

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 2c Analizy deformacji dla terenów o szczególnym znaczeniu Wapno

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 Zbigniew Perski

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.



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



Sfinansowano ze środków NARODOWEGO FUNDUSZU OCHRONY ŚRODOWISKA i GOSPODARKI WODNEJ



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, Kutyła-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, Strzemińska 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	1.2c
Autorzy	Zbigniew Perski
Uwagi	

Spis treści

1. Ws	tęp – historia badań, poprzednie raporty, projekty	6
2. Def	formacje ciągłe. Wielkości przemieszczeń na podstawie danych Sentinel-1	7
2.1	Deformacje ciągłe. Wielkości przemieszczeń reflektorów	0
2.2	Instalacja nowych reflektorów + wstępne wyniki 1	2
2.3	Wstępne wyniki obliczeń1	3
3. Zap	padlisko i monitoring zjawisk zapadliskowych	4
3.1	Wyniki opracowania danych naziemnego skaningu laserowego (TLS)	4
3.2	Wyniki opracowania danych fotogrametrycznych z pułapu UAV	6
3.3	Analiza danych i interpretacja wyników	9
4. Mo	nitoring deformacji nieciągłych za pomocą naziemnego skaningu laserowego TLS. 2	25
4.1	Analiza danych i interpretacja wyników – obszar zapadliska	27
4.2	Analiza danych i interpretacja wyników – obszar okolic dawnego przedszkola	20
miejs	K1ego	50
5. Por	miary kontrolne i analiza danych północnego skłonu wyrobiska gipsów "Gipsiaka" 3	32
5.1	Wizja terenowa	33
5.2	Wyniki pomiarów GNSS	34
5.3	Podsumowanie pomiarów	35
6. Wn	nioski i zalecenia na przyszłość	36
7. Lite	eratura	37

Spis rysunków

Rys. 1. Prędkości przemieszczeń pionowych [mm/rok] dla miejscowości Wapno na podstawie serwisu EGMS	
(okres 2018-2022 r.). Na rysunku zaznaczono lokalizacje reflektorów radarowych oraz rejony przedszkola	
miejskiego i dawnego wyrobiska gipsów tzw. "Gipsiaka"	8
Rys. 2. Przebieg obniżania terenu dla dawnego wyrobiska tzw. "Gipsiaka". (Dane z serwisu EGMS)	9
Rys. 3. Przebieg obniżania w czasie dla centrum miejscowości Wapno (dane z serwisu EGMS)	10
Rys. 4. Rozmieszczenie reflektorów na tle danych PSI EGMS oraz rozkładu deformacji powstałych w wyniku	
katastrofy w 1977 roku. Kolorem różowym zaznaczono nowe reflektory zainstalowane w 2022 roku	11
Rys. 5. Przebieg deformacji reflektorów CR01 – CR07 w czasie na tle zmienności średniej temperatury	
powietrza	12
Rys. 6. Typy reflektorów stosowane na poligonie badawczym Wapno	13
Rys. 7. Serie czasowe deformacji dla reflektorów CR17 - CR20 na tle zmienności średnich temperatur	
dobowych. Składowa pionowa (UP) i pozioma w kierunku W-E (EAST).	14
Rys. 8. Naziemny skaner laserowy Riegl VZ-200i podczas pracy (fot Z.Perski).	15
Rys. 9. Chmura punktów naziemnego skanowania laserowego	16
Rys. 10. Wygenerowany na podstawie chmury punktów numeryczny model terenu	16
Rys. 11. BSL (UAV) podczas pracy (fot. M. Gołda).	17
Rys. 12. Rozmieszczenie fotopunktów oraz szeregów zdjęć nad lejem zapadliskowym (opracowanie K.	
Karwacki)	18
Rys. 13. Ortomozaika (z lewej) i numeryczny model terenu (z prawej) ze zdjęć wykonanych 3.03.2021 r.	
(opracowanie K. Karwacki).	18
Rys. 14. NMT obszaru badań wykonany 03.03.2021 r. metodą naziemnego skaningu laserowego (TLS)	20
Rys. 15. NMT obszaru badań wykonany 01.03.2021 r. metodą fotogrametryczną z pułapu UAV	21
Rys. 16. Profil zapadliska w kierunku W-E (dane TLS).	22
Rys. 17. Profil zapadliska w kierunku N-S (dane TLS).	22
Rys. 18. Zestawienie obrazów różnicowych NMT zapadliska. Skala barw -5.5 m - +5,5 m	23
Rys. 19. NMT różnicowy ALS ISOK (19.10.2014 r.) – UAV (01.04.2021 r.)	24
Rys. 20. NMT różnicowy ALS ISOK (19.10.2014 r.) – TLS (03.04.2021 r.).	25
Rys. 21. Rejon zapadliska z 2021 roku. Chmura punktów przed filtracją	26
Rys. 22. Wygenerowany na podstawie chmury punktów numeryczny model terenu	26
Rys. 23. Zestawienie obrazów różnicowych NMT zapadliska	28
Rys. 24. Zmienność w czasie profili zapadliska w kierunku W-E (góra) i N-S (dół) na podstawie danych TLS.	29
Rys. 25. Rejon przedszkola. Przykładowa chmura punktów przed filtracją	30
Rys. 26. Rejon przedszkola. Przykładowa chmura punktów po filtracji	31
Rys. 27. Wysokościowy obraz różnicowy (ISOK 2013 – TLS 2022). Skala barw -1m / +1 m	31
Rys. 28. Rejon przedszkola: obrazy różnicowe danych TLS z lat 2022, 2023 i 2024	32
Rys. 29. Dokumentacja fotograficzna rejonu badań - północnego skłonu wyrobiska gipsów "Gipsiaka"	33
Rys. 30. Lokalizacja pikiet pomiarowych. Kolorem czerwonym oznaczono pikiety, dla których nie osiągnięto	
wymaganej dokładności (rozwiązanie FLOAT). Kolorem czarnym oznaczono pikiety pomierzone z wymagana	a
dokładnością (rozwiązanie FIX)	34
Rys. 31. Przykładowe profile terenu na podstawie danych ISOK (2014), nalotu UAV (2021) z naniesionymi	
pikietami z pomiarów 08.11.2021 r	35

Spis tabel

Tab. 1 Zestawienie dat wykonania pomiarów monitoringowyc	h TLS
--	-------

1. Wstęp – historia badań, poprzednie raporty, projekty

Wysad solny w Wapnie był przedmiotem powierzchniowej a później podziemnej eksploatacji od XVII w. gipsów a od początków XX w. podziemnej eksploatacji soli kamiennej. W 1977 r. wskutek nagłego wtargnięcia wód powierzchniowych do podziemnych wyrobisk soli kopalnia została zatopiona i zaprzestano produkcji. Katastrofa spowodowała powstanie leja sufozyjnego i zapadanie się całych domów i ulic Wapna. Od tego czasu teren miejscowości nadal pozostaje niestabilny. W końcu zlecone zostały szczegółowe badania geologiczne, których efektem jest opublikowany raport (Rasała i in., 2013). Wnioski z raportu nie mogą napawać optymizmem. Wynika z niego, że teren jest wciąż aktywny i w przyszłości może dochodzić do następnych szkód górniczych. Raport jednak nie wskazuje prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia. Najbardziej niebezpiecznie jest w okolicach przedszkola i dawnego zapadliska, gdzie obowiązuje zakaz budowania nowych budynków. Obecnie zamknięta kopalnia soli sama w sobie nie stanowi zagrożenia. Natomiast groźna jest czapa gipsowa, do której dochodzą wody opadowe. Powodują one jej rozpuszczanie i podmywanie oraz powstawanie nowych pustek (Rasała, 2005, 2006).

Obszar Wapna i występujące tam geozagrożenia znajduje się w obrębie zainteresowań PIG-PIB od 2014 roku, kiedy rozpoczęto realizację tematu "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" " (dalej nazwanym "Wysady solne"). Wówczas, na wniosek Wójta Gminy Wapno, teren miejscowości, oprócz badań geologicznych objęto satelitarnym monitoringiem deformacji przy wykorzystaniu reflektorów radarowych. Z uwagi na utrzymujący się wysoki stopień zagrożeń, monitoring ten kontynuowano w ramach projektu "Interferometryczny Monitoring Powierzchni Terenu Polski (InMoTeP) - etap I i etap II. 26 Marca 2021 roku na terenie dawnego wyrobiska gipsów w centrum miejscowości doszło do powstania zapadliska. Teren zapadliska oraz rejon przedszkola miejskiego, gdzie wcześniej notowano wystąpienia szczelin i zapadlisk zostały objęte dodatkowo monitoringiem za pomocą naziemnego skaningu laserowego oraz fotogrametrycznego z pułapu UAV. Niniejszy raport podsumowuje prace wykonane w latach 2021-2023 w ramach projektu InMoTep II w nawiązaniu do prac wykonanych wcześniej.

W zadaniu Wysady solne (Perski i in., 2019) realizowano dwa podzadania: przetwarzanie danych archiwalnych z systemów ERS-1/2, Envisat dla obszaru całego pasa wysadów oraz przetwarzanie rejestrowanych w trakcie trwania projektu wysokorozdzielczych danych z satelity TerraSAR-X dla rejonu wysadu Wapno. Interferometryczny monitoring wysadu Wapno prowadzono w oparciu o specjalnie zaprojektowane i wykonane w ramach projektu reflektory radarowe, które dla weryfikacji były mierzone za pomocą optycznej niwelacji precyzyjnej i niwelacji GNSS.

W ramach zadania InMoTeP II analizie poddano wyniki interferometryczego przetwarzania danych Sentinel-1 za okres (26.10.2014 r. – 26.06.2020) w raporcie (Perski, 2020) przedstawiono również zagadnienia teoretyczne i metodyczne dotyczące metod interferometrycznych.

2. Deformacje ciągłe. Wielkości przemieszczeń na podstawie danych Sentinel-1

Wyniki prowadzonych wcześniej prac (Perski i in., 2019; Perski, 2020) pozwoliły określić, że miejscowość Wapno podlegała stałym obniżeniom o średnich wartościach do 2,5 mm/rok. Najnowsze wyniki dostępne w serwisie EGMS obejmują okres od 11.02.2018 do 05.12.2022 (Rys. 1). Dla tego okresu, przestrzenny rozkład deformacji kształtował się podobnie jak w latach poprzednich. Największe magnitudy ruchów występują w rejonie dawnego wyrobiska gipsów gdzie prędkości ruchów pionowych kształtują się w zakresie do 6,8 mm/rok (Rys. 2). Potwierdzają to wcześniejsze obserwacje dla danych ERS-1/2, TerraSAR-X jak i Sentinel-1. Deformacje te zostały szczegółowo potwierdzone w wynikach pomiarów reflektorów radarowych, o których będzie mowa w dalszej części raportu.



Rys. 1. Prędkości przemieszczeń pionowych [mm/rok] dla miejscowości Wapno na podstawie serwisu EGMS (okres 2018-2022 r.). Na rysunku zaznaczono lokalizacje reflektorów radarowych oraz rejony przedszkola miejskiego i dawnego wyrobiska gipsów tzw. "Gipsiaka".



Rys. 2. Przebieg obniżania terenu dla dawnego wyrobiska tzw. "Gipsiaka". (Dane z serwisu EGMS).

Strefa największych deformacji została zlokalizowana w centrum miejscowości w otoczeniu dawnego wyrobiska odkrywkowego (tzw. "Gipsiaka") i rozciągała się w kierunku północnym w stronę parku miejskiego będącego rejonem zasypanego leja sufozyjnego z katastrofy z 1977 r. Gęsto zabudowane centrum miejscowości podlega obniżeniom o wielkości 3,6 mm/rok (Rys. 3).



Rys. 3. Przebieg obniżania w czasie dla centrum miejscowości Wapno (dane z serwisu EGMS).

Najnowsze wyniki pomiarów obejmujące okres 2016-2021 oraz 2018 - 2022 zostały opracowane i opublikowane w serwisie EGMS. Szczegóły serwisu przedstawiono w Sprawozdaniu końcowym.

2.1 Deformacje ciągłe. Wielkości przemieszczeń reflektorów

W niniejszym rozdziale przedstawiono jedynie wyniki analiz interferometrycznych, gdyż w ostatnich latach prowadzone pomiary kontrolne GNSS RTK miały za zadanie wykrycie ew. dużych przemieszczeń reflektorów (np. w wyniku uderzenia przez maszyny rolnicze, budowlane). Ostatecznie, dla długich serii czasowych (sierpień 2014 – grudzień 2023) udało się ponownie włączyć reflektory CR01, CR02 i CR04 do sieci pomiarowej. Ostateczny kształt sieci pomiarowej reflektorów przyjęty do zintegrowanych obliczeń i analiz przedstawiono na Rys. 4.



Rys. 4. Rozmieszczenie reflektorów na tle danych PSI EGMS oraz rozkładu deformacji powstałych w wyniku katastrofy w 1977 roku. Kolorem różowym zaznaczono nowe reflektory zainstalowane w 2022 roku.

Wyznaczone w poprzednich opracowaniach przemieszczenia znajdują swoje potwierdzenie w najnowszych obliczeniach. CR05 pozostaje stabilny, podczas gdy CR 07 i CR06 ulegają obniżaniu Rys. 5. Z ogólnego rozkładu deformacji wynika, że reflektor CR06 położony jest w pobliżu centrum rozwijającej się niecki obniżeniowej. CR04, położony w podmokłej pradolinie Jeziora Czeszewskiego w pobliżu oczyszczalni ścieków podlega również stałym obniżeniom, jednak na stałe obniżanie nakłada się silny, cykliczny sezonowy wpływ najprawdopodobniej związany z wahaniami zwierciadła wód podziemnych. Silne obniżenie towarzyszy okresowi letnio-jesiennemu, po którym w okresie zimowo-wiosennym następuje relatywne podnoszenie. Magnituda zmian sezonowych mieści się w zakresie ok 10 mm.



powietrza.

Występowanie stałych obniżeń w rejonie oczyszczalni nie było wcześniej znane. Obszar ten znajduje się poza zasięgiem wysadu i prowadzonej eksploatacji górniczej. Z uwagi na brak zabudowy i bujną roślinność obszar pomiędzy "Gipsiakiem" a rejonem oczyszczalni pozbawiony jest naturalnych rozpraszaczy PS a tym samym brak jest danych dotyczących deformacji tego obszaru. Dla zagęszczenia sieci obserwacyjnej zdecydowano się na umieszczenie w tym rejonie dodatkowych reflektorów.

2.2 Instalacja nowych reflektorów + wstępne wyniki

Dla zagęszczenia sieci pomiarowej i uzyskania danych pomiarowych w zachodniej części na obszarze zabagnionego obniżenia doliny rynnowej Jeziora Czeszewskiego zainstalowano 4 kolejne reflektory wg. projektu stosowanego dotychczas na osuwiskach (Rys. 6). Więcej szczegółów technicznych na temat instalacji nowych reflektorów w ramach projektu przedstawiono w Raporcie 2d.



Rys. 6. Typy reflektorów stosowane na poligonie badawczym Wapno.

2.3 Wstępne wyniki obliczeń

Wstępne wyniki obliczeń CRInSAR obejmują okres 05.09.2022 – 01.07.2024 tj. od zainstalowania reflektorów (Rys. 7). Seria obserwacji obejmuje dwa sezony zimowe oraz jeden pełny sezon letni. Okres ten jest jeszcze zbyt krótki dla pełnej interpretacji danych. Wstępne wyniki pokazują początkowy okres dynamicznych zmian związanych ze stabilizacją reflektorów w gruncie (ok. pierwsze 4 miesiące). Zmiany sezonowe zaczynają być widoczne po pierwszym sezonie letnim (październik 2023). Reflektory CR-17-CR19 wykazują wyraźne obniżenia przy niewielkim udziale przemieszczeń poziomych. Reflektor CR20 zlokalizowany jest, podobnie jak reflektor CR04 (Rys. 4, Rys. 5) w obrębie podmokłej pradoliny Jeziora Czeszewskiego. Reflektor CR20 wykazuje stosunkowo niewielkie obniżenia i duże przemieszczenia poziome w kierunku E-W (ok 10 mm/rok). Duże ruchy poziome mogą być związane z posadowieniem na mało stabilnych aluwiach pradoliny jednak ich pełna interpretacja wymaga prowadzenia obserwacji w dłuższym okresie czasu.



Rys. 7. Serie czasowe deformacji dla reflektorów CR17 - CR20 na tle zmienności średnich temperatur dobowych. Składowa pionowa (UP) i pozioma w kierunku W-E (EAST).

3. Zapadlisko i monitoring zjawisk zapadliskowych

Zapadlisko powstało w dniu 26.02.2021 r. na terenie dawnego, nieczynnego wyrobiska eksploatacji gipsów. Bezpośrednią przyczyną jego powstania była najprawdopodobniej intensywna infiltracja wód roztopowych.

W dniu 01.03.2021 r. wykonano pierwszy nalot UAV, kolejne 03 oraz 04.03.2021. Naziemny skaning laserowy wykonano dwukrotnie, 02.03.2021 zapadliska i najbliższego otoczenia, 03.03.2021 zapadliska i całego dawnego wyrobiska gipsów.

3.1 Wyniki opracowania danych naziemnego skaningu laserowego (TLS)

Dane pozyskiwano za pomocą impulsowego skanera laserowego Riegl VZ-200i (Rys. 8). Skaner wyposażony był w dwuczęstotliwościowy odbiornik GNSS RTK. Poprawki RTK udostępniane były przez stację referencyjną Reach RS2 korygowaną przez sieć ASG EUPOS ustawioną w obrębie dawnego wyrobiska gipsów. Dokładność wyznaczenia pozycji wynosiła do 2 cm. Rozdzielczość skanowania wynosiła 70 mm/100m.

02 marca 2021 r. wykonano skanowanie wokół zapadliska z 7 stanowisk. Dnia następnego (03.03.2021 r.) powtórzono skaning zapadliska oraz wykonano pełne skanowanie całego wyrobiska pogipsowego (tzw. "Gipsiaka") z 49 stanowisk łącznie.



Rys. 8. Naziemny skaner laserowy Riegl VZ-200i podczas pracy (fot Z.Perski).

Dane skanerowe dla obu sesji pomiarowych przetworzono na jednolite chmury punktów oraz poddano filtracji usuwającej roślinność. Tak przetworzone dane posłużyły do wygenerowania numerycznych modeli powierzchni terenu, które wykorzystano do dalszych analiz (Rys. 9, Rys. 10).



Rys. 9. Chmura punktów naziemnego skanowania laserowego.



Rys. 10. Wygenerowany na podstawie chmury punktów numeryczny model terenu.

3.2 Wyniki opracowania danych fotogrametrycznych z pułapu UAV

Zapadlisko poddane zostało pomiarowi metodą fotogrametrii niskiego pułapu (Rys. 11). Metoda ta pozwala uzyskać szczegółową informację o powierzchni terenu przy pomocy zdjęć optycznych wykonanych z pokładu bezzałogowego statku latającego (BSL). Zdjęcia pozyskano w pokryciu podłużnym i poprzecznym w stosunku co najmniej 80%/75% oraz z wysokości pozwalającej uzyskać rozmiar piksela terenowego poniżej 2 cm. Wpasowanie modelu fotogrametrycznego w układ terenowy wykonano przy pomocy fotopunktów pomierzonych na powierzchni terenu uzyskując dokładność poniżej 2 cm sytuacyjnie oraz około 3 cm wysokościowo (Rys. 12).



Rys. 11. BSL (UAV) podczas pracy (fot. M. Gołda).



Rys. 12. Rozmieszczenie fotopunktów oraz szeregów zdjęć nad lejem zapadliskowym (opracowanie K. Karwacki).

Po przetworzeniu materiału zdjęciowego z każdego nalotu wygenerowano gęstą chmurę punktów, a następnie numeryczny model terenu oraz ortomozaikę (Rys. 13).



Rys. 13. Ortomozaika (z lewej) i numeryczny model terenu (z prawej) ze zdjęć wykonanych 3.03.2021 r. (opracowanie K. Karwacki).

Kolejne naloty wykonano 3.03 i 4.03 w celu zbadania zmian powierzchniowych w obrębie leja i wyznaczenia kierunków jego ewentualnego rozwoju.

3.3 Analiza danych i interpretacja wyników

W wyniku opracowania danych otrzymano 5 numerycznych modeli terenu:

01.03.2021 – UAV (Rys. 15) 02.03.2021 – TLS 03.03.2021 – UAV 03.03.2021 – TLS (Rys. 14) 04.03.2021 – UAV

Posłużyły one do wygenerowania obrazów różnicowych pozwalających oszacować dynamikę zachodzących zmian. Za model referencyjny przyjęto model lotniczego skaningu laserowego (ALS) projektu ISOK. Dla obszaru Wapna dane ALS ISOK zostały zarejestrowane 19.10.2014 r.



Rys. 14. NMT obszaru badań wykonany 03.03.2021 r. metodą naziemnego skaningu laserowego (TLS).



Rys. 15. NMT obszaru badań wykonany 01.03.2021 r. metodą fotogrametryczną z pułapu UAV.

W dniach prowadzenia pomiarów średnica zapadliska wynosiła ok. 21 m, głębokość do zwierciadła wody ok. 5,5 m. Ściany zapadliska są bardzo strome, niemal pionowe, jedynie od strony wschodniej nachylenie zmienia się na ok. 300 w miejscu gdzie rozwijają się procesy osuwiskowe (Rys. 16, Rys. 17). Pełna głębokość zapadliska nie jest znana. Objętość pustki do lustra wody wynosi ok. 1960,7 m3 (stan na 03.03.2021 r.). Obszar zajmowany przez zapadlisko wynosił 474 m2 i od 01.03.2021 r. ulegał powiększeniu z prędkością ok 24,3 m2 na dobę.



Rys. 16. Profil zapadliska w kierunku W-E (dane TLS).



Rys. 17. Profil zapadliska w kierunku N-S (dane TLS).

Obrazy różnicowe zapadliska uzyskane na podstawie danych rejestrowanych w poszczególnych dniach nie wykazują większych zmian a jedynie rozwój ruchów masowych i stopniową degradację ścian zapadliska (obrywy, osuwiska) prowadzących do spłaszczenia ich kąta nachylenia (Rys. 18).



Rys. 18. Zestawienie obrazów różnicowych NMT zapadliska. Skala barw -5.5 m - +5,5 m.

Obraz różnicowy obliczony pomiędzy NMT referencyjnym sprzed powstania zapadliska a danymi zarówno UAV jak i TLS nie wykazuje innych, istotnych deformacji poza samym zapadliskiem (Rys. 19, Rys. 20). Niewielkie zmiany (-2 m) stwierdzono przy południowej granicy dawnego wyrobiska. Są one spowodowane prawdopodobnie wybieraniem piasku. Szereg drobniejszych zmian spowodowany jest niecałkowitym odfiltrowaniem roślinności, które jest w zasadzie niewykonalne (brak odbić od gruntu). Faktyczna dokładność danych mieści się zatem w granicach +/- 10 cm. Nie stwierdzono istotnych zmian wysokościowych w rejonie zrekultywowanego zapadliska z 2007.



Rys. 19. NMT różnicowy ALS ISOK (19.10.2014 r.) – UAV (01.04.2021 r.).



Rys. 20. NMT różnicowy ALS ISOK (19.10.2014 r.) – TLS (03.04.2021 r.).

4. Monitoring deformacji nieciągłych za pomocą naziemnego skaningu laserowego TLS

Na wniosek Wójta Gminy Wapno od 2022 roku prowadzony jest monitoring zapadliska na terenie "gipsiaka" oraz terenów na zachód od dawnego przedszkola miejskiego (przeniesionego po powstaniu zapadliska w 2021 roku). Na terenie tym notowano wcześniej niewielkie zapadliska oraz pęknięcia gruntu.

Gipsiak	Przedszkole
03.04.2021	
08.02.2022	08.02.2022
15.02.2023	15.02.2023
21.02.2024	21.02.2024

Tab.	1	Zestawienie	dat	wykonania	pomiarów	monitoring	gowych	TLS
					F F F F F F F F F F	-		

Dane pozyskiwano za pomocą impulsowego skanera laserowego Riegl VZ-200i (Tab. 1). Skaner wyposażony był w dwuczęstotliwościowy odbiornik GNSS RTK. Poprawki RTK udostępniane były przez stację referencyjną Reach RS2 korygowaną przez sieć ASG EUPOS ustawioną w obrębie dawnego wyrobiska gipsów. Dokładność wyznaczenia pozycji wynosiła do 2 cm. Rozdzielczość skanowania wynosiła 70 mm/100m.

W ramach monitoringu wykonano skanowanie wokół zapadliska z 7 - 9 stanowisk. Rejon przyległy do przedszkola skanowano zazwyczaj tego samego dnia realizując skanowanie z 8 - 12 stanowisk rozmieszczonych wokół badanego obszaru.

Dane skanerowe przetworzono na jednolite chmury punktów oraz poddano filtracji usuwającej roślinność. Tak przetworzone dane posłużyły do wygenerowania numerycznych modeli powierzchni terenu dla obu obszarów, które wykorzystano do dalszych analiz (Rys. 21, Rys. 22).



Rys. 21. Rejon zapadliska z 2021 roku. Chmura punktów przed filtracją.



Rys. 22. Wygenerowany na podstawie chmury punktów numeryczny model terenu.

4.1 Analiza danych i interpretacja wyników – obszar zapadliska

W dniu prowadzenia pomiarów (8 lutego 2022) średnica zapadliska wynosiła ok. 28 m, głębokość do zwierciadła wody zwiększyła się do ok 6,5 m. Ściany zapadliska uległy złagodzeniu, od strony wschodniej nadal rozwijają się procesy osuwiskowe (Rys. 23, Rys. 24). Pełna głębokość zapadliska nie jest znana, jednak dalsze obniżenie zwierciadła wody (wizja terenowa z 18 maja 2022 r.) pozwalają szacować głębokość na około 7,5 m. Obszar zajmowany przez zapadlisko wynosił 521 m2 i zwiększył się o 47 m2 (czyli ok. 0,13 m2 na dobę). W porównaniu ze stanem z marca 2021 i notowanymi wówczas prędkościami powiększania się zapadliska (ok 24,3 m2 na dobę) przyrosty są niewielkie a cały proces uległ znacznemu uspokojeniu.

Obrazy różnicowe zapadliska uzyskane na podstawie danych rejestrowanych w kolejnych latach (2023 r. i 2024 r.) nie wykazują większych zmian a jedynie rozwój ruchów masowych i stopniową degradację ścian zapadliska (obrywy, osuwiska) prowadzących do spłaszczenia ich kąta nachylenia oraz relatywnego powiększenia zasięgu (Rys. 23, Rys. 24).



Rys. 23. Zestawienie obrazów różnicowych NMT zapadliska.



Rys. 24. Zmienność w czasie profili zapadliska w kierunku W-E (góra) i N-S (dół) na podstawie danych TLS.

4.2 Analiza danych i interpretacja wyników – obszar okolic dawnego przedszkola miejskiego

Teren dawnego przedszkola miejskiego przylega do zrekultywowanego obszaru zapadliska powstałego w 1977 r. Zachodzą tam nieustannie małoskalowe procesy zapadliskowe, przy czym trudno jednoznacznie ocenić czy chodzi o wtórne wypełnianie pustek po fundamentach zniszczonych budynków materiałem rekultywacyjnym czy też powstawanie zupełnie nowych zjawisk. Dla najbardziej zagrożonego obszaru wykonano naziemne skanowanie laserowe, a otrzymany model (Rys. 25, Rys. 26) terenu porównano z danymi lotniczego skanowania laserowego z projektu ISOK (2013 r.) celem wykrycia ewentualnych obniżeń.



Rys. 25. Rejon przedszkola. Przykładowa chmura punktów przed filtracją.



Rys. 26. Rejon przedszkola. Przykładowa chmura punktów po filtracji.



Rys. 27. Wysokościowy obraz różnicowy (ISOK 2013 – TLS 2022). Skala barw -1m / +1 m.

Otrzymany model różnicowy (Rys. 27) nie wykazuje istotnych zmian. Może to świadczyć o braku deformacji na badanym obszarze albo o ich bardzo lokalnym charakterze przez co nie został wykryty. Obserwacje skanerowe należy kontynuować w następnych latach w okresach jesienno-zimowych lub zimowo-wiosennych dla zminimalizowania wpływu szaty roślinnej.

Skanowania TLS wykonane w kolejnych latach (luty 2023 r. i luty 2024) i wykonane na ich podstawie modele różnicowe (Rys. 28). Wykazują różnice w zakresie do kilkunastu centymetrów czyli jedynie w zakresie dokładności metody wynikającej z błędów filtracji roślinności). Należy stwierdzić, że na obszarze objętym pomiarami nie wykazano istotnych deformacji mogących świadczyć o rosnącym zagrożeniu.



Rys. 28. Rejon przedszkola: obrazy różnicowe danych TLS z lat 2022, 2023 i 2024.

5. Pomiary kontrolne i analiza danych północnego skłonu wyrobiska gipsów "Gipsiaka"

Prace zrealizowano na prośbę wójta gminy Wapno w odpowiedzi na zgłoszenia mieszkańców o pochylonych drzewach w rejonie Kościoła św. Barbary.

Dnia 08.11.2021 r. przeprowadzono wizję terenową oraz kontrolne pomiary GNSS.

Celem analiz było zweryfikowanie hipotezy o powstaniu kolejnej strefy występowania aktywnych deformacji lub zapadliska.

5.1 Wizja terenowa

Wizja polegała na wykonaniu oględzin i dokumentacji fotograficznej rejonu występowania pochylonego drzewostanu w okolicach parkingu przed kościołem św. Barbary. Oględziny wykazały brak widocznych na powierzchni terenu świeżych szczelin, progów, ugięć na badanym obszarze (Rys. 29).



Rys. 29. Dokumentacja fotograficzna rejonu badań - północnego skłonu wyrobiska gipsów "Gipsiaka".

5.2 Wyniki pomiarów GNSS

Kontrolne pomiary GNSS zrealizowano w formie szeregu pikiet na badanym obszarze. Łącznie zebrano 59 pikiet. Z uwagi na przesłonięcie horyzontu przez listowie i korony drzew, część pomiarów (27 pikiet) nie osiągnęła wymaganej dokładności (Rys. 30).



Rys. 30. Lokalizacja pikiet pomiarowych. Kolorem czerwonym oznaczono pikiety, dla których nie osiągnięto wymaganej dokładności (rozwiązanie FLOAT). Kolorem czarnym oznaczono pikiety pomierzone z wymagana dokładnością (rozwiązanie FIX).

- **FIX** Rozwiązanie stałe oznacza, że pozycjonowanie jest względne w stosunku do punktu bazowego, a niejednoznaczność liczb całkowitych jest rozwiązana. Dokładność w trybie autonomicznym jest na poziomie centymetra.
- **FLOAT** Korekty bazowe są brane pod uwagę, a pozycjonowanie jest względne w stosunku do współrzędnych punktu bazowego, ale niejednoznaczność liczb całkowitych nie jest rozwiązana. Dokładność w trybie zmiennoprzecinkowym jest na poziomie poniżej metra.

Wykonane 08.11 pomiary porównano następnie z dostępnymi modelami terenu z projektu ISOK oraz z nalotu fotogrametrycznego UAV z 01.03.2021. Przykładowe profile pokazujące relacje pikiet z modelami terenu poniżej (Rys. 31).



Rys. 31. Przykładowe profile terenu na podstawie danych ISOK (2014), nalotu UAV (2021) z naniesionymi pikietami z pomiarów 08.11.2021 r.

5.3 Podsumowanie pomiarów

Analiza zmian wysokościowych na podstawie różnic pomiędzy pikietami a modelami terenu z marca 2021 oraz października 2014 (ISOK) nie wykazała istotnych odchyleń. W terenie nie stwierdzono widocznych progów, szczelin obniżeń mogących świadczyć o uaktywnieniu się badanego obszaru w kontekście osiadania czy powstawania kolejnego zapadliska. Przyczyna pochylenia się drzew na badanym obszarze ma prawdopodobnie charakter niegeologiczny.

6. Wnioski i zalecenia na przyszłość

Deformacje ciągłe. Z przedstawionych analiz interferometrycznych wynika, że teren centrum miejscowości Wapno podlega stałym ruchom obniżeniowym. Największe wartości deformacji (ok. 8 mm/rok) notowane są w pobliżu reflektora CR 06 w rejonie odkrywki ("Gipsiaka"). Niecka obniżeniowa, którą można prześledzić na obrazie InSAR rozciąga się w kierunku północnym po park w miejski w rejonie zrekultywowanego leja sufozyjnego po katastrofie z 1977 roku. W kierunku zachodnim sięga po rejon oczyszczalni, o czym świadczą obniżenia rejestrowane dla reflektora CR04. Analiza serii czasowych obserwacji z lat 2014 – 2023 pokazuje, że obniżania mają stały, liniowy charakter a w rejonie obniżenia rynnowego Jeziora Czeszewskiego nakładają się na niego zmiany sezonowe wywołane prawdopodobnie wahaniami poziomu wód gruntowych.

Deformacje nieciągłe: Na obszarze dawnego wyrobiska gipsów nie stwierdzono żadnych istotnych zmian oprócz nowo powstałego zapadliska w marcu 2021 r. Powierzchnia terenu w otoczeniu zapadliska jest jednak zniekształcona, co może świadczyć o wcześniejszych procesach sufozyjnych. Jeśli chodzi o samo zapadlisko powstałe wiosną 2021 roku obserwuje się stopniowe uspokojenie dynamiki deformacji. Największe ruchy masowe na ścianach i skarpach zapadliska miały miejsce w pierwszych miesiącach pierwszego roku po powstaniu zapadliska.

Powierzchnia terenu w pobliżu byłego przedszkola nie wykazuje istotnych deformacji w latach 2022-2024 niemniej pomiary należy kontynuować. Uruchomienie kolejnych procesów zapadliskowych jest nadal możliwe, i należy się ich spodziewać w przypadku wystąpienia długotrwałych i obfitych opadów lub gwałtownego topnienia grubej pokrywy śnieżnej.

Dla lepszej interpretacji danych proponuje się rozszerzenie istniejącego monitoringu deformacji o dane hydrologiczne i hydrogeologiczne. Powinno ono obejmować zainstalowanie deszczomierza rejestrującego opady na terenie badań oraz limnimetrów do śledzenia zmian zwierciadła wód podziemnych w czasie w wybranych istniejących otworach hydrogeologicznych (Rasała i in., 2013).

7. Literatura

Perski, Z., 2020. Interferometryczny Monitoring Terenu Polski etap I. Analiza i opracowanie pomiarów interferometrycznych monitoringu poligonu Wapno na bazie danych Sentinel-1 w okresie październik 2014 r. – czerwiec 2020 r.

Perski, Z., Przyłucka, M., Kowalski, Z., 2019. Monitoring geodynamiczny w zakresie interferometrii satelitarnej pasa wysadów solnych w Polsca oraz próba okrelśena ruchliwości soli w czwartorzędzie z wykorzystaniem tomografii elektropoprowej i technik modelowania 3d. Raport zadanie 7.4 Analiza i opracowanie pomiarów interferometrycznych. No. 7.4. Państwowy Instytut Geologiczny - PIB.

Rasała, M., 2005. Właściwości hydrauliczne masywu czapy gipsowej wysadu solnego Wapna. Współczesne Problemy Hydrogeologii XII, 589–595.

Rasała, M., 2006. Problemy modelowania matematycznego przepływu wód podziemnych w rejonie wysadów solnych na przykładzie struktury Wapna. Geologos 10, 215–225.

Rasała, M., Górski, J., Karcz, P., Kortas, G., Maj, A., Hermanowski, P., Ratajczak, R., Grzybowski, Ł., Tunak, A., Wilkosz, P., Begier, M., Miężalik, Ł., 2013. Dokumentacja geologiczna określająca stopień zagrożenia terenu pogórniczego kopalni soli w Wapnie w zakresie określenia jego przydatności do zagospodarowania i rewiatlizacji.