji **343/2021/Wn-07/FG-go-dn/D** z dnia **06.05.2021r. pn.**

„Interferometryczny Monitoring Powierzchni Terenu Polski (InMoTeP) – etap II”.

Numer podzadania	1.1
Autorzy	Maria Przyłucka Mateusz Parafiniuk Zbigniew Perski Michalina Cisło
Uwagi	

Spis treści

Wstęp.....	8
1. Budowa geologiczna Polski.....	9
2. Geozagrożenia występujące na terenie kraju.....	14
3. Satelitarna Interferometria Radarowa – opis metody	18
4. European Ground Motion Service	23
4.1 Dane dla obszaru Polski	24
5. Deformacje powierzchni terenu Polski.....	27
5.1 Kierunek Up-Down	28
5.2 Kierunek East-West.....	30
6. Analiza otrzymanych deformacji.....	31
7. Mapa deformacji	42
8. Literatura.....	44

Spis Rysunków

Rys. 1 Podział Polski na trzy megajednostki tektoniczne (Dandlez, 1993).....	10
Rys. 2 Jednostki tektoniczne Polski pod pokrywą kenozoiczną (Żelaźniewicz i in., 2011). Wstawka A (lewy dolny róg) – Mapa geologiczna Polski bez utworów kenozoiku (Dandlez i in., 2000) z linią przekroju A-A' (Rys. 3).	11
Rys. 3 Przekrój geologiczny przechodzący prostopadle do struktur tektonicznych wzdłuż linii SW-NE (Żelaźniewicz i in., 2011).	13
Rys. 4 Mapa podatności osuwiskowej Polski (Wojciechowski, 2019).	16
Rys. 5 Geometria i zasada działania D-InSAR.	18
Rys. 6 Przykład interferogramu. Rejon miasta Bam (Iran) dotkniętego trzęsieniem ziemi 26.12.2003 r. Prążki interferometryczne przedstawiają deformację powierzchni terenu powstałą w wyniku tego trzęsienia. Dane SAR z satelity ENVISAT (Perski & Hanssen 2006). Jedna sekwencja prążków (od niebieskiego do zielonego) odpowiada przemieszczeniu o ok 3 cm w kierunku od satelity. Największa deformacja (11 prążków) odpowiada 33 cm obniżenia terenu.	19
Rys. 7 Wpływ koherencji na jakość interferogramu. Interferogram i koherencja dla obszaru górniczego KWK Bogdanka obliczony na podstawie wysokorozdzielczych danych TerraSAR-X. Zaszumione obszary A, B, C o niewidocznych prążkach interferometrycznych na interferogramie odpowiadają obszarom o słabej koherencji (ciemne).	20
Rys. 8 Obraz koherencji (lewy) dla typowego 12-dniowego interferogramu danych Sentinel-1 dla obszaru górniczego Siersza w zestawieniu z ortofotomapą (środek) i pokryciem terenu Corine Land Cover (prawy). Wysoka koherencja (jasne obszary na obrazie lewym) odpowiadają głównie terenom zabudowanym. Tereny o małej koherencji (ciemne obszary na obrazie lewym) odpowiadają terenom pokrytym roślinnością.	20
Rys. 9 Schemat geometrii obrazowania SAR (Fuhrmann i Garthwaite, 2019).	22
Rys. 10 Przykład odwzorowania rzeczywistych deformacji (strzałka Dreal) na kierunek LOS (strzałka D _{LOS}), źródło: https://site.tre-altamira.com/insar/	23
Rys. 11 Przykładowy rozkład punktów pomiarowych serwisu EGMS danych poziomu L3 w zestawieniu z klasami pokrycia terenu. Obszary zabudowane cechują się największą gęstością punktów, podczas gdy obszary leśne brakiem danych.	25
Rys. 12 Średnia gęstość punktów PS dla klasy pokrycia terenu w zestawieniu z procentowym udziałem punktów klasy w stosunku do całego zbioru oraz sumy powierzchni danej klasy... ..	27
Rys. 13 Rozkład średnich prędkości w kierunku pionowym punktów PS z serwisu EGMS dla okresu 2016-2020 na terenie Polski.	29
Rys. 14 Histogram średnich prędkości w kierunku pionowym punktów PS z serwisu EGMS dla okresu 2016-2020 na terenie Polski. Oś „Y” została ograniczona do 50 000, aby zapewnić czytelność całego wykresu.	29
Rys. 15 Rozkład średnich prędkości w kierunku poziomym wschód-zachód punktów PS z serwisu EGMS dla okresu 2016-2020 na terenie Polski.	30
Rys. 16 Histogram średnich prędkości w kierunku poziomym wschód-zachód punktów PS z serwisu EGMS dla okresu 2016-2020 na terenie Polski. Oś „Y” została ograniczona do 50 000, aby zapewnić czytelność całego wykresu.	31
Rys. 17 Podstawowe kroki przyjętej metodyki analizy geostatystycznej w celu identyfikacji lokalizacji występowania znaczących deformacji w skali kraju. Powiększanie dla obszaru Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego. a) Pokrycie obszaru regularną siatką o boku 2 km. b) Eliminacja kwadratów siatki dla których średnia prędkość punktów PS mieściła się	

w zakresie od -2 do +2 mm/rok. c) Złączenie kwadratów w poligony po wspólnych granicach.	
d) Obliczenie dla każdego z wynikowych poligonów średniej wartości prędkości, liczby występujących punktów oraz gęstości punktów.	32
Rys. 18 Podsumowanie wyznaczonych lokalizacji, na których występują deformacje w Polsce.	32
Rys. 19 Lokalizacje występowania deformacji. A. Granice poligonów na tle mapy średnich prędkości w kierunku pionowym danych serwisu EGMS. B. Klasy ważności wyznaczonych poligonów. C. Maksymalne wartości prędkości pionowych w granicach poligonów.	34
Rys. 20 Podsumowanie zestawienia lokalizacji występowania deformacji z terenami górnictwami.	35
Rys. 21 Lokalizacje występujących deformacji ciągłych, istotnych w skali kraju.	36
Rys. 22 Lokalizacja numer 5 (Rys. 21) – KWB „Turów”. Mapa średnich prędkości w kierunku pionowym, pozyskanych z serwisu EGMS dla okresu 2016-2020.	36
Rys. 23 Lokalizacja numer 8 (Rys. 21) – KWB „Bełchatów”. Mapa średnich prędkości w kierunku pionowym, pozyskanych z serwisu EGMS dla okresu 2016-2020.	37
Rys. 24 Lokalizacja numer 9 (Rys.21) – Lubelskie Zagłębie Węglowe. Mapa średnich prędkości w kierunku pionowym, pozyskanych z serwisu EGMS dla okresu 2016-2020.	38
Rys. 25 Lokalizacje numer 18, 20 i 28 (Rys. 21) – wydobywanie gazu ziemnego pod Gorzowem Wielkopolskim. Mapa średnich prędkości w kierunku pionowym, pozyskanych z serwisu EGMS dla okresu 2016-2020.	38
Rys. 26 Lokalizacja numer 23 (Rys. 21) – Legnicko-Głogowski Okręg Miedziowy. Mapa średnich prędkości w kierunku pionowym, pozyskanych z serwisu EGMS dla okresu 2016-2020.	39
Rys. 27 Lokalizacja numer 24 (Rys. 21) – Żuławy Wiślane. Mapa średnich prędkości w kierunku pionowym, pozyskanych z serwisu EGMS dla okresu 2016-2020.	40
Rys. 28 Lokalizacja numer 25 (Rys. 21) – Wieliczka. Mapa średnich prędkości w kierunku pionowym, pozyskanych z serwisu EGMS dla okresu 2016-2020.	41
Rys. 29 Lokalizacja numer 26 (Rys. 21) – wydobywanie gazu ziemnego w Przeworsku. Mapa średnich prędkości w kierunku pionowym, pozyskanych z serwisu EGMS dla okresu 2016-2020.	41
Rys. 30 Mapa deformacji powierzchni terenu w kierunku pionowym na podstawie danych serwisu EGMS dla okresu 2016-2020.	43
Rys. 31 Mapa deformacji powierzchni terenu w kierunku poziomym wschód-zachód na podstawie danych serwisu EGMS dla okresu 2016-2020.	44

Spis Tabel

Tab. 1 Występowanie punktów pomiarowych PS z serwisu EGMS na poszczególnych klasach pokrycia terenu warstwy Corine Land Cover.	26
Tab. 2 Pary występujących na obszarze Polski zakresów czasowych dla zestawów danych punktowych z serwisu EGMS poziomu L3.....	27
Tab. 3 Klasy ważności lokalizacji występowania deformacji w zależności od średniej prędkości punktów PS oraz od powierzchni poligonu. Klasa „1” - niższa klasa ważności, klasa „2” – średnia, klasa „3” – najwyższa klasa.	33

Wstęp

Zadanie „Interferometryczny Monitoring Powierzchni Terenu Polski – etap II” to kontynuacja projektu „InMoTeP – etap I” realizowanego w latach 2018-2020. Ma on na celu monitorowanie zachodzących deformacji powierzchni terenu z pułapu satelitarnego i informowanie o wynikach organów administracji samorządowej. W ramach etapu II dostarczono kompleksowy obraz stanu osiadania i wypiętrzania powierzchni terenu dla obszaru całego kraju i udostępniono w ramach usług geoportalu PIG-PIB.

Monitorowanie zagrożeń wynikających ze zmian powierzchni terenu, szczególnie na obszarach górniczych i pogórnich, jak również osuwiskowych, jest kluczowe dla zapewnienia bezpieczeństwa i stabilności infrastruktury oraz ochrony życia mieszkańców. Systematyczna obserwacja pozwala na wczesne wykrywanie deformacji, co umożliwia szybką reakcję i minimalizację potencjalnych szkód. Ponadto, regularne monitorowanie pomaga zrozumieć długoterminowe skutki działalności górniczej i jej wpływ na środowisko, co jest niezbędne dla planowania zrównoważonego rozwoju tych terenów. Bez ciągłej kontroli, ryzyko wystąpienia groźnych zjawisk, takich jak osuwiska czy zapadliska, znacząco wzrasta. Ocena wpływu działalności człowieka na deformacje terenu jest niezwykle istotna również w kontekście ochrony środowiska naturalnego. Regularna obserwacja pozwala na identyfikację negatywnych skutków takich działań, jak urbanizacja, rolnictwo czy przemysł. Dzięki systematycznemu monitorowaniu można wdrażać odpowiednie środki zapobiegawcze i naprawcze, chroniąc tym samym ekosystemy przed dalszymi zniszczeniami. Ponadto, takie działania umożliwiają lepsze zarządzanie zasobami naturalnymi, co jest kluczowe dla zrównoważonego rozwoju i zachowania równowagi ekologicznej.

Deformacje, mogące świadczyć o zachodzących naturalnych procesach oraz tych wywołanych eksploatacją surowców metodą odkrywkową i podziemną, zostały przedstawione w postaci mapy rastrowej i serwisu WMS. Dane do opracowania zostały pozyskane z europejskiego systemu European Ground Motion Service, będącego jedną z najnowszych usług Copernicus Europejskiej Agencji Środowiska.

Nadrzędnym celem zadania było wsparcie dla administracji samorządowej i innych podmiotów publicznych w zakresie przeciwdziałania zagrożeniom geologicznym, szczególnie na obszarach podlegających zmianom terenu, ale nie objętych stałym monitoringiem, takich jak tereny pogórnice. Opracowana została usługa informacyjna o deformacjach powierzchni terenu dla obszaru całego kraju, ze szczególnym uwzględnieniem obszarów kluczowych. Cel ten wychodzi naprzeciw rozwojowi nowoczesnych technik monitoringu zmian terenu, jakimi są przetworzenia interferometryczne scen satelitarnych pozyskanych w paśmie radarowym. Pozwalają one śledzić zmiany powierzchni terenu z niespotykaną do tej pory rozdzielczością czasową jak i przestrzenną. Szczegółowe analizy dynamiki zmian powierzchni terenu na obszarach kluczowych, o szczególnym znaczeniu dla gospodarki narodowej wychodzą naprzeciw potrzebom administracji samorządowej, która nie ma obecnie narzędzi do oceny zagrożeń infrastruktury technicznej, związanych z osiadaniem na powierzchni terenu po zakończeniu eksploatacji. Jest to szczególnie ważne na obszarach zlikwidowanych zakładów górniczych, gdzie nie prowadzi się pomiarów mobilności terenu, pomimo, że deformacje na tych terenach nadal zachodzą prowadząc do powstawania zagrożeń dla infrastruktury budowlanej, drogowej i przesyłowej.

Konieczność realizacji projektu wynika z obowiązku wypełniania zadań państwowej służby geologicznej (ustawa z dnia 9 czerwca 2011 r Prawo geologiczne i górnicze (Dz.U. z 2016, poz. 1131 z późn. zm.), w tym między innymi zadania - rozpoznawania i monitorowania zagrożeń geologicznych (art. 162, ust. 1, pkt. 10 ustawy pgg). Obecnie w

Polsce nie ma systemu jednolitego monitorowania deformacji powierzchni terenu wywołanymi naturalnymi zjawiskami geologicznymi czy też będących skutkiem działalności antropogenicznej. Bardzo często deformacje te zachodzą bardzo wolno, przez co nie są zauważane przez człowieka. Nie mniej jednak nawet powolne zmiany prowadzą w dłuższej perspektywie do uszkodzeń i zniszczeń obiektów budowlanych. Wykonywanie cyklicznych pomiarów obszaru całego kraju wydaje się koniecznością wynikającą z odpowiedzialności PSG, która powinna rozpoznawać i monitorować zagrożenia geologiczne. Mapy deformacji wskażą miejsca, gdzie deformacje zachodzą i gdzie można spodziewać się ewentualnego zagrożenia dla obiektów budowlanych. Wiedza o tych obszarach jest szczególnie pożądana przez organy administracji samorządowej, zwłaszcza na obszarach, gdzie podziemna eksploatacja surowców skalnych została zakończona. Na obszarach tych deformacje powierzchni terenu zachodzą zazwyczaj jeszcze długo (nawet dziesiątki lat) po zamknięciu i likwidacji zakładów górniczych. Samorządy zostają same z problemem, nie będąc na to gotowe.

Niniejszy raport stanowi opis prac przeprowadzonych w celu analizy deformacji zachodzących na powierzchni całego kraju oraz efektów rzeczowych będących ich wynikiem (map, warstw rastrowych, usług WMS).

1. Budowa geologiczna Polski

Obszar Polski położony jest na trzech jednostkach tektonicznych: platformie wschodnioeuropejskiej, platformie zachodnioeuropejskiej oraz orogenie karpackim (Rys. 1). Platforma wschodnioeuropejska zajmuje N i NE część polski. Obydwie platformy oddziela od siebie granica tektoniczna określana przez badaczy jako strefa szwu transeuropejska (TESZ) o przebiegu NW-SE.

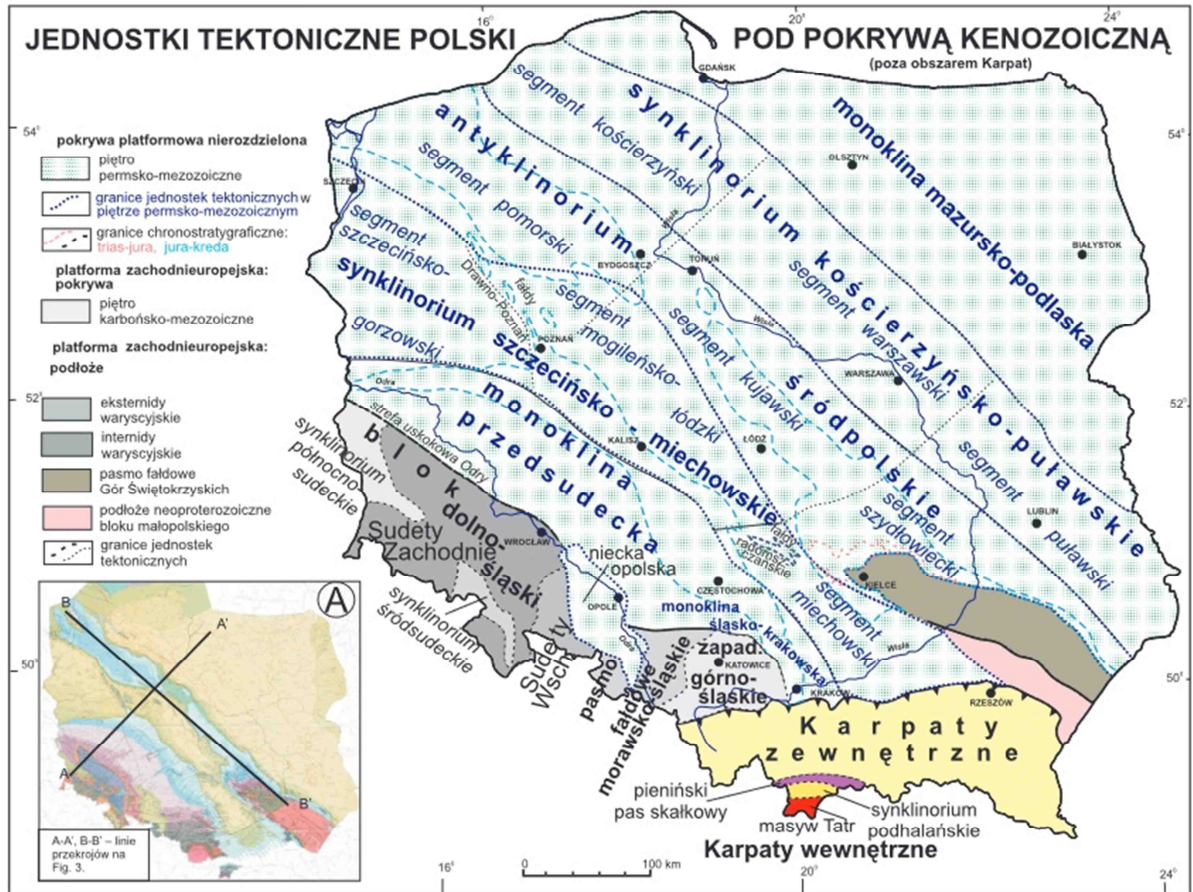


Rys. 1 Podział Polski na trzy megajednostki tektoniczne (Dandlez, 1993).

Platforma wschodnioeuropejska posiada, zbudowane ze skał krystalicznych podłoże będące jej fundamentem przykrytym przez pokrywę osadową, która rozwijała się na powierzchni w wyniku procesów skałotwórczych (np. sedimentacji) w okresie od neoproterozoiku do kenozoiku. Miąższość pokrywy osadowej platformy wschodnioeuropejskiej w obrębie granic Polski nie przekracza 5000 m.

Powierzchnia stropu fundamentu krystalicznego platformy Wschodnioeuropejskiej jest nachylona w kierunku SW. Podczas sedimentacji pokryw osadowych następowały ruchy pionowe przyczyniając się do powstania szeregu jednostek tektonicznych: syneklizy prebałtyckiej, anteklizy mazurskiej, syneklizy podlaskiej oraz lubelsko-podlaskiej struktury zrębowej. Anteklizy (obniżenia) charakteryzują się większymi miąższościami poszczególnych ogniw względem synekliz. Na nich zalegają skały permo-mezozoiczne deponowane w tzw. basenie polskim rozwiniętym wzdłuż strefy T-T, osiągając w jej osi największe miąższości.

Platforma zachodnioeuropejska jest młodsza od graniczącej z nią od północy wschodnioeuropejską. Kratoniczne podłoże platformy zbudowane jest z krystalicznych skał neoproterozoiku i paleozoiku, które ulegały wielokrotnemu fałdowaniu podczas orogenezy: kadomskiej, kaledońskiej i hercyńskiej. Pokrywy osadowe powstawały od końca karbonu po erę kenozoiczną. Od południa platforma zachodnioeuropejska graniczy z orogেনem alpidów (Karpatai), nasuniętych na platformę podczas orogenezy alpejskiej. Platforma Zachodnioeuropejska składa się z kilku dużych bloków (Rys. 2): górnośląskiego, małopolskiego, pasma fałdowego gór świętokrzyskich oraz bloku dolnośląskiego.



Rys. 2 Jednostki tektoniczne Polski pod pokrywą kenozoiczną (Żelaźniewicz i in., 2011). Wstawka A (lewy dolny róg) – Mapa geologiczna Polski bez utworów kenozoiku (Dandlez i in., 2000) z linią przekroju A-A' (Rys. 3).

Blok dolnośląski położony w południowo-zachodniej Polsce jest oddzielony od położonej na północ monokliny przedsudeckiej głębokim uskokiem środkowej Odry. Blok dolnośląski stanowi fragment saksońsko-turyńskich warwyscytów, uformowany podczas tej orogenezy, a następnie odmłodzony podczas orogenezy alpejskiej, która nadała Sudetom zrębowy charakter. Blok dolnośląski można podzielić na szereg jednostek, z których część stanowi jednostki podłoża warwyscyjskiego, a pozostałe są jednostkami platformowymi. Do najważniejszych jednostek należą: masyw łużycko-izerski, granitoidowy masyw karkonosko-izerski, masyw Gór Sowich, masyw strzeliński, masyw gnejsowy Wądroża Wielkiego, ofiolit sudecki, struktura fałdowa Świebodzic, masyw kłodzko-złotostocki, kopuła orlicko-snieżnicka oraz liczne metamorficzne pasma fałdowe. Poszczególne jednostki są wyraźnie oddzielone uskokiemi. Dominują tu odporne na wietrzenie skały metamorficzne powstające w różnych warunkach temperatury i ciśnienia. W obrębie bloku dolnośląskiego wyróżnia się dwa duże baseny z rozwiniętym profilem skał osadowych w wieku od karbonu do górnej kredy: synklinorium północnosudeckie oraz nieckę śródsudecką.

Granicząca od południa z blokiem dolnośląskim monoklina przedsudecka zbudowana jest przez skały sukcesji perm-mezozoicznej zapadających homoklinalnie w kierunku północno-wschodnim, stanowi równocześnie pokrywę platformową bloku dolnośląskiego.

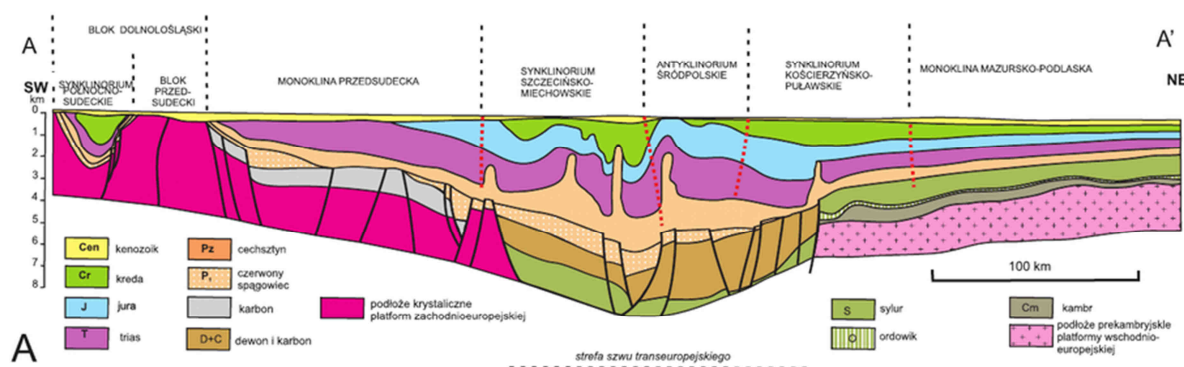
Blok górnośląski jest fragmentem północnej części terranu zwanego Brunowistulią. Granice wyznaczają uskoki Kraków- Lubliniec (NE) oraz prypeninińska strefa uskoku (S). Podłoże krystaliczne bloku górnośląskiego wydatowanego na neoproterozoik, powstało

prawdopodobnie w wyniku tektonicznych procesów metamorficznych związanych z ruchami awalońsko-kadomskimi. Na znaczną część bloku małopolskiego nasunięty jest od południa orogen karpacki. Na cokole krystalicznym rozwijała się sedimentacja skał klasyticznych i węglanowych obejmująca okres od ediakaru do dewonu. Piętro dewońsko-karbońskie tworzy zapadlisko górnośląskie zbudowane ze skał fliszowych tzw. kulm oraz węgla. Te ostatnie są eksploatowane w ramach Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW).

Od kierunku NE blok górnośląski graniczy z blokiem małopolskim stanowiącym fragment skorupy prekambryjskiej pokrytej osadami. Od strony NE za granice uznano uskoki świętokrzyskie. Podłoże bloku małopolskiego tworzą silikoklastyczne utwory wieku prekambryjskiego, w mniejszym lub większym stopniu przeobrażone przez procesy metamorficzne. Powyżej położone są skały klastyczne i węglanowe wieku ordowik-sylur.

Położone wyżej na północ pasmo fałdowe gór świętokrzyskich można podzielić na dwie jednostki: kielecką oraz łysogórską, rozgraniczoną przez uskoki świętokrzyskie. W ich obrębie wyróżnia się kilka mniejszych jednostek tektonicznych (synklin i antyklin). Najstarszym piętrzem strukturalnym Gór Świętokrzyskich są kambryjskie skały ilaste sfałdowane w trakcie tzw. fazy sandomierskiej. W okresie ordowik-sylur powstawały osady zarówno głęboko-, jak i płytkomorskie (np. łupki graptolitowe oraz szarogłazy niewachlowskie) sfałdowane w orogenezie kaledońskiej. Powyżej znajduje się kolejne piętro strukturalne złożone ze skał dewonu (zdominowanych przez węglany) oraz karbonu (zdominowanego przez osady drobnoklastyczne tzw. kulmu). Utwory tego piętra były fałdowane podczas ruchów waryscyjskich, przy czym blok łysogórski podlegał tylko tym ostatnim ruchom górotwórczym. Świętokrzyskie pasmo fałdowe stanowiące trzon paleozoiczny otacza obrzeżenie mezozoiczne położone niezgodnie na skałach paleozoiku.

Piętro permo-mezozoiczne osadowych pokryw platformowych powstawało w rozległym basenie sedimentacyjnym powstałym wzdłuż linii T-T. Nagromadziły się tu osady permskie reprezentujące wulkanity oraz następujące sukcesywnie osady klastyczne czerwonego spągowca oraz transgresyjne osady cechsztynu (kompleksu skał charakteryzujących się powtarzającą sekwencją: mułowce, iłowce wapienne, dolomity, sole, gipsy i anhydryty). Nad osadami permu zgodnie osadzały się skały mezozoiku: triasu, jury i kredy. Następnie w wyniku ruchów laramijskich nastąpiła inwersja basenu polskiego, co doprowadziło do powstania szeregu antyklin i synklin, a utwory soli w wyniku naprężeń uległy uplastycznieniu i przebiły utwory młodsze, pnąc się ku górze tworząc tzw. diapiry solne. W części centralnej basenu znajduje się antyklinorium środkowopolskie (Rys. 3) charakteryzujące się największymi miąższościami utworów permo-mezozoicznych. Następnie od północy graniczy z synklinorium kościelżyńsko-puławskim przechodząc dalej na północ w monoklinę mazursko-podlaską o niewielkim kącie zapadania warstw w kierunku NE. Od południa antyklinorium środkowopolskie graniczy z synklinorium szczecińsko-miechowskim przechodzącym dalej na południe w monoklinę przedsudecką.



Rys. 3 Przekrój geologiczny przechodzący prostopadle do struktur tektonicznych wzdłuż linii SW-NE (Żelaźniewicz i in., 2011).

Od południa na platformę zachodnioeuropejską nasunięty został orogen karpacki powstały w wyniku zamykania się poszczególnych basenów oceanu Tetydy. Karpaty wykazują ciągłość strukturalną z resztą pasm alpejskich. Na terytorium Polski Karpaty dzieli się na: wewnętrzne i zewnętrzne. W skład Karpat wewnętrznych wchodzi Masyw Tatrzański zbudowany z skał krystalicznych oraz położonych i następnie sfałdowanych w kredzie osadowych skał mezozoicznych. Kolejnym elementem jednostki wewnętrznej jest Niecka Podhalańska zbudowana z sfałdowanych w neogenie skał fliszowych tzn. na przemian lekkich piaskowców, mułowców i łupków powstających w środowisku głębokomorskim tworząc serie osadowe o dużej miąższości. Granice między Karpatami Wewnętrznymi i Zewnętrznymi stanowi Pieniński Pas Skałkowy (PPS) powstały w strefie kolizji mikrokratonu Apuli z płytą zachodnioeuropejską. PPS zbudowany jest głównie z mezozoicznych skał węglanowych i charakteryzuje się bardzo skomplikowaną budową strukturalną. Dalej na północ występują Karpaty Zewnętrzne charakteryzujące się płaszczowinową budową tzn. poszczególne, kolejne jednostki są nasunięte na siebie w wyniku działania procesów tektonicznych związanych z zamykaniem się poszczególnych basenów sedymenacyjnych i utworzeniem z ich osadów przyzmy akrecyjnej. W polskiej części Karpat fliszowych od południa występują w następującej po sobie kolejności płaszczowiny: magurska, grybowska, dukielska, śląska, podśląska, skolska i stebnicka. Utwory fliszu karpackiego (wiek: Kreda górna- miocen) zostały sfałdowane, a następnie nasunięte na osady młodsze (miocen) wypełniające basen zapadliska przedgórskiego nazwany Zapadliskiem Przedkarpackim. Z budową geologiczną Karpat zewnętrznych oraz Zapadliska Przedkarpackiego wiąże się obecność niewielkich lecz dość licznych złóż węglowodorów: ropy naftowej i gazu ziemnego. Współcześnie największym udokumentowanym złożem gazu ziemnego w ww. utworach jest to odkryte w rejonie Przemyśla.

Na początku ery kenozoicznej nastąpiło stopniowe wypłcenie zbiorników morskich, zachodzące równocześnie z laramijskimi ruchami górotwórczymi. Obszar ten wielokrotnie ulegał procesom erozji oraz transgresji morskiej. W eocenie powstawały osady lądowe głównie: piaski, iły oraz węgle brunatne deponowane w warunkach jeziornych na które wkroczyły osady transgresyjne (margle, piaski glaukonitowe i iły). Oligocen w Polsce pozakarpackiej charakteryzował się depozycją osadów ilastych w warunkach epikontynentalnego zbiornika morskiego. W okresie miocenu obszar dzisiejszej Polski miał charakter lądowy. Na powierzchni osadzały się skały drobno-okruchowe i ilaste, zaś na obszarach rowów tektonicznych oraz zapadliskach osady węglonośne (w rejonie Bełchatowa i Konina mają znaczenie przemysłowe). Najwyższym ogniwem miocenu są iły pstre

(poznańskie) rozpowszechnione na dużym obszarze i sedymentujące w zbiorniku śródlądowym. Depozycja iłów poznańskich obejmowała również dolny pliocen.

W czwartorzędzie klimat obszaru dzisiejszej Polski podlegał cyklicznym i znaczącym zmianom. Klimat uległ ochłodzeniu, co skutkowało wkroczeniem lądolodu. Okres ten charakteryzuje się wielokrotnym wkraczaniem pokryw lodowych (glacjalów) rozgraniczonych okresami cieplejszymi (interglacjalami). Zlodowacenia podzielono na południowo-, środkowo-, północnopolskie, które te z kolei dzielą się na dokładniejsze jednostki klimatostratygraficzne. Procesy związane z transgresją i regresją zostawiły miększe pokrywy osadów polodowcowych, takich jak: gliny zwałowe, pisaki polodowcowe oraz ily zastoiskowe. Pod koniec plejstocenu lądolód wycofuje się z obszaru Polski. W holocenie kształtuje się współczesna sieć rzeczna oraz następuje sedymentacja iłów, namułów jeziornych, torfów oraz produktów wietrzenia skał różnej genezy kształtując tym samym współczesny krajobraz Polski.

2. Geozagrożenia występujące na terenie kraju

Gerozagrożenia to termin opisujący zagrożenia przyrodnicze powodowane procesami dynamicznymi zachodzącymi w obrębie atmosfery, litosfery oraz hydrosfery. Polska pod względem występowania geozagrożeń nie jest narażona na czynniki powodujące katastrofy naturalne tak jak inne kraje położone na obszarach aktywnych sejsmicznie lub położone w innych strefach klimatycznych. Nie znaczy to jednak że jest całkowicie pozbawiona możliwości ich wystąpienia.

Idealnym przykładem są trzęsienia ziemi, które w obszarach asejsmicznych oraz pansejsmicznych takich jak Polska nie powinny występować, lecz dość często pojawiają się tzw. „zdarzenia sejsmiczne” (ang. seismic events) powodowane najczęściej przez działalność górniczą. Dodatkowo sporadycznie na obszarach uważanych za asejsmiczne może dojść do rozładowania skumulowanych w czasie geologicznym naprężeń. Przykładem może być trzęsienie ziemi z 21 września 2004, które odczuwalne było na obszarze północnej Polski, którego epicentrum zlokalizowano w rejonie kaliningradzkim i osiągnęło siłę 6 stopni w skali Richtera. Powodem wstrząsu były postglacjalne ruchy izostatyczne półwyspu skandynawskiego. Historycznie na obszarze naszego kraju również miały miejsca odczuwalne wstrząsy powodujące uszkodzenia budynków.

W rejonie pasów orogenicznych takich jak Karpaty i Sudety większość wstrząsów powiązana jest z uskokami zlokalizowanymi głęboko w skorupie ziemskiej. Rzadko energia wstrząsu przekracza magnitudę o wartości 5. Młodszy orogen Karpacki wykazuje znacznie większą od pozostałej części kraju aktywność sejsmiczną (zwłaszcza jej południowa część na terytorium Rumunii) związana z występowaniem nagromadzonych w przeszłości naprężeń w starych strefach subdukcji. W Sudetach bardzo rzadkie oraz o niewielkiej magnitudzie epizody sejsmiczne powiązane są z sudeckim uskokiem brzeżnym oraz uskokiem środkowej Odry.

Do najczęstszych przyczyn trzęsień ziemi w Polsce są:

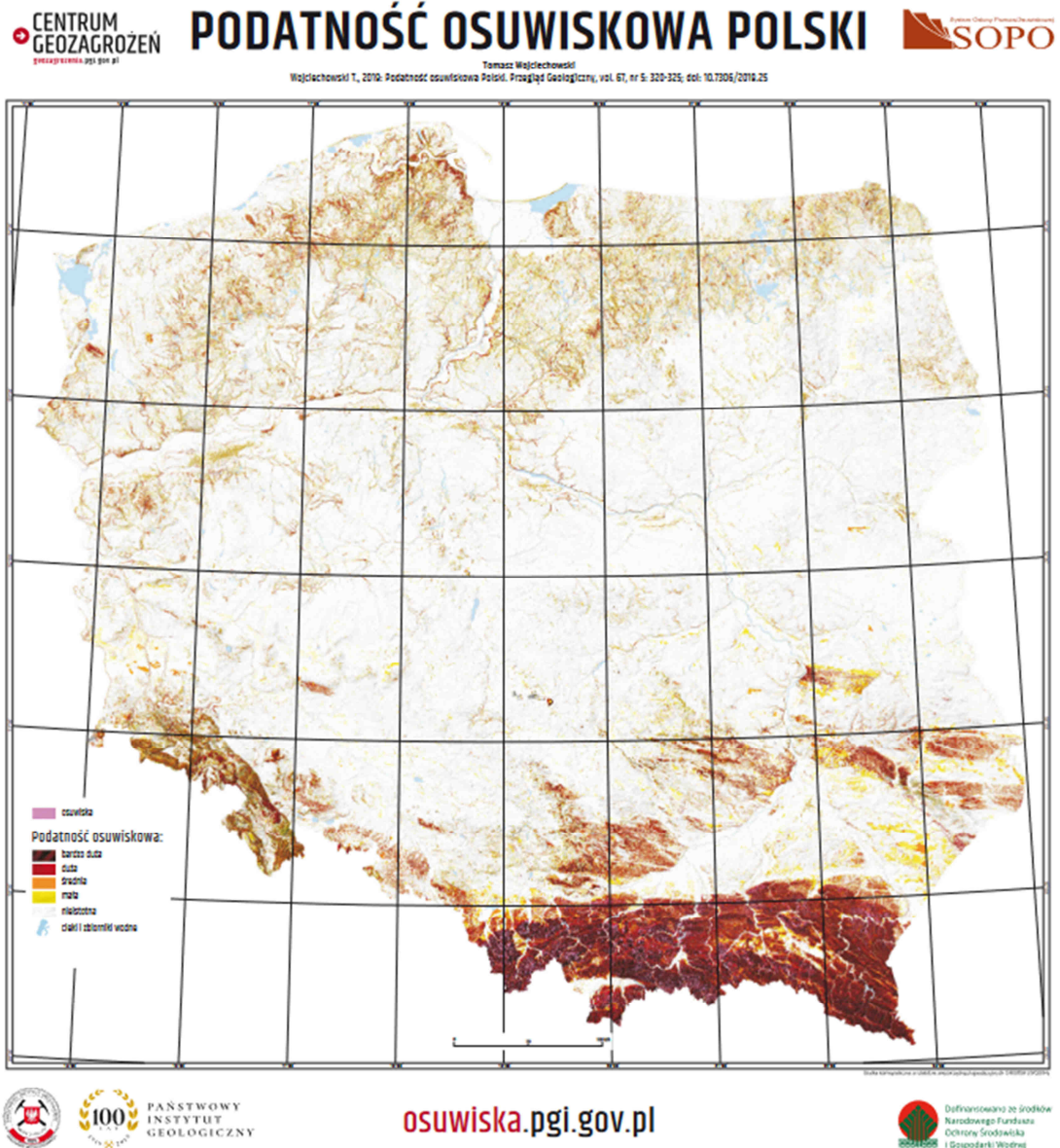
- działalność górnicza np. osiadanie stropów podziemnych wyrobisk, tąpnięcia, eksplozje;
- zapadanie się stropów jaskiń na obszarach krasowych;
- zapadliska związane z występowaniem wysadów solnych tzw. diapirów;
- osuwiska.

Do głównych zjawisk powodujących znaczne straty w mieniu, a niekiedy powodujące również utratę życia ludzkiego w Polsce należy zaliczyć powierzchniowe ruchy masowe

ziemi. Pojęcie to obejmuje osuwiska, obrywy skalne, spełzywania gruntu oraz spływy. Zjawiska te mają zarówno nagły i gwałtowny przebieg, jak również mogą być bardzo powolne i możliwe do rejestracji za pomocą specjalistycznej aparatury pomiarowej. Ruchy masowe to procesy opisujące przemieszczanie się mas skalnych, osadów oraz zwietrzeliny wzdłuż stoków. W Polsce najczęstszym zjawiskiem wywoływanym w wyniku ruchów masowych są osuwiska. Osuwiska to formy geologiczne powstałe w wyniku przemieszczenia mas skalnych lub gruntowych wzdłuż tzw. powierzchni poślizgu. Cechą szczególną osuwisk jest obecność specyficznych elementów rzeźby: skarp, progów akumulacyjnych, pagórków, czół, szczelin, rowów, wałów oraz licznych przejawów wód takich jak, wysięki źródłiska czy podmokłości. Charakterystyczne jest również przemieszczenie liniowych elementów pokrycia stoków: dróg, linii przesyłowych, ciągów upraw czy bruzd.

Poniżej powierzchni terenu występuje powierzchnia odkucia, wzdłuż której następuje ruch mas zwanych koluwium. Część osuwiska, gdzie koluwium ulega akumulacji nazywamy jęzorem, zaś fragment obejmujący ubytek mas skalnych, strefą oderwania.

Ponad 90 % wszystkich osuwisk na terenie Polski występuje w Karpatach (Rys. 4). Ma to związek z współwystępowaniem szeregu czynników sprzyjających ich powstawaniu. Głównym z nich jest budowa geologiczna masywu Karpat zbudowanego głównie z utworów tzw. fliszu karpackiego. Kolejnym czynnikiem jest stosunkowo duża i gęsta sieć nieciągłości (uskoków i spękań ciosowych), co ma związek z płaszczowinowym (alpejskim) charakterem orogenu karpackiego. Powstawanie osuwisk zależy od szeregu czynników, które dzieli się na aktywne i bierne. Do aktywnych zaliczmy te które ulegają zmianie w czasie: opady, roztopy, wstrząsy sejsmiczne oraz działalność człowieka. Czynniki bierne nie ulegają czasowej zmianie i mają znaczący wpływ na regionalną koncentrację występowania osuwisk. Zaliczamy do nich: nachylenie i morfologię zboczy, rodzaj materiału skalnego, orientacja warstw względem nachylenia stoku oraz obecność nieciągłości tektonicznych, warunki hydrogeologiczne oraz sieć hydrograficzna. Czynniki te mają wpływ na kształtowanie się tzw. podatności osuwiskowej definiowanej jako przestrzenne prawdopodobieństwo wystąpienia osuwisk pod wpływem wymienionych wyżej czynników. Obszar Polski poza karpackiej również nie jest pozbawiony ryzyka osuwiskowego. Zjawiska takie występują dość często w dolinach rzek. Szczególnie warte wyróżnienia są osuwiska występujące w dolinie Wisły (skarpa na odcinku Wyszogród Włocławek oraz rejon Sandomierza). Innym obszarem narażonym na częste występowanie ruchów masowych jest klifowe wybrzeże Morza Bałtyckiego narażonego na procesy abrazji marskiej. Wyraźnym przykładem jest klif w rejonie Jastrzębiej Góry, gdzie w poziomy gliny zwałowej są przełowione łłami warwowymi zwiększając tym samym podatność klifu na osuwanie. Region Sudecki i Świętokrzyski z racji charakteryzuje się niewielką podatnością osuwiskową, a same osuwiska występują sporadycznie, co ma związek występowaniem odpornych mechanicznie skał. Niewielkie, ale dość liczne osuwiska występują na obszarach pokryw lessowych, zwłaszcza na terenach podlegających procesom intensywnej erozji, takich jak np. wąwozy lessowe.



Rys. 4 Mapa podatności osuwiskowej Polski (Wojciechowski, 2019).

Znaczna część osuwisk uruchamiana jest w wyniku intensywnych i długotrwałych opadów oraz wezbrań wód w rzekach. Do takiej sytuacji doszło wiosną 2010 r. na obszarze całych Karpat w wyniku opadów doszło do uruchomienia się 1311 osuwisk, co doprowadzało do katastrofy na skutek której, uszkodzone zostało ok. 1600 budynków, a ewakuacją objęto przeszło pół tysiąca osób.

Do innych przykładów występowania ruchów masowych w Polsce należą również spływy (np. gruzowo-błotne), obrywy skalne, obsypy, procesy spęływania (powolnego przemieszczania się gruntu bez wyraźnej powierzchni odkucia) oraz soliflukcja (spęływanie odmarzniętej płytkiej warstwy gruntu po zmarzniętym podłożu).

Polska jest krajem o drugiej historii górnictwa. Na obszarze Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW) sięga ona 200 lat eksploatacji złóż węgla kamiennego. Podziemne prace wydobywcze powodują powierzchniowe deformacje terenu na wskutek zapadania się

podziemnych wyrobisk. W przypadku GZW powierzchnia obszaru narażonego na występowanie tego typu zjawisk szacuje się na ok. 600 km² (Mizerski W., Graniczny M., 2017).

W ostatnich latach zaobserwowano uaktywnienie oraz przyrost deformacji terenu powiązanych bezpośrednio z działalnością zakładów górniczych, zarówno tych historycznych, jak i współczesnych.

Deformacje te dzieli się na ciągłe i nieciągłe. Deformacje ciągłe nie prowadzą do przerwania powierzchni terenu. W ich wyniku powstają niecki osiadań charakteryzujące się powolnym obniżaniem terenu, gdzie maksymalna wartość deformacji osiągają w części środkowej. Formy tego typu zajmują dużą powierzchnie i często wykraczają poza tereny objęte eksploatacją kopalni. Zjawiskom tego typu mogą towarzyszyć lokalne podtopienia. Deformacje nieciągłe polegają na zerwaniu ciągłości gruntu, całkowitym zniszczeniu powierzchni terenu oraz pojawieniem się specyficznych form takich jak: zapadliska, uskoki, progi oraz szczeliny. Szczególnie niebezpieczne z punktu zagrożeń dla życia i mienia ludzkiego wydają się zapadliska. Zapadlisko jest nagłym ubytkiem materiału skalnego skutkujący zawaleniem się stropu powstałej pustki. Zapadlisko na powierzchni tworzy formę o okrężnym kształcie, zaś w jego przekrój przypomina kształtem stożek. Zapadlisko w dolnej części może przyjmować rozmaite kształty np. dzwony, kominy lub rowy. W Polsce poza obszarem GZW deformacje terenu występują w: Legnicko-Głogowskim Zagłębiu Miedziowym, Lubelskim Zagłębiu Węglowym, miejscach występowania cechsztyńskich wysadów solnych oraz obszarach związanych z eksploatacją gazu ziemnego. Szczególnie ciekawe wydają się deformacje terenu wynikające z mobilności wysadów solnych (wieku permskiego) tworzących diapiry. Struktury te powstają w wyniku halokinezy, czyli ruchu soli pod wpływem siły ciężkości (Trusheim, 1957). W rejonach występowania oraz eksplantacji złóż soli kamiennej dochodziło do zdarzeń o charakterze katastroficznym m.in. w Wapnie, gdzie brak zachowania odpowiednich filarów ochronnych w trakcie wydobywania powodował naruszenie czapy gipsowej oraz dostaniem się wody w obręb wysadu, skutkując niekontrolowanym rozpuszczaniem i wypłukiwaniem soli i w rezultacie powiększaniem kawern.

Podczas eksploatacji węgla brunatnego w KWB „Bełchatów” powstał lej depresji, czyli obniżenie zwierciadła wód podziemnych w stosunku do jego średniego położenia z okresu wielolecia. Zjawisko to powoduje obniżenie ciśnienia piezometrycznego i stopniowe, niewielkie osiadanie terenu. Analogiczna sytuacja ma miejsce w rejonie eksploatacji węgla brunatnego w rejonie Konina.

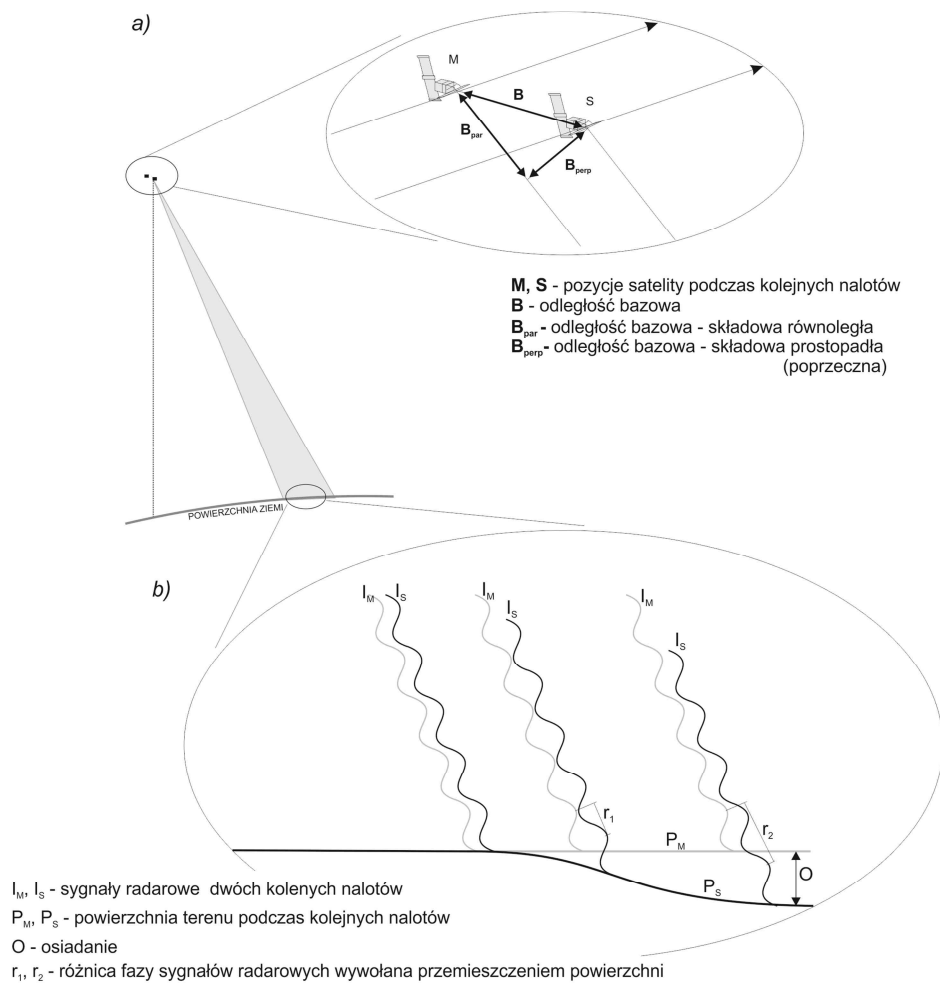
Na przestrzeni ostatnich kilku lat zarejestrowano pojawienie się oraz uaktywnienie licznych zapadlisk. Zjawiska te dokonały uszkodzeń w infrastrukturze oraz naraziły społeczeństwo w rejonie Trzebini (2023), Wapna (2021) oraz Bolesławia (2023).

Część deformacji może mieć także naturalne przyczyny związane z neotektoniką, czyli współczesnymi ruchami skorupy ziemskiej w okresie ustabilizowanego pola naprężeń. Na obszarze Polski metodami geodezyjnymi rejestrowane są pionowe ruchy ziemi. Przykładem mogą być niewielkie pionowe ruchy zaobserwowane w rejonie Mierzei Wiślanej (Zuchniewicz, 2007). Procesy neotektoniczne są ciągle przedmiotem badań wielu naukowców i nie są dokładnie rozpoznane. Metoda interferometrii radarowej może znacząco przyczynić się zbadania ww. zjawisk w skali całego kraju.

Przegląd geozagrożeń występujących w ostatnich latach w Polsce można znaleźć między innymi w Wojciechowski i in. 2021 oraz 2022.

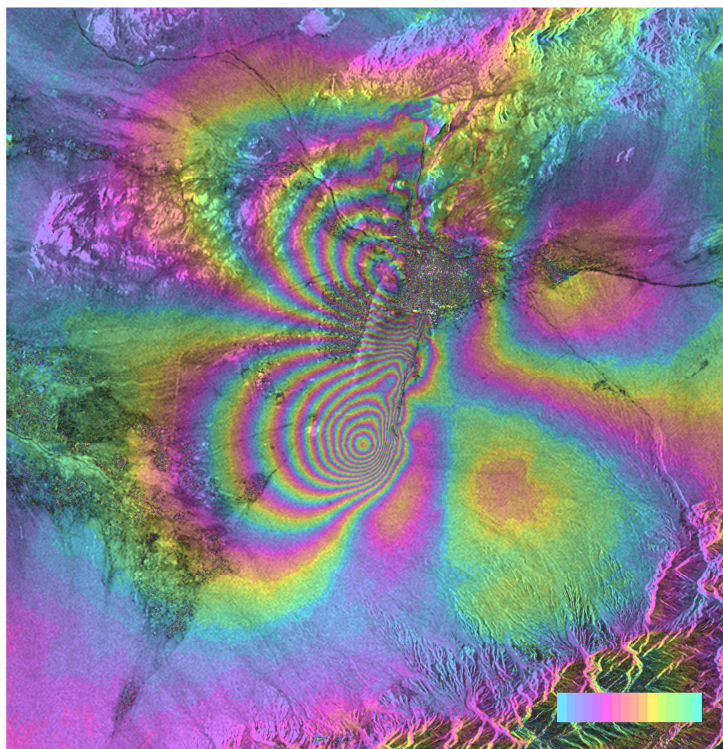
3. Satelitarna Interferometria Radarowa – opis metody

Interferometria SAR (InSAR) to technika służąca do uzyskiwania informacji dotyczących względnych danych wysokościowych (Goldstein i in., 1988). Wykorzystuje ona różnice fazy sygnałów radarowych pochodzących z dwóch obserwacji mikrofalowych typu SAR (Synthetic Aperture Radar) tego samego obszaru (Rys. 5). Dobry przegląd podstaw metodyki, potencjału i obszarów zastosowań InSAR można znaleźć w szeregu prac o charakterze podstawowym: (Bamler, Hartl, 1998; Bürgmann i in., 2000; Massonnet, Feigl, 1998; Perski, 1999). Tradycyjna technika InSAR opiera się na wykorzystaniu interferogramów tj. rastrowych zbiorów przedstawiających różnice fazy pomiędzy dwoma rejestracjami SAR. Pomiar deformacji dokonywany jest w technice Differential InSAR (DInSAR), w której od interferogramu odejmuje się topografię terenu od składowych fazy. Podsumowując, DInSAR wykorzystuje rejestracje SAR wykonywane sekwencyjnie za pomocą jednej anteny SAR w czasie kolejnych przelotów satelity nad tym samym obszarem.



Rys. 5 Geometria i zasada działania D-InSAR.

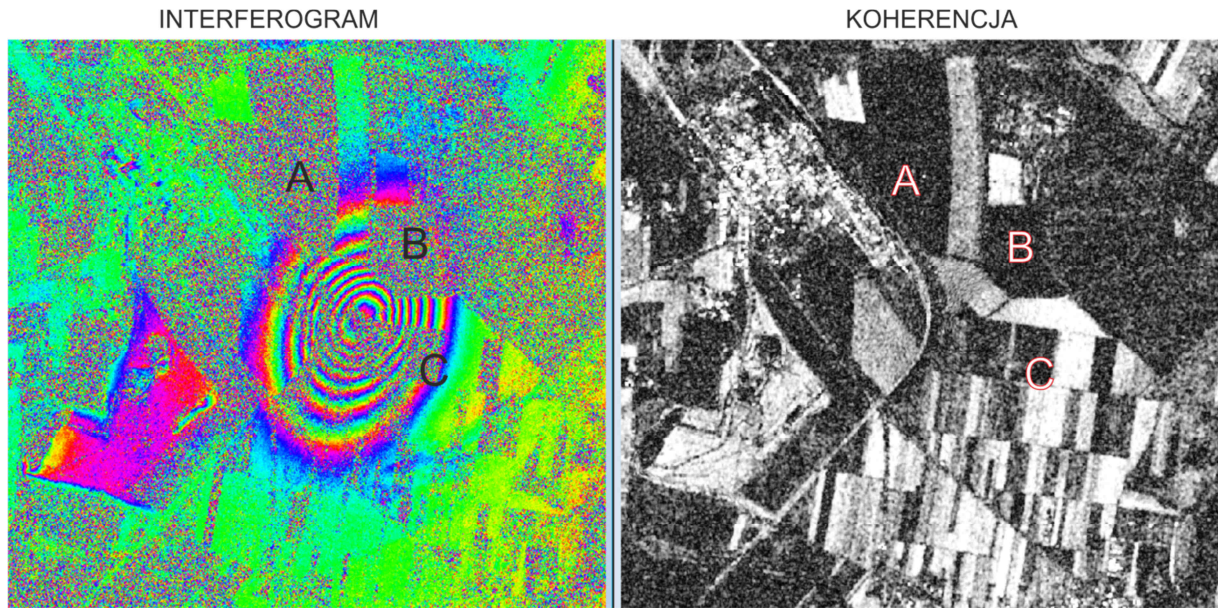
Przetwarzanie interferometryczne danych SAR polega na obliczeniu różnic fazy na podstawie dwóch zobrażeń SAR. Rezultatem tego przetwarzania jest obraz różnic fazy zwany **interferogramem**. Interferogramy można wizualizować w postaci sekwencji barw odpowiadających różnicom fazy zwanych prążkami interferometrycznymi (Rys. 6).



Rys. 6 Przykład interferogramu. Rejon miasta Bam (Iran) dotkniętego trzęsieniem ziemi 26.12.2003 r. Prążki interferometryczne przedstawiają deformację powierzchni terenu powstałą w wyniku tego trzęsienia. Dane SAR z satelity ENVISAT (Perski & Hanssen 2006). Jedna sekwencja prążków (od niebieskiego do zielonego) odpowiada przemieszczeniu o ok 3 cm w kierunku od satelity. Największa deformacja (11 prążków) odpowiada 33 cm obniżenia terenu.

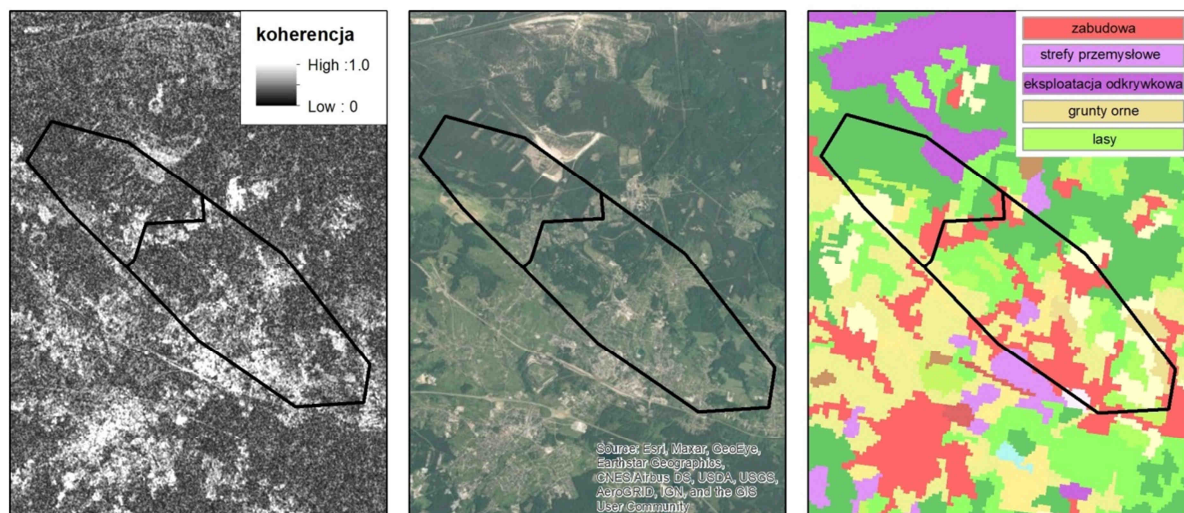
Na degradację jakości interferogramu wpływają błędy atmosfery, szum oraz tzw. koherencja. Jest to wielkość współczynnika korelacji zespolonych wartości sygnału SAR. Największy problem stanowi tzw. dekoherencja czasowa, która związana jest ze zmianami właściwości elektromagnetycznych lub/i pozycją obiektów odbijających fale wewnątrz komórki rozdzielczości czy typem rozpraszania (Perski i in., 2006). Koherencja określa bezpośrednio stopień zgodności fazy sygnałów SAR. Jej wielkość jest zależna bezpośrednio od zakłóceń fazy interferogramu (Cattabeni i in., 1994; Zebker, Villasenor, 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. 7).



Rys. 7 Wpływ koherencji na jakość interferogramu. Interferogram i koherencja dla obszaru górniczego KWK Bogdanka obliczony na podstawie wysokorozdzielczych danych TerraSAR-X. Zazumione obszary A, B, C o niewidocznych prążkach interferometrycznych na interferogramie odpowiadają obszarom o słabej koherencji (ciemne).

Na Rys. 8 przedstawiono obraz koherencji 12-dniowego interferogramu satelity Sentinel-1 dla obszaru Trzebini w porównaniu z obrazem ortofotomapy i pokrycia terenu. Tereny o wysokiej koherencji odpowiadają głównie terenom zabudowanym, przemysłowym bądź terenom odkrytym (kopalnie odkrywkowe). Tereny leśne, jak również łąki, pastwiska i grunty orne cechują się niską koherencją. Obraz koherencji dla obszaru badawczego ilustruje miejsca, gdzie wyniki przetworzeń InSAR będą możliwe do uzyskania. Na obszarach pokrytych roślinnością, informacja o deformacjach za pomocą techniki InSAR nie będzie możliwa do uzyskania, lub będzie mało wiarygodna.



Rys. 8 Obraz koherencji (lewy) dla typowego 12-dniowego interferogramu danych Sentinel-1 dla obszaru górniczego Siersza w zestawieniu z ortofotomapą (środek) i pokryciem terenu Corine Land Cover (prawy). Wysoka koherencja (jasne obszary na obrazie lewym) odpowiadają głównie terenom zabudowanym. Tereny o małej koherencji (ciemne obszary na obrazie lewym) odpowiadają terenom pokrytym roślinnością.

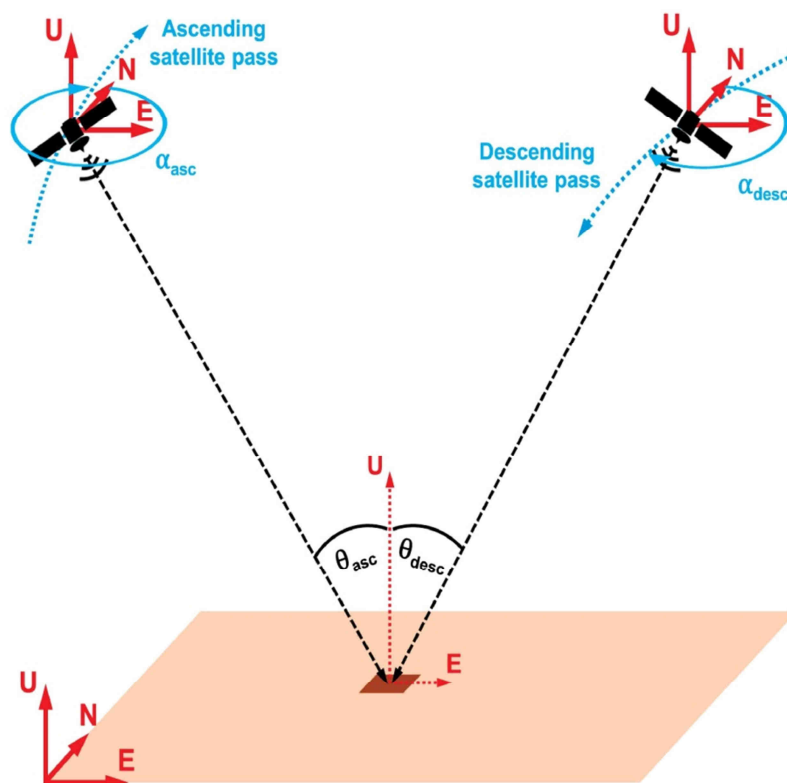
Największe ograniczenia metody InSAR wiążą się z tzw. dekorelacją czasową (stopniową utratą koherencji w czasie), która związana jest ze zmianami właściwości elektromagnetycznych lub/i pozycją rozpraszacza wewnątrz komórki rozdzielczości (Cattabeni i in., 1994; Zebker, Villasenor, 1992). Kolejnym ograniczeniem metody InSAR jest występowanie tzw. artefaktów atmosferycznych. Zróżnicowana zawartość pary wodnej w troposferze a także jej turbulentny charakter są źródłem dodatkowej składowej fazowej sygnału nazywanej atmosferycznym obrazem fazy. W przypadku pojedynczego lub jedynie kilku interferogramów dla danego obszaru efekty atmosferyczne są bardzo trudne lub wręcz niemożliwe do usunięcia, stąd uzyskiwane dokładności pomiarowe są często dużo niższe od oczekiwanych (Hanssen, 2005). Z powodu wymienionych ograniczeń praktyczne użycie metody InSAR jest w większości przypadków zredukowane do danych o małych bazach czasowych, przypadków badania zjawisk o dużych przyrostach deformacji zachodzących w czasie pomiędzy kolejnymi rejestracjami, badania obszarów pozbawionych roślinności, przypadków, gdy oba obrazy użyte do konstrukcji interferogramu zostały zarejestrowane w tych samych bądź bardzo zbliżonych warunkach atmosferycznych.

Ominięciem tych ograniczeń są metody bazujące na analizie serii czasowych danych SAR. Celem tych metod jest odtworzenie historii deformacji danego obszaru w oparciu o analizę serii czasowych interferogramów. Takie podejście, zapewniające redundancje danych umożliwia dekompozycję fazy interferometrycznej na składowe i wyznaczenie przyrostów deformacji z bardzo wysoką dokładnością (w granicach nawet 1mm/rok). Serie czasowe interferogramów zawierają sporo obszarów, jak i całych interferogramów, o niskich wartościach koherencji interferometrycznej. Aby móc takie dane wykorzystać należy z nich wyseparować piksele zachowujące wysoką koherencję dla całej serii lub jej części. Piksele o wysokiej koherencji są to tzw. rozpraszacze stabilne (z ang. Persistent Scatterers, PS). W rzeczywistości są to obiekty fizyczne, których odbicie dominuje dla danego piksela. Piksele PS charakteryzują się bardzo stabilną w czasie fazą sygnału radarowego, praktycznie niewrażliwą na zmiany geometrii obrazowania oraz warunki atmosferyczne. Mogą nimi być dachy i narożniki budynków, fragmenty różnego rodzaju konstrukcji (mostów, ogrodzeń, itp.), wysokie słupy telegraficzne czy latarnie oraz specjalnie w tym celu konstruowane reflektory (Perissin i in., 2006). Na terenach pozbawionych obiektów infrastruktury rozpraszacze stabilne stanowią np. wychodnie skał. Właściwości PS omówiono szczegółowo w (Perski i in., 2006).

Metoda przetwarzania Persistent Scatterer Interferometry (PSI) służy do wyznaczania wielkości deformacji na podstawie analizy wieloczasowej serii danych SAR. Wykorzystuje ona właściwości rozpraszaczy stabilnych (PS). Była ona pierwszą opracowaną i wdrożoną w praktyce metodą analiz wieloczasowych SAR (Ferretti et al. 1999, Crosetto i in., 2015). Podstawowym warunkiem prawidłowego przeprowadzenia dekompozycji sygnału i wyłonienia składowej odpowiadającej za deformację jest odpowiednia liczba obserwacji, stąd wymagane co najmniej 20 interferogramów. Tak duża liczba obserwacji umożliwia dokładne wyznaczenie modelu deformacji oraz modelu obrazu atmosfery (APS). Należy podkreślić, że w metodzie PSI, podobnie jak w przypadku InSAR mamy do czynienia z wyznaczeniem wartości deformacji o charakterze względnym, tak w czasie, jak i przestrzeni. Na wstępie przetwarzania konieczny jest wybór tzw. sceny referencyjnej, będącej jednocześnie odniesieniem czasowym dla wszystkich pozostałych obserwacji. Wyboru tego dokonuje się w taki sposób, aby bazy czasowe i geometryczne pomiędzy sceną referencyjną i pozostałymi były jak najmniejsze.

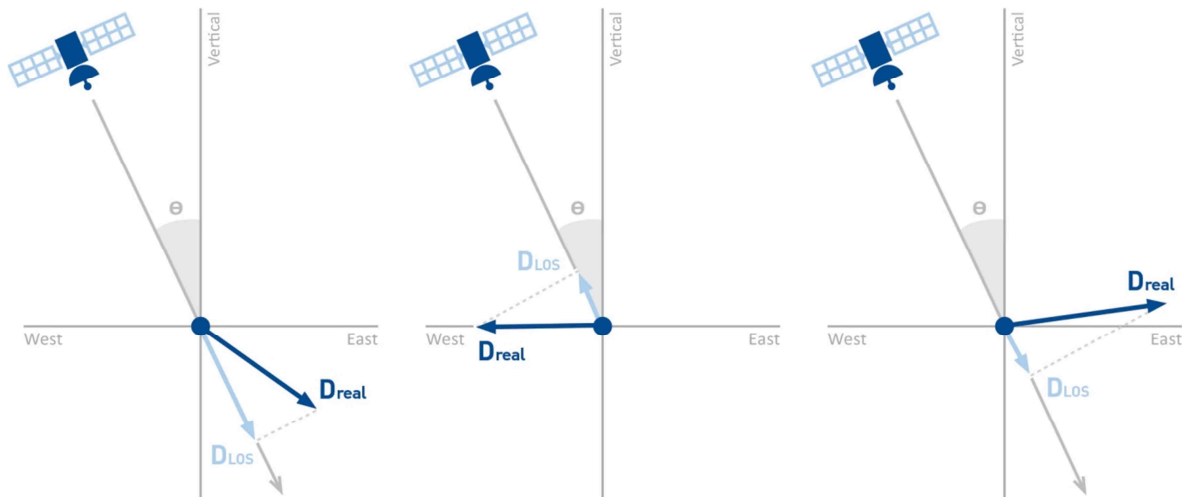
Kluczowym elementem metody PSI jest wykrycie rozpraszaczy stabilnych PS a następnie wyodrębnienie informacji fazowej dla tych właśnie punktów. Jednym z najistotniejszych ograniczeń tej metody pomiarowej jest brak możliwości zaplanowania rozmieszczenia punktów pomiarowych nazywanych stabilnymi rozpraszaczami. Lokalizacja ich zależy od właściwości obiektów znajdujących się na terenie. Wyniki przetwarzania ściśle zależą od koherencji. W konsekwencji wszelkie gwałtowne zmiany w charakterystyce odbicia sygnału w obrębie analizowanej serii czasowej powodują utratę koherencji a tym samym informacji o ewentualnych przemieszczeniach. Zmiany charakterystyki odbicia mogą być powodowane przez szereg czynników takich jak: wzrost roślinności, zmiany ulistnienia, zmiany wilgotności, pojawianie się i zanikanie pokrywy śnieżnej. Do zmian środowiskowych wywołujących utratę koherencji zaliczyć można również roboty ziemne, prace budowlane i rozbiórkowe a także pojawianie się zapadlisk. Najlepszą koherencją, a tym samym największą gęstością punktów charakteryzują się obszary pozbawione roślinności – wychodnie skalne, odkrywki a w warunkach Polski przede wszystkim tereny zurbanizowane, przemysłowe oraz szlaki komunikacyjne.

Wynikowe pomiary deformacji powierzchni terenu są ograniczone do jednowymiarowej (1D) geometrii widoku wzdłuż kierunku propagacji sygnału radarowego satelity, line-of-sight (LOS). Geometria „widzenia” satelity LOS jest określona przez kąt padania θ , ang. incidence angle (kąt między lokalnym zenitem a wektorem „patrzenia” satelity) oraz kąt kursu satelity α , ang. satellite heading. Obserwacje LOS są wykonywane w kierunku prostopadłym do kursu satelity (Rys. 9). Dane mogą być pozyskiwane w dwóch geometriach obserwacyjnych – orbity wschodzącej (ang. ascending), kiedy satelita porusza się z południa na północ oraz orbity schodzącej (ang. descending), kiedy satelita porusza się z północy na południe.



Rys. 9 Schemat geometrii obrazowania SAR (Fuhrmann i Garthwaite, 2019).

Należy mieć na uwadze, iż wyniki pomiaru ograniczone do kierunku LOS będą stanowić przybliżenie rzeczywistych deformacji, gdyż ruchy powierzchniowe zachodzą na ogół w trzech wymiarach przestrzennych (tj. wschód (E), północ (N) i góra (U)). Oznacza to, że analizy InSAR uzyskane w pojedynczej geometrii obserwacyjnej nie są w stanie w pełni uchwycić wielkości i kierunku ruchów powierzchniowych (Rys. 10).



Rys. 10 Przykład odwzorowania rzeczywistych deformacji (strzałka D_{real}) na kierunek LOS (strzałka D_{LOS}), źródło: <https://site.tre-altamira.com/insar/>.

Wynikiem przetwarzania PSI jest wektorowy zbiór punktów PS, którym przypisane są wartości średniej prędkości ruchu w kierunku LOS obliczonej względem punktu referencyjnego oraz serie czasowe z względnymi wartościami przemieszczeń obliczonymi dla każdej daty pozyskanego obrazu z okresu rejestracji.

Metoda PSI najlepiej sprawdza się do monitorowania powolnych zmian ciągłych, których linia trendu przyrostu przemieszczenia będzie zbliżona do liniowego. Podstawowym warunkiem prawidłowego przeprowadzenia obliczeń w metodzie PSI jest odpowiednia liczba obserwacji, stąd wymaganie co najmniej 20 interferogramów. Narzuca to konieczność monitorowania danego obszaru podczas każdego przelotu satelity, np. w okresie rocznym lub kilkuletnim.

4. European Ground Motion Service

European Ground Motion Service (EGMS) należy do grupy produktów programu Copernicus służącego do monitorowania powierzchni lądów, a jego wdrożenie powierzono Europejskiej Agencji Środowiska (EEA), Constatini i in., (2021).

Internetowa strona serwisu:

<https://land.copernicus.eu/en/products/european-ground-motion-service>

EGMS dostarcza spójnych, regularnych, znormalizowanych, zharmonizowanych informacji dotyczących naturalnych i antropogenicznych ruchów powierzchni terenu w Europie, niezależnie od granic administracyjnych państw, z milimetrową dokładnością. Przemieszczenia są wyznaczone na podstawie analiz szeregów czasowych satelitarnych danych radarowych Sentinel-1 z wykorzystaniem metod interferometrii radarowej:

<https://land.copernicus.eu/user-corner/technical-library/european-ground-motion-service>

Serwis udostępnia dane trzech poziomów przetworzenia:

Podstawowy: Mapy prędkości w kierunku obrazowania satelity (line-of-sight) z orbit wschodzącej i schodzącej oddzielnie dla każdego punktu pomiarowego. Produkty podstawowe dowiązane są do lokalnego punktu referencyjnego;

Skalibrowany (produkt L2b): Mapy prędkości w kierunku obrazowania satelity (line-of-sight) z orbit wschodzącej i schodzą oddzielnie w odniesieniu do modelu referencyjnego pochodzącego z danych szeregów czasowych globalnych systemów nawigacji satelitarnej. Skalibrowane produkty są bezwzględne, nie odnoszą się już do lokalnego punktu odniesienia;

Orto (produkt L3): Składowe ruchu (poziome i pionowe) dowiązane do referencyjnego modelu geodezyjnego. Produkty Orto są generowane dla siatki o boku 100 m.

Dokładna specyfikacja produktów znajduje się w dokumencie „Product Description and Format Specification”: <https://land.copernicus.eu/en/technical-library/egms-product-description-document/@@download/file>.

Dla obszaru Polski w ramach tematu „Interferometryczny Monitoring Powierzchni Terenu Polski” zostały pobrane dane poziomu „Orto” ilustrujące deformacje w kierunku poziomym oraz pionowym w siatce 100 m dla okresu od 2016 do 2020 roku (był to pierwszy dostępny, możliwy do pobrania okres). Każdy z tych pikseli (punktów stabilnych rozpraszaczy) ma przypisaną wartość średniej prędkości ruchu w podanym kierunku w jednostkach mm na rok oraz wartości szeregów czasowych przemieszczeń w milimetrach pomiędzy każdym pozyskanym obrazem.

Dodatkowo pobrano dane poziomu „Skalibrowany” orbity wschodzącej i schodzącej. Prezentują one deformacje w kierunku obrazowania satelity, a więc nie przeliczone na łatwe w interpretacji wektory deformacji pionowe i poziome, ale odchylone od kierunku pionowego o 29.1° - 46.0° . Dane te mają większą rozdzielczość niż dane „Orto” i w niektórych przypadkach pomogły w analizie zaobserwowanych deformacji, aczkolwiek nie zostały wykorzystane w ostatecznej mapie deformacji.

4.1 Dane dla obszaru Polski

Dla obszaru Polski z serwisu EGMS zostały pobrane następujące dane porywające obszar kraju lub obszary przygraniczne:

1. 48 pliki csv „Orto” (Level 3) w arkuszach o boku 100km od E45N33 do E53N31, zawierające dane o deformacjach w kierunku poziomym w okresie 2016-2020,
2. 48 pliki tiff z georeferencją „Orto” (Level 3) w arkuszach o boku 100km od E45N33 do E53N31, zawierające dane o deformacjach w kierunku poziomym w okresie 2016-2020,
3. 48 pliki csv „Orto” (Level 3) w arkuszach o boku 100km od E45N33 do E53N31, zawierające dane o deformacjach w kierunku pionowym w okresie 2016-2020,
4. 48 pliki tiff z georeferencją „Orto” (Level 3) w arkuszach o boku 100km od E45N33 do E53N31, zawierające dane o deformacjach w kierunku pionowym w okresie 2016-2020.

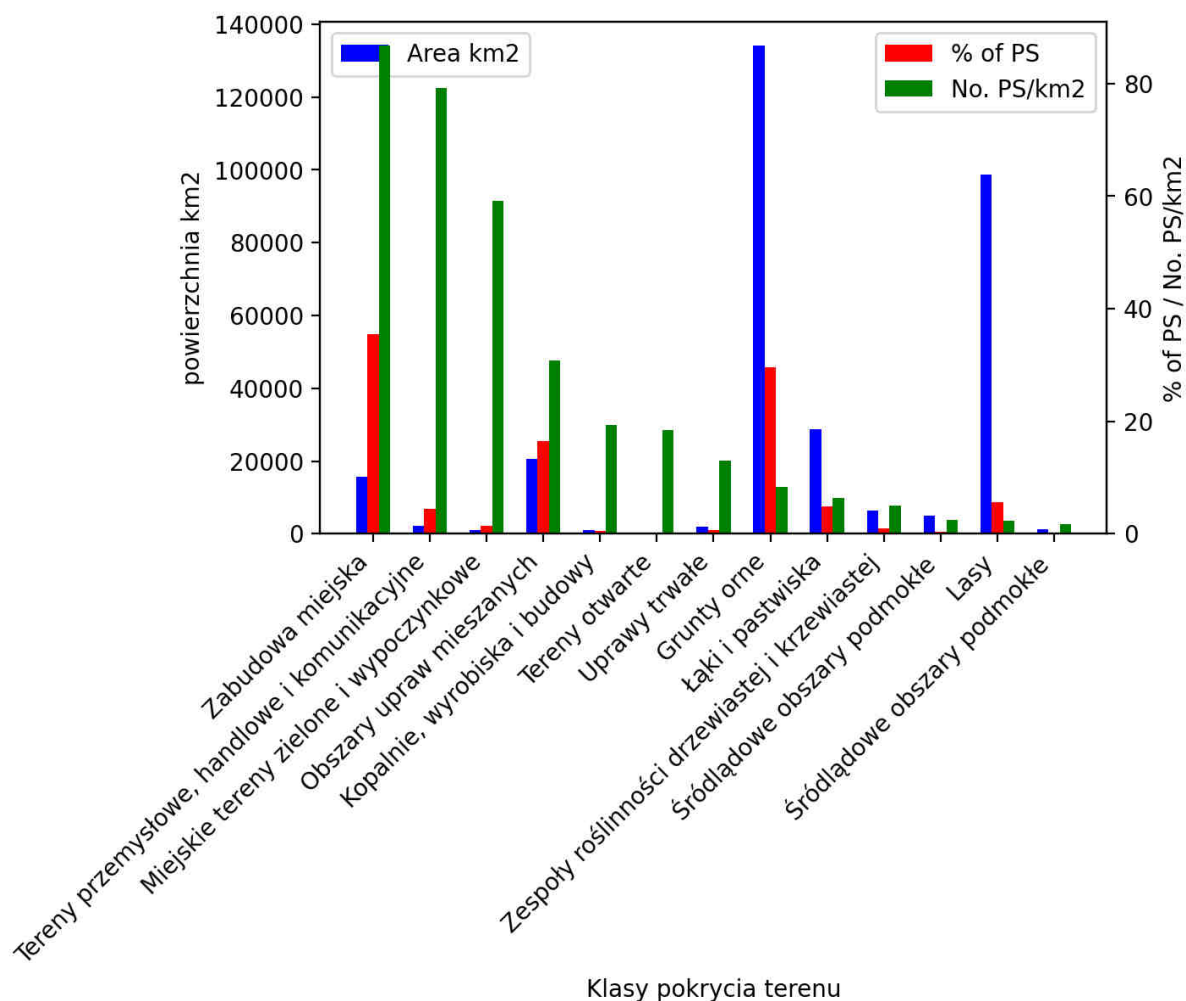
Dane w formacie csv zostały wczytane do środowiska GIS, a następnie przekonwertowane do formatu shp, tworząc wektorowe warstwy punktowe. Punkty pomiarowe z serwisu EGMS z poziomu L3 są zlokalizowane w siatce co 100 m, z wyłączeniem miejsc niskiej koherencji, gdzie uzyskanie wiarygodnych punktów było niemożliwe. Dla każdego kierunku deformacji z każdego punktu wyodrębniono atrybut „velocity” będący średnią prędkością ruchu danego punktu w okresie 2016-2020. Następnie

Na obszarach zabudowy miejskiej, która stanowi 5% powierzchni Polski, znajduje się 35% punktów pomiarowych. Dużą gęstością cechują się również obszary przemysłowe i trasy komunikacyjne, ale łącznie zajmują one mniej niż 1% powierzchni kraju. Grunty orne, które pokrywają 42% powierzchni Polski charakteryzują się gęstością 8 punktów na kilometr kwadratowy. Natomiast na lasach, które również zajmują większą część powierzchni (31%) zidentyfikowano tylko niecałe 6% wszystkich punktów pomiarowych.

Nierównomierny rozkład punktów może w znaczący sposób utrudniać analizę deformacji powierzchni terenu, w szczególności na obszarach pokrytych wysoką roślinnością. Niemniej jednak ogólny obraz pozyskanych danych skłania ku wnioskowi, że kraj jest pokryty w stopniu umożliwiającym pełną analizę zachodzących deformacji powierzchniowych o charakterze ciągłym.

Tab. 1 Występowanie punktów pomiarowych PS z serwisu EGMS na poszczególnych klasach pokrycia terenu warstwy Corine Land Cover.

Lp.	nazwa klasy pokrycia terenu	area km ²	area %	no. PS/km ²	% of PS
1	Zabudowa miejska	15649,93	4,96	86,66	35,45
2	Tereny przemysłowe, handlowe i komunikacyjne	2073,85	0,66	79,16	4,29
3	Miejskie tereny zielone i wypoczynkowe	872,82	0,28	59,16	1,35
4	Obszary upraw mieszanych	20563,66	6,51	30,80	16,56
5	Kopalnie, wyrobiska i budowy	832,67	0,26	19,41	0,42
6	Tereny otwarte, pozbawione roślinności lub z rzadkim pokryciem roślinnym	157,56	0,05	18,41	0,08
7	Uprawy trwałe	1733,97	0,55	13,11	0,59
8	Grunty orne	134046,70	42,46	8,44	29,57
9	Łąki i pastwiska	28777,41	9,12	6,42	4,83
10	Zespoły roślinności drzewiastej i krzewiastej	6259,10	1,98	5,12	0,84
11	Śródlądowe obszary podmokłe	4820,63	1,53	2,41	0,30
12	Lasy	98763,22	31,28	2,19	5,67
13	Śródlądowe obszary podmokłe	1149,66	0,36	1,66	0,05



Rys. 12 Średnia gęstość punktów PS dla klasy pokrycia terenu w zestawieniu z procentowym udziałem punktów klasy w stosunku do całego zbioru oraz sumy powierzchni danej klasy.

5. Deformacje powierzchni terenu Polski

Deformacje powierzchni zidentyfikowane na punktach z serwisu EGMS są przeliczone w dwóch kierunkach: kierunku pionowym Up-Down oraz kierunku poziomym East-West. Obie warstwy zawierają to samo pokrycie punktami pomiarowymi. Serie czasowe punktów, w zależności od oryginalnej ścieżki satelity Sentinel-1 zawierają względne przemieszczenia w interwałach co 6 lub 12 dni. Szczegółowe zakresy wszystkich występujących na obszarze Polski serii czasowych przedstawiono w Tabeli nr 2.

Tab. 2 Pary występujących na obszarze Polski zakresów czasowych dla zestawów danych punktowych z serwisu EGMS poziomu L3.

Lp.	Pierwsza data	Ostatnia data	Liczba interwałów
1	20160105	20201215	302
2	20160609	20201203	274
3	20160105	20201227	304
4	20160329	20201215	288
5	20160329	20201203	286

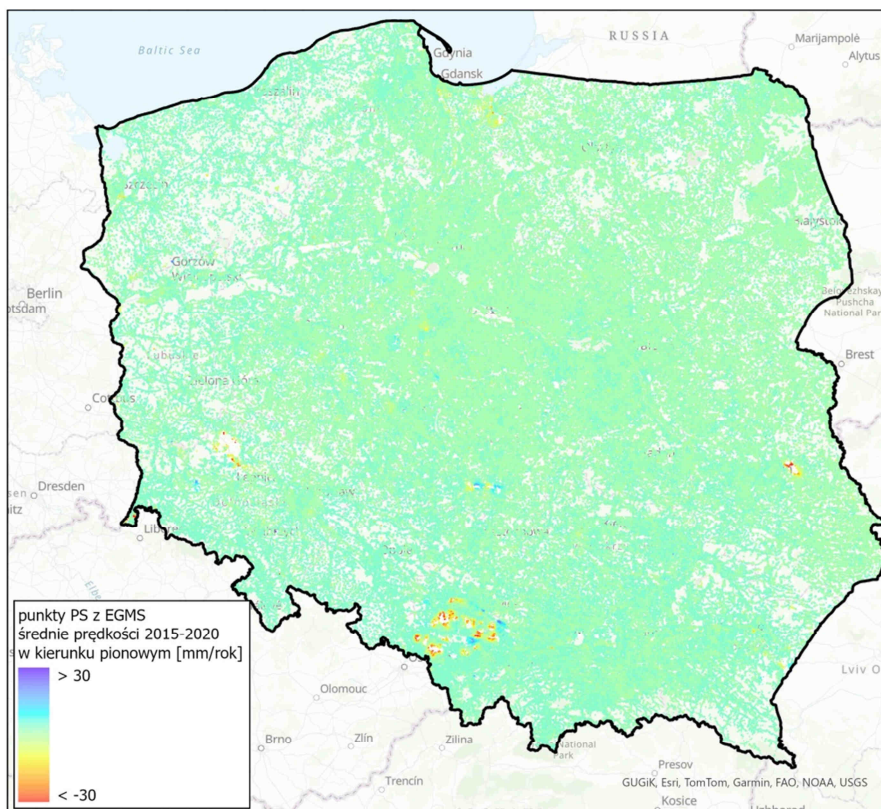
6	20160105	20201221	303
7	20160105	20201215	277
8	20160105	20201209	301
9	20160105	20201203	300
10	20160609	20201221	277
11	20161007	20201209	255
12	20160105	20201226	304

W celu wspólnej analizy danych na obszarze Polski, przyjęto, że analizowany okres obejmuje 5 lat, od początku 2016 do końca 2020 roku.

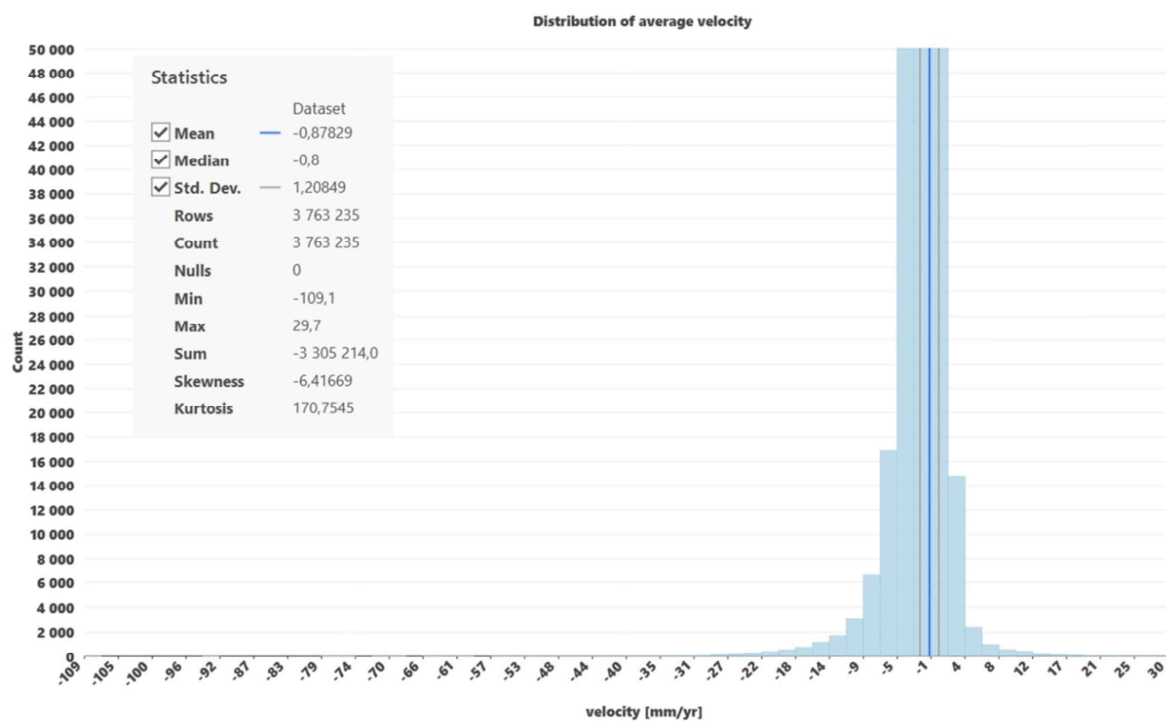
5.1 Kierunek Up-Down

Rozkład przestrzenny średnich prędkości ruchu punktów powierzchni terenu w kierunku pionowym przedstawiono na Rys. 13. Wartości uznawane za stabilne w zakresie od -2 do 2 mm na rok występują na 91,5% punktów (tj. 3 445 023), osiadanie a więc wartości mniejsze niż -2 mm na rok występuje na 8,1% punktów (tj. 306 234), natomiast podnoszenie, czyli wartości większe niż 2 mm na rok występuje na 0,3% punktów (tj. 11 978). Pełen histogram wartości średnich prędkości przedstawiono na Rys. 14. Można na nim zaobserwować lekką skrętność (-6), spowodowaną większą liczbą punktów osiadających niż wypiętrzających. Średnia wartość punktów wynosi -0,9 mm na rok, a odchylenie standardowe 1,2. Maksymalna zarejestrowana wartość dodatnia wynosi 29,7 mm na rok, podczas gdy maksymalna wartość ujemna -109,1 mm na rok.

Na podstawie wstępnej analizy wizualnej zbioru danych, można wyciągnąć wnioski, iż większość obszaru Polski jest stabilna. Widoczne są pojedyncze obszary, które charakteryzują się deformacjami w kierunku pionowym związane z eksploatacją górniczą, takie jak Górnośląskie Zagłębie Węglowe, Lubelskie Zagłębie Węglowe, Legnicko-Głogowski Okręg Miedziowy, Kopalnia Węgla Brunatnego „Bełchatów”.



Rys. 13 Rozkład średnich prędkości w kierunku pionowym punktów PS z serwisu EGMS dla okresu 2016-2020 na terenie Polski.

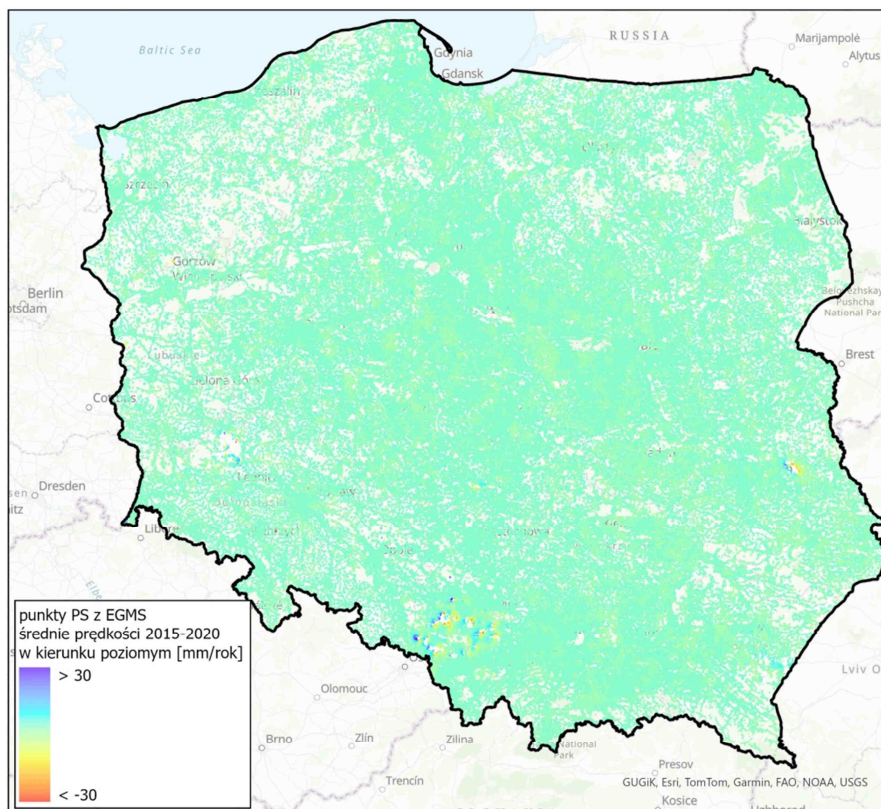


Rys. 14 Histogram średnich prędkości w kierunku pionowym punktów PS z serwisu EGMS dla okresu 2016-2020 na terenie Polski. Oś „Y” została ograniczona do 50 000, aby zapewnić czytelność całego wykresu.

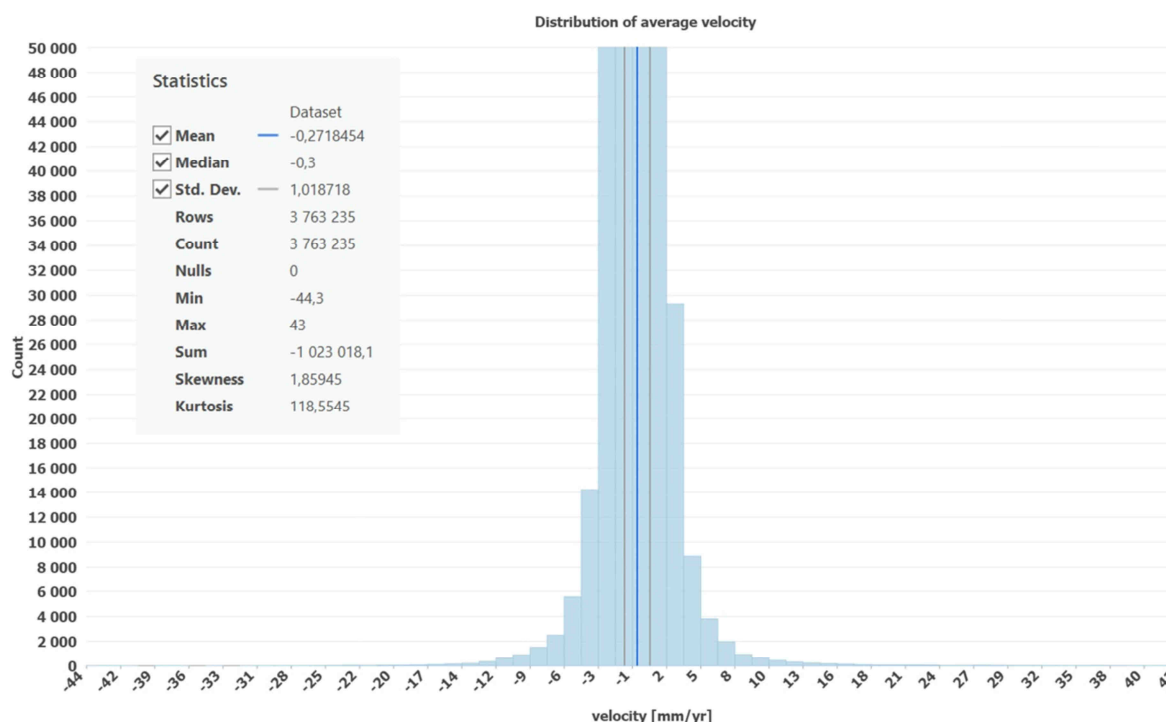
5.2 Kierunek East-West

Rozkład przestrzenny średnich prędkości ruchu punktów powierzchni terenu w kierunku poziomym wschód-zachód przedstawiono na Rys. 15. Wartości uznawane za stabilne w zakresie od -2 do 2 mm na rok występują na 96,3% punktów (tj. 3 625 245), deformacje w kierunku zachodnim a więc wartości mniejsze niż -2 mm na rok występują na 2,4% punktów (tj. 90 594), natomiast deformacje w kierunku wschodnim, czyli wartości większe niż 2 mm na rok występuje na 1,3% punktów (tj. 47 396). Pełen histogram wartości średnich prędkości przedstawiono na Rys. 16. Histogram przyjmuje rozkład normalny, ze średnią wartością -0,3 mm na rok i odchyleniem standardowym 1,0. Maksymalna zarejestrowana wartość dodatnia (ruch w kierunku wschodnim) wynosi 43,0 mm na rok, podczas gdy maksymalna wartość ujemna (ruch w kierunku zachodnim) -44,3 mm na rok.

Wartości deformacji poziomych są bardzo niewielkie na całym obszarze kraju. Pojedyncze lokalizacje, na których można zauważyć większe zgrupowania punktów, gdzie takie deformacje występują są związane z dużym osiadaniem (jest to głównie rejon Górnośląskiego i Lubelskiego Zagłębia Węglowego oraz LGOM).



Rys. 15 Rozkład średnich prędkości w kierunku poziomym wschód-zachód punktów PS z serwisu EGMS dla okresu 2016-2020 na terenie Polski.



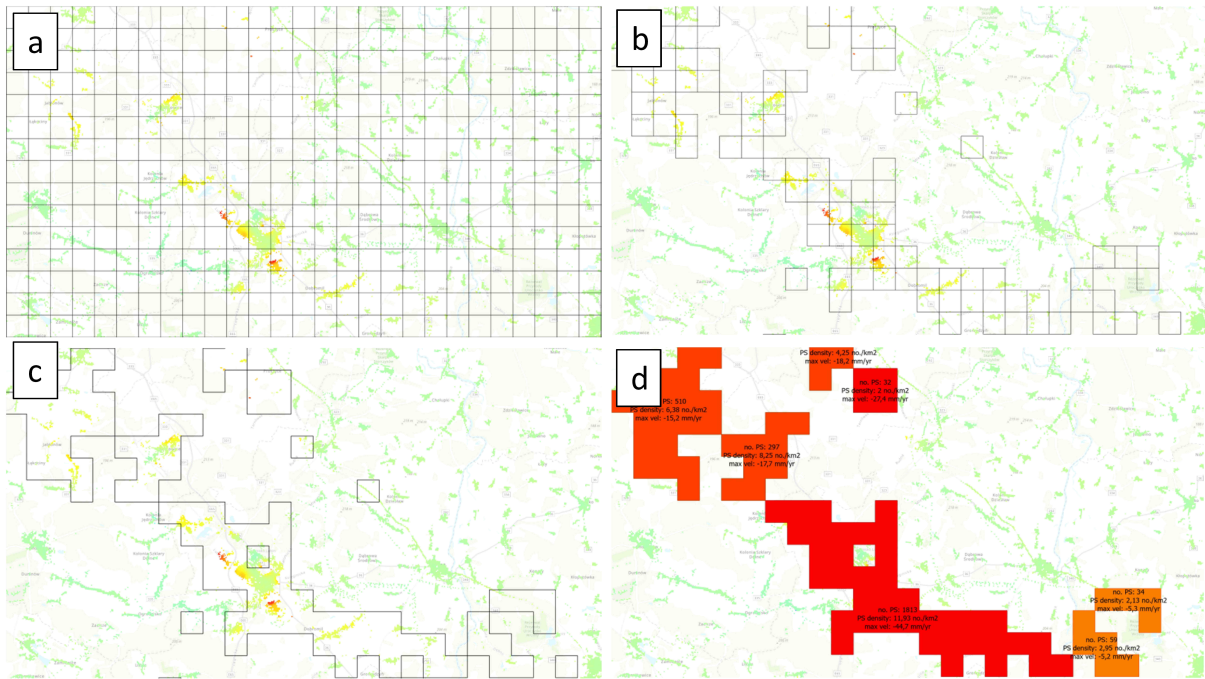
Rys. 16 Histogram średnich prędkości w kierunku poziomym wschód-zachód punktów PS z serwisu EGMS dla okresu 2016-2020 na terenie Polski. Oś „Y” została ograniczona do 50 000, aby zapewnić czytelność całego wykresu.

6. Analiza otrzymanych deformacji

Obszar Polski jest pokryty przez niecałe 4 mln punktów pomiarowych serwisu EGMS. W celu identyfikacji miejsc, na których zachodzą deformacje istotne w skali kraju, wykonano analizę geostatystyczną, której założenia metodyczne przedstawiono poniżej:

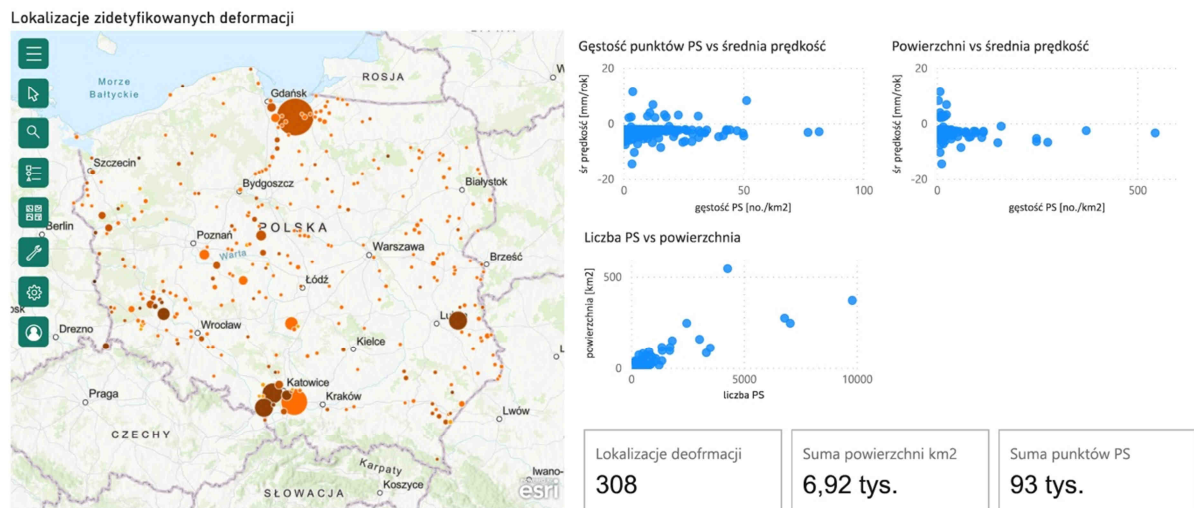
1. Obszar Polski pokryto regularną siatką o boku 2 km.
2. Dokonano złączenia przestrzennego warstwy siatki kwadratów z warstwą punktów PS prędkości w kierunku pionowym.
3. W każdym kwadracie siatki obliczono średnią wartość prędkości.
4. Wyeliminowano kwadraty, dla których wartość średnia mieściła się w przedziale od -2 do +2 mm na rok, uznając, że są to obszary stabilne.
5. Pozostałe kwadraty złączono ze sobą, jeśli stykały się granicą. W ten sposób powstały poligony, zawierające grupy punktów pomiarowych, za których zidentyfikowano wartości ruchu w kierunku pionowym.
6. Dla każdego poligonu obliczono: liczbę występujących punktów PS, średnią wartość prędkości w kierunku pionowym, zakres występujących wartości, wartość minimalną, wartość maksymalną, sumaryczną powierzchnię poligonu, gęstość punktów PS.
7. Ze zbioru poligonów usunięto te, które miały powierzchnię mniejszą niż 8 km² (składały się tylko z jednego oczka siatki), chyba że średnia zarejestrowana prędkość była większa niż 5 mm na rok oraz liczba punktów w obrębie poligonu przekraczała 20 (wystąpił jeden poligon o powierzchni 4 km², dla którego zarejestrowano wartość średnią +8 mm/rok na 205 punktach pomiarowych).

Przedstawiona metodyka została zilustrowana na Rys. 17.



Rys. 17 Podstawowe kroki przyjętej metodyki analizy geostatystycznej w celu identyfikacji lokalizacji występowania znaczących deformacji w skali kraju. Powiększenie dla obszaru Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego. a) Pokrycie obszaru regularną siatką o boku 2 km. b) Eliminacja kwadratów siatki dla których średnia prędkość punktów PS mieściła się w zakresie od -2 do +2 mm/rok. c) Złączenie kwadratów w poligony po wspólnych granicach. d) Obliczenie dla każdego z wynikowych poligonów średniej wartości prędkości, liczby występujących punktów oraz gęstości punktów.

W ten sposób zostało wyznaczonych 308 lokalizacji, na których występują deformacje w Polsce. Podsumowanie poligonów przedstawiono na Rys. 18, a ich dokładną lokalizację na Rys. 19A.



Rys. 18 Podsumowanie wyznaczonych lokalizacji, na których występują deformacje w Polsce.

Jak wynika z Rys. 18 sumarycznie poligony zajmują niecałe 7 tysięcy kilometrów kwadratowych, stanowiąc 2% powierzchni kraju. W ich granicach znajduje się 93 tysiące punktów PS, na których zarejestrowano większe prędkości ruchu.

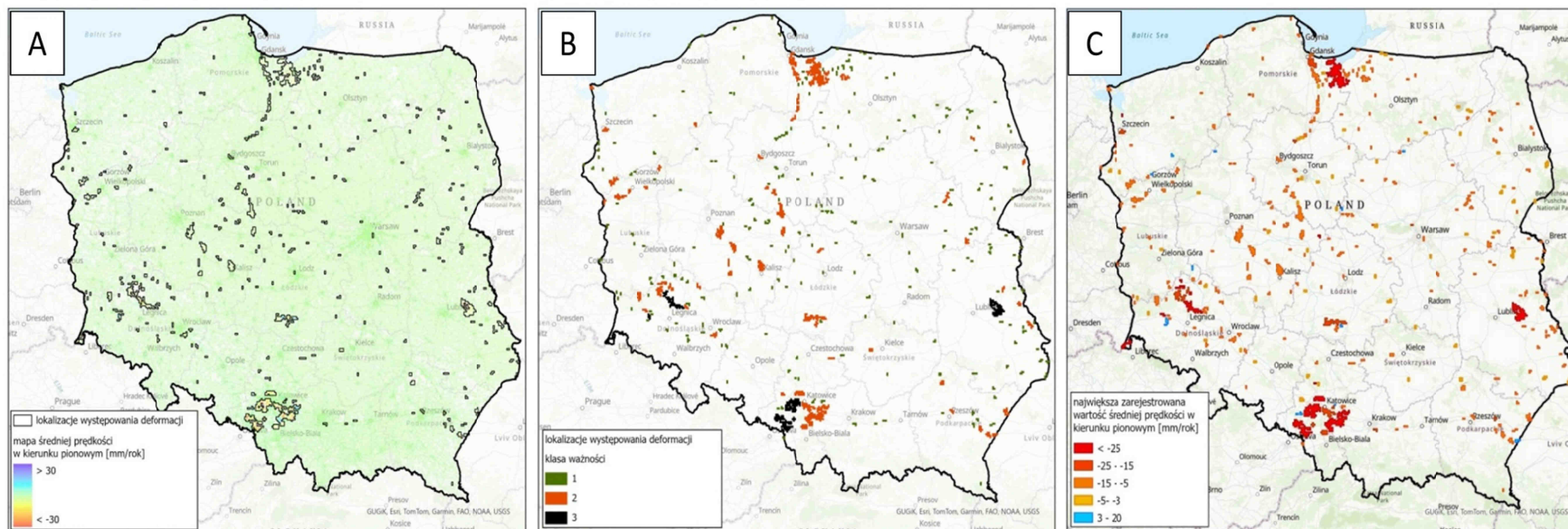
Poligonom przypisano również klasy ważności od 1 do 3 w zależności od średniej prędkości ruchu zarejestrowanego na punktach PS oraz od powierzchni poligonu, według Tabeli 3.

Tab. 3 Klasy ważności lokalizacji występowania deformacji w zależności od średniej prędkości punktów PS oraz od powierzchni poligonu. Klasa „1” - niższa klasa ważności, klasa „2” – średnia, klasa „3” – najwyższa klasa.

		średnia prędkość punktów PS						
		≤ -10	(-10, -5]	(-5, -2]	(-2, +2)	[+2, +5)	[+5, +10)	≥ +10
powierzchnia poligonu [km ²]	≤ 16	1	1	1	X	1	1	1
	16 – 20	3	2	1	X	1	2	3
	≥ 20	3	3	2	X	2	3	3

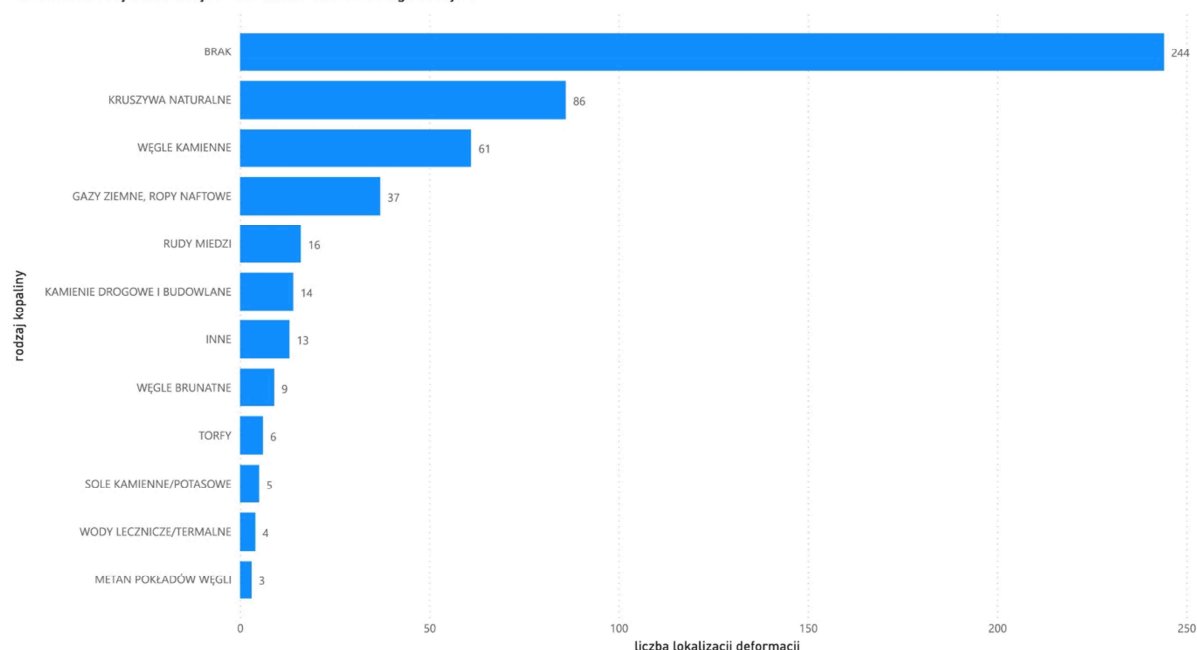
Rozkład klas ważności przedstawiono na Rys. 19B, natomiast na Rys. 19C przedstawiono rozkład maksymalnych prędkości w kierunku pionowym zarejestrowanych w granicach poligonów. Spośród 308 wyznaczonych lokalizacji, 8 przypisano najwyższą klasę ważności „3”. Poligony te znajdują się na Lubelskim i Górnolubelskim Zagłębiu Węglowym, na terenie LGOMu oraz Turowa. 62 lokalizacje mają klasę „2”, natomiast zdecydowana większość lokalizacji, bo aż 238, klasę „1”, a więc są to poligony niewielkie powierzchniowo lub o średnich prędkościach deformacji do 5 mm na rok. Porównanie największych zarejestrowanych wartości deformacji wykazało, iż tylko w 15 lokalizacjach zarejestrowano wartości większe niż 25 mm na rok. Są to lokalizacje, oprócz wymienionych wyżej poligonów klasy ważności „3”, rejon Żuław Wiślanych oraz kopalni KWB „Bełchatów”. Na 20 lokalizacjach największe wartości mieszczą się od -25 do -15 mm na rok, natomiast na większości pozostałych lokalizacji wartości nie przekraczają 10 mm na rok. Należy również zwrócić uwagę, że tylko na 20 lokalizacjach deformacje odnoszą się do ruchu wypiętrzającego, podczas gdy na 288 związane są z osiadaniem.

Wyznaczone lokalizacje występowania deformacji zestawiono z granicami terenów górniczych bazy MIDAS (<https://midasinfo.pgi.gov.pl/midas-web/index.html>). Wyniki zestawienia przedstawiono na Rys. 20. Brak związku z prowadzoną eksploatacją górnictwem wykazano dla 244 lokalizacji, ale tylko 28 z nich przypisano klasę ważności „2” (pozostałe mają klasę „1” i można je uznać za mało istotne). Pozostała część deformacji jest związana z prowadzoną działalnością górnictwem, kruszyw naturalnych, węgla kamiennych i brunatnych, gazu i ropy, rud miedzi, soli oraz wód leczniczych. Na podstawie przeprowadzonej analizy można stwierdzić, iż deformacje ciągle występujące na powierzchni terenu Polski są związane głównie z działalnością górnictwem. Niewielkie powierzchniowo zarejestrowane inne lokalizacje są to prawdopodobnie osiadania związane z posadowieniem nowych budynków lub budową tras komunikacyjnych.



Rys. 19 Lokalizacje występowania deformacji. A. Granice poligonów na tle mapy średnich prędkości w kierunku pionowym danych serwisu EGMS. B. Klasy ważności wyznaczonych poligonów. C. Maksymalne wartości prędkości pionowych w granicach poligonów.

Liczba lokalizacji deformacji w zestawieniu z terenami górnictwami



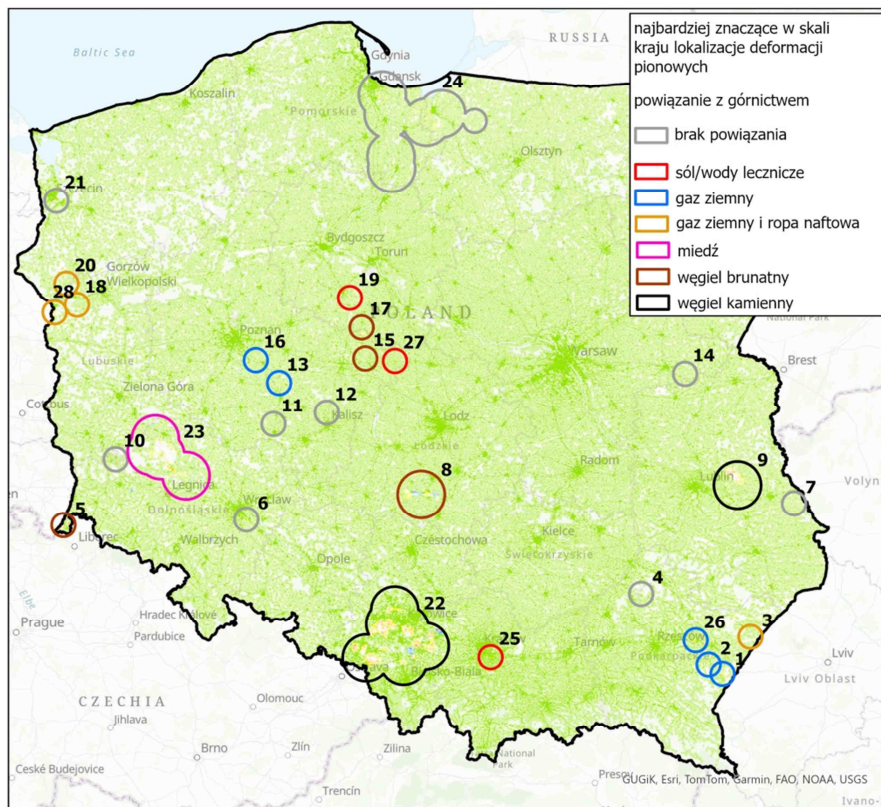
Rys. 20 Podsumowanie zestawienia lokalizacji występowania deformacji z terenami górnictwami.

Warstwa poligonów występowania deformacji pozwoliła na wyznaczenie 28 lokalizacji, gdzie zdaniem zespołu, występują deformacje istotne w skali kraju. Lokalizacje te przedstawiono na Rys. 21. Zaliczono do nich, wszystkie miejsca, gdzie zidentyfikowano poligony o klasie ważności „3” oraz większe poligony o klasie ważności „2”. Każde z tych miejsc przejrzano manualnie, w kontekście występujących tam deformacji, rozkładu punktów PS oraz prowadzonej działalności górniczej.

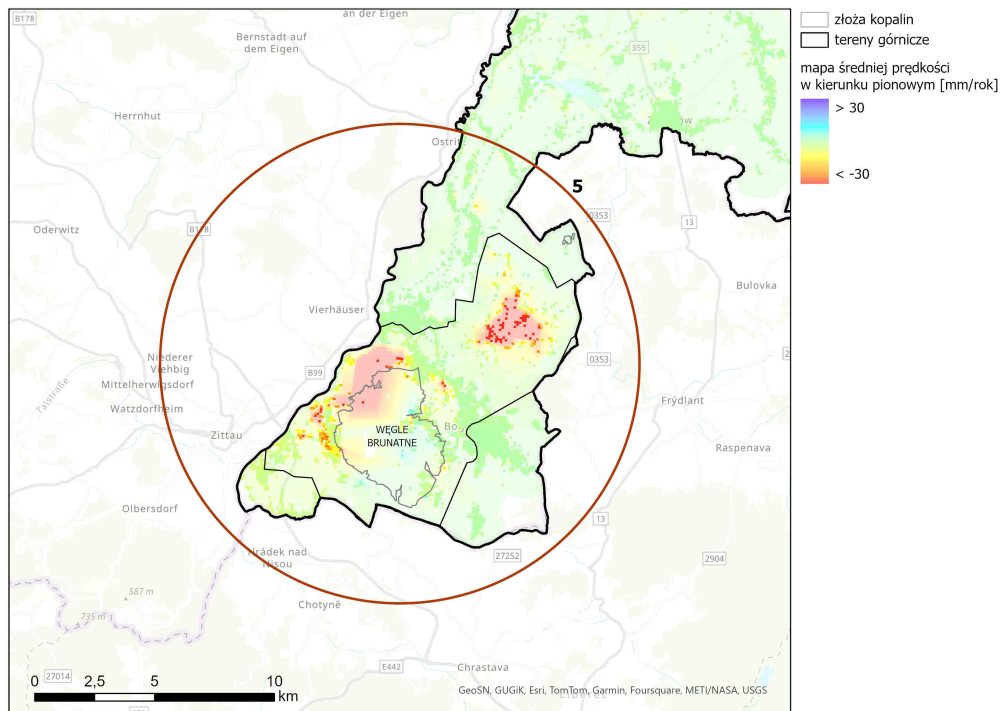
Dla 7 lokalizacji nie znaleziono prostego powiązania z górnictwem. Analiza tych obszarów wymaga przeprowadzenia dodatkowych badań i być może będzie kontynuowana w dalszych etapach realizacji zadania.

Średnie wartości deformacji w kierunku pionowym dla wybranych lokalizacji przedstawiono na Rys. 22-29. Należy zaznaczyć, że lokalizacje o numerach (Rys. 21) 15 i 17 (KWB „Konin”), 27 (Kopalnia soli „Kłodawa”), 22 (Górnośląskie Zagłębie Węglowe) są przedmiotami szczegółowych analiz, prowadzonych w ramach podzadania 1.2 (patrz Raporty 2a, 2b, 2c i 2d).

Na poniższych rysunkach zilustrowano pionowe deformacje terenu związane z procesami geologicznymi, głównie z działalnością górniczą. Rys. 22 przedstawia osiadanie powierzchni terenu spowodowane podziemnym wydobyciem węgla brunatnego na trójstyku granic Niemiec, Czech i Polski w Kotlinie Żytawskiej. Na mapie średnich prędkości pionowych widać dwie niecki obniżeniowe, o największej zarejestrowanej wartości -92 mm na rok.

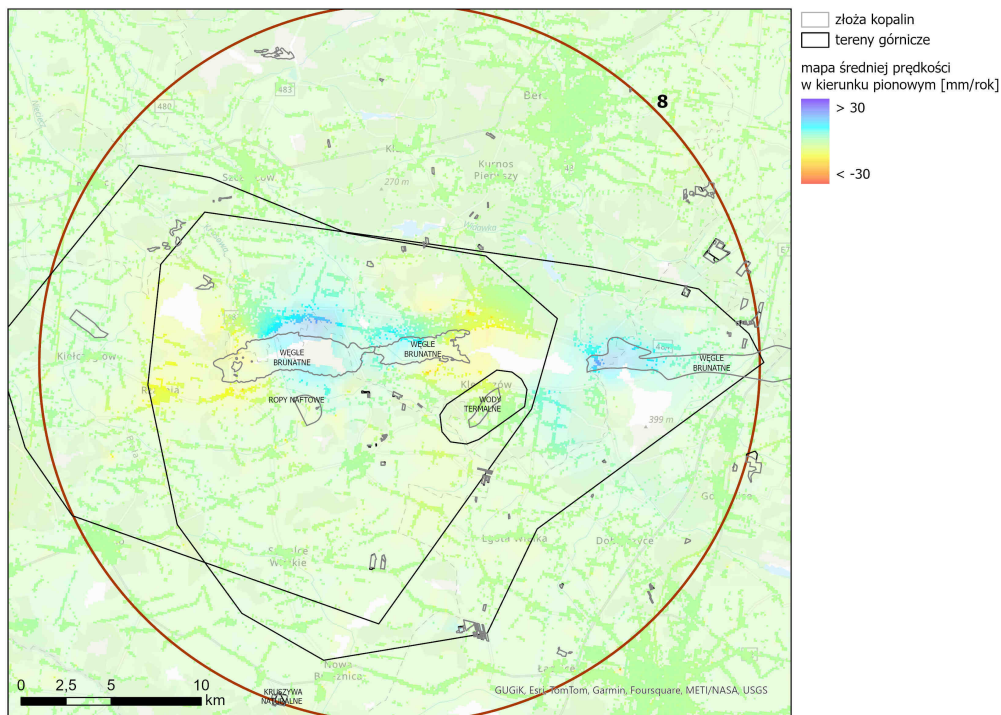


Rys. 21 Lokalizacje występujących deformacji ciągłych, istotnych w skali kraju.



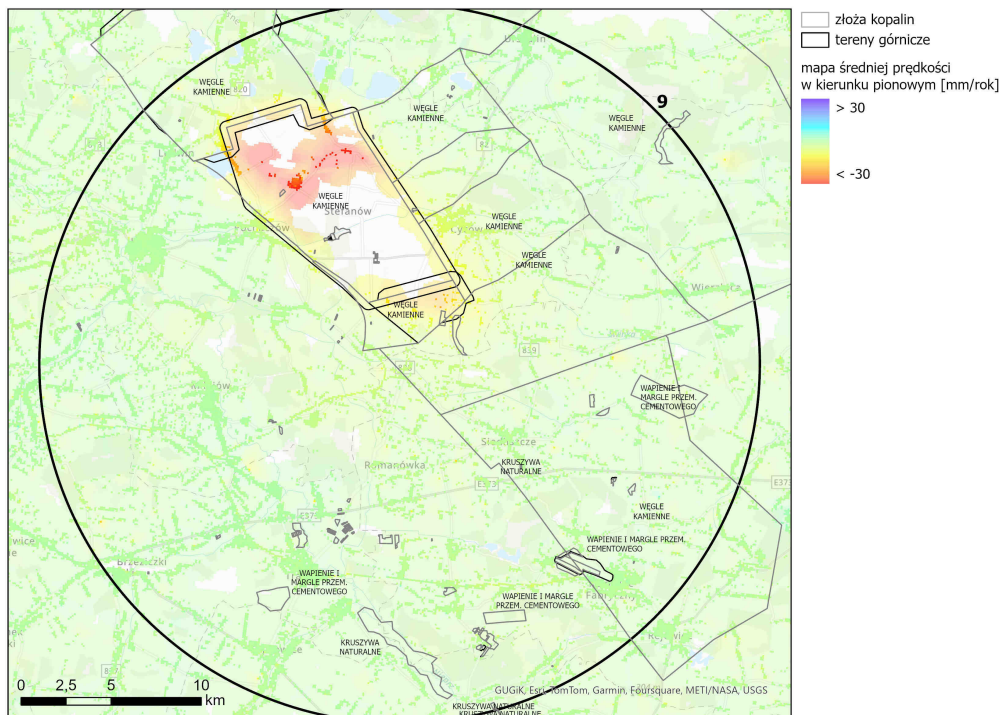
Rys. 22 Lokalizacja numer 5 (Rys. 21) – KWB „Turów”. Mapa średnich prędkości w kierunku pionowym, pozyskanych z serwisu EGMS dla okresu 2016-2020.

Na Rys. 23 przedstawiono przemieszczenia pionowe – ubytek i nasyp mas ziemnych na odkrywcę węgla brunatnego w Bełchatowie. Na podstawie wykorzystanych danych, można wywnioskować iż w latach 2016-2020 systematyczne wydobywanie złoża pogłębiło dwa otwory na powierzchni średnio o 7 mm na rok, aczkolwiek możliwe, że deformacje miały większe wartości, tylko ze względu na ograniczenia metody nie zostały one zarejestrowane, gdyż brak jest danych w środkowych częściach odkrywki. Maksymalne przemieszczenie ujemne, jakie widać na danych EGMS wynosi -17 mm na rok. Można również zaobserwować podnoszenie terenu, związane z nasypami na hałdach. Ma ono średnią wartość 10 mm na rok, a największą 20 mm na rok.



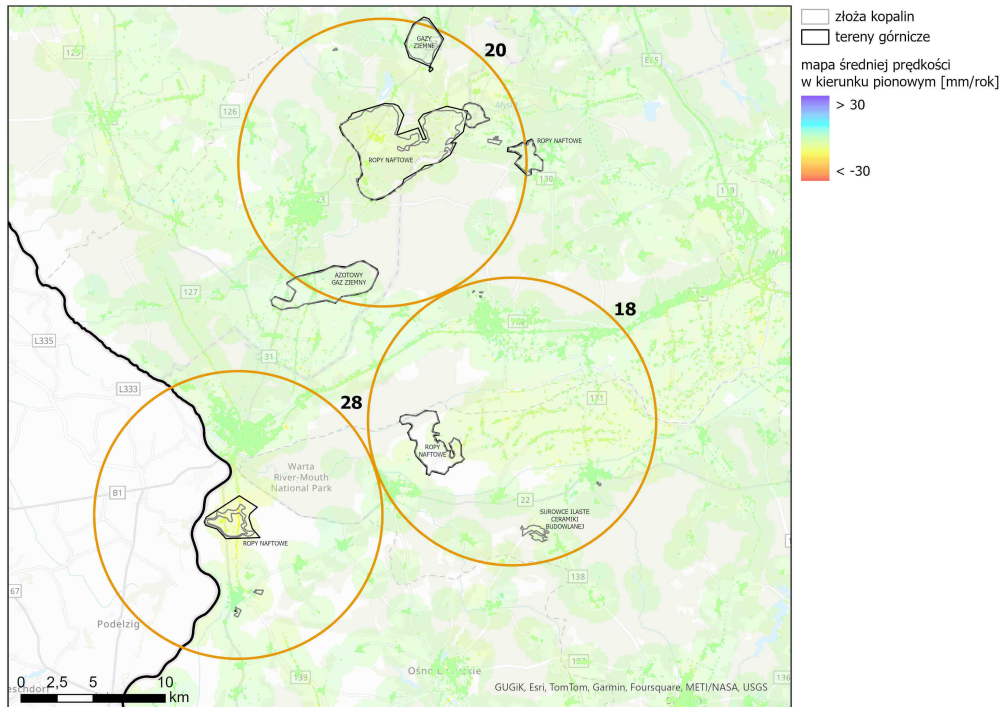
Rys. 23 Lokalizacja numer 8 (Rys. 21) – KWB „Bełchatów”. Mapa średnich prędkości w kierunku pionowym, pozyskanych z serwisu EGMS dla okresu 2016-2020.

Lubelskie Zagłębie Węglowe zostało przedstawione na Rys. 24. Mapa średnich prędkości w kierunku pionowym uwidoczniała nieckę obniżeniową powstałą nad złożem Bogdanka. Zarejestrowane osiadanie wstępuje w granicach terenów górniczych Ludwin, Puchaczów V i Stręczyn. Najwyższa wartość wynosi – 41 mm na rok, brak jest danych w środkowej części złoża, co może być spowodowane brakiem koherencji obrazów SAR na terenie pokrytym roślinnością, ale również występowaniem większych, szybszych ruchów terenu.

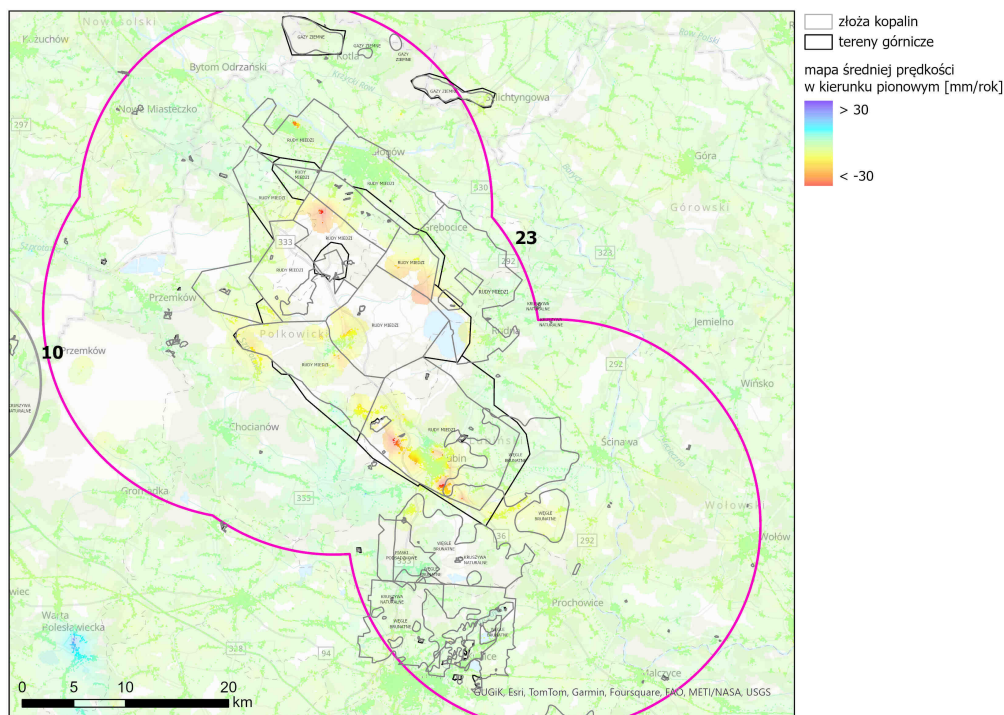


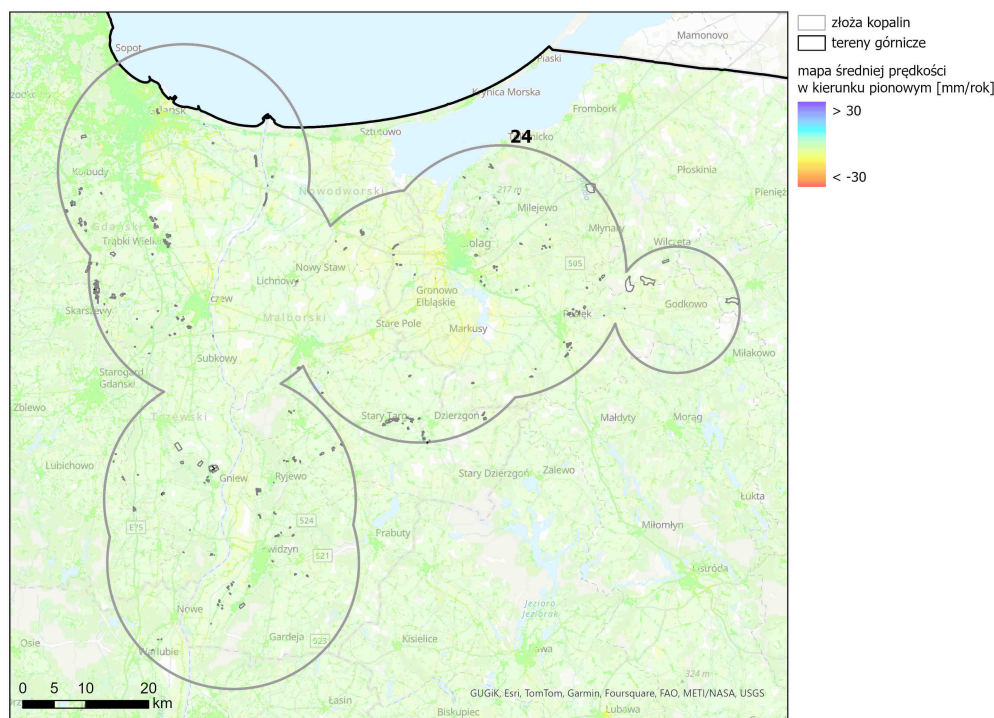
Rys. 24 Lokalizacja numer 9 (Rys.21) – Lubelskie Zagłębie Węglowe. Mapa średnich prędkości w kierunku pionowym, pozyskanych z serwisu EGMS dla okresu 2016-2020.

Niewielkie osiadanie, do -14 mm na rok, zaobserwowano na złożach ropy naftowej i gazu ziemnego w okolicach Kostrzyna nad Odrą, Rys. 25.



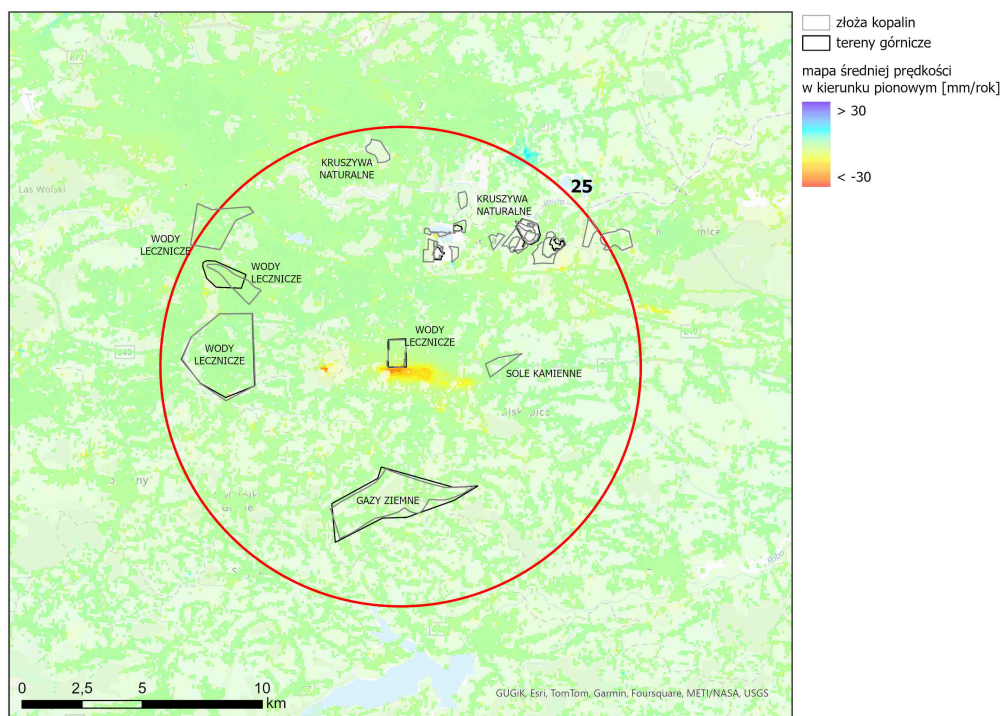
Rys. 25 Lokalizacje numer 18, 20 i 28 (Rys. 21) – wydobywanie gazu ziemnego pod Gorzowem Wielkopolskim. Mapa średnich prędkości w kierunku pionowym, pozyskanych z serwisu EGMS dla okresu 2016-2020.





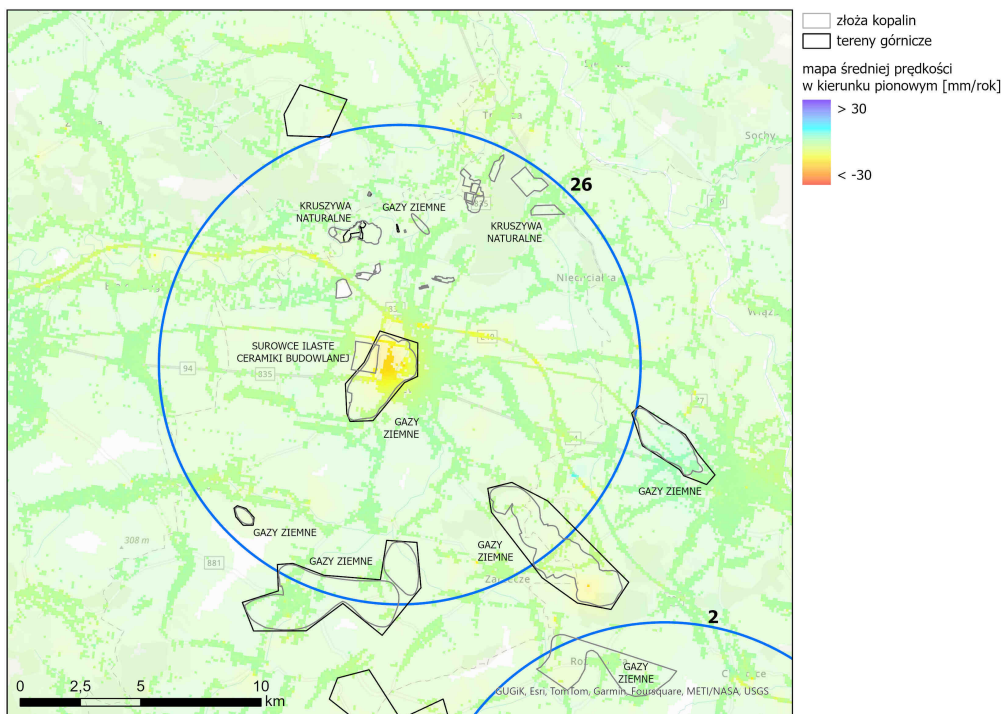
Rys. 27 Lokalizacja numer 24 (Rys. 21) – Żuławy Wiślane. Mapa średnich prędkości w kierunku pionowym, pozyskanych z serwisu EGMS dla okresu 2016-2020.

Nieckę obciążeniową na terenie Wieliczki przedstawiono na Rys. 28. Obszar ten w dużym stopniu jest pokryty zabudową, co zapewniło otrzymanie wiarygodnej informacji o granicach występowania zmian terenu. Zarejestrowane punkty pomiarowe umożliwiają przedstawienie całej niecki wraz z wartościami największymi (-23 mm na rok), w jej środkowej części.



Rys. 28 Lokalizacja numer 25 (Rys. 21) – Wieliczka. Mapa średnich prędkości w kierunku pionowym, pozyskanych z serwisu EGMS dla okresu 2016-2020.

Podobnego rzędu osiadanie (do -15 mm na rok) zostało zauważone w okolicach Przeworska, gdzie widoczna jest niekiedy związana z wydobyciem gazu ziemnego, Rys. 29.



Rys. 29 Lokalizacja numer 26 (Rys. 21) – wydobycie gazu ziemnego w Przeworsku. Mapa średnich prędkości w kierunku pionowym, pozyskanych z serwisu EGMS dla okresu 2016-2020.

7. Mapa deformacji

Na podstawie danych, opisanych w rozdziale 4.1, stworzono dwie mapy deformacji powierzchni terenu obejmujące obszar Polski: w kierunku pionowym oraz w kierunku poziomym wschód-zachód. Każda z map zawiera dwie warstwy:

1. Warstwę pochodzącą z interpolacji wartości punktów pomiarowych.

Interpolacja została wykonana metodą triangulacji za pomocą funkcji tworzenia siatki wysokościowej z warstwy punktowej w programie Global Mapper. W trakcie tworzenia siatki zostało nadane kryterium odległości dla braku danych w wynikowej siatce wysokościowej (wartość kryterium 7.5 zapewniła interpolację do 1 km od punktu pomiarowego. Jeśli w tej odległości nie było drugiego punktu, siatka otrzymywała wartość „brak danych”). W ten sposób dla danych punktowych o dużej gęstości, zostały wykorzystane wszystkie dane, natomiast dla miejsc, gdzie dane nie zapewniały dostatecznej gęstości, lub w ogóle nie występowały, siatka wysokościowa została wykonana niepełnie, tak aby nie tworzyć wartości, które nie są znane.

Dodatkowo z otrzymanej warstwy zostały wycięte obszary wód śródlądowych. Utworzenie warstwy ciągłej na podstawie warstwy punktowej w znaczący sposób ułatwia interpretację danych. Zachodzące na powierzchni terenu deformacje ciągłe, nie odnoszą się do pojedynczych pikseli, ale są rozległe obszarowo i powinny być analizowane w kontekście, jako klastry pikseli na których zaobserwowano wartości sugerujące trwający proces deformacji, np. tworzenie się niecki osiadania, wypiętrzenie obszaru spowodowane podnoszeniem wody. Odnosi się to szczególnie do analizy opisanej w tym raporcie, której celem było identyfikowanie miejsc, gdzie zachodzą deformacje, znaczących w skali kraju, a nie pojedynczych obiektów.

Warstwa ciągła została przedstawiona na mapie z przezroczystością 70% w celu ułatwienia nałożenia jej na warstwę mapy bazowej (na przykład mapy topograficznej, albo ortomozaiki). Tak duża przezroczystość została również nadana, aby zaznaczyć iż jest to pewna interpretacja danych, a nie źródłowe dane pomiarowe.

2. Warstwę pikseli o boku 100m, pochodzącą z punktów pomiarowych danych z serwisu EGMS.

Dla pikseli o znanych wartościach średniej prędkości, zostały one przyjęte wprost z warstwy danych EGMS. Piksele, gdzie punkty PS nie zostały zarejestrowane, mają wartość „brak danych”.

Warstwa punktów pomiarowych serwisu EGMS również została przedstawiona na mapie z przezroczystością, ale 30%. Przezroczystość została nadana w celu zapewnienia widoczności warstwy mapy bazowej.

Obie warstwy zostały przedstawione w tej samej w skali barwnej: od niebieskiego (podnoszenie) do czerwonego (osiadanie), gdzie kolorem zielonym są oznaczone wartości uznane za stabilne. Został zastosowany podział kolorów na 8 klas, w zależności od wartości średniej prędkości.

Wynikowe mapy przedstawiono na Rys. 30 – dla kierunku pionowego oraz Rys. 31 dla kierunku poziomego wschód-zachód. Stanowią one również Załączniki 1.1 oraz 1.2. Załączniki te są jednocześnie efektami rzeczowymi zadania.

Opisane warstwy, stanowiące składowe wyników map są możliwe do wyświetlenia na portalu PIG-PIB

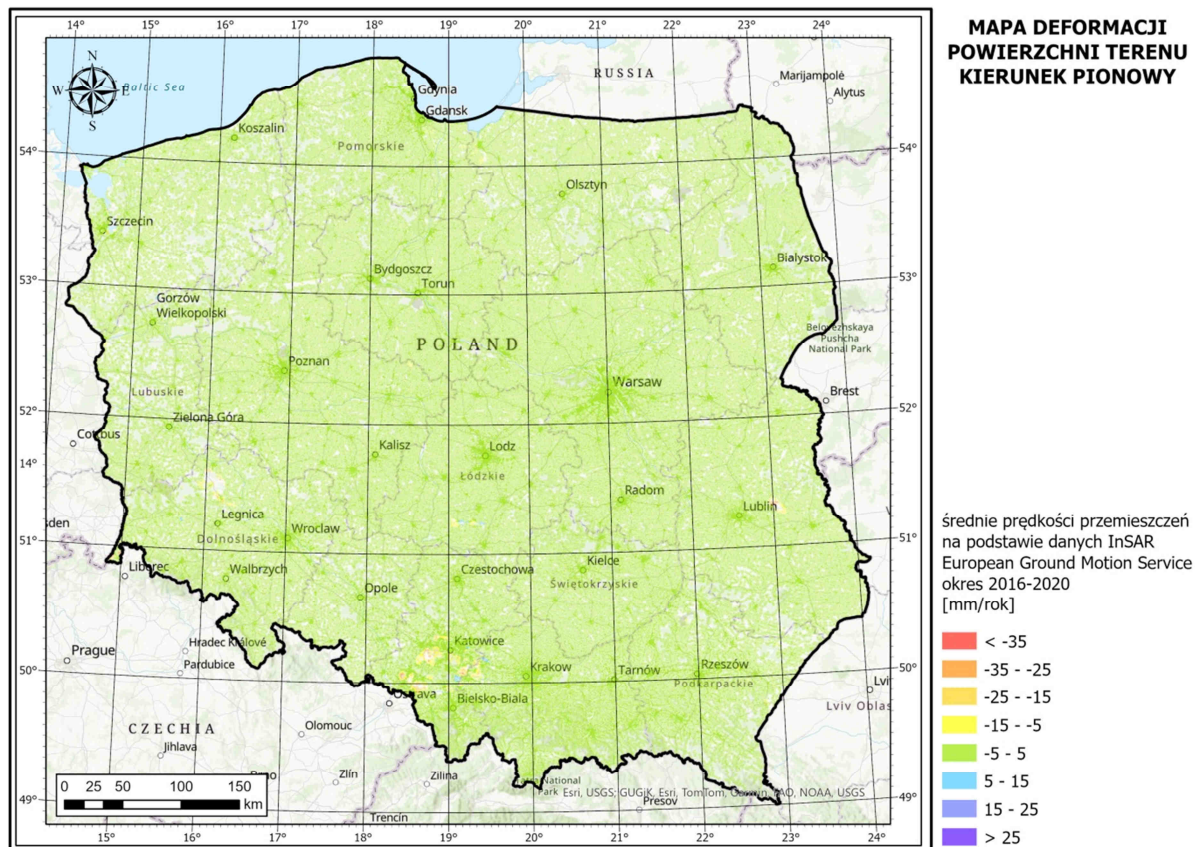
<https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/?page=Deformacje-terenu>

oraz jako usługa WMS

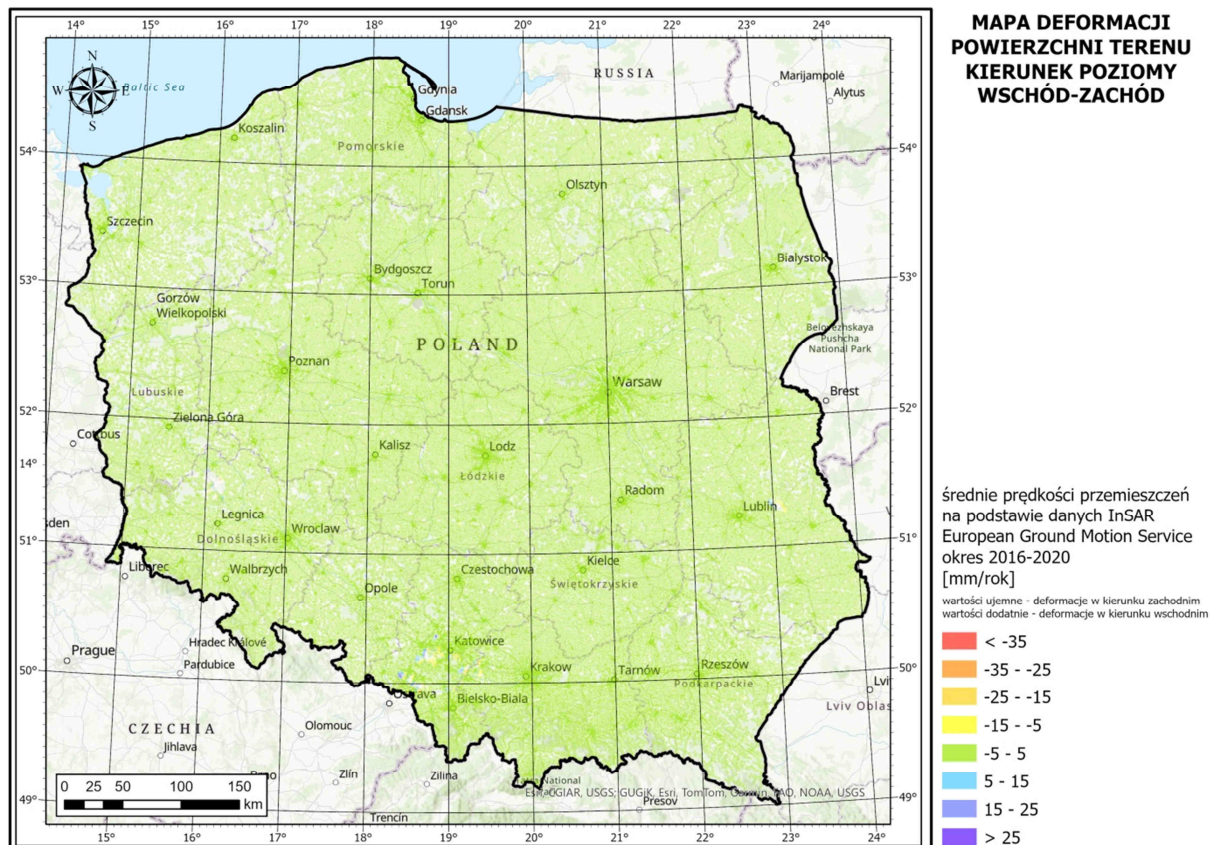
<https://cbdgmapi.pgi.gov.pl/arcgis/services/geozagrozenia/inmotep/MapServer/WMSServer>

Internetowa strona projektu, gdzie przedstawiono główne założenia oraz uzyskane wyniki prac znajduje się pod adresem:

<https://www.pgi.gov.pl/monitoring-osiadan/o-projeckie.html>



Rys. 30 Mapa deformacji powierzchni terenu w kierunku pionowym na podstawie danych serwisu EGMS dla okresu 2016-2020.



Rys. 31 Mapa deformacji powierzchni terenu w kierunku poziomym wschód-zachód na podstawie danych serwisu EGMS dla okresu 2016-2020.

8. Literatura

- 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.
- Costantini, M., Minati, F., Trillo, F., Ferretti, A., Novali, F., Passera, E., Andersen, H. S., 2021. European ground motion service (EGMS). In *2021 IEEE international geoscience and remote sensing symposium IGARSS* (pp. 3293-3296). IEEE.
- Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas-González, M., Devanthéry, N., & Crippa, B. 2015. Persistent scatterer interferometry: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 78-89.
- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F., 1999. Permanent Scatterers in SAR Interferometry. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1999. IGARSS '99*, 1–3.
- Fuhrmann, T., & Garthwaite, M. C., 2019. Resolving three-dimensional surface motion with InSAR: Constraints from multi-geometry data fusion. *Remote Sensing*, 11(3), 241.
- Goldstein, R.M., Zebker, H.A., Werner, C.L., 1988. Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping. *Radio Sci.* 23, 713–720.
- Hanssen, R.F., 2005. *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis* 2nd ed., Heidelberg: Springer Verlag.
- Marciniec P. i in., 2019- „Osuwiska w Polsce- od rejestracji do prognozy, czyli 13 lat projektu SOPO”, *Przegląd Geologiczny*, vol.67, nr.5, Warszawa

- Massonnet, D., Feigl, K.L., 1998. Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface. *Rev. Geophys.* 36, 441–500.
- Mizerski W., 2014- „Geologia Polski” PWN, Warszawa
- Mizerski W., Graniczny M., 2017-„Geozagrożenia” PWN, Warszawa
- Perissin, D. i in., 2006. On the physical characterization of SAR Permanent Scatterers in urban areas. *Proceedings of EUSAR'06*.
- Perski, Z. & Hanssen, R., 2006. The interpretation of Bam fault kinematics using envisat SAR interferometric data. In *European Space Agency, (Special Publication) ESA SP*.
- Perski, Z., 1999. Osiadania terenu GZW pod wpływem eksploatacji pozdziemnej określane za pomocą satelitarnej interferometrii radarowej (InSAR). *Przegląd Geol.* 2, 171–174.
- 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*, Vol. 16.
- Trusheim, F., 1957, Über Halokinese und ihre Bedeutung für die strukturelle Entwicklung Norddeutschlands”, *Deutsche Geol. Gesell. Zeitschr.* 109, 111–151.
- Wojciechowski T., 2019 – „Podatność osuwiskowa Polski” *Przegląd geologiczny*, vol.67, nr 5
- Wojciechowski, T., Laskowicz, I., Kos, J., Marciniak, P., Uścińowicz, G., Przyłucka, M., & Wódka, M. (2022). Zagrożenia geologiczne w Polsce w 2021 roku. *Przegląd Geologiczny*, 70(9), 617-626.
- Wojciechowski, T., Laskowicz, I., Nescieruk, P., Marciniak, P., Uścińowicz, G., Czerwiński, T., & Perski, Z. (2021). ARTYKUŁY INFORMACYJNE Zagrożenia geologiczne w Polsce w 2020 roku. *Przegląd Geologiczny*, 69(5), 303-311+.
- Zebker, H.A., Villasenor, J., 1992. Decorrelation in interferometric radar echoes. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 30, 950–959.
- Zuchniiewicz i in., 2007- „Uwagi o neotektonice Polski: wybrane przykłady”, *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego* 425: 105-128, Warszawa
- Żelaźniewicz A., 2011- „Regionalizacja Tektoniczna Polski”, *Komitet Nauk Geologicznych PAN*, Wrocław