



Państwowy Instytut Geologiczny
Państwowy Instytut Badawczy
państwowa służba geologiczna

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

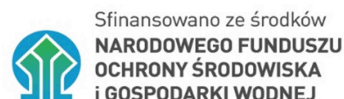
Raport 2a Analizy deformacji dla terenów o szczególnym znaczeniu Górnośląskie Zagłębie Węglowe

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



Wykonawca:

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



Osoba sporządzająca raport:

dr inż. Maria Przyłucka
mgr Grzegorz Suszka

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	1.2a
Autorzy	Maria Przyłucka Zbigniew Perski Janusz Jureczka Włodzimierz Krieger Izabela Ługiewicz-Mołas Weronika Nadłonek Michał Rolka Grzegorz Suszka
Uwagi	

Spis treści

Wstęp.....	7
1 Charakterystyka obszaru GZW	8
1.1 Położenie administracyjne i geograficzne	8
1.2 Morfologia, hydrografia i zagospodarowanie przestrzenne	9
1.3 Zarys budowy geologicznej oraz warunków hydrogeologicznych	10
1.4 Zagospodarowanie złóż węgla kamiennego	14
2 Eksploatacja górnicza na obszarze GZW	16
2.1 Rys historyczny eksploatacji węgla kamiennego i innych kopalin	16
2.2 Płytkie kopalnictwo	18
2.3 Obecna eksploatacja złóż węgla kamiennego	25
3 Wpływ dokonanej eksploatacji podziemnej na powierzchnię terenu GZW	28
3.1 Zmiany morfologii terenu.....	28
3.2 Zmiany stosunków wodnych	29
3.3 Wpływ eksploatacji na obiekty infrastruktury naziemnej	31
4 Składowe mapy i ich przygotowanie	33
4.1 Wyniki otrzymane w etapie I.....	33
4.2 Analiza osiadania w okresie 1992-2012 na podstawie danych InSAR	34
Dane DInSAR.....	34
Dane PSI	35
Analiza wyników przetworzeń InSAR	37
Mapa skumulowanego osiadania DInSAR.....	38
Strefy wpływu górnictwa na podstawie danych PSI	38
4.3 Analiza osiadania w okresie 2012-2021 na podstawie danych InSAR i LIDAR.....	41
Dane DInSAR.....	42
Dane PSI	42
Dane LIDAR.....	44
Analiza wyników przetworzeń InSAR	44
Analiza wyników różnicowego modelu LIDAR.....	46
5 Mapa deformacji	51
6 Interpretacja mapy deformacji	54
7 Literatura.....	55

Spis rysunków

Rys. 1 Położenie administracyjne i zasięg GZW.	8
Rys. 2 Ukształtowanie powierzchni terenu wraz z siecią hydrograficzną.	10
Rys. 3 Mapa geologiczna GZW odkryta po karbon.	12
Rys. 4 Rozmieszczenie i zagospodarowanie złóż węgla kamiennego.	15
Rys. 5 Rejony z zaniechaną eksploatacją górniczą na tle topografii terenu.	18
Rys. 6 Obszary płytkiej i powierzchniowej eksploatacji węgla kamiennego w GZW.	20
Rys. 7 Rejony płytkiej eksploatacji w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym.	21
Rys. 8 Rejon I płytkiej eksploatacji w GZW.	22
Rys. 9 Rejon II płytkiej eksploatacji w GZW.	22
Rys. 10 Obszary płytkiej eksploatacji na pograniczu Katowic i Siemianowic (pomniejszona mapa w skali 1:10 000).	23
Rys. 11 Rejon III płytkiej eksploatacji w GZW.	24
Rys. 12 Rejon IV płytkiej eksploatacji w GZW.	24
Rys. 13 Rejon V płytkiej eksploatacji w GZW.	25
Rys. 14 Rejony obecnej eksploatacji złóż węgla kamiennego.	28
Rys. 15 Mapa deformacji terenów mogących powodować szkody w środowisku i zniszczenia infrastruktury technicznej obszaru Górnośląskiego Zagłębia Węglowego wykonana w oparciu o dostępne satelitarne dane archiwalne obejmujące okres 1992-2017 r. Mapa ilustruje współzależność pomiędzy historycznymi nieckami osiadań, dynamiką osiadania w latach 1993-2010 oraz prędkościami współczesnych ruchów (lata 2014-2017).	34
Rys. 16 Zasięg przestrzenny zbiorów danych InSAR na obszarze Górnośląskiego Zagłębia Węglowego dla okresu 1992-2012.	37
Rys. 17 Pokrycie czasowe interferogramów DInSAR. Każdy wiersz odnosi się do zestawu danych SAR wykorzystywanych do tworzenia interferogramów. Najniższy wiersz o nazwie „DInSAR surfaces” nawiązuje do obrazów osiadań całego GZW utworzonych na podstawie interferogramów.	38
Rys. 18 (a) Wykorzystane zbiory danych PSI. Żółto-pomarańczowe i czerwone punkty reprezentują wartości osiadania. (b) Interpolowane zbiory danych PSI z wyznaczonymi wartościami warstw prędkości -4 i -8 mm/rok.	39
Rys. 19 Mapa osiadań terenu spowodowanych eksploatacją górniczą na Górnym Śląsku w latach 1992-2012 na podstawie danych InSAR.	40
Rys. 20 Osiadania skumulowane na powierzchniach DInSAR od lutego 2007 r. do grudnia 2012 r. w odstępach 6-miesięcznych, z uwzględnieniem zakresów prowadzonej w tym czasie eksploatacji górniczej.	41
Rys. 21 Diagram odstępów czasowych pomiędzy kolejnymi scenami Sentinel-1 SLC SAR używanymi do przetwarzania DInSAR (czarny) i PSI (niebieski).	43
Rys. 22 Przetwarzanie InSAR i różnicowe wyniki LIDAR.	47
Rys. 23 (A) Porównanie osiadań zidentyfikowanych za pomocą DInSAR (żółte wielokąty), różnicowego LIDAR (niebieskie wielokąty) i przetwarzania PSI (różowe wielokąty). Profile użyte do porównania różnicowego modelu LIDAR i mapy InSAR pokazano czarnymi liniami. (B) – (G) Powiększenie wybranych obszarów; wyniki osiadań z DInSAR (wartości czerwono-żółte), różnicowego LIDAR (raster niebiesko-fioletowy) i PSI (niebiesko-czerwone punkty z czerwoną warstwą -5 mm/rok).	50
Rys. 24 Przekroje przez różnicowy model LIDAR i wyniki DInSAR na wybranych profilach liniowych (lokalizacja profili na Rys. 23).	51
Rys. 25 Mapa wpływu działalności górniczej na powierzchnię w latach 1992-2021 na podstawie danych InSAR i różnicowego modelu terenu LIDAR.	52
Rys. 26 Wynikowa mapa deformacji pionowych na obszarze GZW uzyskana na podstawie danych InSAR z okresu 2015-2020.	53

Spis tabel

Tab. 1 Udokumentowane złoża węgla kamiennego w obszarze GZW według stanu na 31.12.2022 r.....	26
Tab. 2 Charakterystyka zestawów danych InSAR.....	36
Tab. 3 Główna charakterystyka przetworzonych zbiorów danych InSAR Sentinel-1. W prawej dolnej części histogram punktów PS średnich wartości prędkości.....	43
Tab. 4 Schemat pozyskanych sceny SAR Sentinel-1 SLC ze ścieżki descending 124 do przetworzenia DInSAR dla obszaru badań z liczbą przedziałów czasowych uzyskanych interferogramów.....	43

Wstęp

Raport stanowi wynik prac przeprowadzonych na obszarze Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW). Obszar badawczy został wytypowany jako jeden z obszarów o szczególnym znaczeniu, dla którego przeprowadzono dodatkowe analizy InSAR, wykraczające poza wyniki serwisu European Ground Motion Service (patrz Raport 1).

Na terenie GZW podziemna eksploatacja węgla kamiennego powoduje duże deformacje powierzchni terenu. Aktywne niecki osiadania powodują zniszczenia infrastruktury i stanowią ciągłe zagrożenia. Zamykanie obszarów górniczych sprawia, że odpowiedzialność za osiadania terenu, które zachodzą nawet kilkanaście lat po ustaniu eksploatacji, spoczywa na barkach administracji samorządowej. Organy administracji nie są jednak przygotowane do monitorowania tego typu geozagrożeń. Dzięki satelitarnej interferometrii radarowej, można określać wielkość deformacji na znacznych obszarach i w jednym czasie, z bardzo dużą dokładnością, co jest niemożliwe do osiągnięcia dużo droższymi klasycznymi metodami naziemnymi.

Podstawą opracowania mapy deformacji pogórnicy była mapa deformacji GZW przygotowana w etapie I projektu. Została ona opracowana na podstawie archiwalnych danych radarowych z satelitów ERS-1/2, Envisat, TerraSAR-X oraz Sentinel-1 a także historycznych danych kartograficznych. Mapa ta jest spójnym i regionalnym obrazem złożonych zmian powierzchni terenu tego obszaru w ciągu ostatnich 100 lat. Dane te stanowiły istotną pomoc w interpretacji zachodzących zjawisk obserwowanych współcześnie.

Do określenia skali osiadania, które zaszło po 2013 roku wykorzystano przetworzenia scen satelitarnych Sentinel-1 od roku 2015 do 2020 oraz wysokorozdzielcze numeryczne modele terenu z danych LIDAR z lat 2012 i 2021. Złożone analizy geostatystyczne pozwoliły na połączenie informacji otrzymanych z różnych rodzajów danych i wykonanie kompleksowej mapy pionowych przemieszczeń dla obszaru całego Zagłębia.

Raport zawiera opis obszaru badań w kontekście geologicznym oraz prowadzonej współcześnie i w przeszłości działalności górniczej, pełne zestawienie wszystkich wykorzystanych danych, ich analizę i opis wynikowej mapy.

1 Charakterystyka obszaru GZW

1.1 Położenie administracyjne i geograficzne

Obszar Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW) znajduje się w południowej części Polski oraz w rejonie ostrawsko-karwińskim w Republice Czeskiej. Całkowita powierzchnia zagłębia wynosi ok. 7250 km², w tym na terenie państwa polskiego ok. 5600 km². Pod względem administracyjnym Górnośląskie Zagłębie Węglowe (w obrębie Polski) położone jest w województwie śląskim (ponad 70% obszaru) i w województwie małopolskim.

Południowo-wschodnia część GZW, leżąca w województwie małopolskim, zasięgiem obejmuje powiaty: olkuski, chrzanowski, krakowski, oświęcimski, wadowicki, suski i myślenicki. W województwie śląskim obszar GZW obejmuje powiaty: gliwicki, tarnogórski, będziński, raciborski, rybnicki, wodzisławski, cieszyński, bielski, pszczyński, mikołowski, bieruńsko-lędziński oraz miasta na prawach powiatu: Piekary Śląskie, Gliwice, Zabrze, Bytom, Świętochłowice, Siemianowice Śląskie, Chorzów, Sosnowiec, Ruda Śląska, Rybnik, Żory, Jastrzębie Zdrój, Bielsko-Biała, Tychy, Katowice, Mysłowice, Jaworzno oraz Jaworzno (Rys 1).



Rys. 1 Położenie administracyjne i zasięg GZW.

Pod względem geograficznym Górnośląskie Zagłębie Węglowe leży w obrębie trzech prowincji: Wyżyny Polskie, Karpaty Zachodnie z Podkarpaciem Zachodnim i Północnym oraz w niewielkiej części w prowincji Niż Środkowoeuropejski (Richling i in., 2021).

W obrębie Niżu Środkowoeuropejskiego, podprowincji Niziny Środkowopolskie, makroregionie Nizina Śląska, mezoregionie Brama Raciborska znajduje się niewielki południowo-zachodni fragment GZW.

Południowo-zachodnia, zachodnia, północno-zachodnia, północna i północno-wschodnia część obszaru zagłębia położona jest w obrębie prowincji Wyżyny Polskie, podprowincji Wyżyna Śląsko-Krakowska, makroregionie Wyżyna Śląska, mezoregionach: Płaskowyż Rybnicki, Obniżenie Bojszowa, Garb Tarnogórski, Wyżyna Katowicka, Pagóry Jaworznickie oraz makroregionie Wyżyna Woźnicko-Wieluńska, mezoregionie Obniżenie Górnej Małej Panwi (północna część obszaru badań).

Z kolei, wschodnia część GZW znajduje się w makroregionie Wyżyna Krakowsko-Częstochowska, mezoregionach: Wyżyna Olkuska, Rów Krzeszowicki i Garb Tenczyński.

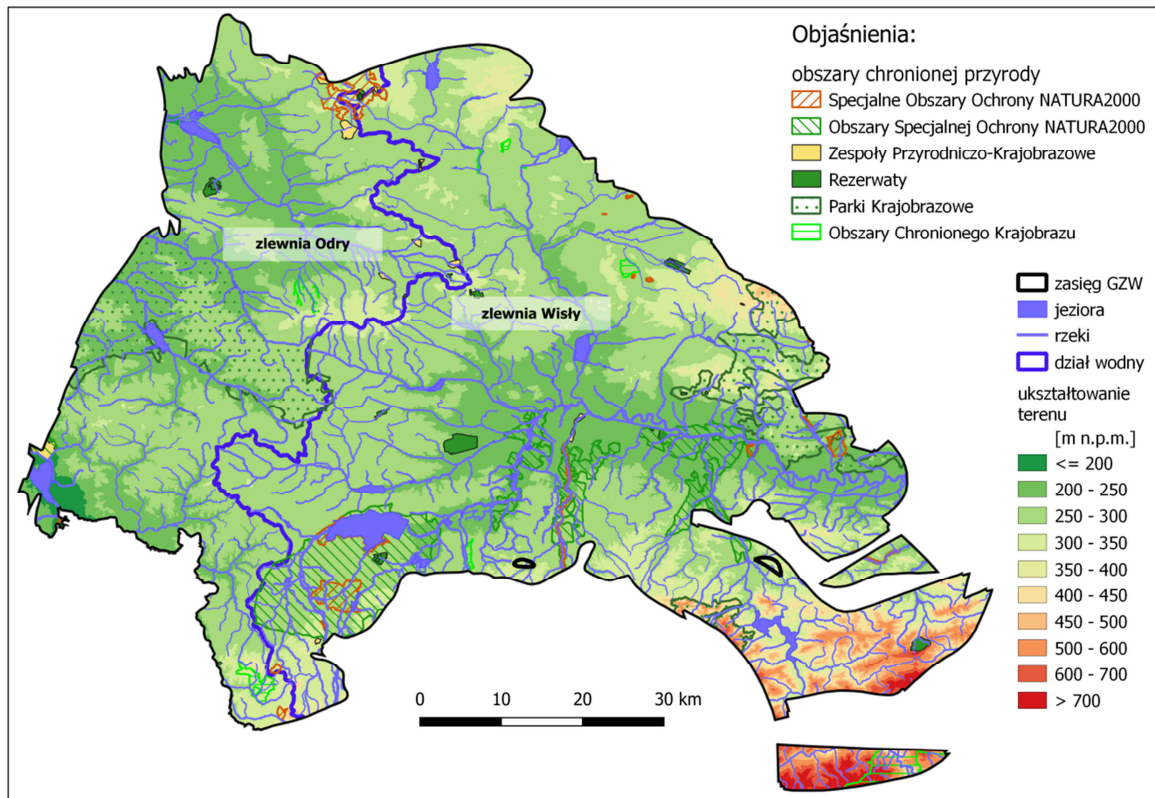
Centralna i południowa część obszaru znajduje się w zasięgu prowincji Karpaty Zachodnie z Podkarpaciem Zachodnim i Północnym, podprowincji Podkarpace Północne, w makroregionie Kotlina Ostrawska (część południowo-zachodnia), mezoregionie Kotlina Olzy i Wysoczyzna Kończycka, makroregionie Kotlina Oświęcimska, mezoregionie Równina Pszczyńska (część centralna), Dolina Górnej Wisły i Pogórze Wilamowickie, makroregionie Brama Krakowska, mezoregionie Obniżenie Cholerzyńskie i Rów Skawiński.

Skrajnie południowa i południowo-wschodnia część GZW leży w podprowincji Zewnętrzne Karpaty Zachodnie, makroregionie Pogórze Zachodniobeskidzkie, mezoregionach Pogórze Śląskie i Pogórze Wielickie, makroregionie Beskidy Zachodnie (mezoregiony Beskid Mały, Beskid Makowski, Pasma Pewelsko-Krzeczowskie i Beskid Żywiecko-Orawski).

1.2 Morfologia, hydrografia i zagospodarowanie przestrzenne

Górnośląskie Zagłębie Węglowe jest jednym z największych obszarów działalności górniczej w Europie. W wyniku długotrwałej eksploatacji węgla kamiennego, ale również piasków podsadzkowych, rud cynku i ołowiu oraz surowców skalnych, obszar ten został silnie zurbanizowany i przekształcony antropogenicznie (Jureczka i Kotas, 1995; Dulias, 2013); charakterystyczne są liczne deformacje terenu. Pogórnice antropogeniczne formy rzeźby na obszarze GZW łącznie zajmują powierzchnię 149,6 km² (3,3% całego obszaru zagłębia). Najwięcej form antropogenicznych znajduje się w obrębie Wyżyny Śląskiej. Należą do nich zwałowiska, kamieniołomy, glinianki, wyrobiska po eksploatacji kruszyw naturalnych i piasków podsadzkowych. Ich występowanie w obrębie poszczególnych mezoregionów geomorfologicznych jest mocno zróżnicowane. Na obszarze Górnośląskiego Zagłębia Węglowego, zwłaszcza w części północno-centralnej, występują liczne deformacje ciągłe (niecki osiadań) i nieciągłe (głównie leje, zapadliska), związane z płytką eksploatacją węgla kamiennego oraz rud cynku i ołowiu. Niezależnie od ruchów powierzchni wywołanych eksploatacją węgla kamiennego, na obszarze GZW występują również naturalne ruchy neotektoniczne (Dulias, 2013).

Powierzchnia GZW w ogromnej większości położona jest na wysokościach 200–300 m n.p.m. (Rys. 2). Obszary w północnej, północno-wschodniej i południowo-zachodniej części leżą na wysokościach 300–400 m n.p.m. Największe wysokości występują w południowo-wschodniej części GZW, w rejonie Karpat, osiągając ponad 700 m n.p.m.



Rys. 2 Ukształtowanie powierzchni terenu wraz z siecią hydrograficzną.

Zagospodarowanie przestrzenne powierzchni terenu jest zróżnicowane. Obszar GZW charakteryzuje się zwartą zabudową, stanowiącą około 1/3 powierzchni obszaru (głównie północna i wschodnia część) i znacznym stopniem zalesienia (głównie centralna i zachodnia część – około 13% powierzchni). Na obszarze GZW znajduje się 12 obszarów chronionego krajobrazu, w części południowej 5 obszarów specjalnej ochrony (Dolina Górnej Wisły, Dolina Dolnej Skawy, Stawy Wielikąt i Las Tworkowski, Stawy w Brzeszczach i Dolina Dolnej Soły), liczne pomniki przyrody, 29 rezerwatów oraz 7 parków krajobrazowych (w części wschodniej, zachodniej i południowej) wraz z otulinami.

Większa, wschodnia część obszaru GZW (około 60% powierzchni) należy do dorzecza Wisły i jest odwadniana głównie przez Wisłę, Przemszę, Pszczyнкę, Gostynię, Sołę oraz Skawę. Zachodnia część GZW należy do dorzecza Odry, odwadniają ją m.in. Kłodnica, Ruda, Bierawka i Olza (Rys. 2).

1.3 Zarys budowy geologicznej oraz warunków hydrogeologicznych

Profil geologiczny

W budowie geologicznej obszaru Górnośląskiego Zagłębia Węglowego biorą udział osady czwartorzędu, neogenu (głównie miocenu), paleogenu i kredy – nasunięcia karpackiego (w najbardziej wysuniętej na południe części), jury, triasu, permu, karbonu, dewonu, kambriu oraz prekambriu (Jureczka i in., 2005).

Czwartorzęd reprezentowany przez osady aluwialne, fluwioglacjalne i eoliczne, tworzy nieciągłą pokrywę osadową składającą się z piasków i żwirów przewarstwionych glinami

i łożami. Ich miąższość jest zróżnicowana, zazwyczaj wynosi 10–40 m, jedynie w dolinach rzecznych osiąga 100 m.

Neogen stanowią morskie osady miocenu, tworzące nieciągłą pokrywę osadową leżącą na silnie morfologicznie zróżnicowanej powierzchni karbońskiej, częściowo również na utworach triasu lub jury, oraz na niewielkim obszarze osady pliocenu. Najmłodsze osady miocenne zbudowane ze skał ewaporatowych zalegają głównie w zachodniej części zagłębia, osiągając miąższości do 150 metrów, oraz osadów ilasto-mułowcowych miąższości do 300 m. Miocenną formację skawińską (kompleks ilasto-mułowcowy) cechuje największy zasięg, ale również zróżnicowana miąższość osadów, wzrastająca w kierunku południowym do 1100 metrów (Jureczka i Kotas, 1995). Jej miąższość jest zmienna i wynosi zwykle 100–300 m i wzrasta w kierunku południowym do 1100 m. W centralnej i zachodniej części GZW zalegają lądowe osady klastyczne należące do formacji kłodnickiej. Na południu głębokie rynnne erozyjne wypełniają osady formacji dębowieckiej. Tworzą ją skały gruboklastyczne, głównie zlepieńce i piaskowce, ze sporadycznymi przewarstwieniami mułowców i łożowców, a ich miąższość waha się zazwyczaj od 100 do 150 m.

W południowej części GZW na osady miocenne formacji skawińskiej lub dębowieckiej nasunięte są utwory **fliszu karpackiego** (osady płaszczowin śląskiej i podśląskiej), osiągając średnio 800 m miąższości. W kierunku południowo-wschodnim miąższość tych osadów znacznie wzrasta, osiągając 2000 m w rejonie Suchej Beskidzkiej.

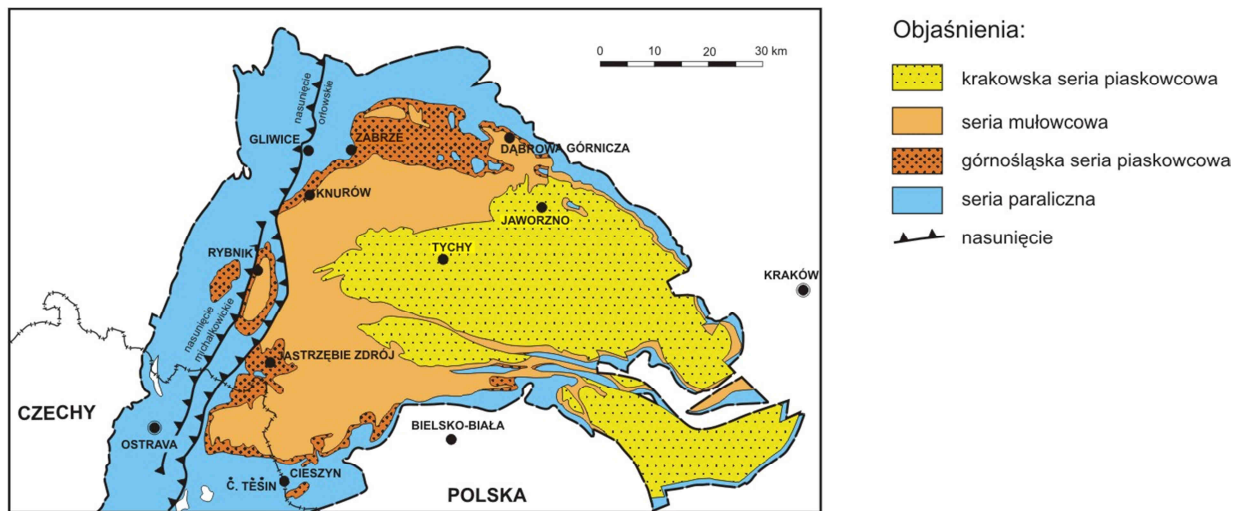
Osady **jury** występują jedynie w skrajnie wschodniej części GZW, głównie w okolicy Chrzanowa, i są wykształcone w postaci margli, wapieni skalistych i płytowych oraz piaskowców. Ich miąższość dochodzi do 100 m.

Trias zalega głównie w północnej i wschodniej części zagłębia, a na pozostałym – centralnym – obszarze tworzy izolowane płyty. Utwory tego okresu reprezentowane są przez dolomity, margle i wapienie jamiste triasu środkowego (wapienia muszlowego) i retu oraz piaskowce, łożowce i mułowce triasu dolnego (pstrygo piaskowca). W okolicach Chrzanowa i w niecce bytomskiej występują dolomity kruszconośne. Miąższość kompleksu triasowego nie przekracza 230–250 m.

Osady **permu** (czerwonego spągowca) występują głównie we wschodniej i skrajnie północnej części zagłębia, niezgodnie zalegając na warstwach karbonu produktywnego i tworząc izolowane wzgórza. W skrajnie północno-zachodniej części leżą pod przykryciem utworów triasowych. Najwyżej zalegają tufy filipowickie, melafiry i porfiry, a niżej zlepieńce myślachowickie i martwica wapienna. Miąższość całej serii osiąga do 400 m (Jureczka i Kotas, 1995).

We wschodniej części GZW występują utwory **arkozy kwaczalskiej** zaliczane do karbonu górnego (stefanu) o miąższości maksymalnej wynoszącej 170 m. Są to gruboziarniste piaskowce arkozowe i żwiry przeławiczone czerwonymi i pstrymi łupkami.

W obrębie utworów **karbonu produktywnego** wydziela się 4 serie litostratygraficzne: krakowską serię piaskowcową, serię mułowcową, górnośląską serię piaskowcową oraz serię paraliczną (Rys. 3). Wyraźnie zaznacza się dwudzielność tych osadów – w niższej części są to osady o wyraźnych wpływach okresowych zalewów morskich (seria paraliczna) oraz trzy wyżej leżące serie osadów lądowych.



Rys. 3 Mapa geologiczna GZW odkryta po karbon.

Najmłodsza formacja – krakowska seria piaskowcowa występuje w centralnej i wschodniej części Górnos Śląskiego Zagłębia Węglowego. Obejmuje warstwy libiąskie i łaziskie, oddzielone luką stratygraficzną. Litologicznie są to piaskowce grubo- i średnioziarniste (ok. 70–90% profilu), tworzące grube, dużej miąższości pakiety. Pakiety te rozdzielone są interwałami osadów drobnoziarnistych, w obrębie których znajdują się pokłady węgla. Krakowska seria piaskowcowa zawiera 40 pokładów, w tym 20 o znaczeniu bilansowym, o miąższości sięgającej 6–7 m. Maksymalna miąższość serii wynosi 1140 m w rejonie Libiąża. Seria mułowcowa obejmująca warstwy orzeskie s.s. i warstwy załęskie zajmuje największy obszar wśród lądowych osadów karbonu produktywnego. Tworzą ją utwory drobnoklastyczne: mułowce, mułowce piaszczyste, podrzędnie iłowce. Miąższość tej serii wzrasta w kierunku zachodnim. Występuje tu 160 pokładów węgla, z czego 70 ma znaczenie ekonomiczne. Pokłady są stosunkowo cienkie (rzadko przekraczają 1,5 m), silnie zmienne i często zawierają przerosty skały płonnej. Największa miąższość pokładów węgla cechuje spągową część serii (pokład 405). Górnos Śląska seria piaskowcowa (warstwy rudzkie s.s. i warstwy siodłowe) zbudowana jest głównie z piaskowców i zlepieńców (70–90% profilu) oraz w mniejszej ilości z mułowców i iłowców. Występuje tu około 60, zazwyczaj dość miąższych (4–8 m), pokładów węgla, najgrubszy pokład 510 osiąga 24 m. Górnos Śląska seria piaskowcowa charakteryzuje się zmienną miąższością, maksymalnie osiąga około 1100 m, w kierunku wschodnim ulega całkowitej redukcji. Seria paraliczna występuje na całym obszarze GZW. W profilu cyklicznie występują osady klastyczne (piaskowce, rzadziej zlepieńce, oraz mułowce i iłowce) oraz osady fitogenetyczne (łupki węglowe i pokłady węgla). Dolną granicę serii wyznacza strop poziomu morskiego Śtur. W obrębie serii paralicznej stwierdzono występowanie około 110 przeważnie cienkich, nie przekraczających 1–1,5 m pokładów węgla. Miąższość serii jest zmienna, wynosi prawie 3800 m w części zachodniej, w kierunku wschodnim ulega redukcji do około 200 m (Jureczka i Kotas, 1995).

Poniżej karbonu węglonośnego zalegają osady **kulmu** (asocjacji fliszowej), które charakteryzuje praktycznie całkowity brak pokładów węgla. Są to warstwy malinowickie w północnej i wschodniej części GZW, warstwy załaskie w części wschodniej i kijowickie w części czeskiej. Miąższość kulmu waha się od 200 do 1500 m. Poniżej utworów diastroficznej asocjacji fliszowej zalegają **osady węglanowe** należące do kompleksu dewońsko-dolnokarbońskiego. Seria wapienna zbudowana jest z wapieni organodetrytycznych i organogenicznych, miejscami pelitycznych i pseudoolitowych z przewarstwieniami mułowców,

tufitów i litytów. W spągu kompleksu zalega seria dolomityczna. Litologicznie są to ciemnoszare i czarne dolomity (250–290 m) z nielicznie występującymi, cienkimi wkładkami margli i mułowców. Maksymalna miąższość całej serii węglanowej wynosi 1170 m. W obrębie utworów **dewonu** występują również skały klastyczne, obejmujące zlepieńce i piaskowce, przewarstwione mułowcami i iłowcami o miąższościach dochodzących maksymalnie do około 80 m (dewon dolny). Osady **kambru** składają się głównie z piaskowców (zazwyczaj zlepieńcowatych), natomiast w górnej części z mułowców i iłowców. Miąższość utworów kambryjskich waha się od 0 do 1100 m. **Prekambryjskie podłoże krystaliczne** jest zbudowane ze skał metamorficznych i magmowych oraz kompleksu słabo zmetamorfizowanych skał pelitowych i psamitowych.

Tektonika

Budowa geologiczna Górnośląskiego Zagłębia Węglowego kształtowała się wskutek ruchów górotwórczych, które następowały głównie podczas orogenezy waryscyjskiej, a następnie została zmodyfikowana w okresie alpejskiej epoki tektonicznej. Model budowy strukturalnej na przeważającej części zagłębia został ukształtowany przez tektonikę dysjunktywną (blokową). Efektem aktywności górotwórczej jest skomplikowana tektonika i liczne uskoki (w tym strefy uskokowe o amplitudach zrzutu często przekraczających 200 m, a nawet, choć rzadziej, 500–1000 m, głównie o przebiegu zbliżonym do równoleżnikowego). Ponadto obserwuje się ugięcia warstw w formie synklin i antyklin, brachysynklin (niecki jejkowicka i chwałowicka), a także strefy nasunięć i sfałdowań. Tektonika fałdowa charakteryzuje zachodnią część obrzeża niecki górnośląskiej, natomiast tektonika fałdowo-blokowa wąski fragment wschodniej części GZW (Jureczka i Kotas, 1995).

Centralnym elementem strukturalnym zapadliska górnośląskiego jest niecka główna. Obszar GZW od północy ograniczony jest zasięgiem siodła głównego i niecki bytomskiej, od wschodu strukturą antyklinalną Ząbkowice-Będzin-Kryspinów, a od zachodu nieckami ostrawską i jejkowicką.

Warunki hydrogeologiczne

Najważniejsze piętra wodonośne w obrębie GZW występują w utworach czwartorzędu (bezpośrednio kontaktujących się z wodami powierzchniowymi), neogenu, triasu i karbonu, a w części wschodniej również jury. Piętra wodonośne znajdują się również w obrębie dewonu i kambru.

W czwartorzędowym profilu piętra wodonośnego wyróżnia się 1–3 poziomów wodonośnych obejmujących osady rzeczne, rzeczno-lodowcowe oraz piaski międzymorenowe o miąższościach osiagających od kilku do 100 metrów.

Kompleks wodonośny neogenu zbudowany jest z osadów ilasto-piaszczystych o miąższości od kilku do 1100 metrów (południowa część GZW). Najwyższą przepuszczalnością cechują się piaski i żwiry plioceńskie w północno-zachodniej części GZW oraz piaszczysto-ilaste utwory sarmatu (Kleczkowski, 1966; Rudzińska-Zapaśnik, 1997). Warstwy izolujące stanowią słabo wodonośne morskie utwory miocenu. W zapadlisku przedkarpaccim największy zbiornik w profilu utworów wodonośnych neogenu tworzą warstwy dębowieckie wykształcone w postaci zlepieńców, brekcji i piaskowców (Buła i in., 1994) o miąższościach od 25 do 300 m, średnio 70 m. Warstwy te zalegają zazwyczaj na głębokościach 500–1300 m p.p.t.

Na osady neogeńskie nasunięte zostały utwory fliszu karpacciego wieku neogeńsko-paleogeńsko-kredowego tworzące kompleks izolujący (Chowaniec i in., 2006) o miąższości od kilku do 300 metrów.

Piętro wodonośne jury, reprezentowane przez poziom szczelinowo-krasowy, występuje jedynie lokalnie w zasięgu Głównego Zbiornika Wód Podziemnych – triasowego zbiornika Chrzanów. Miąższości poziomu wynoszą około kilkudziesięciu metrów.

W triasowym piętrze wodonośnym występują trzy główne poziomy wodonośne: dwa poziomy szczelinowo-krasowe, związane z węglanowymi osadami wapienia muszlowego i retu oraz poziom porowy środkowego i dolnego pstręgo piaskowca. Miąższość warstw węglanowych wynosi od 20 do 120 m. Poziom wodonośny środkowego i dolnego pstręgo piaskowca (o zmiennym występowaniu) budują piaski i słabo związane piaskowce o miąższościach do dwudziestu kilku metrów. Poziom ten drenowany jest przez wyrobiska górnicze kopalń węgla kamiennego.

Utwory perm wykształcone w formie słabo przepuszczalnych, prawie całkowicie bezwodnych zlepieńców, podrzędnie piaskowców i iłowców występują jedynie we wschodniej i skrajnie północnej części GZW.

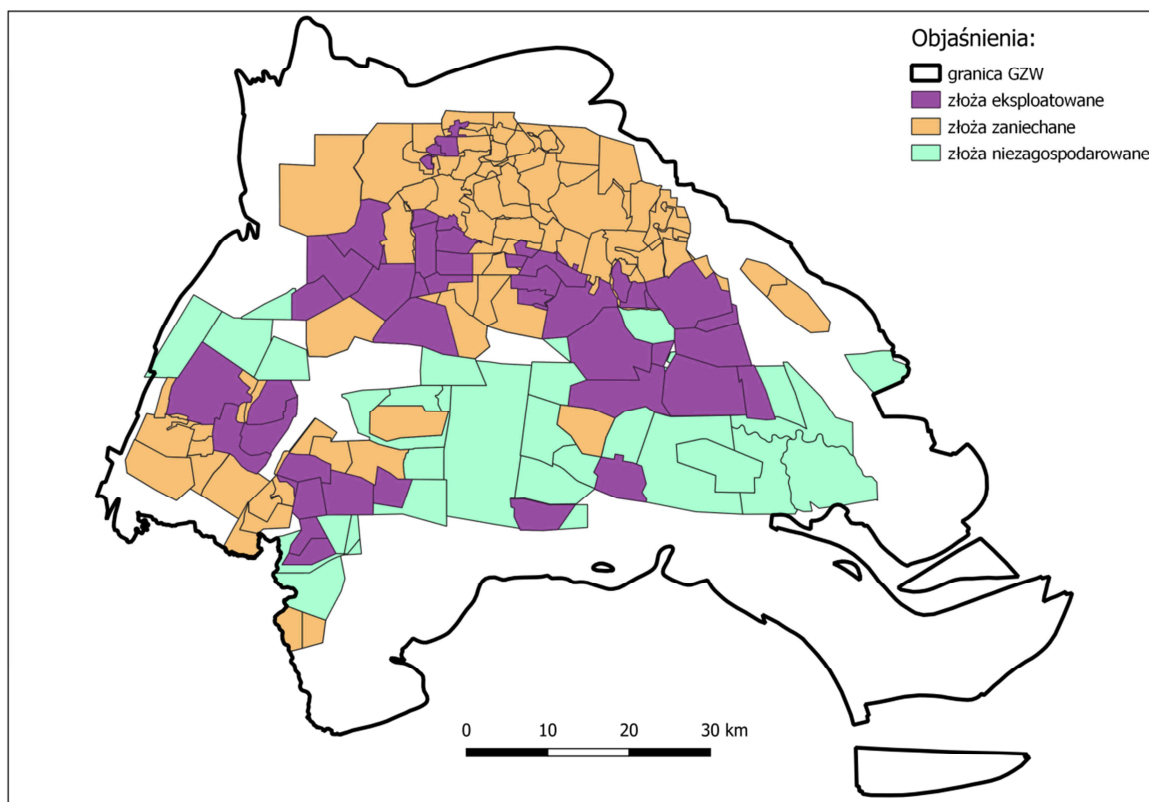
Karbońskie piętro wodonośne obejmuje cztery kompleksy wodonośne: krakowskiej serii piaskowcowej, serii mułowcowej, górnosławskiej serii piaskowcowej i serii paralicznej. Kompleksy wodonośne serii piaskowcowych są wykształcone głównie w postaci piaskowców, natomiast serię mułowcową i paraliczną tworzą kompleksy iłowcowo-mułowcowe (Wilk, 2003). Kompleksy warstw krakowskiej serii piaskowcowej i górnosławskiej serii piaskowcowej cechują wyższe wartości właściwości hydrogeologicznych skał w porównaniu do pozostałych serii. Piętro wodonośne karbonu górnego osiąga miąższości do 4,5 km. W obrębie utworów karbońskich występują odrębne szczelinowo-porowe poziomy wodonośne (piaskowce i zlepienie), izolowane wkładkami nieprzepuszczalnych iłowców. Łączność hydrauliczna występuje pomiędzy poszczególnymi poziomami wodonośnymi w strefach uskoku, a także w zasięgu wpływu oddziaływania eksploatacji górniczej. Obniżenie wodonośności i przepuszczalności warstw wodonośnych karbonu następuje wraz z głębokością.

Kompleks wodonośny dolnego karbonu oraz górnego i środkowego dewonu stanowią nieprzepuszczalne wapienie i dolomity. Południowa część GZW charakteryzuje się podwyższoną porowatością i przepuszczalnością wynikającą ze znacznego zaangażowania tektonicznego obszaru, a także występowania powierzchni skrasowiaków i zwierzających.

Łądowe utwory dolnego dewonu i kambru tworzące słabo przepuszczalny poziom porowy, zalegają w centralnej części niecki głównej na głębokości kilku kilometrów.

1.4 Zagospodarowanie złóż węgla kamiennego

Na terenie GZW już w połowie XVII wieku rozpoczęła się eksploatacja węgla kamiennego. Obecnie znajdują się tu wszystkie czynne kopalnie, z wyjątkiem jednej działającej na obszarze Lubelskiego Zagłębia Węglowego. Według stanu na 31.12.2022 r. (Szufliski i in, 2023) w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym udokumentowanych jest 145 złóż węgla kamiennego (42 złoża zagospodarowane, 51 niezagospodarowane i 52 złoża zaniechane) (Rys. 4). Łączna powierzchnia złóż udokumentowanych wynosi ponad 3488 km², złoża eksploatowane zajmują 1002 km² (zlokalizowane głównie w centralnej i południowo-zachodniej części Górnośląskiego Zagłębia Węglowego) a złoża wyeksploatowane i zaniechane – 938 km². Znaczna część złóż zaniechanych jest zlokalizowana w północnej i północno-wschodniej części Zagłębia.



Rys. 4 Rozmieszczenie i zagospodarowanie złóż węgla kamiennego.

Eksploatacja aktualnie jest prowadzona przez Polską Grupę Górniczą S.A. (7 kopalń, w tym kopalnie kilku ruchowe), Jastrzębską Spółkę Węglową S.A. (4 kopalnie, tym kopalnie kilku ruchowe), Węgłokoks Kraj S.A. (1 kopalnia), Południowy Koncern Węglowy S.A. (3 zakłady górnicze) oraz firmy/spółki prywatne (3 kopalnie). Łącznie eksploatacja jest prowadzona w 28 zakładach górniczych. Polska Grupa Górnicza S.A. utworzona w 2016 r. prowadzi eksploatację w kopalniach zlokalizowanych w centralnej i zachodniej części GZW. Przejęła 11 kopalń należących wcześniej do Kompanii Węglowej: Jankowice, Marcel, Chwałowice i Rydułtowy – obecnie KWK ROW, Bielszowice, Halemba-Wirek i Pokój – KWK Ruda, Piast i Ziemowit – KWK Piast-Ziemowit, Bolesław Śmiały i Sośnica. W 2017 roku spółka przejęła od Katowickiego Holdingu Węglowego S.A. kopalnie Mysłowice-Wesoła, Murcki-Staszic i Wujek – Oddział KWK Staszic-Wujek oraz Wieczorek. Kopalnia Wieczorek została przekazana Spółce Restrukturyzacji Kopalń w 2018 r. a pozostałe zasoby zostały oddane do eksploatacji Oddziałowi KWK Staszic-Wujek Ruch Murcki-Staszic. W składzie Południowego Koncernu Węglowego S.A. znajdują się Zakłady Górnicze Jaworzno, Janina i Brzeszcze. Przedsiębiorstwo WĘGLOKOKS S.A. prowadziło eksploatację w kopalniach „Bobrek” i „Piekary” (później kopalni „Bobrek-Piekary”) do 2020 roku. Wówczas zakończono eksploatację na KWK Bobrek-Piekary Ruch Piekary. Ponadto wydobywanie prowadzą prywatne zakłady górnicze: „SILTECH”, Zakład Górniczy EKO-PLUS Sp. z o.o., i przedsiębiorstwo PG Silesia Sp. z o.o.

2 Eksploatacja górnicza na obszarze GZW

W Górnośląskim Zagłębiu Węglowym znajdują się duże złoża różnych surowców mineralnych. Mimo że najbardziej rozpowszechniona jest eksploatacja górnicza węgla kamiennego, zagłębie posiada także blisko tysiącletnią tradycję eksploatacji złóż galeny, srebra oraz rud żelaza, a eksploatacja galmanu dała Polsce jedno z czołowych miejsc wśród górnich państw świata.

Występują tu także surowce skalne, z których największe znaczenie miała eksploatacja plejstocénskich piasków podsadzkowych. Na potrzeby przemysłu hutniczego, wapienniczego, cementowego i budowlanego wydobywano w tym rejonie dolomity, wapienie, margle, porfiry i melafiry, a w południowej części Zagłębia znajdują się także złoża solanki.

2.1 Rys historyczny eksploatacji węgla kamiennego i innych kopalin

Rozwój górnictwa węgla kamiennego w rejonie Górnośląskiego Zagłębia Węglowego jest ściśle związany z historią tego rejonu. Zainteresowanie nowym surowcem wzrosło w połowie XVII w., po zakończeniu wojny 30-letniej (1618-1648), w której zniszczona została znaczna część lasów. Dokumenty potwierdzające wydobywanie węgla kamiennego pochodzą z 1657 r. i dotyczą zalecenia, wydanego przez Erdmanna I Leopolda von Promnitz (właściciela ziemi pszczyńskiej), stosowania węgla kamiennego do świeżenia żelaza w kuźnicy jaroszowickiej.

Początkowo węgiel wydobywali chłopcy metodą odkrywkową za pomocą kilofów, łomów, motyk lub łopat. Rozwijający się gospodarczo teren Górnośląskiego Zagłębia Węglowego, bogatego w różne surowce, stał się obiektem zainteresowania Państwa Pruskiego, rosnącego w siłę na arenie międzynarodowej. Trwające ponad 20 lat Wojny Śląskie (1740-1742; 1744-1745; 1756-1763) doprowadziły do przejęcia władzy przez Prusy nad prawie całym Śląskiem. Praktycznie, od tego czasu – drugiej połowy XVIII w. można mówić o przemysłowej skali wydobywania węgla kamiennego, uregulowanej różnymi przepisami, a początkowo odkrywkowa eksploatacja tego surowca zaczęła przechodzić w regularną eksploatację podziemną eksploatację. Pierwszą zarejestrowaną według nowych przepisów kopalnią była, należąca do barona Karola von Stechowa, kopalnia „Brandenburg” (później „Wawel”) w Rudzie Śląskiej. W tym czasie (1774 r.) przeprowadzono pierwsze próby produkcji koksu, a od 1789 r. koks stosowano do produkcji ołowiu i srebra w Hucie „Fryderyk”, Uruchomiono także hutnictwo cynku, co przyczyniło się do reaktywacji górnictwa galmanu. Powstały nowe huty żelaza, wykorzystujące koks i węgiel, wzrastała też liczba maszyn parowych. Wybudowano pierwsze linie kolejowe, umożliwiające szybki i tani transport dużych ilości węgla.

Po rozbiorach Polski, Górnośląskie Zagłębie Węglowe znalazło w granicach trzech państw, tworząc odrębne okręgi górnice – górnośląski (w granicach Państwa Pruskiego/później Cesarstwa Niemieckiego), dąbrowski (w granicach Cesarstwa Rosyjskiego) i krakowski (w granicach Cesarstwa Austro-Węgierskiego). Pod zaborami górnictwo rozwijało się nadal systematycznie, jednak nieharmonijnie. Łącznie na terenie podzielonego na trzy części Zagłębia w 1913 r. pracowały 103 kopalnie, które koncerny przemysłowe zaczęły łączyć w duże kopalnie z licznymi szybami. W tym też czasie zaczęto schodzić z eksploatacją na większe głębokości, przekraczające 100–200 m. Należy jednak dodać, że cały czas prowadzone było nielegalne wydobywanie z płytko zalegających pokładów poprzez tzw. biedaszyby.

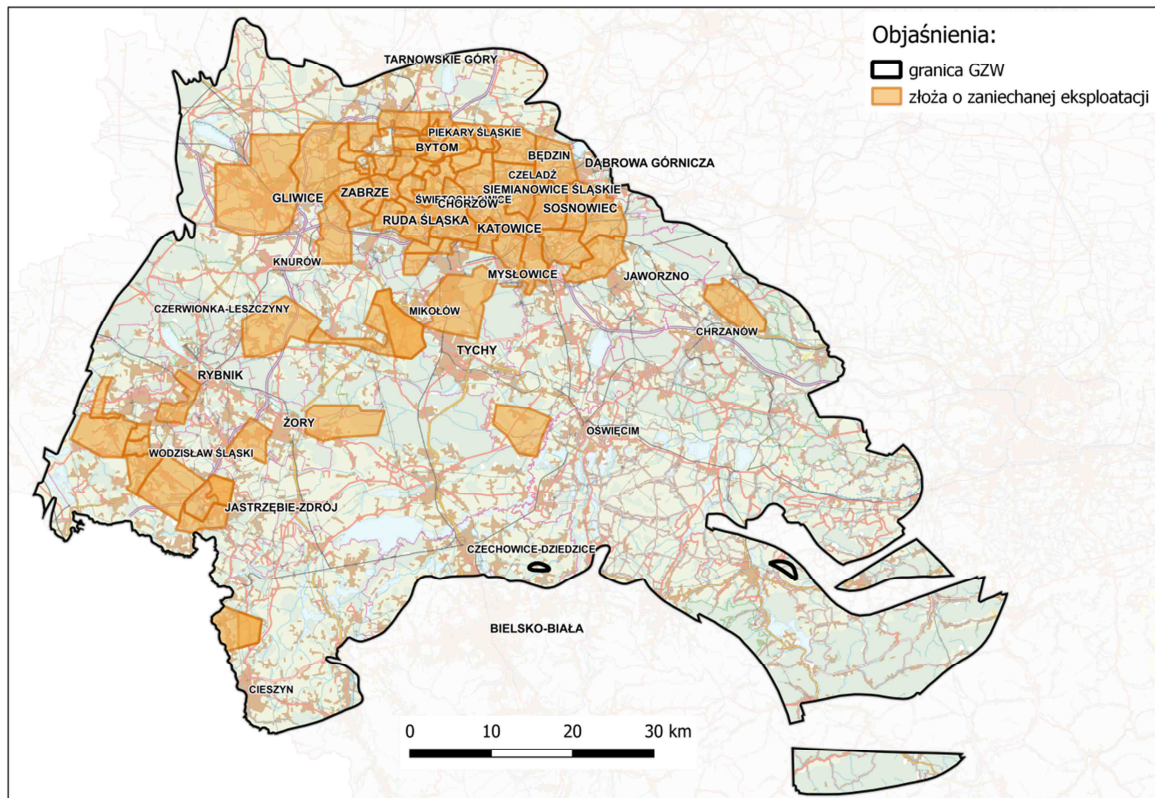
Wybuch I Wojny Światowej (1914-1918) zakończył ówczesną złotą epokę górnictwa węglowego. Od 1918 r. w granicach Polski znalazły się Zagłębia Dąbrowskie i Krakowskie, a

od 1922 r. – znaczne obszary niemieckiej części Zagłębia Górnośląskiego (bez rejonów Zabrze, Gliwic i Bytomia). Granice państwowe ostatecznie ustabilizowały się w 1945 r., po włączeniu pozostałych części zagłębia, znajdujących się w granicach Niemiec. Po II wojnie światowej nastąpił szybki rozwój górnictwa, zaczęto budować nowe kopalnie, oddawano do użytku nowe poziomy wydobywcze oraz wiele kilometrów wyrobisk i szybów. Z eksploatacją schodzono na coraz większe głębokości, praktycznie zakończone eksploatację płytką do 100 m, aczkolwiek w latach 50. i 60. prowadzono tego rodzaju działania płytkimi upadowymi, od których ostatecznie odstąpiono. Zakończono również eksploatację odkrywkową, ostaną kopalnia odkrywkowa Brzozowica została zamknięta w 1968 r. Apogeum wydobywania węgla oraz prowadzenia rozpoznawczych i dokumentacyjnych prac geologicznych miała miejsce pod koniec lat 70. XX wieku. Od tego czasu, systematycznie zaczęto wycofywać się z poszukiwania nowych złóż węgla kamiennego i zmniejszać jego wydobycie.

Kopalnie, mimo wielu dotacji państwowych, stały się w dużej części nierentowne, w związku z czym od początku lat 90. podejmowano próby ratowania przemysłu górnictwa poprzez wprowadzanie kolejnych reform, zakładających: likwidację, a następnie powoływanie nowych nadrzędnych struktur zarządzania, ograniczenie wielkości wydobywania i liczby zatrudnionych, podnoszenie efektywności działania kopalń poprzez likwidowanie kopalń nierentownych lub łączenie kopalń sąsiednich, po to by część z nich po paru latach likwidować już jako Ruch nowo powstałej po połączeniu kopalni. W niektórych przypadkach, po postawieniu kopalni w stan likwidacji i zakończeniu eksploatacji tworzone także na jej części nową jednostkę wydobywczą, którą po kilku latach funkcjonowania zamykano. Miały też miejsce jeszcze bardziej złożone przypadki, gdy po połączeniu kopalni zamykano, a z części ich obszarów tworzone nowe zakłady, lub też, gdy z kopalni zamkniętej tworzone nowe zakłady. Miały też miejsce likwidacje części kopalń.

Trwający prawie 15 lat proces restrukturyzacji górnictwa węgla kamiennego – po raz pierwszy w 2004 roku – pozwolił na odzyskanie płynności finansowej, pozwalającej na pełne regulowanie bieżących zobowiązań.

Od rozpoczęcia restrukturyzacji eksploatację zakończono w 39 kopalniach GZW, do których należy jeszcze doliczyć 8 kopalń („Jadwiga”, „Bytom I”, „Bytom II”, „Rozalia”, „Wojkowice”, „Brzeziny”, „Centrum”, „Piekary”), które powstały na bazie kopalń zamkniętych, i w których również zakończono eksploatację (Rys. 5).



Rys. 5 Rejony z zaniechaną eksploatacją górniczą na tle topografii terenu.

2.2 Płytkie kopalnictwo

Za płytką eksploatację węgla kamiennego rozumie się wydobywanie węgla kamiennego z pokładów zalegających do głębokości 80 m, licząc od powierzchni terenu (według niektórych autorów jest to 90–100 m). Głębokość ta jest zgodna z granicą przyjętą w Instrukcji nr 15 Głównego Instytutu Górniczego – „Zasady oceny możliwości prowadzenia podziemnej eksploatacji górniczej z uwagi na ochronę obiektów budowlanych” (Kwiatkiewicz i in., 2000), w której, w punkcie 3.3. zawarta jest definicja płytkiego kopalnictwa: „*Należy wyróżnić eksploatację płytką, za jaką uważa się eksploatację do głębokości 80 m oraz wyrobiska górnicze do tej głębokości (szyby, sztolnie, upadowe itp.).*”

Nie należy zapominać, że eksploatacja z najwcześniejszego okresu od połowy XVIII w. do połowy XIX w. bardzo często nie jest w ogóle udokumentowana. Wraz z późniejszym rozwojem miernictwa i kartografii sytuacja uległa znacznej poprawie. Nie oznacza to jednak pełnego udokumentowania robót górniczych do początku XX w. Uwaga ta dotyczy zwłaszcza najpłytszych robót górniczych prowadzonych przez osoby prywatne i małe przedsiębiorstwa górnicze (Kotyrba, 2005).

Odrębnym zagadnieniem jest wspomniana nielegalna eksploatacja węgla kamiennego w tzw. biedaszybach, mająca miejsce w różnych okresach historii w GZW. Eksploatacja ta zwykle nie jest zaznaczona na żadnych mapach, co uniemożliwia jej dokładną lokalizację.

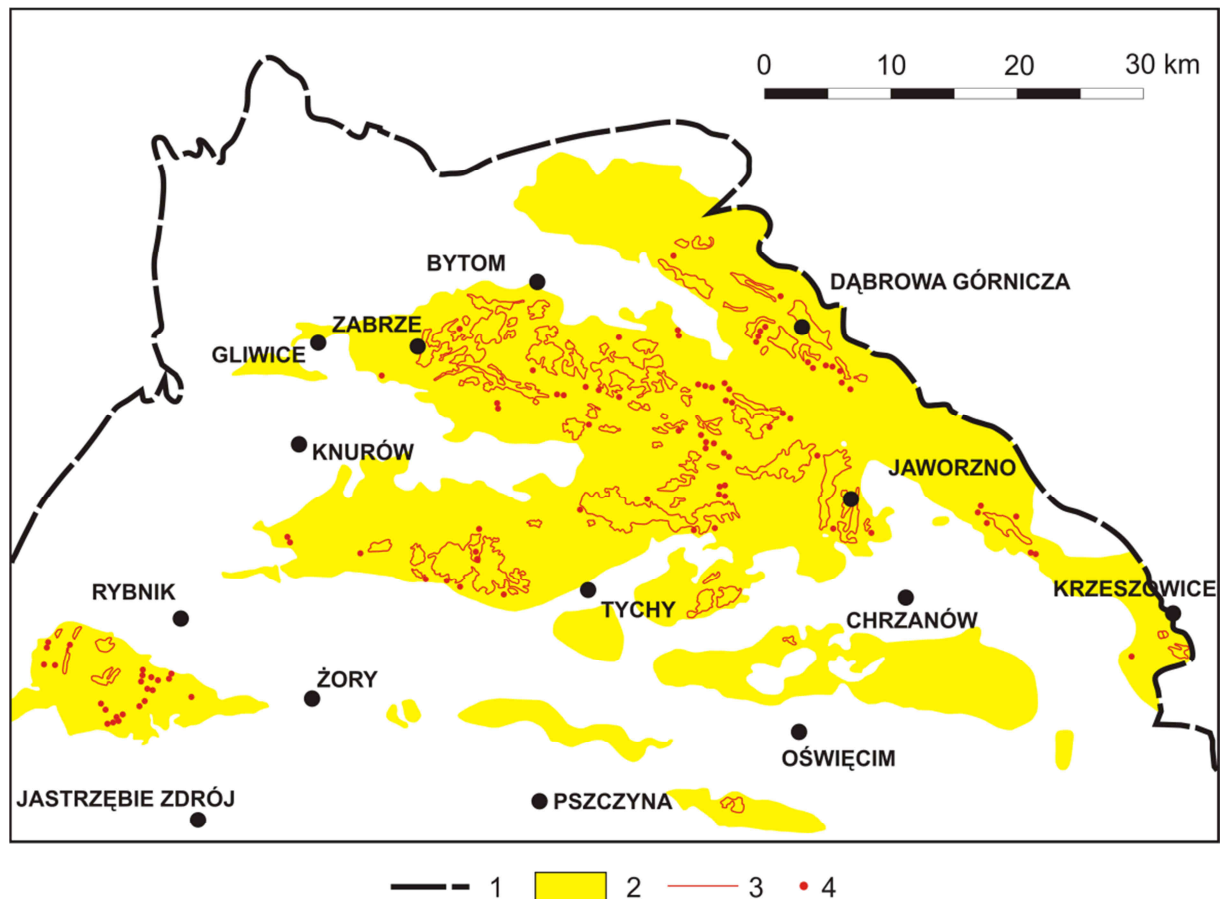
Historia przemysłowej eksploatacji węgla kamiennego w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym sięga 250 lat, czyli drugiej połowy XVIII w. Przez ten okres zasięg eksploatacji w GZW objął prawie 1850 km² powierzchni terenu i sięgnął 1200–1300 m głębokości.

Początkowo eksploatację prowadzono w małych odkrywkowych lub bardzo płytkich kopalniach, usytuowanych na obszarach wychodni utworów karbonu, głównie w rejonie Murcek, Rudy Śląskiej, Chorzowa i Zabrza (ówcześnie na obszarze państwa pruskiego). Wydobywany węgiel przeznaczany był na potrzeby pobliskich, drobnych zakładów typu: cegielni, kuźni, wapienników itp. Sytuacja uległa radykalnej zmianie pod koniec XVIII w. wraz z pojawieniem się maszyn parowych, stosowanych początkowo do odwadniania kopalń rud cynku i ołowiu w okolicach Tarnowskich Gór, a później wykorzystywanych w górnictwie węglowym. Z jednej strony zwiększyły one popyt na węgiel kamienny, a z drugiej – umożliwiły rozwój techniczny kopalń, w tym przejście do eksploatacji podziemnej oraz stosowanie parowych maszyn odwadniających i wydobywczych (Jaros, 1975). Rozwój górnictwa był spowodowany również wzrostem zapotrzebowania na węgiel kamienny do wytopu żelaza i ołowiu, a głównie do wytopienia cynku. Było to przyczyną rozwoju górnictwa węgla kamiennego w kolejnych rejonach zagłębia: Mysłowic, Rybnika, Orzesza, Katowic, Bytomia, Siemianowic i Łazisk – w części pruskiej; Dąbrowy Górniczej, Będzina, obecnego Sosnowca, Psar – w części rosyjskiej, oraz Jaworzna i Sierszy, a mniejszym stopniu także Filipowic – w części austriackiej. W rejonach tych w pierwszej połowie XIX w. eksploatację prowadzono na obszarach płytkiego zalegania karbonu, na głębokościach na ogół nie przekraczających 100 m. W 1859 r. najgłębszy szyb miał głębokość 112,8 m (kopalnia „Matylda” w Świętochłowicach-Lipinach), a spośród 83 kopalń górnośląskich w 68 głębokość szybów nie przekraczała 75 m (Kossuth, 1965).

Wraz z wyczerpywaniem się części płytko zalegających zasobów, eksploatacja węgla kamiennego w drugiej połowie XIX w. i przez cały XX w. oraz początek XXI w. sięgała do coraz głębszych poziomów i obejmowała coraz większy zasięg powierzchniowy (obecnie blisko 1850 km² do głębokości 1290 m). Jednocześnie niemal przez cały ten okres, w szczególności do pierwszych dekad XX w., trwała również płytka eksploatacja. Jej szczególny renesans miał miejsce w latach pięćdziesiątych i sześćdziesiątych XX w., kiedy uruchomiono 49 upadowych z powierzchni, 28 odkrywek i 5 płytkich kopalń węgla kamiennego. Były to na ogół obiekty lokalizowane przy kopalniach, a ich żywotność przeważnie nie była dłuższa niż kilka lat. Działyły głównie w rejonie Jaworzna, Katowic, Mysłowic, Łazisk, Mikołowa, Sierszy, Sosnowca i Dąbrowy Górniczej (Rys. 6), a w pojedynczych przypadkach także Chorzowa, Rudy Śląskiej, Wojkowic i Łędzin. W tym czasie działała też uruchomiona w 1956 r. odkrywkowa kopalnia węgla kamiennego „Brzozowica” w Będzinie. Wydobywanie w tej kopalni – jak wcześniej wspomniano – zakończono w 1968 r., kończąc tym samym okres powierzchniowej eksploatacji węgla kamiennego w GZW.

Rejony płytkiej eksploatacji węgla kamiennego

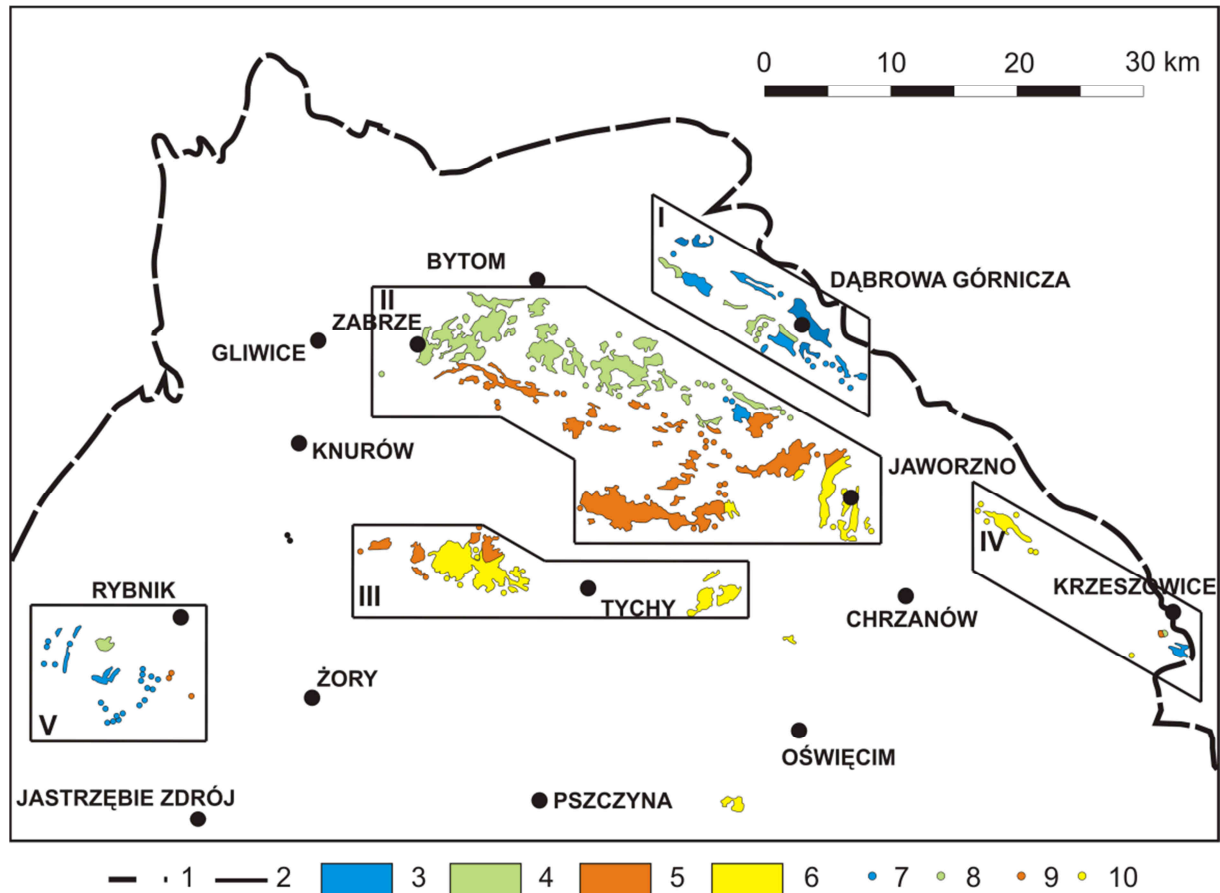
Obszary płytkiej i powierzchniowej eksploatacji występują głównie w północno-wschodniej oraz centralnej części GZW, w mniejszym stopniu także w części zachodniej i południowo-wschodniej (Rys. 6). Łączna powierzchnia wyznaczonych obszarów wynosi 104 km² (wg parcel na mapach górniczych). W stosunku do stanu faktycznego jest to wartość zaniżona, ponieważ plany pokładowe nie obejmują znacznej części dawnych wyrobisk powierzchniowych, a także płytkiej eksploatacji z drugiej połowy XVIII w. oraz „biedaszybów”. Ponadto obliczona powierzchnia ma charakter geodezyjny, powstały w wyniku sumowania poszczególnych parcel na planach pokładowych. Uogólniając ten obraz i łącząc wyrobiska położone blisko siebie, powstaje znacznie większy obszar zasięgu płytkiej eksploatacji, który ma ok. 143 km², co stanowi blisko 8% całości terenów objętych górnictwem węgla kamiennego.



1 – granica zagłębia, 2 – zasięg miąższości nadkładu karbonu do 100 m, 3 – obszary płytkiej i powierzchniowej eksploatacji, 4 – odosobnione obszary płytkiej i powierzchniowej eksploatacji, nie dające się odwzorować w skali mapy (na ogół mniejsze niż 15 ha).

Rys. 6 Obszary płytkiej i powierzchniowej eksploatacji węgla kamiennego w GZW.

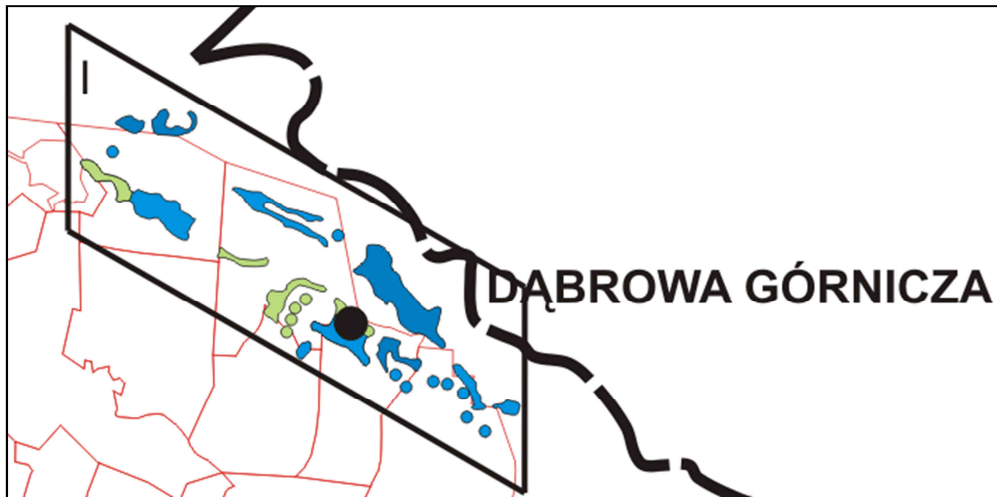
Obszary płytkiej eksploatacji znajdują się głównie w rejonach wychodni utworów karbonu na powierzchnię lub ich płytkiego zalegania pod czwartorzędem. Znacznie rzadsze są przypadki płytkiego kopalnictwa na obszarach, na których utwory karbonu są przykryte osadami triasu. Pod względem stratygraficznym płytkie kopalnictwo objęło pokłady węgla niemal wszystkich jednostek stratygraficznych profilu karbonu węglonośnego (z wyjątkiem warstw pietrkowickich w serii paralicznej). Powierzchniowo największy obszar płytkiej eksploatacji obejmuje pokłady serii mułowcowej i górnośląskiej serii piaskowcowej. Rozmieszczenie wyznaczonych obszarów na tle budowy geologicznej zagłębia pozwala na ich zgrupowanie w pięciu rejonach (Rys. 7). Rozkład sumarycznej miąższości eksploatowanych pokładów węgla w tych rejonach jest słabo zróżnicowany. Dominują obszary, na których suma miąższości wybranych pokładów węgla zawiera się w przedziale 1–5 m (ponad 80% powierzchni obszarów objętych płytką eksploatacją). Maksymalna sumaryczna miąższość wybranych pokładów wynosi 21,5 m.



3-10 – stratygrafia eksploatowanych pokładów: 3 i 7 – seria paraliczna (SP), 4 i 8 – górnosląska seria piaskowcowa (GSP), 5 i 9 – seria mułowcowa (SM), 6 i 10 – krakowska seria piaskowcowa (KSP); 7, 8, 9, 10 – małe obszary eksploatacji, niemożliwe do prezentacji obszarowej w skali mapy.

Rys. 7 Rejony płytkiej eksploatacji w Górnosląskim Zagłębiu Węglowym.

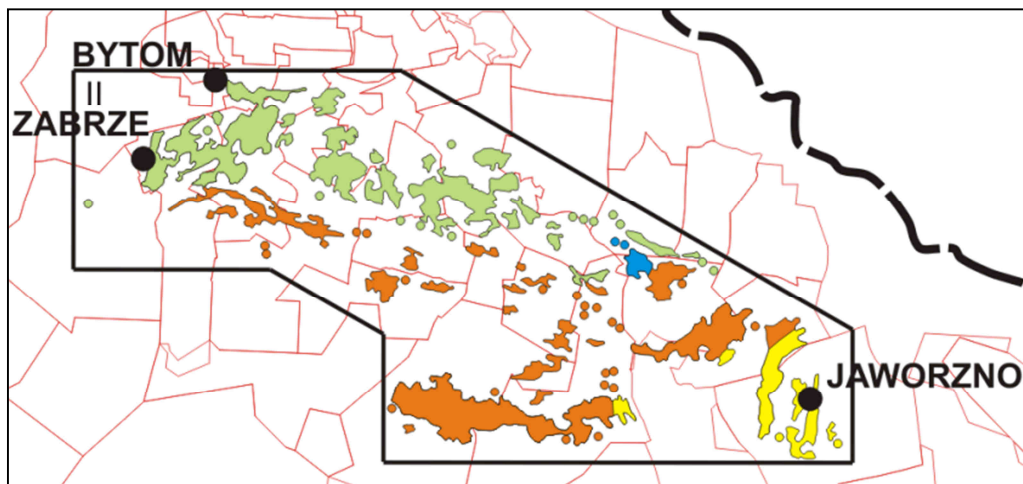
Rejon I „Wojkowice – Dąbrowa Górnicza”, położony wzdłuż północno-wschodniej granicy zagłębia, tworzy pas o długości 19 km i szerokości 5 km w granicach zamkniętych kopalń „Grodziec” i „Paryż”, częściowo także „Porąbka-Klimontów” i „Kazimierz-Juliusz” (Rys. 8). Rejon ten obejmuje również obszary płytkiej eksploatacji położone na północ i północny wschód od tych kopalń (okolice Strzyżowic, Gołonoga, Strzemieszyc, min. dawne kopalnie „Andrzej II” i „Flora”). Płytką eksploatacją objęte były przede wszystkim pokłady warstw siódłowych, grodzieckich (porębskich) i florowskich (gruszowskich), w mniejszym stopniu także rudzkich s.s. i załęskich. Maksymalna sumaryczna miąższość wybranych pokładów wynosi 16,0 m.



Objaśnienia jak do Rys. 7.

Rys. 8 Rejon I płytkiej eksploatacji w GZW.

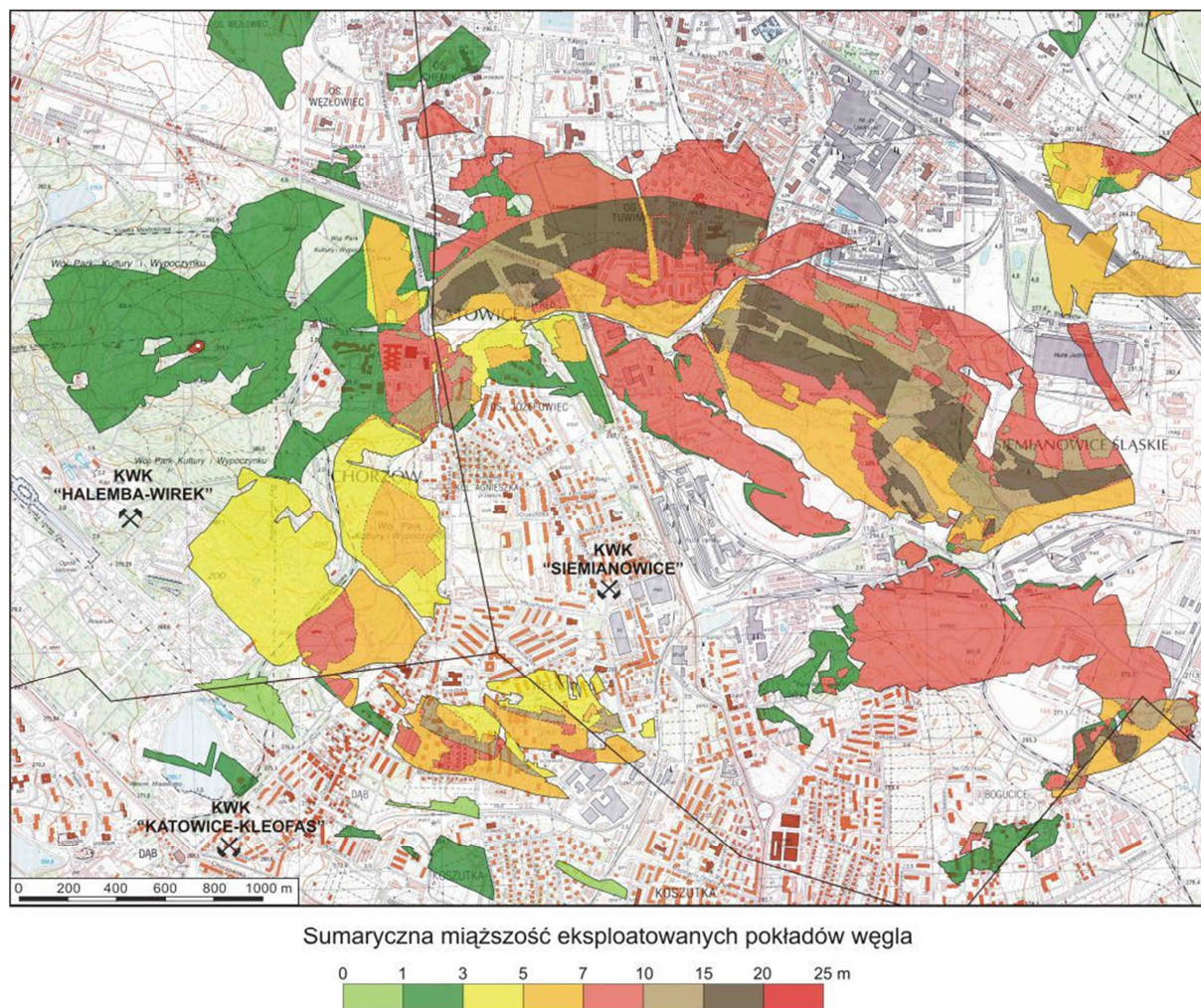
Rejon II „Zabrze – Jaworzno” tworzy największe skupisko obszarów płytkiej eksploatacji w pasie ciągnącym się od Zabrza i Bytomia po Jaworzno przez Rudę Śląską, Świętochłowice, Chorzów, Siemianowice, Katowice, Mysłowice i Sosnowiec, na długości 38 km i szerokości 8–14 km (Rys. 9). W uogólnieniu jest to rejon siodła głównego i niecki bytomskiej, najbardziej tradycyjny dla rozwoju górnictwa węgla kamiennego obszar, na którym na przestrzeni lat funkcjonowały dziesiątki kopalń. Podstawą płytkiej eksploatacji były pokłady warstw rudzkich s.s. i siodłowych, a także porębskich oraz załęskich i orzeskich s.s., a w części wschodniej także łaziskich. Maksymalna sumaryczna miąższość wybranych pokładów wynosi 21,5 m, przy czym na znacznych obszarach utrzymują się miąższości w granicach 10–20 m, co ma istotne znaczenie ze względu na wysokie zurbanizowanie tego rejonu.



Objaśnienia jak do Rys. 7.

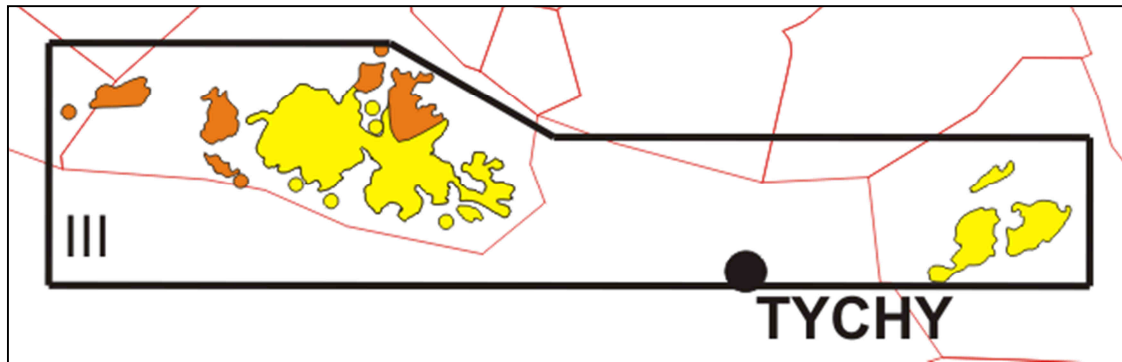
Rys. 9 Rejon II płytkiej eksploatacji w GZW.

Rysunek 10 przedstawia przykładowy obszar z pogranicza Katowic i Siemianowic o powierzchni ok. 18 km² w 30% objęty płytką eksploatacją. Współcześnie jest to obszar w znacznej części objęty zwartą zabudową miejską.



Rys. 10 Obszary płytkiej eksploatacji na pograniczu Katowic i Siemianowic (pomniejszona mapa w skali 1:10 000).

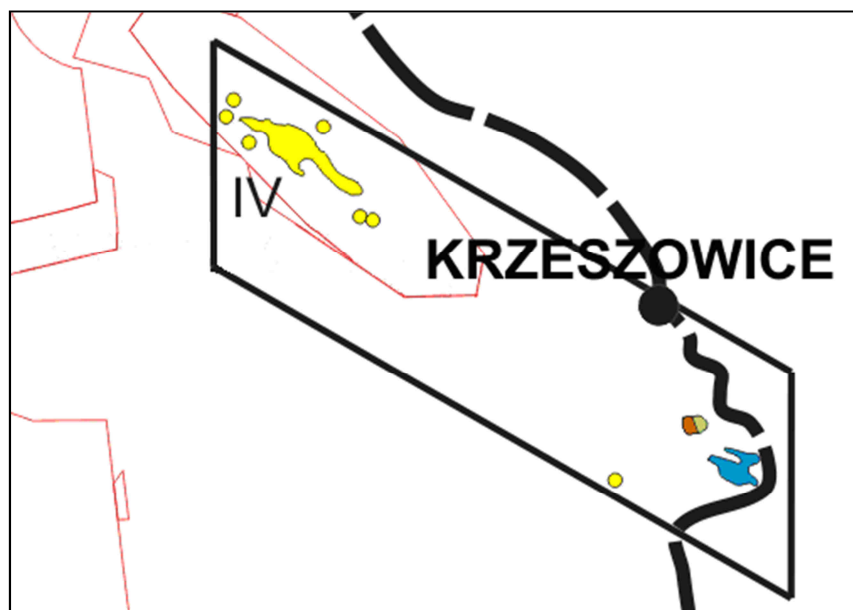
Rejon III „Orzesze – Imielin” obejmuje dwa skupiska płytkiej eksploatacji położone w niecce głównej w centralnej części zagłębia. Pierwsze z nich występuje na terenie Orzesza, Łazisk Górnych i Mikołowa w rejonie eksploatacji kopalni „Bolesław Śmiały” (Rys. 11). Drugie, oddzielone od poprzedniego pasem utworów triasowych, znajduje się na terenie Łędzin i Imielina – kopalnia „Ziemowit” (obecnie Ruch kopalni „Piast-Ziemowit”). Eksploatowane były pokłady warstw łaziskich, w mniejszym stopniu także – warstw orzeskich s.s. Do tego rejonu można również zaliczyć położony dalej na zachód niewielki obszar w Czerwionce-Leszczynach (zamknięta obecnie kopalnia „Dębieńsko”) oraz położony na wschód obszar dawnej płytkiej kopalni „Chełm Wielki” (warstwy libiąskie). Maksymalna sumaryczna miąższość wybranych pokładów wynosi 7,45 m.



Objaśnienia jak do Rys .7.

Rys. 11 Rejon III płytkiej eksploatacji w GZW.

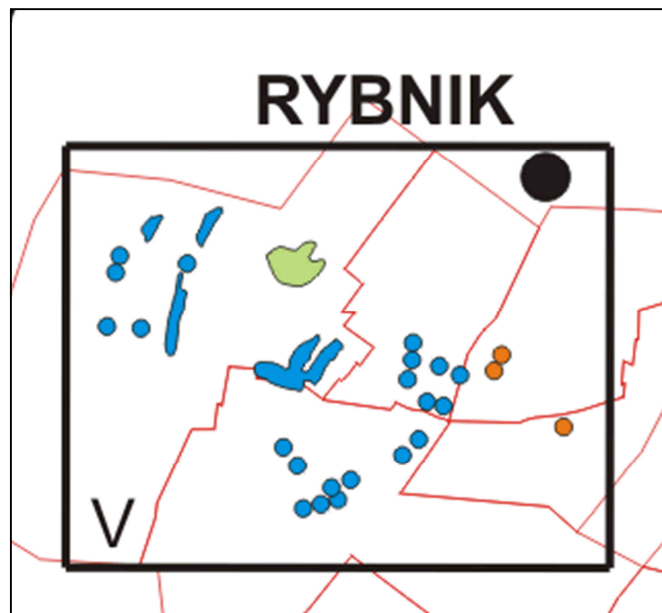
Rejon IV „Siersza – Tenczynek” znajduje się we wschodniej części zagłębia (Rys. 12) i obejmuje dwa stosunkowo nieduże obszary płytkiej eksploatacji w rejonie dawnej kopalni „Siersza” oraz Tenczynka (kilka dawnych, niewielkich kopalń, m.in. kopalnia „Krystyna”). W rejonie Sierszy eksploatowane były pokłady warstw łaziskich i orzeskich s.s., natomiast w rejonie Tenczynka warstw libiąskich, orzeskich s.s. oraz serii paralicznej. Maksymalna sumaryczna miąższość wybranych pokładów wynosi 7,1 m.



Objaśnienia jak do Rys .7.

Rys. 12 Rejon IV płytkiej eksploatacji w GZW.

Rejon V „Rybnik” tworzy niewielki powierzchniowo obszar w zachodniej części zagłębia (niecka jejkowicka, w niewielkim stopniu także niecka chwałowicka), na terenie Rydułtów, Radlina i Rybnika (Rys. 13). Podstawą płytkiej eksploatacji były pokłady warstw jakłowieckich, porębskich i siodłowych – kopalnie „Rydułtowy-Anna”, „Marcel”, „Chwałowice”, a w niewielkim zakresie także warstw załęskich („Jankowice”). Maksymalna sumaryczna miąższość wybranych pokładów wynosi 5,5 m.



Objaśnienia jak do Rys .7.

Rys. 13 Rejon V płytkiej eksploatacji w GZW.

Poza wymienionymi rejonami znajduje się niewielki obszar płytkiej eksploatacji w południowej części zagłębia w rejonie kopalni „Brzeszcze”. Eksploatowany był tu jeden pokład warstw łaziskich o miąższości do 2,0 m.

Lokalizacja rejonów zasięgu płytkiej eksploatacji została wykonana na podstawie analizy archiwalnych map górniczych (map pokładowych w skali 1:1 000, 1:2 000 lub 1:5 000. Należy jednak pamiętać, że eksploatacja z najwcześniejszego okresu (od połowy XVIII wieku do połowy XIX wieku) praktycznie nie była dokumentowana. Również informacje ze starych map górniczych mogą być obarczone błędami. W związku z tym, dokładniejsza lokalizacja płytkiej eksploatacji powinna być wsparta rozpoznaniem metodami pośrednimi i bezpośrednimi (Krieger i in., 2011).

2.3 Obecna eksploatacja złóż węgla kamiennego

Według stanu na 31.12.2022 r. (Szuflicki i in., 2023) na obszarze Górnośląskiego Zagłębia Węglowego rozpoznanych i udokumentowanych jest 145 złóż węgla kamiennego. Zajmują one powierzchnię 3 488 km² (tj. ok. 60% powierzchni Zagłębia).

Złóża eksploatowane (Tab. 1) zajmują 1 002 km² (tj. ok. 17% powierzchni zagłębia) i znajdują się głównie w centralnej, południowo-zachodniej i zachodniej części Górnośląskiego Zagłębia Węglowego, a pojedyncze złóża także w części wschodniej i południowej oraz północnej.

Eksploatację węgla kamiennego prowadzą: Polska Grupa Górnicza S.A., Jastrzębska Spółka Węglowa S.A., Węglkokoks Kraj S.A., Południowy Koncern Węglowy S.A. oraz firmy/spółki prywatne (Rys. 14).

Polska Grupa Górnicza S.A. prowadzi eksploatację 19 złóż węgla kamiennego zlokalizowanych w zachodniej i centralnej części Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Złóża te eksploatowane są przez 7 kopalń – 4 z nich są kopalniami wieloruchowymi.

Jastrzębska Spółka Węglowa S.A. eksploatuje węgiel kamienny z 10 złóż rozmieszczonych w południowo-zachodniej i zachodniej części Górnośląskiego Zagłębia Węglowego.

Tauron Wydobywanie S.A. (od 2 stycznia 2024 r. Południowy Koncern Węglowy S.A.) prowadzi eksploatację w 7 złożach węgla kamiennego położonych we wschodniej i południowej części GZW. Eksploatację prowadzą 3 zakłady górnicze.

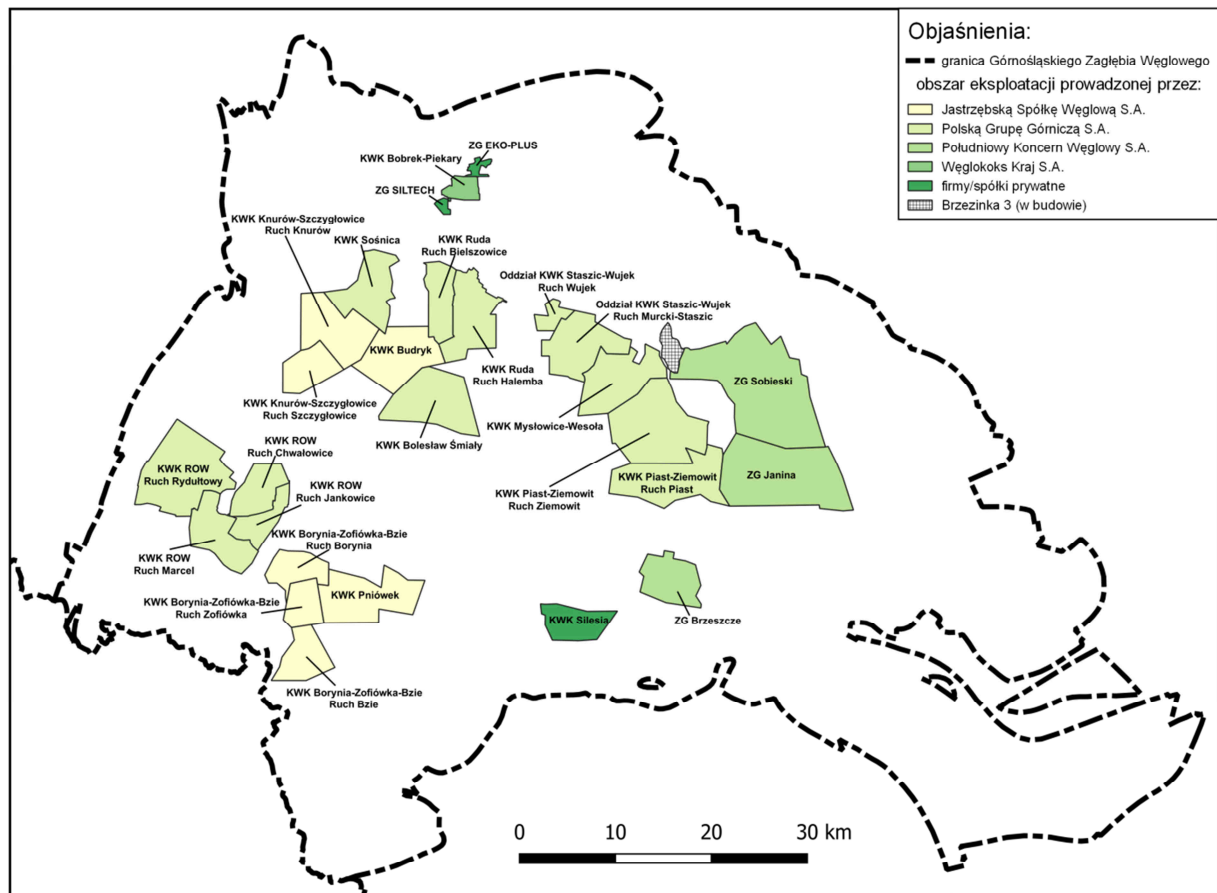
WĘGŁOKOKS S.A. w północnej części GZW prowadzi eksploatację 2 złóż węgla kamiennego.

Cztery złoża – 3 w północnej i jedno w południowej części GZW – eksploatowane są przez firmy prywatne.

Tab. 1 Udokumentowane złoża węgla kamiennego w obszarze GZW według stanu na 31.12.2022 r.

Lp.	Spółka	Kopalnia/Ruch	Nazwa złoża	Obszar górniczy	Teren górniczy
1	2	3	4	5	6
1	Polska Grupa Górnicza S.A.	KWK ROW Ruch Rydułtowy	Rydułtowy 1	Rydułtowy II	Rydułtowy II
2		KWK ROW Ruch Chwałowice	Chwałowice 1	Chwałowice 1	Chwałowice 1
3		KWK ROW Ruch Marcel	Marcel 1	Radlin II	Radlin II
4		KWK ROW Ruch Jankowice	Jankowice	Jankowice 1	Jankowice 1
5		KWK Ruda Ruch Bielszowice	Zabrze-Bielszowice	Bielszowice III	Bielszowice
6				Zabrze I	
7		KWK Ruda Ruch Halemba	Pokój	Wirek II	Ruda-Wirek II
8			Halemba	Halemba I	Halemba I/II
9			Halemba II	Halemba - Szyb Wschodni	
10			Halemba II	Halemba II	
11			Śmiłowice	Śmiłowice	Śmiłowice
12		KWK Piast- Ziemowit Ruch Ziemowit	Ziemowit	Lędziny I	Lędziny I
13		KWK Piast- Ziemowit Ruch Piast	Piast	Bieruń II	Bieruń II
14		KWK Sośnica	Sośnica	Sośnica III	Sośnica III
15		KWK Bolesław Śmiały	Łaziska	Łaziska II	Łaziska II
16		Oddział KWK Staszic-Wujek Ruch Wujek	Wujek	Katowice-Brynów	Katowice-Brynów- Ligota
17			Wujek-część Stara Ligota	Stara Ligota I	Katowice-Brynów- Ligota
18		Oddział KWK Staszic-Wujek Ruch Murcki- Staszic	Staszic	Giszowiec I	Giszowiec I
19			Wieczorek	Bogucice I	Bogucice I
20		KWK Mysłowice- Wesoła	Janów	Janów	Janów
21			Murcki	Murcki I	Murcki I
22		KWK Mysłowice- Wesoła	Wesoła	Wesoła II	Wesoła II
23		KWK Borynia-	Borynia	Szeroka I	Szeroka I

Lp.	Spółka	Kopalnia/Ruch	Nazwa złoża	Obszar górniczy	Teren górniczy
1	2	3	4	5	6
21		Zofiówka-Bzie Ruch Borynia	Jas-Mos 1	Jastrzębie IV	Jastrzębie IV
22		KWK Borynia-Zofiówka-Bzie Ruch Zofiówka	Zofiówka	Jastrzębie Górne I	Jastrzębie Górne I
23		KWK Borynia-Zofiówka-Bzie Ruch Bzie	Bzie-Dębina 2-Zachód	Bzie-Dębina 2-Zachód	Bzie-Dębina 2-Zachód
24		KWK Budryk	Budryk	Ornontowice I	Ornontowice I
25			Chudów-Paniowy 1	Ornontowice II	Ornontowice II
26		KWK Pniówek	Pniówek	Krzyżowice III	Krzyżowice III
27			Pawłowice 1	Pawłowice 1	Pawłowice 1
28		KWK Knurów-Szczygłowie Ruch Knurów	Knurów	Knurów	Knurów
29		KWK Knurów-Szczygłowie Ruch Szczygłowie	Szczygłowie	Szczygłowie	Szczygłowie I
30	Tauron Wydobywanie S.A.	ZG Sobieski	Brzezinka 1	Brzezinka I	Brzezinka I
31			Dzieńkowice	Dzieńkowice	Dzieńkowice
32			Jaworzno	Jaworzno	Jaworzno
33			Byczyna	Byczyna	Byczyna
34		ZG Janina	Janina	Libiąż IV	Libiąż IV
35			Wisła I i Wisła II-1	Babice I	Babice I
36		ZG Brzeszcze	Brzeszcze	Brzeszcze II	Brzeszcze IV
37	Węglukoks S.A.	KWK Bobrek-Piekary	Bytom III	Bytom III - ZG	Bytom III - ZG
38			Bobrek-Miechowice 1	Bobrek-Miechowice 1	Bobrek-Miechowice 1
39	Prywatne	ZG SILTECH	Bobrek-Miechowice 2	Bobrek-Miechowice II	Bobrek-Miechowice II
40			Jadwiga 2	Gigant I	Gigant I
41		ZG EKO-PLUS	Bytom I-1	Bytom VII	Bytom VII
42		KWK Silesia	Silesia	Czechowice II	Czechowice II



Rys. 14 Rejony obecnej eksploatacji złóż węgla kamiennego.

3 Wpływ dokonanej eksploatacji podziemnej na powierzchnię terenu GZW

3.1 Zmiany morfologii terenu

Podziemna działalność górnicza związana głównie z eksploatacją węgla kamiennego niewątpliwie wywiera największy, ze wszystkich prowadzonych działalności górniczych, wpływ na morfologię terenu i przekształcenia środowiska. W niniejszym rozdziale nie sposób wymienić i omówić wszystkich przekształceń morfologicznych terenu występujących w obszarze GZW. Sytuacja taka podyktowana jest faktem prowadzenia w tym obszarze kilkusetletniej eksploatacji, której wpływ na zmiany morfologii terenu był, jest i będzie zauważalny, niezależnie od podjętych środków zapobiegawczych.

Głównym skutkiem podziemnej eksploatacji na powierzchnię terenu są uwidaczniające się deformacje ciągłe i nieciągłe. Do deformacji ciągłych zaliczamy te, które nie powodują naruszenia spójności gruntów i skał, są to głównie formy morfologiczne zwane nieckami osiadań. Powstają one nad obszarem, w którym prowadzono eksploatację pokładów węgla, zwłaszcza, jeżeli eksploatacja ta prowadzona była systemem „na zawał”, bez zastosowania podsadzki. Największe obniżenia terenu powstają nad centralną częścią wyeksploatowanej przestrzeni, blisko jej krawędzi zauważalne są odkształcenia przybierające

formę krzywizn a nawet przemieszczeń gruntu. Nakładanie się na siebie w profilu pionowym kilku, a czasem i kilkunastu powierzchni eksploatacyjnych, zwiększa zasięg i parametry powstających deformacji na powierzchni terenu.

Narażenie powierzchni terenu na oddziaływania związane z podziemną eksploatacją górnictw i występowaniem niecek osiadań, wymusza na właścicielach tych terenów określony sposób ich zagospodarowania, a w terenach zabudowanych wymusza stosowanie wzmocnień konstrukcji budynków. Miejsca, w których mogą pojawić się deformacje ciągłe są względnie łatwe do przewidzenia, a ich skala zależy m.in.: od głębokości i tempa eksploatacji, powierzchni i miąższości wybieranego pokładu węgla, budowy geologicznej nadkładu oraz od stosowanego systemu eksploatacji. Deformacje ciągłe postępują w środowisku wolno i nie mają tak dynamicznego przebiegu, jak mało przewidywalne deformacje nieciągłe, które powodują naruszenie spójności gruntów i skał, a do których zaliczamy głównie zapadliska. Deformacje nieciągłe mają przebieg nagły, przeważnie lokalny, mogą pojawić się już w trakcie eksploatacji, ale również po jej zakończeniu – nawet kilkadziesiąt lat później. Oprócz zapadlisk, które stanowią najpoważniejszy problem, do deformacji nieciągłych zaliczamy pęknięcia i szczeliny terenu, progi, garby i osuwiska. Najczęstszą przyczyną pojawiania deformacji nieciągłych, pod postacią zapadlisk, w rejonie Górnośląskiego Zagłębia Węglowego jest historycznie prowadzone, z zawałem stropu, płytkie kopalnictwo (do ok. 80–100 m) oraz zachodzące w górotworze procesy sufozji związane ze zmianami położenia zwierciadła wód podziemnych.

Oprócz wklęsłych form morfologicznych, do których zaliczamy niecki i zapadliska, na przekształcenia morfologii terenu wpływają również hałdy i zwały będące wypukłymi formami morfologicznymi, odgrywające znaczącą rolę w antropogenicznie ukształtowanym krajobrazie Górnośląskiego Zagłębia Węglowego.

Antropogeniczne formy morfologiczne, związane z eksploatacją podziemną, nie tylko wpływają na zmiany ukształtowania terenu i kształtowanie krajobrazu Górnośląskiego Zagłębia Węglowego, ale również wywierają znaczący wpływ na przekształcenie środowiska naturalnego i życie lokalnych społeczności. W przypadku morfologicznych form wklęsłych są to m.in.: ugięcia i zaburzenia ciągłości warstw geologicznych występujących w nadkładzie eksploatowanego złoża, zmiany stosunków wodnych (patrz rozdział 3.2), naruszenie podziemnej infrastruktury technicznej – zwłaszcza wodno-kanalizacyjnej i gazowniczej oraz niekorzystny wpływ na naziemne obiekty budowlane (patrz rozdział 3.3). W przypadku form wypukłych, przekształcenia środowiska odzwierciedlają się m.in. zanieczyszczeniem gruntów, wód podziemnych i powierzchniowych, lokalnych zaburzeń przepływu prądów powietrza, a także obniżeniem walorów krajobrazowych.

3.2 Zmiany stosunków wodnych

Eksploatacja podziemna, oprócz wpływu na przekształcenia morfologii powierzchni terenu, których skutki przedstawiono w rozdziale 3.1, negatywnie wpływa również na stosunki wodne, zarówno w reżimie wód powierzchniowych jak i podziemnych.

Zmiany stosunków wodnych na terenach, gdzie prowadzona jest – lub była – podziemna eksploatacja górnictwa, rozpoczęły się z chwilą uruchomienia pomp i obniżania zwierciadła wód podziemnych poprzez otwory studzienne – drenażowe, na etapie drażenia szybów i wyrobisk udostępniających płytko zalegające pokłady węgla. Na etapie prowadzenia tego typu prac tworzą się lokalne leje depresji, ulegają zmianie lokalne kierunki przepływu wód podziemnych, a wskutek zrzutu pompowanych wód wzrastają przepływy w ciekach powierzchniowych. Prace prowadzone na tym etapie oraz płytka eksploatacja, która

w obszarze GZW obecnie ma znaczenie historyczne, najbardziej wpływają na wody podziemne pierwszego poziomu wodonośnego. Intensywny drenaż górniczy wód, zwłaszcza pierwszego poziomu wodonośnego skutkuje uruchomieniem niekorzystnych procesów geologiczno-inżynierskich wpływających na bezpieczeństwo obiektów infrastruktury naziemnej (porównaj rozdz. 3.3). Do procesów tych możemy zaliczyć m.in: sufozję mechaniczną i chemiczną, zmiany struktury i stabilności gruntów lub/i przebicia hydrauliczne polegające na zawaleniu kanału utworzonego w wyniku filtracji wody wraz z przemytym materiałem, prowadząc do lokalnych nierównomiernych deformacji powierzchni terenu (Frolik i in., 1986).

Uruchomienie systemu odwadniania dołowego i prowadzenie prac wydobywczych na większych głębokościach w mniejszym stopniu wpływa na wody pierwszego poziomu wodonośnego i rzadko prowadzi do całkowitego odwodnienia nadkładu złoża (Kaszowska, 2007). Należy zaznaczyć, że skutkiem prowadzonego drenażu górniczego jest zawsze wzmożone obniżanie się powierzchni terenu, wskutek konsolidacji osadów budujących warstwy wodonośne.

Prowadzone odwodnienie górotworu, zwłaszcza na dużych głębokościach, z jednej strony powoduje osuszenie rozciętych eksploatacją poziomów, natomiast z drugiej może powodować pozorny wznios zwierciadła wód w izolowanych poziomach wodonośnych występujących w nadkładzie eksploatowanych złóż. Pozorny wznios zwierciadła wód podziemnych jest skutkiem obniżania się powierzchni terenu w wyniku powstających osiadań przy niezmiennych zasobach zarówno podziemnych jak i powierzchniowych zbiorników wodnych. Prowadzić on może do powstawania podtopień i zalewisk.

Odwodnienie górnicze prowadzone na etapie eksploatacji złóż przyczynia się do regionalnych zmian stosunków wodnych. Powstający regionalny lej depresji może objąć poziomy kilku pięter wodonośnych, w tym pierwszego poziomu wodonośnego będącego w kontakcie hydraulicznym z wodami powierzchniowymi. Prowadzone przez wiele lat odwadnianie górnicze, a w przypadku kopalń węgla kamiennego w obszarze Górnosląskiego Zagłębia Węglowego, przez blisko trzy stulecia, przyczynia się do nieodwracalnych zmian stosunków wodnych, zubożenia zasobów i niekorzystnych zmian środowiskowych, zwłaszcza w obszarze cieków powierzchniowych, spowodowanych zrzutami wysoko zmineralizowanych wód dołowych. Ciągłe odwadnianie górotworu wymusza trwałe zmiany w kierunkach i prędkościach przepływu wód podziemnych, może prowadzić do zmian charakteru cieków powierzchniowych, które z cieków drenujących zmieniają się w infiltrujące, a w skrajnych przypadkach może dochodzić do ich zaniku. Trwające równocześnie procesy przekształceń morfologicznych terenu powodują, że w nieckach osiadań powstają zalewiska i podtopienia. Niejednokrotnie zmiany morfologii terenu przyczyniają się do zmian kierunku przepływu wód w ciekach powierzchniowych. Wymienione zjawiska wymuszają prowadzenie prac naprawczych związanych z budową przepompowni, przerzutem wód pomiędzy zlewniami powierzchniowymi oraz regulowaniem i uszczelnieniem koryt rzecznych, a te z kolei przyczyniają się do szybszego odpływu wód opadowych zmniejszając retencję gruntową.

Kilkusetletnia eksploatacja podziemna prowadzona na obszarze Górnosląskiego Zagłębia Węglowego wywarła znaczący wpływ na układ pola hydrodynamicznego wód podziemnych i przeobrażenia wód powierzchniowych. Skutki podziemnej eksploatacji i zaburzenia stosunków wodnych odczuwane są nie tylko na etapie udostępniania złóż do eksploatacji i w czasie jej trwania, ale również kilkadziesiąt lat po jej zaprzestaniu bądź zmniejszenia jej aktywności. Zaniechanie działalności wydobywczej rodzi nowe problemy zwłaszcza w obszarach występowania lejów depresji i niecek osiadań. W obszarach tych, tak jak w całym GZW, nastąpił rozwój infrastruktury powierzchniowej, dostosowanej

konstrukcyjnie do zagrożeń, które niosą za sobą tapnięcia i odsiadania górotworu. Jednakże, zaniechanie działalności wydobywczej wiąże się z zaprzestaniem prowadzenia odwodnienia i powolną odbudową zasobów wodnych w nadległych, dotychczas osuszonych, poziomach wodonośnych.

Wznios zwierciadła, podobnie jak jego obniżanie, powoduje uruchomienie niekorzystnych procesów kształtujących warunki geologiczno-inżynierskie, zwłaszcza w obszarach zdrenowania pierwszego poziomu wodonośnego. Odbudowa zwierciadła wód podziemnych doprowadzi do sytuacji, w której po kilkudziesięciu latach od zaprzestania odwadniania, ponownie pojawiają się płytkie wody gruntowe (Absalon, 2009), co może skutkować powstawaniem podmokłości i podtopień, a na obszarach leśnych i rolniczych degradacją gleb.

3.3 Wpływ eksploatacji na obiekty infrastruktury naziemnej

Wskutek długotrwałej i intensywnej eksploatacji węgla kamiennego nastąpiły ogromne zmiany środowiska naturalnego znacznych obszarów GZW. Jak wcześniej wspomniano, wśród negatywnych następstw towarzyszących wydobywaniu węgla kamiennego można m.in. wyróżnić **ciągłe i nieciągłe** deformacje powierzchni terenu. **Deformacjami ciągłymi** objęta jest praktycznie cała powierzchnia terenów górniczych kopalń węgla kamiennego. Maksymalnie w niektórych rejonach notuje się osiadania terenu w granicach od 0,5 m do ponad 1 metra rocznie, na ogół są to jednak znacznie mniejsze wartości rzędu kilku-kilkunastu centymetrów. Tempo deformacji jest zmienne, największe – w pierwszych miesiącach po przejściu ściany eksploatacyjnej, a okres ujawniania się wpływów deformacji trwa do pięciu lat.

Inny charakter mają **deformacje nieciągłe**. Wśród deformacji nieciągłych występują deformacje liniowe (szczeliny, progi) i powierzchniowe (leje, zapadliska). Na powierzchni terenu pojawiają się one w sposób gwałtowny, są wyjątkowo szkodliwe i niebezpieczne, zwłaszcza, że są trudne do prognozowania ze względu na zależność od szeregu czynników naturalnych, a także od działalności człowieka. Deformacje nieciągłe powstają tylko w określonych okolicznościach. Są nimi między innymi: reaktywacja starych, płytkich zrobów; aktywizacja niezlikwidowanych, bądź częściowo zlikwidowanych szybów, szybików i upadowych (także biedaszybów); aktywizacja pierwotnych i wtórnych pustek w górotworze, powstałych na skutek sufozji mechanicznej, chemicznej i innych procesów. Deformacje nieciągłe liniowe powstają zazwyczaj w pobliżu wychodni pokładów nachylonych, które zostały naruszone robotami górniczymi lub też w pobliżu wychodni uskoków tektonicznych. Deformacje powierzchniowe związane są natomiast z występowaniem pustek w górotworze i powstają w przypadku ich zawалу. Zawał taki może powstać nagle, a czas jego wystąpienia jest trudny do określenia. Deformacje nieciągłe charakteryzują się nieregularnym przebiegiem, powodują m.in. uszkodzenia budynków, obiektów przemysłowych i szlaków komunikacyjnych.

Najistotniejsze, negatywne skutki związane z górnictwem eksploatacją złóż węgla kamiennego to powstawanie deformacji górotworu szkód na powierzchni w budynkach, budowlach, obiektach liniowych i infrastrukturze, a także w ciekach wodnych i obiektach hydrotechnicznych.

W GZW złoża są wielopokładowe, cechują się bogatą tektoniką. W wyniku wieloletniej eksploatacji powstał szereg wtórnych nieciągłości w górotworze. Pod wpływem eksploatacji kolejnych pokładów na powierzchni tworzą się nieciągłości, które występują w rejonach

wychodni uskoku tektonicznych, krawędzi eksploatacyjnych w kilku pokładach, na granicach filarów ochronnych i pól eksploatacyjnych. W tych miejscach występuje sumowanie się odkształceń poziomych rozciągających, co powoduje przekroczenie stanów równowagi granicznej i powstawanie powierzchni poślizgów w górotworze lub gruncie.

Elementy zagospodarowania powierzchni na terenach górniczych mogą się znaleźć w zasięgu oddziaływania deformacji ciągłych, deformacji nieciągłych oraz wstrząsów górniczych. Duże znaczenie mogą mieć również zmiany poziomu wód gruntowych. O występowaniu, formie i rozmiarach szkód obiektów powierzchniowych powstałych w wyniku prowadzenia eksploatacji górniczej decydują charakter i intensywność oddziaływania, warunki gruntowe i wodne oraz sposób zagospodarowania powierzchni (Kaszowska, 2007).

Niektóre oddziaływania górnicze są bardzo niekorzystne dla pewnych rodzajów obiektów. Najczęściej negatywne skutki podziemnej eksploatacji górniczej są obserwowane w obiektach budowlanych. Podstawowym wskaźnikiem kształtującym współdziałanie podłoża gruntowego z obiektami budowlanymi na terenach górniczych jest poziome odkształcenie przypowierzchniowej warstwy górotworu. Fundamenty budowli uniemożliwiają swobodne przemieszczanie się cząstek tej warstwy, w skutek czego między nimi a podłożem powstają dodatkowe naprężenia i w efekcie w fundamentach występują dodatkowe obciążenia. Krzywizna podłoża prowadzi natomiast do zmiany rozkładu pionowych oddziaływań między fundamentami budowli a podłożem. Ponadto, znaczną rolę odgrywa szybkość deformacji przypowierzchniowej warstwy górotworu związana z szybkością eksploatacji. Zwiększenie tempa eksploatacji skutkuje szybszym powstawaniem odkształceń w elementach konstrukcyjnych obiektów. Nachylenie powierzchni prowadzi do wychyleń budynków od pionu, a w efekcie do powstawania dodatkowych obciążeń w konstrukcji obiektów (Kaszowska, 2007).

W miarę postępu robót wydobywczych krawędź eksploatacji ulega przemieszczeniu. Zbliżający się do budynku front robót górniczych wywołuje wzrost rozciągań i krzywizn wypukłych ich podłoża, aż do ich maksymalnych wartości. Następnie wskaźniki maleją, ale nachylenie powierzchni rośnie. Gdy front eksploatacji przechodzi bezpośrednio pod obiektem wartości nachylenia są najwyższe, a odkształcenia i krzywizny zerowe (następuje wtedy zmiana rozciągań na ściskania oraz krzywizn wypukłych na wklęsłe). Wraz z oddalaniem się frontu od obiektu nachylenia ulegają zmniejszeniu, natomiast zwiększają się ściskania i krzywizny wklęsłe. Po osiągnięciu ich maksymalnej wartości wszystkie wskaźniki maleją do zera. Każdy obiekt, znajdujący się nad wybraną przestrzenią po zakończeniu eksploatacji, w trakcie prowadzonych robót górniczych ulega czasowemu ścisnieniu, i rozciąganiu, zostaje pochylony i poddany krzywiznom wypukłym i wklęsłym (Kaszowska, 2007). Nadmierne wychylenie budynku może stanowić zagrożenie dla jego konstrukcji.

Górnice deformacje terenu powodują uszkodzenia budynków, obejmujące elementy konstrukcyjne, elementy wykończenia, jak również wyposażenia. Mimo, że uszkodzenia elementów wykończenia najczęściej nie stanowią zagrożenia dla bezpieczeństwa budynków, mogą być uciążliwe dla ich użytkowników. W obrębie fundamentów, ścian i stropów powstają zarysowania lub pęknięcia. W ścianach zarysowania i pęknięcia pojawiają się zwykle w miejscach o zmniejszonej lub skokowo zmieniającej się sztywności. Są to między innymi nadproża oraz strefy nad otworami okiennymi i drzwiowymi. W obrębie elementów wykończenia i wyposażenia budynków obserwuje się przede wszystkim zarysowania, spękania i odspojenia tynków ściennych i sufitowych, pęknięcia ścianek działowych, spękania i wypiętrzenia posadzek, spękania i odspojenia okładzin ceramicznych, a także deformacje

stolarki okiennej i drzwiowej. Fundamenty i ściany w piwnicach są narażone na uszkodzenie warstw izolacyjnych i w konsekwencji zawilgocenie ścian. Uszkodzeniom ulegają również pokrycia dachowe i rynny, co prowadzi do niewłaściwego odwodnienia połaci dachowej. Zagrożenie stanowią spękania w trzonach kominowych i defekty instalacji, w tym szczególnie niebezpieczne dotyczące instalacji gazowej (Kaszowska, 2007).

Wstrząsy górnicze oddziałują na budynki, powodując ich odpowiedź dynamiczną, zależną od okresu drgań własnych i tłumienia. W GZW występują drgania nieodczuwalne przez budynki, drgania odczuwalne lecz nieszkodliwe dla konstrukcji, (przyspieszone zużycie budynków, nieliczne rysy w wyprawach i tynkach), jak również drgania szkodliwe, osłabiające konstrukcje i zmniejszające nośność budynków (lokalne spękania i zarysowania, odpadanie wypraw i tynków).

Takim samym wpływom eksploatacji górniczej na terenach górniczych jak obiekty kubaturowe podlegają elementy infrastruktury technicznej, w tym sieci uzbrojenia, drogi i szlaki kolejowe. Możliwości przenoszenia przez nie tych wpływów są jednak odmienne ze względu na wydłużony kształt oraz najczęściej bezpośredni kontakt z gruntem. Dla infrastruktury terenu największe zagrożenie stanowią deformacje nieciągłe, podmakanie gruntów i zalewiska.

Ciągłe deformacje podłoża powodują powstanie w sieciach podziemnych sił wewnętrznych, wymuszają ich odkształcenia i przemieszczenia, a to prowadzi do awarii i zaburzeń w ich prawidłowym funkcjonowaniu. Może dojść do rozszczelnienia (najgroźniejsze dla sieci gazowych) lub zmiany spadków (wyjątkowo niebezpieczne dla torów kolejowych i kanalizacji). Przyczyną awarii rurociągów w postaci ich rozszczelnienia bywają również wstrząsy górotworu (Kaszowska, 2007).

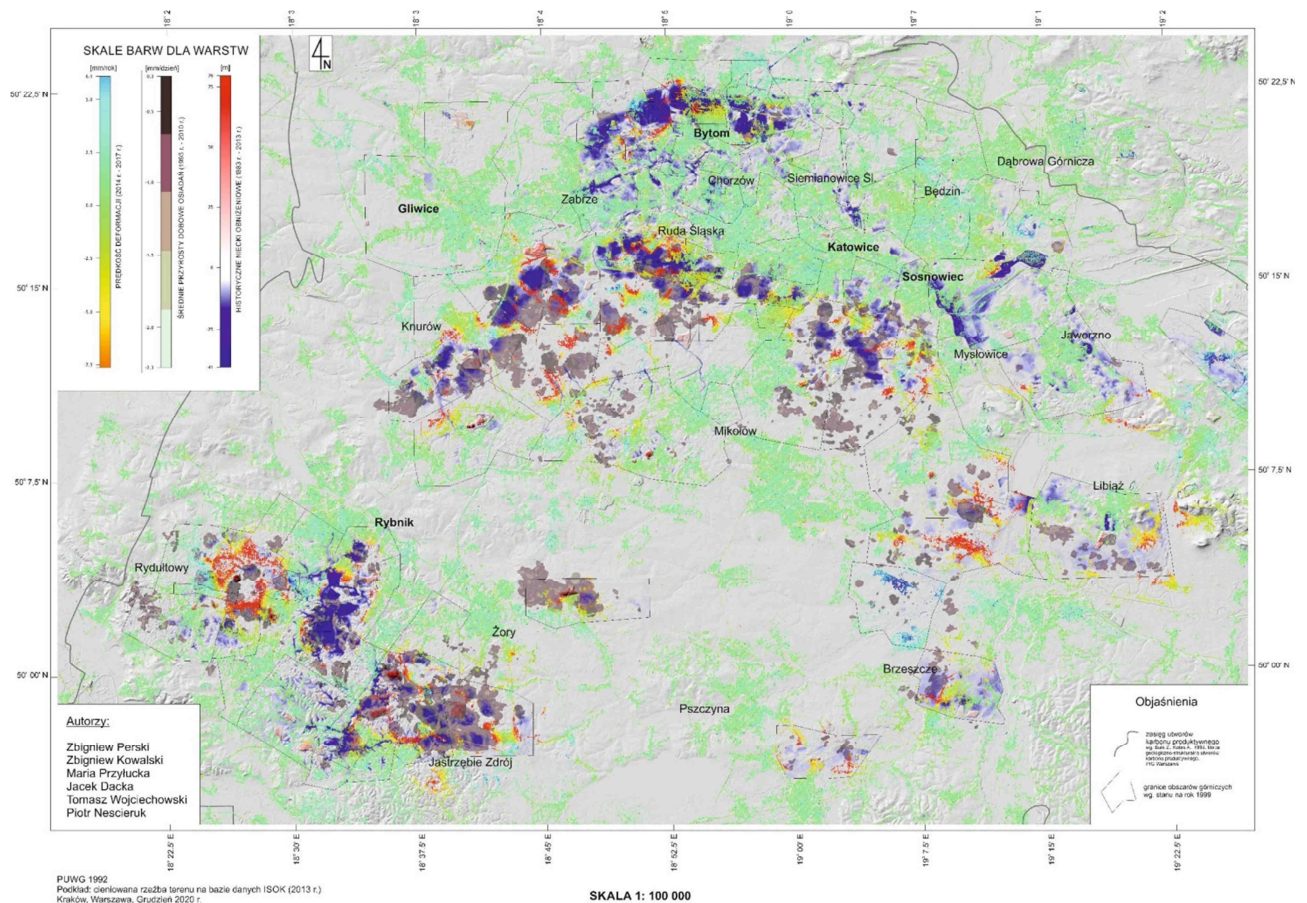
4 Składowe mapy i ich przygotowanie

4.1 Wyniki otrzymane w etapie I

Etap I tematu „Interferometryczny Monitoring Powierzchni Terenu Polski” był realizowany w PIG-PIB w latach 2018-2021 w ramach umowy dotacji 194/2018/Wn-07/FG-go-dn/D z dnia 23.08.2018 r. Jednym z efektów rzeczowych zadania była mapa deformacji terenów mogących powodować szkody w środowisku i zniszczenia infrastruktury technicznej obszaru Górnośląskiego Zagłębia Węglowego wykonana w oparciu o dostępne satelitarne dane archiwalne obejmujące okres 1992-2017 r. Na główną treść mapy składały się 3 warstwy tematyczne:

- historyczne niecki obniżeniowe (lata 1883 – 2013) otrzymane na podstawie porównania modelu terenu otrzymanego z nalogów LIDAR w 2013 oraz digitalizacji rysunku poziomicowego z niemieckich map topograficznych 1: 25 000 tzw. Messtischblatt wydawanych od schyłku XIX wieku do 1944 roku;
- średnie dobowe przyrosty osiadań (lata 1993 – 2010) otrzymane na podstawie analizy interferogramów różnicowych archiwalnych scen satelitarnych SAR z satelitów ERS-1 i 2 oraz Envisat;
- prędkość deformacji (lata 2014 – 2017) otrzymane na podstawie zbioru danych PSI przetworzenia scen satelity Sentinel-1.

Na Rys. 15 przedstawiono wynikowa mapę.



Rys. 15 Mapa deformacji terenów mogących powodować szkody w środowisku i zniszczenia infrastruktury technicznej obszaru Górnośląskiego Zagłębia Węglowego wykonana w oparciu o dostępne satelitarne dane archiwalne obejmujące okres 1992-2017 r. Mapa ilustruje współzależność pomiędzy historycznymi nieckami osiadań, dynamiką osiadania w latach 1993-2010 oraz prędkościami współczesnych ruchów (lata 2014-2017).

Nałożenie na siebie 3 opisanych powyżej zbiorów danych pozwoliło zrozumieć współzależność pomiędzy występowaniem wielkoobszarowych niecek osiadań, dynamiką deformacji i współcześnie obserwowanymi prędkościami deformacji. Dla sporej liczby przypadków współczesne procesy deformacyjne zachodzą w rejonach, gdzie osiadania występują już od ponad 100 lat. Najbardziej wyraźnie widać to na przykładzie północnej jak i południowej strefy osiadań. Duże przyrosty deformacji współtwarzają rejonom, gdzie współczesna prędkość osiadania wynosi 5,0 – 10 mm/rok bądź więcej (brak punktów). Dla wielu obszarów historyczne niecki osiadań nadal podlegają ruchom obniżeniowym (Rys. 15). Są to właśnie obszary najbardziej narażone na występowanie szkód w budynkach, infrastrukturze komunikacyjnej i przesyłowej. Dokładny opis danych i wynikowej mapy znajduje się w raporcie: <https://www.pgi.gov.pl/monitoring-osiadan/mos-wyniki.html#wyniki-inmotep-etap-i>.

4.2 Analiza osiadania w okresie 1992-2012 na podstawie danych InSAR

Dane DInSAR

Do określenia lokalizacji niecek obniżeniowych w okresie 1993-2012 wykorzystano trzy zestawy interferogramów. Pozwoliły one na scharakteryzowanie pionowych, szybkich

przemieszczeń na całym obszarze górniczym Górnego Śląska (Tab. 2). Część interferogramów została już przetworzona w ramach wcześniejszych projektów badawczych realizowanych w PIG-PIB. Nowo przetworzone interferogramy uzupełniają istniejące zestawy, aby w jak największym stopniu wypełnić informacją okres dwudziestu lat. Łącznie wykorzystano 81 interferogramów:

- 18 z archiwalnych scen ERS i ENVISAT w paśmie C, z okresu 30 lipca 1993 – 5 lipca 2010. Choć łączny czas akwizycji scen jest bardzo długi, należy zaznaczyć, że interferogramy nie obejmują całego okresu, lecz tylko wybrane przedziały jednodwumiesięczne. Analizowane lata 1993-2007 charakteryzują się zatem niepełną informacją o ówczesnych deformacjach. Niemniej jednak na podstawie uzyskanych zdjęć udało się ocenić skalę i zasięg osiadań na przełomie XX i XXI wieku. Duże przerwy czasowe w danych były spowodowane uzyskaniem niespójnych obrazów fazowych w tych okresach. Sceny SLC ze ścieżek 494, 222, 143 i 415 zostały pobrane z archiwów Europejskiej Agencji Kosmicznej i przetworzone w oprogramowaniu SARscape ENVI.
- 26 z przetwarzania scen ALOS w paśmie L, z okresu od 22 lutego 2007 r. do 13 sierpnia 2009 r. W poprzednich badaniach sceny w paśmie L wykazały ogromne znaczenie dla monitorowania ruchu terenu na obszarach górniczych. Długość fali w paśmie L przenika przez roślinność, dlatego interferogramy są silnie skorelowane, nawet na obszarach nieurbanizowanych. Wykorzystano przetworzone wcześniej interferogramy ALOS z projektu Terrafirma (Przyłucka i in., 2015a), uzupełnione archiwalnymi scenami tego samego satelity, pobranymi z archiwum NASA Earth Science Data. Dane zostały przetworzone dla czterech nakładających się ramek (ścieżki 624 i 625, ramki 990 i 1000) w oprogramowaniu SARscape ENVI.
- 37 ze scen w paśmie X satelity TerraSAR-X, ramka 108, od 5 lipca 2011 r. do 27 stycznia 2013 r. 28 interferogramów w 11-dniowych odstępach zostało już przetworzonych przez Tele-Rilevamento Europa — T.R.E w ramach unijnego projektu DORIS obejmującego okres 5 lipca 2011 r. – 21 czerwca 2012 r. Pełny opis tego przetwarzania można znaleźć w (Przyłucka i in., 2015b). Następnie w programie SARscape przetworzono 9 interferogramów z okresu od 21 czerwca 2012 r. do 27 stycznia 2013 r. i uzupełniono informacje o kolejną połowę roku osiadania. Interferogramy pasma X charakteryzują się dużą rozdzielczością przestrzenną i dobrą korelacją fazową; często jednak obserwowano, że w centrum niecki obniżeniowej, gdzie przemieszczenie jest bardzo szybkie, prążki interferometryczne są zaburzone lub niedoszacowane.

Dane PSI

Prace obejmowały także pięć zestawów danych przetworzeń PSI, obejmujących różne zakresy czasowe i przestrzenne.

- Dwa zestawy, opracowane w ramach projektu Terrafirma (Graniczny i in. 2007, Graniczny i in. 2014), pochodzą z satelity ERS w paśmie C i obejmują okres 1992-2003. Zbiór danych obejmujący północną część Górnego Śląska (obszar „Sosnowiec”) uzyskano z 54 scen, składa się on z 30 869 punktów PS. Zbiór danych obejmujący południową część Górnego Śląska (obszar „Rybnika”) pochodzi z przetworzenia 77 scen i składa się z 64 734 punktów PS.
- Jeden podobny zbiór danych ERS został przetworzony w ramach projektu Doris (Del Ventisette et al. 2013) i obejmował lata 1992-2000 i jedynie środkową

część Górnego Śląska (obszar „Katowice”). Przetwarzanie obejmowało 70 scen ERS i dało w wyniku 71 709 punktów PS.

- Jeden zestaw z satelity Envisat obejmował lata 2003-2010 i również został otrzymany w ramach projektu Doris. Zestaw składa się z 32 341 punktów PS i obejmuje jedynie środkową część Górnego Śląska, obszar „Katowice”.
- Jeden zestaw z satelity TerraSAR-X był oparty na zestawie scen w paśmie X wykorzystywanych w interferogramach DInSAR i obejmował lata 2011-2012. Dzięki wysokiej rozdzielczości przestrzennej gęstość punktów PS jest znacznie większa niż w paśmie C, a w wyniku przetworzenia uzyskano 1,7 mln punktów PS pokrywających większość obszaru środkowej części Górnego Śląska.

Zestawienie wszystkich zbiorów danych InSAR przedstawiono w Tabeli 2, a ich zasięg przestrzenny na Rys. 16.

Tab. 2 Charakterystyka zestawów danych InSAR.

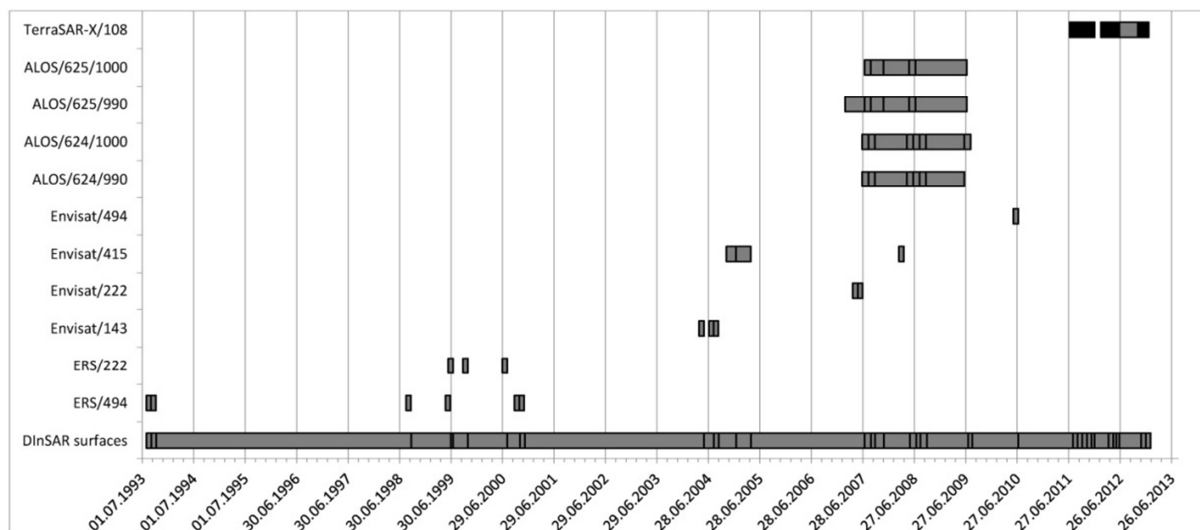
Zestaw danych	DInSAR ERS i Envisat	DInSAR ALOS	DInSAR TSX	PSI ERS “Sosnowiec”	PSI ERS “Rybnik”	PSI ERS “Katowice”	PSI Envisat “Katowice”	PSI TSX
Typ przetworzenia	DInSAR	DInSAR	DInSAR	PSInSAR	PSInSAR	PSInSAR	PSInSAR	SqueeSAR™
Długość fali	C (5.6 cm)	L (23.6 cm)	X (3.1 cm)	C (5.6 cm)	C (5.6 cm)	C (5.6 cm)	C (5.6 cm)	X (3.1 cm)
Liczba scen SAR	31	35	39	54	77	70	31	30
Data pierwszej sceny	30/07/1993	22/02/2007	05/07/2011	17/05/1992	30/05/1995	17/05/1992	05/03/2003	05/07/2011
Data ostatniej sceny	05/07/2010	13/08/2009	27/01/2013	09/04/2003	15/11/2000	20/12/2000	29/09/2010	21/06/2012
Liczba interferogramów	18	26	37	-	-	-	-	-
Pokryta powierzchnia [sq km]	20436.37	12408.543	963.52	1217.01	1198.88	485.42	485.42	963.52
Liczba punktów PS	-	-	-	30,869	64,734	71,709	32,341	1,715,758
Gęstość punktów PS [no./sq km]	-	-	-	25	54	148	66	1781
$\mu \pm \sigma$ prędkości punktów PS [mm/yr]	-	-	-	-1.2 $\pm$ 2.0	-2.5 $\pm$ 1.5	-2.1 $\pm$ 3.9	-0.3 $\pm$ 2.8	-3.7 $\pm$ 12.2



Wykorzystane zestawy danych PSI również pokrywają różne obszary zarówno czasowe jak i przestrzenne (według Tab. 2 i Rys. 16). Ponadto zawierają one zupełnie inny typ informacji niż dane DInSAR. Przedstawiają małe, śladowe przemieszczania na granicach obszaru podległego wpływom działalności górniczej. Informacja jest przedstawiona w formie punktów, dla których przypisane są średnie prędkości zmian położenia w jednostkach mm na rok.

Mapa skumulowanego osiadania DInSAR

W celu połączenia informacji o osiadaniu z interferogramy różnicowych wykonano, co następuje: po pierwsze, poprzez rozpakowanie fazy, każdy uzyskany obraz interferometryczny został przekształcony w powierzchnię deformacji. W ten sposób obrazy prążków zamieniono na mapy deformacji powierzchni, na których każdemu pikselowi przypisano wartość osiadania. Obraz rastrowy został przekonwertowany na obraz konturowy w celu usunięcia błędnych informacji o przemieszczeniach. Na tym etapie duże znaczenie miała ręczna interpretacja uzyskanego osiadania. Większość interferogramów zawierała istotne błędy (np. na całym obszarze stwierdzono wartości osiadań poniżej 2-5 cm). Operator skupił się na wytypowaniu jedynie tych miejsc, w których widoczne były charakterystyczne dla obszaru Górnego Śląska niecki osiadań górniczych. Uformowane dla tych obszarów kontury osiadań uwzględniono w dalszym etapie analizy, tj. ponownej konwersji konturów liniowych na obraz rastrowy. W ten sposób stworzono mapy osiadań dla wszystkich okresów obrazów interferometrycznych. Następnie opracowano mapy deformacji skumulowanych dla Górnego Śląska w oparciu o sumowanie kolejnych rastrów. Przedział czasowy każdej wydzielonej powierzchni deformacyjnej Górnego Śląska przedstawiono na Rys. 17 („DInSAR surfaces”). Te powierzchnie przemieszczeń sekwencyjnie do siebie dodawano, tworząc kolejne obrazy skumulowanego osiadania i rozwoju niecek na terenach górniczych. Ostatecznie przygotowano mapę uwzględniającą osiadanie ze wszystkich wykorzystanych interferogramów.



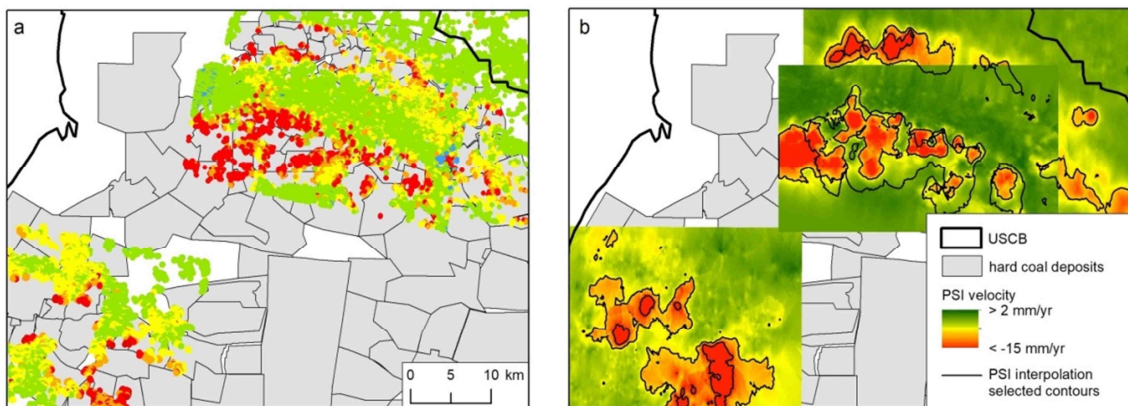
Rys. 17 Pokrycie czasowe interferogramów DInSAR. Każdy wiersz odnosi się do zestawu danych SAR wykorzystywanych do tworzenia interferogramów. Najniższy wiersz o nazwie „DInSAR surfaces” nawiązuje do obrazów osiadań całego GZW utworzonych na podstawie interferogramów.

Strefy wpływu górnictwa na podstawie danych PSI

Dane PSI to zbiory danych punktów wektorowych zawierające informacje o małych przemieszczeniach pionowych w jednostkach mm/rok. Maksymalne wartości osiadań odnotowane w wykorzystanych zbiorach wyniosły -16 mm/rok (PSI ERS „Rybnik”), -23 mm/rok (PSI „Sosnowiec”), -28 mm/rok (Envisat „Katowice”), -40 mm/rok (PSI ERS „Katowice”) i -335 mm/rok (PSI TSX). Oprócz danych w paśmie X, punkty PS nie pozwoliły na obserwację większych i szybszych osiadań. Niemniej jednak wszystkie wykorzystane

zbiory danych dały całościowy obraz zmian zachodzących na badanym obszarze. Dane w skali barw wyraźnie określają obszar objęty osiadaniem (Rys. 18).

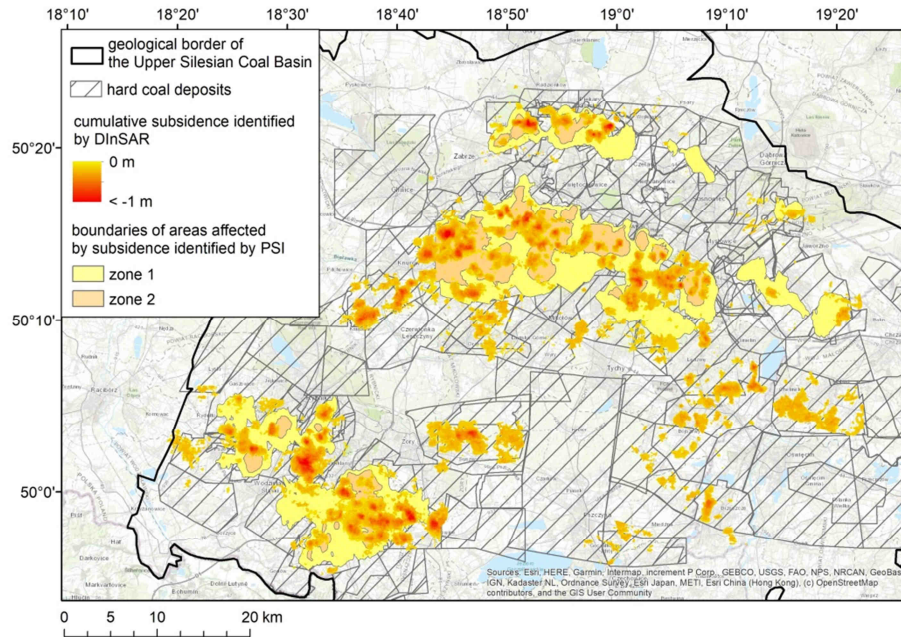
W celu wyznaczenia granic wartości osiadań szczątkowych zastosowano następującą metodykę. W pierwszym etapie dokonano interpolacji zbiorów punktów PS metodą krigingu. Następnie z uzyskanych powierzchni wybrano kontury o wartościach - 4 i - 8 mm/rok. Za granicę wiarygodnej wartości przetwarzania PSI uważa się wartość -2 mm/rok (Crosetto i in. 2016). Uznano, że dla wykorzystywanych zbiorów danych, głównie archiwalnych pasm C, które charakteryzują się dużą ilością szumów, ich pomnożenie wyznaczy wiarygodną granicę niewielkich osiadań narastających na danym obszarze i nazwaną strefą pierwszą. Drugi kontur (-8 mm/rok) stanowi granicę wyznaczonej strefy drugiej i wyznacza obszary szybszego przemieszczania się, w centrum których można znaleźć poszczególne niecki obniżeniowe. W kolejnym etapie połączono strefy wpływu działalności górniczej uzyskane z poszczególnych zbiorów danych. W ten sposób powstał obraz stref oddziaływania górniczego na powierzchnię.



Rys. 18 (a) Wykorzystane zbiory danych PSI. Żółto-pomarańczowe i czerwone punkty reprezentują wartości osiadania. (b) Interpolowane zbiory danych PSI z wyznaczonymi wartościami warstw prędkości -4 i -8 mm/rok.

Kompleksowe połączenie danych InSAR zaowocowało stworzeniem mapy ilustrującej zasięg i skalę osiadań terenu spowodowanych działalnością górniczą na Górnym Śląsku w latach 1992-2012 (Rys. 19). Pojedyncze interferogramy umożliwiły stworzenie warstwy niecek obniżeniowych, pojawiających się bezpośrednio po przeprowadzonej eksploatacji. Sporządzenie zbiorczego obrazu przemieszczeń pionowych poprzez zsumowanie wartości z pojedynczych rastrów, umożliwiło identyfikację miejsc, w których w analizowanym okresie pojawiły się nowe niecki osiadań, zmieniające powierzchnię terenu w sposób typowy dla podziemnych obszarów eksploatacyjnych. Łącznie zidentyfikowano 312,5 km² takich lokalizacji, z czego 18 km² pokrywa się z obszarami zurbanizowanymi.

Wyznaczone strefy wpływów górniczych, wykorzystując zbiory danych PSI, uzupełniły informacje o obszarach znajdujących się pod wpływem osiadania. Pokazują obszar, na którym wystąpiły powolne, szczątkowe deformacje w terenie. Powierzchnia wyznaczonej pierwszej strefy obejmuje aż 521 km², natomiast powierzchnia drugiej strefy, w której osiadanie było większe niż 8 mm rocznie, wynosi 152 km². Porównanie z danymi topograficznymi wykazało, że pod wpływem ruchów znajdowało się 98 km² zwartej zabudowy.



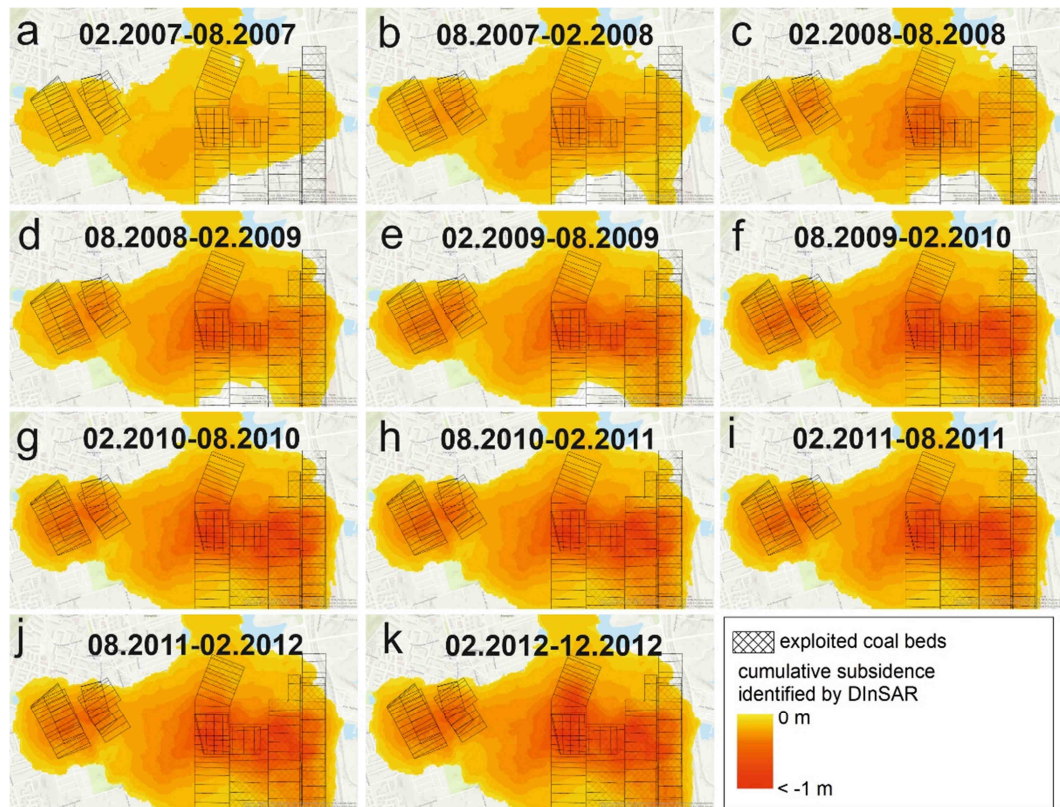
Rys. 19 Mapa osiadań terenu spowodowanych eksploatacją górniczą na Górnym Śląsku w latach 1992-2012 na podstawie danych InSAR.

Ostateczna mapa pozwala ocenić wpływ górnictwa na powierzchnię Górnego Śląska na przestrzeni 20 lat przełomu XX i XXI wieku. Niewątpliwą jej zaletą jest długi okres analizy, który w połączeniu z dużym obszarem badawczym daje po raz pierwszy ogólny, wielkoobszarowy obraz, tym bardziej, że dotyczy okresów sprzed 30 lat i dlatego jest niemożliwy do zbadania, z wykorzystaniem klasycznych metod geodezyjnych. Mapa pokazuje ogromny wpływ górnictwa na powierzchnię. W połączeniu z danymi topograficznymi może dostarczyć decydom lokalnym i regionalnym ogólnych informacji o obszarach zagrożonych.

Niestety podane dane są niekompletne. Informacje o osiadaniach z interferogramów obarczone były błędami wynikającymi z ręcznego czyszczenia danych, niespójnego obrazu fazowego w wielu miejscach, zwłaszcza tych porośniętych roślinnością, a przede wszystkim długich okresów braku danych. Uzyskane wartości osiadań należy zatem uznać za niedokładne, mocno zaniżone i niepełne. Mapę można wykorzystać do ogólnej analizy wpływów górniczych a uzyskane wartości należy rozumieć jako „nie mniejsze niż”.

Na interferogramach występują także miejsca osiadań, które nie znajdują się w strefach wpływów wyznaczonych punktami PS, szczególnie w okolicach Żor, Tychów, Bierunia, Chełmka, Libiążu i Brzeszcz. Wynika to z braku danych PSI dla tych obszarów.

Oprócz ogólnego obrazu długoterminowego oddziaływania górnictwa węgla kamiennego na powierzchnię, przedstawione opracowanie danych może posłużyć do szczegółowej analizy rozwoju niecek obniżeniowych w wybranych lokalizacjach. Poszczególne powierzchnie zmian powierzchni terenu (Rys. 17, „DInSAR surfaces”) pozwalają na opracowanie ostatecznego sumarycznego obrazu osiadań, ale także obrazów pośrednich pokazujących narastanie przemieszczeń w czasie. Przykład takiej analizy przedstawiono na Rys. 20 dla miasta Bytom. Kolejne obrazy przedstawiają osiadanie w odstępie sześciu miesięcy od lutego 2007 do grudnia 2012. Zestawienie zdjęć pozwala prześledzić narastanie zmian powierzchni terenu, a co za tym idzie rozwój niecki zagrażającej miastu w związku z prowadzoną eksploatacją.



Rys. 20 Osiadania skumulowane na powierzchniach DInSAR od lutego 2007 r. do grudnia 2012 r. w odstępach 6-miesięcznych, z uwzględnieniem zakresów prowadzonej w tym czasie eksploatacji górniczej.

4.3 Analiza osiadania w okresie 2012-2021 na podstawie danych InSAR i LIDAR

W celu określenia osiadań górniczych oraz pełnego wykorzystania potencjału danych Sentinel-1, zastosowano złożoną metodologię, polegającą na oddzielnym przetwarzaniu scen radarowych z wykorzystaniem klasycznej techniki interferometrii różnicowej DInSAR oraz techniki PSI. Do analizy deformacji wykorzystano sceny satelitarne Sentinel-1 ze ścieżki descending o numerze 124.

Wcześniejsze badania wykazały, że satelitarna interferometria radarowa na terenie GZW sprawdza się jako uzupełniająca metoda monitorowania przemieszczeń powierzchni terenu. Aby ostateczne zidentyfikowane wartości osiadań były jak najbardziej wiarygodne, informacje uzyskane na punktach PS oraz na interferogramach różnicowych należy analizować łącznie. Praca Przyłuckiej i in. (2015b) przedstawia próbę takiego połączenia na obszarze miasta Bytom, gdzie dane PS wykazały resztkowe osiadanie na krawędziach tworzącej się niecki. Jednocześnie interferogramy różnicowe pozwoliły na identyfikację istotnych zmian zachodzących w jej środkowej części. Podobne badania na terenie kopalni Rydułtowy przedstawili także Pawłuszek-Filipiak i Borkowski (2020). Charakter deformacji terenu spowodowanych podziemnym wydobywaniem węgla na GZW często skutkuje brakiem punktów PS w środkowych częściach niecek obniżeniowych, gdyż metoda PSI nie jest wystarczająca do zidentyfikowania najbardziej znaczących przemieszczeń ze względu na ich wysoce nieliniowe zachowanie w czasie. Jednocześnie na interferogramach DInSAR nie widać z kolei przemieszczeń resztkowych. Dlatego te dwie techniki uzupełniają się i razem pozwalają na pełny opis zmian zachodzących na powierzchni terenu.

Dodatkowym źródłem informacji o osiadaniach były cyfrowe modele terenu LIDAR. Dostępność nowych i archiwalnych danych zapewniła pełne pokrycie obszaru badawczego i identyfikację wszystkich niecek obniżeniowych powstałych na przestrzeni 9 lat.

Dane DInSAR

Metodą DInSAR przetworzono 195 scen, z których wykonano 182 interferogramów różnicowych w odstępach czasowych 12, 24, 36 lub 48 dni (Rys. 21). Zbiór danych obejmuje okres od 18.01.2015 r. do 29.12.2020 r., podstawowa charakterystyka zbioru danych znajduje się w Tabeli 3. Dla znacznej liczby par scen interferogramy z jednej ramki pokrywały tylko część obszaru badań, dlatego też konieczne było wykonanie dwóch interferogramów z dwóch różnych ramek tak, aby pokryć cały obszar (Tabela 4). Przetwarzanie przeprowadzono w oprogramowaniu Europejskiej Agencji Kosmicznej Sentinel Applications Platform (SNAP) z wtyczką SNAPHU, przy użyciu zarówno GUI, jak i narzędzia Graph Processing Tool (gpt) wiersza poleceń SNAP, a także SNAP API z narzędzi Python (snappy). Eliminację trendów przeprowadzono w programie R, łączenie rastrów w Global Mapper oraz inne analizy GIS w ESRI ArcGIS.

Metodologia przetwarzania DInSAR obejmowała klasyczne przetwarzanie kolejnych interferogramów różnicowych przy użyciu obrazów w szerokim trybie interferometrycznym SLC w polaryzacji VV. Do usunięcia fazy topograficznej wykorzystano numeryczny model terenu SRTM (rozdzielczość 30 m), udostępniony przez US Geological Survey, i zastosowano filtr Goldsteina.

Przed rozpakowaniem faz, w celu zminimalizowania efektu błędu atmosferycznego, zdefiniowano 12 mniejszych fragmentów obrazów, z angielskiego subsets. Granice fragmentów obrazu wybrano tak, aby obejmowały obszary czynnej eksploatacji górniczej, na których występuje największe osiadanie, zwłaszcza te niezidentyfikowane na punktach PS. Poniższe etapy przetwarzania przeprowadzono oddzielnie dla każdego fragmentu obrazu (subset). Rozpakowywanie faz przeprowadzono w ramach wtyczki SNAP SNAPHU (Chen i Zebker, 2002) metodą MST i trybem DEFO. Rozpakowaną fazę następnie przekształcono na wartości przemieszczenia i geokodowano metodą Range Doppler Terrain Correction. Następnie operator przeglądał każdy powstały obraz, aby wyeliminować te, w przypadku których faza nie została pomyślnie rozpakowana. W kolejnym kroku sumowano uzyskane powierzchnie deformacji fragmentu obrazu z jednego roku kalendarzowego. Na koniec zastosowano eliminację trendu poprzez dopasowanie wielomianu drugiego rzędu w celu odjęcia nakładających się błędów atmosferycznych.

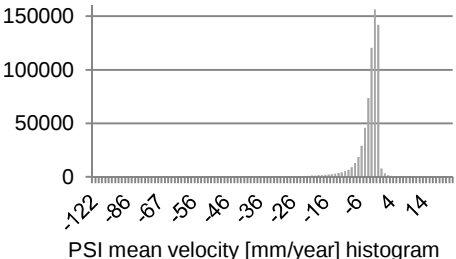
W ostatnim etapie połączono wszystkie obrazy osiadań z jednego roku kalendarzowego dla pojedynczego fragmentu obrazu, tworząc obraz deformacji dla całego obszaru badawczego. W rezultacie uzyskano obrazy przemieszczeń dla każdego z 6 lat obserwacji. Ostatecznie połączenie interferogramów z całego GZW pozwoliło na wykonanie ostatecznej mapy osiadań dla okresu 2015/01-2020/12 (Rys. 22).

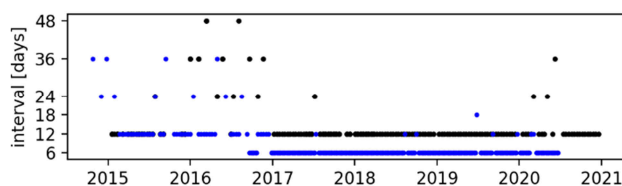
Dane PSI

Do przetwarzania PSI łącznie zarejestrowano 260 scen w minimalnych odstępach 12 dni (dla satelity Sentinel-1A) lub co 6 dni dla konstelacji Sentinel-1A/B, obejmujące okres od 26.10.2014 r. do 26.06.2020 r. (Rys. 21). Powstały zbiór obejmuje 10 201 730 punktów PS na obszarze 8 150 km², co daje średnią gęstość 1 252 PS/km². Jednakże występowanie punktów PS nie jest regularne (Rys. 22). Największe ich zagęszczenie obserwuje się na obszarach zurbanizowanych, a najmniejsze na terenach leśnych. Należy również zaznaczyć, że nie ma punktów dla obszarów, w których tempo odkształceń jest większe niż 100 mm/rok. Obszary

takie charakteryzują się dużą nieliniową deformacją w czasie, zbyt dużą utratą koherencji, co skutkuje brakiem punktów PS w środkowych częściach niecek obniżeniowych. Obróbkę przeprowadzono w programie Interferometric Toolbox Of PGI (InTOP) (Perski i in., 2019). Podstawową charakterystykę otrzymanego zbioru punktów PS przedstawiono w Tabeli 3.

Tab. 3 Główna charakterystyka przetworzonych zbiorów danych InSAR Sentinel-1. W prawej dolnej części histogram punktów PS średnich wartości prędkości.

Processing	PSI	DInSAR
Band	C	C
Wavelength	5.5 cm	5.5 cm
Incidence angle	29° - 36°	29° - 36°
Orbital path	124	124
Acquisition mode	Descending	Descending
Resolution of the image	5 m × 20 m	5 m × 20 m
Min. / Max. the time span between two acquisitions	6 / 36 days	12 / 48 days
Temporal span	2014/10/26 - 2020/06/26	2015/01/18 - 2020/12/29
Area cover	8 150 km ²	4 207 km ²
No. SAR images	260	195
Displacement along LOS between two fringes on the interferogram	NA	2.8 cm (Crossetto et al., 2016)
Max. theoretical velocity between neighbouring PS	42.6 cm/year (Crossetto et al., 2016)	NA
Reference image	29.08.2017	
No. of PSs	10,201,730	
Density of PS points	1252 [no./ km ²]	
$\mu \pm \sigma$	-0.4 ± 0.0 mm/year	
VELMIN/VELMAX	-123.9/+58.5 mm/year	
	 PSI mean velocity [mm/year] histogram	



Rys. 21 Diagram odstępów czasowych pomiędzy kolejnymi scenami Sentinel-1 SLC SAR używanymi do przetwarzania DInSAR (czarny) i PSI (niebieski).

Tab. 4 Schemat pozyskanych sceny SAR Sentinel-1 SLC ze ścieżki descending 124 do przetworzenia DInSAR dla obszaru badań z liczbą przedziałów czasowych uzyskanych interferogramów.

	Image coverage			
year	South part of USCB	North part of USCB	Whole USCB	Number of DInSAR time intervals
2015	18	15	0	19
2016	6	6	5	11
2017	14	14	12	26
2018	8	8	22	30
2019	0	0	29	29
2020	0	0	25	25
sum	182			140

Dane LIDAR

Jako drugie źródło informacji o osiadaniach mających miejsce na terenie całego Górnego Śląska wykorzystano różnicowy model terenu uzyskany z danych LIDAR o wysokiej rozdzielczości. Model różnicowy utworzono na podstawie dwóch modeli LIDAR w siatce 1 m, których dokładność wysokościowa jest nie mniejsza niż 15 cm, reprezentujących powierzchnię z lat 2012 i 2021 (Rys. 22). Modele zostały udostępnione przez Główny Urząd Geodezji i Kartografii. Powstały raster został ponownie próbkowany do rozdzielczości 20 m, zbliżonej do rozdzielczości końcowego rastra uzyskanego z danych InSAR. Model różnicowy utworzono w programie Global Mapper, a dalsze analizy wykonano w programie ESRI ArcGIS.

Analiza wyników przetworzeń InSAR

Wyniki uzyskane metodami PSI, DInSAR i różnicowym LIDAR przedstawiono na Rys. 22. W szczególności Rys. 22A zawiera łącznie niecki obniżeniowe zidentyfikowane i zsumowane na interferogramach InSAR z okresu 6 lat, nałożone na nie osiadania wyznaczone na podstawie modelu różnicowego LIDAR oraz punkty PS i dodatkowo wyróżnioną warstwą prędkości deformacji -5 mm rocznie. Na mapie zaznaczono także granice obszarów górniczych węgla kamiennego. Zaprezentowane metody z powodzeniem pozwoliły na identyfikację miejsc, w których w wybranych okresach występowały deformacje powierzchni terenu, choć każda z metod wykazywała inna skuteczność w identyfikacji poszczególnych wielkości zmian.

W wyniku przetworzenia PSI danych Sentinel-1 otrzymano 10 milionów punktów pomiarowych PS. Każdy z nich ma kilka atrybutów, z których najważniejszymi są średnia prędkość zmian położenia oraz szereg czasowy położenia punktu dla każdej daty pozyskania sceny, w odniesieniu do położenia dla obrazu „master” (które jest przyjmowane jako poziom odniesienia), w tym przypadku w środku przedziału czasowego, tj. 2017-08-29. Rozkład oszacowanych przemieszczeń na punktach PS, mierzonych jako średnia prędkość przemieszczania w kierunku obrazowania satelity LOS (z ang. Line-Of-Sight) dla całego okresu, przedstawiono na Rys. 22A, a główną charakterystyką zbioru danych w Tabeli 3. Ujemna skośność histogramu prędkości LOS można wytłumaczyć dominującym osiadaniem wykrytym na terenie GZW. Średnie odchylenie standardowe wynosi prawie 0 mm/rok.

Można zaobserwować, że większość punktów PS zlokalizowana jest na terenach zabudowanych, w mniejszych i większych miastach oraz na szlakach komunikacyjnych, natomiast znaczne luki w danych charakteryzują obszary leśne i rolnicze. Podobnie brak punktów PS zauważalny jest w środkowych częściach stref osiadania, wyznaczonych przez obszary górnicze. Choć największa zaobserwowana prędkość wynosi aż 120 mm/rok (Tab. 3), dla większość punktów, na których zaobserwowano osiadanie, wartość prędkości nie

przekracza 20 mm/rok (patrz histogram w Tabeli 3). Szybsze ruchy terenu powodują odrzucenie punktów PS z powodu dekorrelacji, jak opisano powyżej.

Baza punktów PS umożliwiła zapoznanie się ze skalą osiadań spowodowanych eksploatacją podziemną, która miała miejsce na przestrzeni 6 lat od 2015 do 2020 r. Punkty PS pokazują podobne zmiany na powierzchni terenu publikowane w innych pracach (Graniczny i in., 2015, Przyłucka i in., 2022), gdzie wykorzystano dane z innych satelitów. Nie ulega wątpliwości, że szeroki zakres zbioru danych oraz ich duże zagęszczenie pozwala na wyciągnięcie wstępnych wniosków dotyczących całego obszaru i poszczególnych zakładów górniczych. Po pierwsze, widać, że pomimo ograniczenia wydobycia węgla w ostatnich latach, obszar ten w dalszym ciągu podlega istotnym zmianom, a tereny zabudowane nie są wolne od ryzyka osiadań. Brak punktów PS w centralnych częściach obszarów prowadzonej eksploatacji górniczej sugeruje, że przemieszczenia są tam bardzo duże. Osiadanie zaobserwowano na terenie ponad 65 z 81 eksploatowanych złóż węgla kamiennego.

Punkty PS po interpolacji tworzą powierzchnię średnich prędkości ruchów, łatwiejszą do interpretacji niż dane punktowe. Na podstawie powierzchni wyznaczono strefy, w obrębie których występuje osiadanie większe niż 5 mm/rok (Rys. 22A). Łączna powierzchnia tych stref wynosi 430 km², z czego 111 km² to tereny zabudowane. Warto także zaznaczyć, że 68 km² osiadań wykracza poza granice obszarów górniczych.

Przetwarzanie interferogramów różnicowych z wykorzystaniem metodologii przedstawionej w poprzednim podrozdziale doprowadziło do stworzenia mapy osiadań oddzielnie dla każdego roku obserwacji. Kolejne sumy uzyskanych powierzchni pozwoliły na obserwację osiadań, narastającą od 2015 do 2020 roku, i ostateczny obraz całkowitych przemieszczeń, jakie nastąpiły w ciągu 6 lat. Analiza DInSAR pozwoliła określić maksymalne osiadanie do 70 cm w ciągu jednego roku i -1,35 m na skumulowanym obrazie całkowitego zmierzonego przemieszczenia. Ogółem zaobserwowano 132 niecki o powierzchni od 0,005 do 8,189 km², o łącznej powierzchni 65,479 km², z czego 11 km² to tereny zabudowane (Rys. 22). Większość z nich występuje w granicach obszarów czynnych górniczo w analizowanym okresie. Warto zauważyć, że niektóre obniżenia wykraczają poza obszary eksploatowanych złóż, podobnie jak strefy osiadań wyznaczone techniką PSI. Małe niecki zidentyfikowane poza strefami osiadania punktów PS można uznać za błędy w rozpakowywaniu fazy. Podobnie jak w przypadku techniki PSI, utrata koherencji na terenach pokrytych roślinnością skutkowałą niepełnym obrazem przemieszczeń na terenach rolniczych i leśnych. Również manualna analiza poszczególnych interferogramów po rozpakowaniu faz ujawniła istotne błędy w uzyskaniu wiarygodnych wartości.

Obserwacja obrazów osiadań zidentyfikowanych w kolejnych latach oraz obrazów osiadań skumulowanych pozwala prześledzić rozwój zmian na powierzchni terenu, w miejscach w których występują największe przemieszczenia. Przykład rozwoju osiadań na obszarze górniczym Ornontowice przedstawiono na Rys. 22B-G. Każdy rysunek przedstawia skumulowane osiadanie w odstępach rocznych. Na Rys. 22G przedstawiono całkowite skumulowane osiadanie dla lat 2015-2020, natomiast na Rys. 22I dodatkowo przedstawiono prędkości szczytowe zarejestrowane na punktach PS oraz granicę obszaru podlegającego deformacji -5 mm rocznie, a na Rys. 22J wyniki na podstawie różnicowego modelu LIDAR.

Często tam, gdzie osiadanie w środkowej części niecek było duże i szybkie, na obrazie z przedziałem 12-dniowym można było dostrzec co najmniej dwa, a nawet trzy prążki interferometryczne, co widać na przykładzie nieodpakowanej fazy interferogramu różnicowego z dat 21.02.2020-2020.03.04 na Rys. 22H. W wielu przypadkach jednak, ze względu na nieregularność koherencji poszczególnych pikseli, nie udało się prawidłowo

rozpakować fazy i w efekcie otrzymane wartości były zaniżone a informacja o osiadaniach była niekompletna.

Wyznaczone przez DInSAR niecki zlokalizowane są dokładnie w strefach wyznaczonych punktami PS (Rys. 22A). Potwierdza to główne założenia analizy, tj. wyznaczenie granic przemieszczeń szczątkowych na podstawie danych PS i uzupełnienie ich o najistotniejsze wartości odkształceń za pomocą przetworzenia DInSAR. Widoczne jest także, że przemieszczenia całkowite na mapach uzyskanych z DInSAR nie pozwoliły na określenie małych, drobnych zmian, które jednak były widoczne na punktach PS. Analiza ta prowadzi do wniosku, że pełniejszy obraz deformacji z danych InSAR na GZW można uzyskać jedynie poprzez połączenie informacji z dwóch metod. Jednocześnie charakter zmian powierzchni terenu oraz obecność roślinności na dużej części obszaru badań sprawia, że nawet połączenie wyników PSI i DInSAR nie daje pełnego obrazu istniejących deformacji.

Z analizy końcowego obrazu można wnioskować, że całkowite wartości InSAR są zaniżone. Podobne wnioski można wyciągnąć porównując uzyskane wartości z wartościami z pomiarów geodezyjnych publikowanych np. przez Ilievę i in. (2019) oraz Kowalski i in. (2021). Ilieva i in. (2019) wykazali osiadanie o wartości 1 m na terenie Miechowic w Bytomiu, które wystąpiło jedynie w ciągu pół roku od kwietnia do października 2017 r., a Kowalski i in. (2021) przedstawili osiadanie w Rudzie Śląskiej na poziomie prawie 2,2 m w okresie trzech lat od stycznia 2018 r. do listopada 2020 r. Tymczasem nasza mapa, obejmująca dłuższy okres, pokazuje w tych miejscach odpowiednio 0,31 i 0,81 m deformacji.

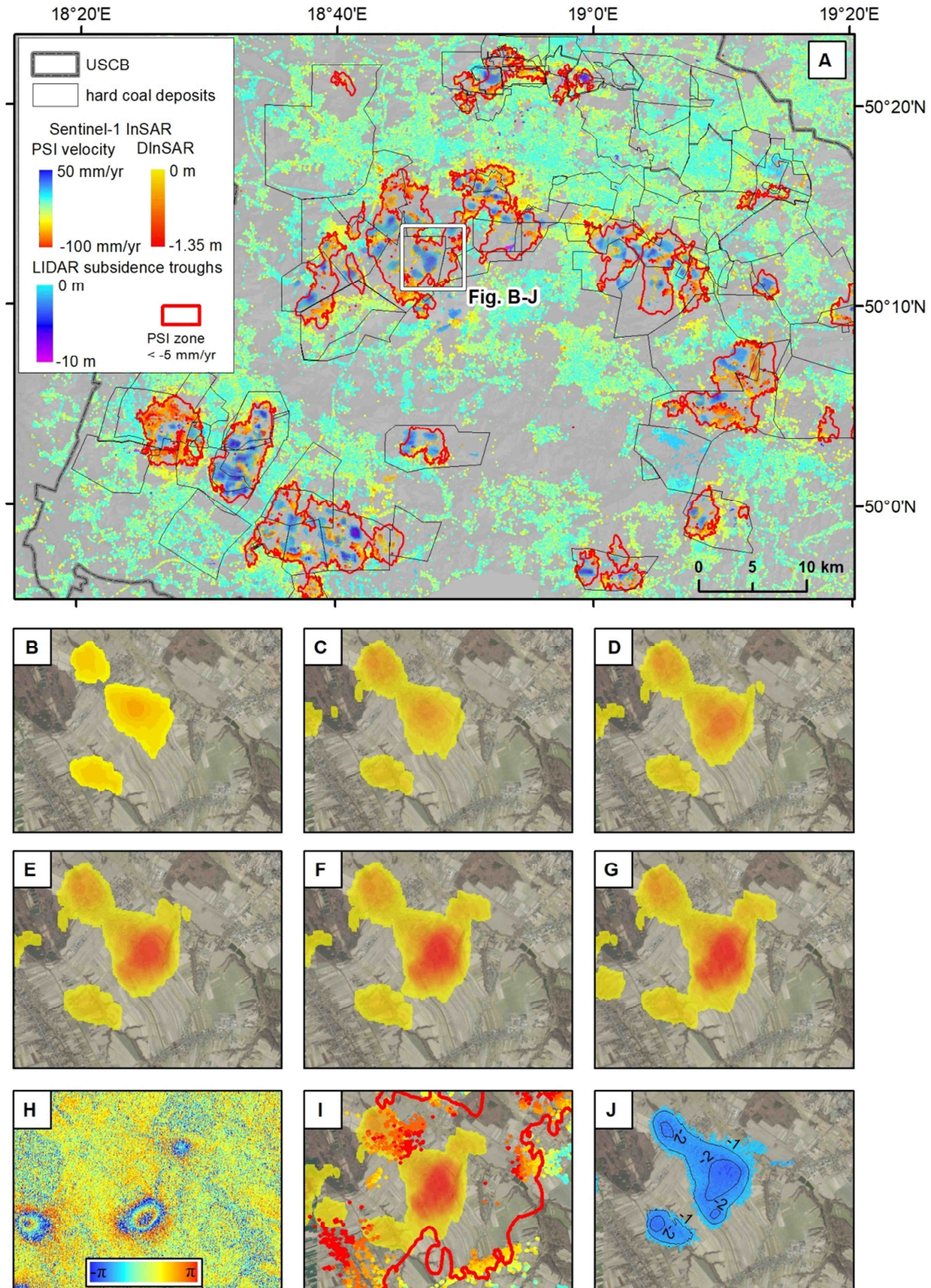
Niemniej jednak analiza pozwala na oszacowanie skali zjawiska osiadania występującego na badanym obszarze. Miejsca powstałych niecek i ich granice wyznaczone przez osiadanie szczątkowe jednoznacznie związane są z terenami górniczymi. Mapa pozwala na identyfikację obszarów, w których występują deformacje i porównanie ich z danymi topograficznymi.

Analiza wyników różnicowego modelu LIDAR

Różnicowy model terenu wykonano poprzez odjęcie powierzchni z 2012 r. od powierzchni z 2021 r. Pojedynczy model powierzchni terenu charakteryzuje się dokładnością wysokościową wynoszącą 15 cm, zatem należy przyjąć, że w przypadku niekorzystnej kumulacji błędów obu modeli przy tworzeniu ich różnicy błąd może sięgać 30 cm. Potwierdzono to w analizie przeprowadzonej w GIS na 204 wybranych punktach, w których w latach 2012-2021 nie powinny wystąpić przemieszczenia, a średnia wartość różnicowego modelu terenu wynosi 25 cm.

Aby wyselekcjonować jedynie te obszary, które odpowiadają nieckom obniżeniowym, uzyskaną powierzchnię modelu różnicowego zastąpiono konturami. Ze względu na małą dokładność różnicowego modelu terenu (błąd do 30 cm) za granicę niecek obniżeniowych przyjęto warstwice o wartości -50 cm. Ze zbioru miejsc, w których wystąpiły osiadania, jako nieistotne usunięto fragmenty o powierzchni $<0,1 \text{ km}^2$. Wykorzystując ostateczne warstwice -50 cm z rastrowego obrazu różnicowego modelu terenu wycięto niecki osiadań. Otrzymane w ten sposób niecki osiadań uwzględniono w dalszych analizach.

Łącznie zidentyfikowano 103 miejsca obniżeń o powierzchni 88 km^2 . Lokalnie różnice wysokości dochodziły do 38 m, przy czym te znaczne, duże wartości wiązały się z eksploatacją odkrywkową lub zmianami w pokryciu terenu (np. budową dróg). Największa wartość odkształceń w środkowej części niecki związana z eksploatacją podziemną wyniosła -108 cm.



Rys. 22 Przetwarzanie InSAR i różnicowe wyniki LIDAR. (A) Średnia prędkość punktów PS w jednostkach mm/rok i obszary niecek obniżeniowych DInSAR w żółto-czerwonej skali barwnej; niecki obniżeniowe na różniowym modelu LIDAR w skali barwnej niebiesko-fioletowej. (B) – (G) Osiadanie na podstawie DInSAR narastająco w odstępach jednego roku na obszarze Orontowice: (B) 2015, (C) 2015-2016, (D) 2015 – 2017, (E) 2015 – 2018, (F) 2015 – 2019, (G) 2015 – 2020. (H) Przykład jednego interferogramu różnicowego z Sentinel-1 dla dat 21.02.2020-2020.03.04, obraz fazowy w niebiesko-czerwonej skali kolorów dla wartości radianów. (I) Wyniki PSI i DInSAR plus strefa osiadania większa niż -5 mm rocznie, wyróżniona czerwonym konturem. (J) Niecki osiadania na podstawie różnicowego modelu LIDAR-u na obszarze Orontowice z warstwicami wartości osiadania w [m].

W literaturze światowej można znaleźć wiele przykładów walidacji danych InSAR (np. Ferretti i in., 2007; Del Soldato i in., 2021), które zwykle ujawniając dobrą jakość wyników przetwarzania w przypadku małych obszarów. W większości przypadków porównanie z danymi geodezyjnymi, tradycyjnymi pomiarami niwelacyjnymi lub GNSS, wykazało dobrą zgodność uzyskanych wartości deformacji. Jak już omówiono w poprzednich rozdziałach, udowodniono również, że na obszarze GZW technika PSI nie pozwala na oszacowanie dużych przemieszczeń w środkowej części niecek obniżeniowych ze względu na ich wielkość i nieliniowy charakter. Jednocześnie metoda DInSAR, mimo że jest w stanie wykryć duże prędkości osiadania, nie może zapewnić bardzo dokładnych pomiarów ze względu na błędy atmosfery i trudności w dokładnym odpakowaniu fazy. Większość badań nad określeniem dokładności wyników InSAR opierała się na krótkich okresach, kilkumiesięcznych lub rocznych i małych obszarach badawczych, np.: jednym obszarze górniczym, a nawet pojedynczych nieckach. Przedstawienie skumulowanych wyników przetwarzania DInSAR z sześciu lat obserwacji obejmujących obszar pięciu tysięcy km² zmniejsza dokładność uzyskanych wartości, ponieważ błędy uzyskane na każdym interferogramie sumują się. Niedoszacowanie dużych odkształceń w środkowej części niecek, wynikających z błędów rozpakowania faz w krótkim okresie, nie byłoby tak widoczne, jak po zsumowaniu całego okresu 6 lat obserwacji. Z kolei najbardziej wiarygodną wartością uzyskaną w wyniku przetwarzania PSI nie jest wartość przemieszczenia (jak ma to miejsce w przypadku pomiarów geodezyjnych), ale średnia wartość prędkości punktu PS.

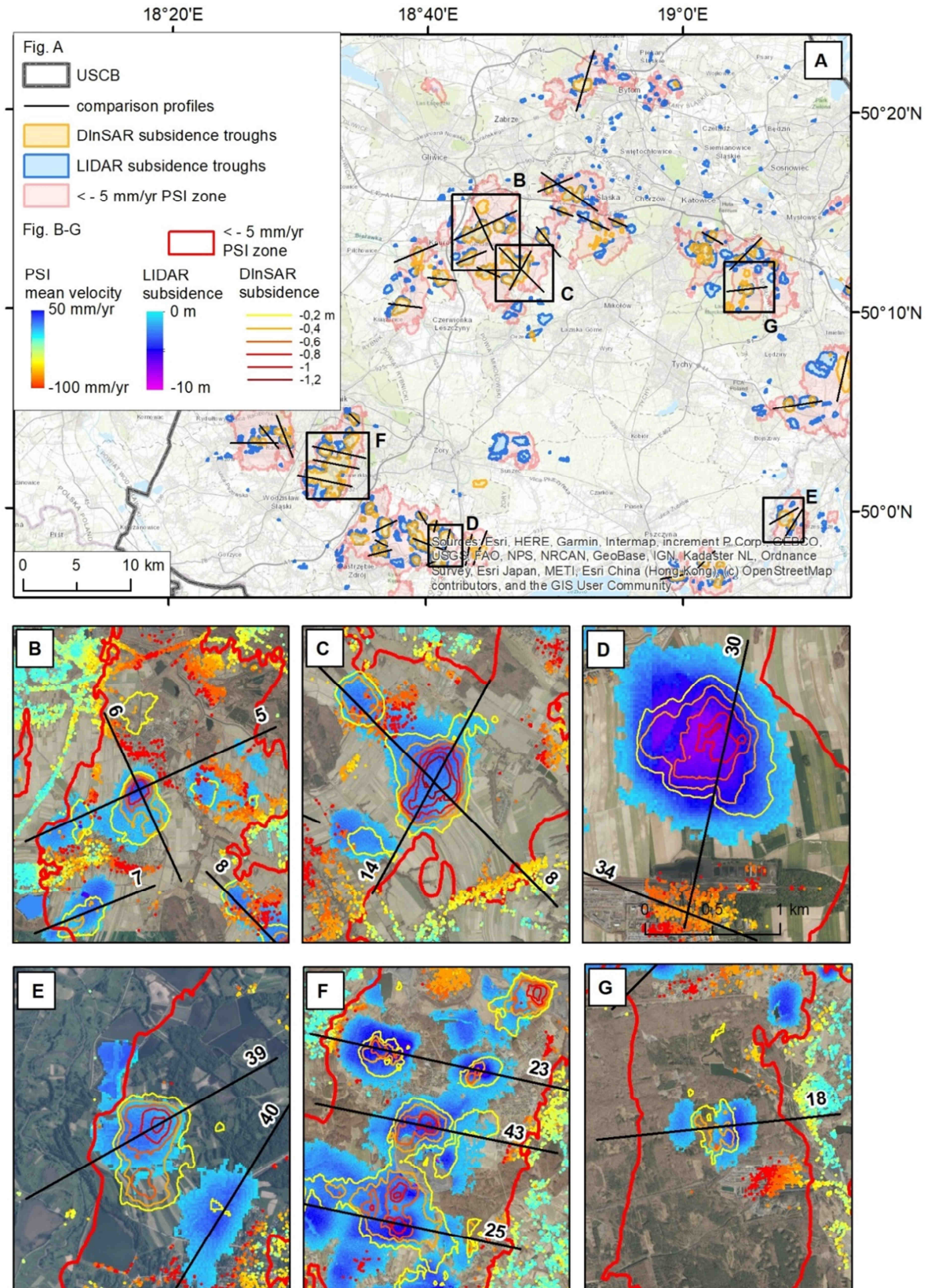
Zaprezentowane wyniki z danych InSAR porównano z różnicowym modelem terenu LIDAR z lat 2012-2021. Porównanie z danymi LIDAR jest mniej dokładne niż dane niwelacyjne, ale pozwala na ocenę uzyskanych wyników dla całego obszaru badań.

Dokładność i jakość mapy osiadań uzyskanej z pomiarów InSAR oceniano w dwóch etapach. W pierwszej kolejności przeprowadzono ocenę jakościową, polegającą na wizualnej interpretacji różnic pomiędzy dwoma obrazami deformacji (Rys. 23). Można wyciągnąć następujące wnioski: Mapy osiadania wykazują dobrą korelację w zakresie identyfikacji występowania deformacji. Miejsca występowania niecek pokrywają się i są ściśle powiązane z terenami czynnymi górniczo. Niemniej jednak na mapie InSAR nie wykryto aż 48 miejsc, w których w różnicowym modelu LIDAR osiadanie przekracza 0,5 m. Łączna powierzchnia niecek niezidentyfikowanych na danych satelitarnych wynosi 17,9 km². Analiza tych miejsc wraz z danymi pokrycia terenu CLC2018 wykazała, że występują one głównie na obszarach pokrytych roślinnością i uprawami rolnymi, a miejsca położone na terenach zurbanizowanych miały charakter małych wielokątów (średnia powierzchnia wielokąta na terenach zurbanizowanych w obrębie tych niecek wynosiła <0,05 km²). Są to miejsca występowania niskiej koherencji na pikselach danych SAR, co utrudnia wykrycie deformacji. Jednocześnie należy zaznaczyć, że choć dane DInSAR nie wykazały dużych osiadań widocznych na modelu różnicowym, to 38 z 48 tych lokalizacji leży w strefach osiadań szczytkowych wyznaczonych na podstawie danych PS.

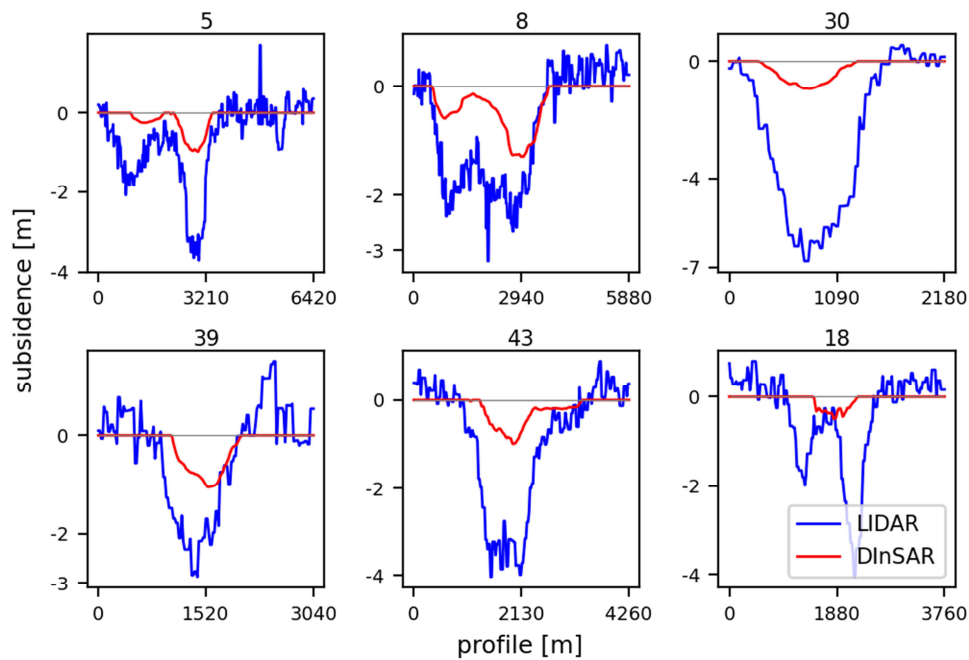
W drugim etapie walidacji dokonano dwuetapowego porównania ilościowego wartości na obu mapach. Najpierw wygenerowano 7 984 punkty w regularnej siatce o boku 500 m obejmującej obszar zainteresowania. Dla każdego punktu obliczono różnicę pomiędzy wartościami końcowego obrazu zmian powierzchni terenu uzyskanej z danych InSAR i różnicowym modelem LIDAR. Do obliczenia błędu średniokwadratowego (RMSE) wykorzystano pierwiastek średniokwadratowy różnic pomiędzy wartościami uzyskanymi na punktach. Błąd ten wyniósł 1,26 m. W drugim etapie na mapie naniesiono 43 profile liniowe przechodzące przez niecki obniżeniowe (Rys. 23). Profile te rysowano ręcznie, a zadaniem operatora było zlokalizowanie profilu tak, aby przechodził przez środek basenu i przecinał obszar, w którym rejestrowano przemieszczenia. Na każdym profilu co 20 m wyznaczano

punkty, w sumie 7 330 punktów. Dla każdego punktu wyznaczono różnicę wartości na dwóch uzyskanych powierzchniach (InSAR i różniczkowy LIDAR) i na podstawie tych różnic również obliczono błąd RMSE. Błąd ten wyniósł 1,86 m.

Na 43 wyznaczonych profilach dokonano także wizualnego porównania miejsc najbardziej krytycznych pod względem odkształceń zarejestrowanych dwiema metodami pomiarowymi. Wybrane profile przedstawiono na Rys. 24. Wizualizacja przekrojów w płaszczyźnie pionowej dodatkowo uwidoczniała różnice w wartościach. O ile kształt i lokalizacja odkształcenia są mniej więcej zgodne, co widać także na mapie na Rys. 23, o tyle niedoszacowanie danych InSAR w wielu przypadkach przekracza 1 m. Nawet biorąc pod uwagę błąd różnicowego modelu LIDAR (0,3 m), uzyskana wartość porównawcza mapy InSAR jest znacząca. Można to częściowo wytłumaczyć faktem, że obie mapy obejmują różne okresy (model LIDAR obejmuje 9 lat, natomiast mapa InSAR 6 lat, dokładnie w środku okresu LIDAR). Niemniej jednak tak duży błąd średni uzyskanych wartości potwierdza założenia przedstawione na początku tej części raportu, że powstałej mapy osiadań InSAR nie można traktować jako mapy dokładnych, wiarygodnych wartości deformacji, a jedynie jako ich przybliżony obraz. Z kolei różnicowy model LIDAR zawiera szum i nieprawidłowe wartości w zakresie kilkudziesięciu centymetrów, co uniemożliwia identyfikację bardzo małych przemieszczeń i prawidłową ocenę granic basenów widocznych na mapie punktów PSI.



Rys. 23 (A) Porównanie osiadań zidentyfikowanych za pomocą DInSAR (żółte wielokąty), różnicowego LIDAR (niebieskie wielokąty) i przetwarzania PSI (różowe wielokąty). Profile użyte do porównania różnicowego modelu LIDAR i mapy InSAR pokazano czarnymi liniami. (B) – (G) Powiększenie wybranych obszarów; wyniki osiadań z DInSAR (wartości czerwono-żółte), różnicowego LIDAR (raster niebiesko-fioletowy) i PSI (niebiesko-czerwone punkty z czerwoną warstwą -5 mm/rok).



Rys. 24 Przekroje przez różnicowy model LIDAR i wyniki DInSAR na wybranych profilach liniowych (lokalizacja profili na Rys. 23).

5 Mapa deformacji

Omówione w poprzednich rozdziałach zestawy danych, mimo iż wszystkie zawierają informacje o powierzchniowych zmianach terenu, są trudne do połączenia, gdyż pochodzą z różnych typów przetworzenia, pokrywają niejednolite obszary lub okresy oraz nie są wolne od miejsc braków danych wynikających z ograniczeń wykorzystanych metod. Dane PSI są to wektorowe dane punktowe, a najbardziej wiarygodna wartość jest to średnia prędkość zmian położenia w jednostkach milimetry na rok. Pozyskana na ich podstawie informacja jest przydatna głównie do określenia szczytkowych przemieszczeń występujących na granicach obszarów eksploatowanych lub do wyznaczenia granic stref, w których wystąpiły przemieszczenia. Duże osiadania tworzące niecki obniżeniowe nie są rejestrowane na punktach PS. Brak jest również informacji na obszarach pokrytych gęstą roślinnością.

Dane pochodzące z interferogramów różnicowych uzupełnią informacje z przetworzeń PSI o duże przemieszczenia, ale też nie są wolne od błędów. Zgromadzony zestaw interferogramów nadal ma luki czasowe, a otrzymane przemieszczenia są bardzo niedoszacowane. Poza tym również w tym przypadku brak jest wiarygodnej informacji na terenach leśnych i łąkach.

Uzupełnienie danych różnicowym modelem terenu LIDAR pozwoliło wyznaczyć niecki osiadania, ale tylko dla okresu od 2012 do 2021 roku. Poza tym różnicowy model LIDAR nie pozwolił wyznaczyć prawidłowo granic niecek obniżeniowych, gdyż jego dokładność wysokościowa wynosiła 25 cm.

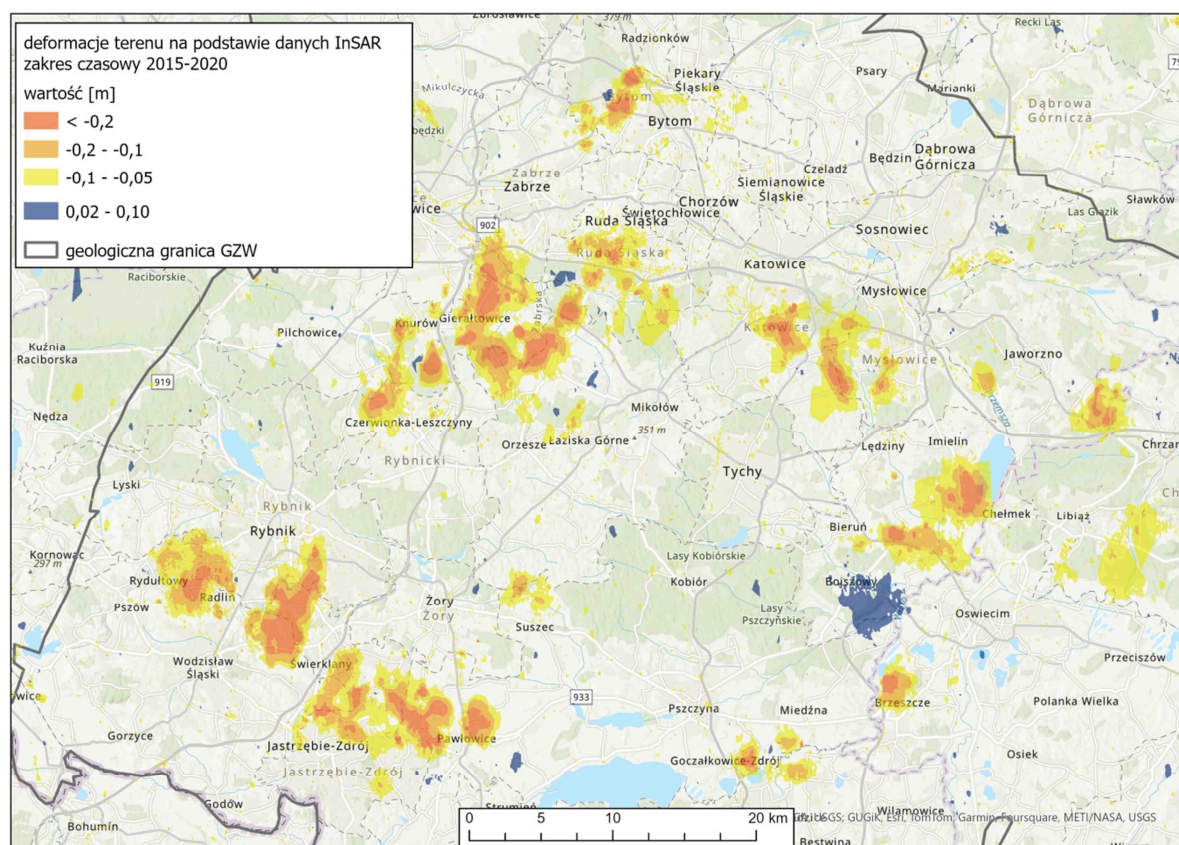
Tak więc zebrane zestawy danych znacząco różnią się od siebie a ich połączenie nie mogło zostać wykonane wprost, na przykład poprzez dodanie wartości. Niemniej jednak każdy z prezentowanych zestawów niesie informacje o przemieszczeniach, choć w różnej formie. W celu określenia wpływu oddziaływania na powierzchnię terenu na jak największym

Mapę deformacji, zawierająca konkretne wartości osiadania i podnoszenia, wykonano dla okresu 2015-2020, wykorzystując dane z przetworzeń PSI i DInSAR z satelity Sentinel-1. Te dwa zestawy danych, omówione w rozdziale 4.3, są najbardziej komplementarne między sobą.

Dane PSI i wynikająca z nich sumaryczna mapa osiadań uzyskana z interferogramów różnicowych zostały połączone w jeden produkt rastrowy przedstawiający przemieszczenia pionowe, jakie wystąpiły w latach 2015-2020 na badanym obszarze. Połączenie zostało wykonane w środowisku GIS i narzędzi geostatystycznych w kilku krokach.

1. Najpierw pomnożono średnią prędkość punktów PS przez 6, aby uzyskać przybliżone wartości sumarycznego osiadania dla całego okresu.
2. Następnie mapę niecek uzyskaną z analizy DInSAR przekształcono na wektorową warstwę punktową w regularnej siatce o boku 20 m.
3. Obie warstwy punktowe (pozyskane z danych PS i DInSAR) zostały połączone w trzecim kroku.
4. Na koniec dane poddano interpolacji w oprogramowaniu Global Mapper, tworząc siatkę sumarycznych przemieszczeń metodą triangulacji.

Rys. 26 przedstawia wynikową mapę deformacji pionowych dla obszaru Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Mapa ta stanowi efekt rzeczowy zadania i jest również przedstawiona jako Załącznik 2.1.



Rys. 26 Wynikowa mapa deformacji pionowych na obszarze GZW uzyskana na podstawie danych InSAR z okresu 2015-2020.

6 Interpretacja mapy deformacji

Ostateczna mapa pokazuje ogromny wpływ górnictwa na osiadanie. Łącznie zanalizowano zmiany powierzchni terenu powstałe w okresie prawie 30 lat od 1992 do 2021 na obszarze 5600 km² Górnosląskiego Zagłębia Węglowego.

Dla okresu 1992-2012 wykryto ponad 500 km², na których wystąpiły mniejsze lub bardziej istotne osiadania, z czego prawie 100 km² znajdowało się na terenach zurbanizowanych. Na obrazach interferometrycznych zidentyfikowano obszary szybkiego przemieszczania się o powierzchni ponad 300 km².

Dla okresu 2015-2020 wyznaczono 132 obszary niecek obniżeniowych, a 430 km² stref podlega deformacjom większym niż 5 mm rocznie. Dodatkowo różnicowy model terenu uzyskany z LIDAR-u o wysokiej rozdzielczości z lat 2021 i 2012 umożliwił identyfikację deformacji, które wystąpiły na przestrzeni 9 lat. Wyniki LIDAR wykazały 103 miejsca, w których zmiany powierzchni terenu spowodowane górnictwem podziemnym osiągnęły 10 m i łącznie zajmowały powierzchnię prawie 90 km².

Porównanie danych InSAR z danymi różnicowymi LIDAR pozwoliło określić dokładność uzyskanych wartości z InSAR jako niską, rzędu kilkudziesięciu centymetrów, ale w sposób rzetelny i kompleksowy pokazujące całościowy obraz zmian powierzchni terenu wywołanych długotrwałą działalnością górnictwem. Dodatkowo analiza poszczególnych powierzchni deformacji uzyskanych z sumy interferogramów różnicowych w okresach rocznych umożliwiła analizę rozwoju poszczególnych niecek obniżeniowych oraz śledzenie przyrostu osiadań.

Przetwarzanie InSAR, jak każda metoda pomiarowa, nie jest wolne od wad. Brak danych na obszarach o niskiej koherencji, błędy związane z wpływem atmosfery oraz trudności w rozpakowywaniu faz skutkują niską dokładnością wartości końcowych, zwłaszcza w tak długim okresie. Kompleksowa analiza wyników dwóch typów przetwarzania obejmujących obszar całego największego w Polsce zagłębia węglowego, pozwoliła na wyznaczenie niecek obniżeniowych oraz opisanie skali i zasięgu deformacji w ostatnich latach. Jednakże porównanie z różnicowym modelem terenu LIDAR wykazało bardzo duże niedoszacowanie danych w centralnych częściach niecek, opisane błędem RMSE o wartości 1,86 m. Natomiast osiadanie szczytkowe wyznaczone na podstawie punktów PS nie zostało zmierzone ani na mapach DInSAR, ani na modelu różnicowym LIDAR. Mapa punktów PS pozwoliła na wyznaczenie obszarów podlegających osiadaniom od -5 mm rocznie i tym samym uzupełniła informacje o dużych osiadaniach prezentowane na DInSAR i różnicowym LIDAR. Identyfikacja osiadań spowodowanych górnictwem podziemnym przy użyciu różnicowego modelu LIDAR wykazało ogromny potencjał. Dane obejmujących okres 9 lat pozwoliły na identyfikację wszystkich obszarów, na których powstały duże niecki obniżeniowe, nawet tam, gdzie roślinność uniemożliwiała pomiary InSAR. Dane LIDAR mogą jednak nie być dostępne w krótkich odstępach czasu, a aktualizacja ich na tak dużym obszarze jest bardzo kosztowna. W celu szczegółowego monitorowania lub uzupełnienia informacji o kolejnych przyrostach deformacji w krótszych okresach celowe jest stosowanie pomiarów DInSAR.

Zestawione łącznie wszystkie wykorzystane zestawy danych pozwoliły na wyznaczenie dwóch stref: osiadań szczytkowych oraz osiadań znaczących. Wykazano, iż w okresie od 1992 do 2021 roku aż 786 km² znalazło się pod wpływem osiadania, a 245 km² stanowi miejsca, w których zarejestrowano osiadania większe niż 10 cm. Liczby te wskazują, iż wpływ eksploatacji górnictwa na powierzchnię jest nadal bardzo duży.

7 Literatura

- Absalon D., Matysik M., 2009 – Antropogeniczne zagrożenia wód podziemnych na obszarach górniczych na przykładzie miasta Jaworzno. W: *Przeobrażenia stosunków wodnych w warunkach zmieniającego się środowiska*. Red. Nauk.: Jankowski A., T., Absalon D., Machowski R., Ruman M. Wydział Nauk o Ziemi Uniwersytetu Śląskiego. ISBN 978-83-61644-05-7.
- Buła Z., Chmura A., Jureczka J., Różkowski A., Wagner J., 1994 – Ocena możliwości włączania słonych wód kopalnianych do zbiornika warstw dębowieckich (trzeciorzęd) w południowej części regionu górnośląskiego [W]: V Konferencja pt. „Problemy geologii i ekologii w górnictwie podziemnym”. Szczyrk, 12-14 października 1994. Wyd. GIG: 229-241.
- Chen, C.W., Zebker, H.A., 2002. Phase unwrapping for large SAR interferograms: Statistical segmentation and generalized network models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40: 1709-1719. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.802453>.
- Chowaniec J., Freiwald P., Łopuszańska M., Patorski R., Witek K., 2006 – Możliwości uzyskania zwykłych wód podziemnych w zachodniej części polskich Karpat fliszowych. [W]: *Hydrogeochemia'06*. X Międzynarodowa konferencja naukowa pt. “Aktualne problemy hydrogeochemii”. Sosnowiec-Złoty Potok, 23.06-24.06.2006. Sosnowiec.
- Crosetto M, Monserrat O, Cuevas-González M, Devanthery N, Crippa B, 2016. Persistent scatterer interferometry: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 78-89.
- Del Soldato, M., Confuorto, P., Bianchini, S., Sbarra, P., Casagli, N., 2021. Review of works combining GNSS and InSAR in Europe. *Remote Sensing*, 13: 1684. <https://doi.org/10.3390/rs13091684>.
- Del Ventisette C, Ciampalini A, Manunta M, Calò F, Paglia L, Ardizzone F, Guzzetti F, et al., 2013. Exploitation of large archives of ERS and ENVISAT C-band SAR data to characterize ground deformations. *Remote Sensing*, 5(8), 3896-3917.
- Dulias R., 2013 – Denudacja antropogeniczna na obszarach górniczych na przykładzie Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Uniwersytet Śląski, Katowice.
- Ferretti, A., Savio, G., Barzaghi, R., Borghi, A., Musazzi, S., Novali, F., Prati, C., Rocca, F., 2007. Submillimeter accuracy of InSAR time series: Experimental validation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45: 1142-1153. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.894440>
- Frolik A., Rogoż M., Staszewski B., 1986 – Zasady prognozowania zmian warunków wodnogruntowych i ich wpływ na podłoże obiektów budowlanych. PBZ - 016 - 06. Główny Instytut Górnictwa. Katowice.
- Graniczny M, Kowalski Z, Leśniak A, Czarnogórska M, Piątkowska A, 2007. Analysis of the PSI data from the Upper Silesia – SW Poland. The International Geohazard Week 5–9 November 2007 ESA-ESRIN Frascati Rome, Italy. The International Forum on Satellite EO and Geohazards: 17.
- Graniczny M, Kowalski Z, Przyłucka M, Zdanowski A, 2014. Wykorzystanie danych SAR do obserwacji deformacji terenu spowodowanych działalnością górniczą w rejonie Górnośląskiego Zagłębia Węglowego: wyniki projektu DORIS (EC-FP7). *Przegląd Górniczy* 70(12), 11-19.
- Graniczny, M., Colombo, D., Kowalski, Z., Przyłucka, M., Zdanowski, A., 2015. New results on ground deformation in the Upper Silesian Coal Basin (southern Poland) obtained during the DORIS Project (EU-FP 7). *Pure and Applied Geophysics*, 172: 3029-3042. <https://doi.org/10.1007/s00024-014-0908-6>.
- Ilieva, M., Polanin, P., Borkowski, A., Gruchlik, P., Smolak, K., Kowalski, A., Rohm, W., 2019. Mining deformation life cycle in the light of InSAR and deformation models. *Remote Sensing*, 11: 745. <https://doi.org/10.3390/rs11070745>.
- Jaros J., 1975 – Zarys dziejów górnictwa węglowego. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa – Kraków.
- Jureczka J., Dopita M., Gałka M., Krieger W., Kwarciński J., Martinec P., 2005 – Atlas geologiczno-złożowy polskiej i czeskiej części Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Państwowy Instytut Geologiczny, Ministerstwo Środowiska, Warszawa.
- Jureczka J., Kotas A., 1995 – Coal deposits Upper Silesian Coal Basin. [In]: *The Carboniferous System in Poland*. *Prace PIG*, 148: 164-173.

- Kaszowska O., 2007 – Wpływ podziemnej eksploatacji górniczej na powierzchnię terenu. W: Problemy Ekologii, vol. 11, nr 1, styczeń-luty 2007, s. 52–57.
- Kleczkowski A.S. (red.), 1966 – Podczwartorzędowe podłoże Kotliny Górnej Odry oraz jej wodonośność. [W]: Prace Geol. PAN, 25. Wyd. Geologiczne, Warszawa.
- Kossuth S., 1965 – Górnictwo węglowe na Górnym Śląsku w połowie XIX wieku. Wydawnictwo Śląsk.
- Kotyrbka A., 2005 – Zagrożenie i ryzyko zapadliskowe terenów Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Wiadomości Górnicze nr 7–8.
- Kowalski, A., Gruchlik, P., Polanin, P., Kiełbiowski, K., Rutkowski, T., 2021. Mining extraction in Ruda Śląska –Wirek, deformations and protection of the church building (in Polish with English summary). Przegląd Górniczy, 77: 16-35.
- Krieger W., Jureczka J., Ługiewicz-Mołas I., Rolka M., 2011 – Inwentaryzacja płytkiej i powierzchniowej eksploatacji węgla kamiennego w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym. Archiwum Państwowego Instytutu Geologicznego, Państwowego Instytutu Badawczego.
- Kwiatek J., Dubiński J., Frolik A., Gil-Kleczewska B., Jędrzejec E., Kowalski A., Muszyński L., Mutke G., Zawora J., 2000 – Zasady oceny możliwości prowadzenia podziemnej eksploatacji górniczej z uwagi na ochronę obiektów budowlanych. Główny Instytut Górnictwa, seria Instrukcje nr 12.
- Pawluszek-Filipiak K, Borkowski A, 2020. Comparison of PSI and DInSAR approach for the subsidence monitoring caused by coal mining exploitation. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 43, 333-337.
- Perski, Z., Brzeziński, M., Przyłucka, M., Pacanowski, G., Musiatowicz, M., Nowacki, Ł., Graniczny, M., Kowalski, Z., Chełmiński, J., Czarniak, P., Stępień, U., Czapowski, G., 2019 – Monitoring geodynamiczny w zakresie interferometrii satelitarnej pasa wysadów solnych w Polsce oraz próba określenia ruchliwości soli w czwartorzędzie z wykorzystaniem tomografii elektrooporowej i technik modelowania 3D, Raport Końcowy (in Polish), Polish Geological Institute – NRI, Warsaw 2019. Material effect from the implementation of a task within the scope of the national geological service, agreement no. 913/2014/Wn-07/FG-GO-DN/D from 23.12.2014r.
- Przyłucka M, Graniczny M, Kowalski Z, 2015a. Identification and Changes of Subsidence Basins Caused by Coal Mining Activity in Upper Silesia Using Satellite Interferometric Data. Proceedings of FRINGE'15: Advances in the Science and Applications of SAR Interferometry and Sentinel-1 InSAR Workshop 2015, Frascati, Italy, 23-27 March 2015, ESA Publication SP-731. doi:10.5270/Fringe2015.51.
- Przyłucka M, Herrera G, Graniczny M, Colombo D, Béjar-Pizarro M, 2015b. Combination of Conventional and Advanced DInSAR to Monitor Very Fast Mining Subsidence with TerraSAR-X Data: Bytom City (Poland). Remote Sensing 2015, 7(5), 5300-5328.
- Przyłucka, M., Kowalski, Z., Perski, Z., 2022, Twenty years of coal mining-induced subsidence in the Upper Silesia in Poland identified using InSAR. International Journal of Coal Science & Technology, 9(1), 86.
- Richling A., Solon J., Macias A., Balon J., Borzyszkowski J., Kistowski M., 2021 – Regionalna geografia fizyczna Polski. Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań.
- Rudzińska-Zapaśnik T., 1997 – Poziomy wodonośne trzeciorzędu. [W]: Rózkowski A., Chmura A., Siemiński A. (red.), 1997 – Użytkowe wody podziemne Górnośląskiego Zagłębia Węglowego i jego obrzeżenia.
- Szuflicki M., Malon A., Tyimiński M. (red.), 2023 – Bilans zasobów złóż kopalin w Polsce wg stanu na 31 XII 2022 r. Państwowy Instytut Geologiczny - Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa.
- Wilk Z. (red.), 2003 – Hydrogeologia polskich złóż kopalin i problemy wodne górnictwa. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne. Kraków.