

MONITORING POWIERZCHNIOWY OSUWISK ZBIORCZY

dla powiatu tarnowskiego

WYKONANY METODĄ
INTERFEROMETRII RADAROWEJ



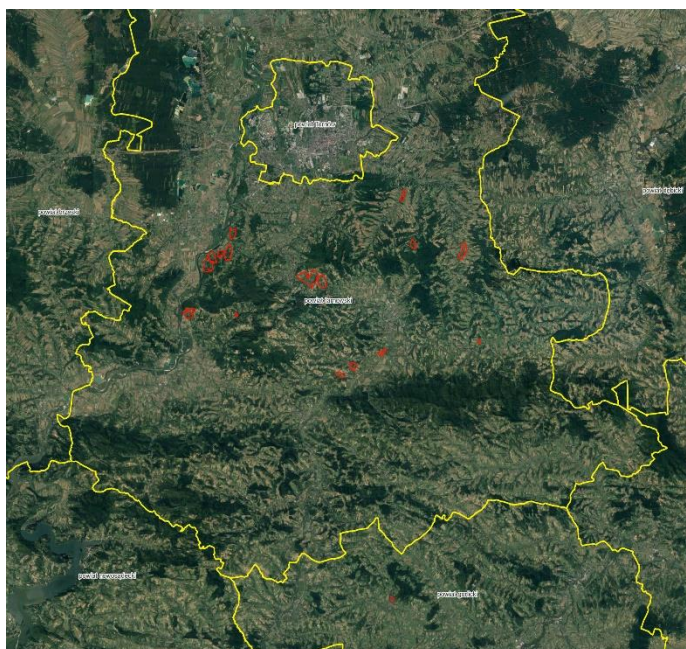
RAPORT

Kraków, 09.08.2022

Zleceniodawca:
Starostwo Powiatowe
w Tarnowie

OBSZAR BADAŃ

Powiat tarnowski znajduje się w województwie małopolskim. Obszar badań obejmował **17 osuwisk** o łącznej powierzchni **ok. 4,9 km²**. Rzędne terenu objętego ruchami masowymi w najniższym jego punkcie wynoszą 200 m n.p.m.. (wieś Błonie), zaś najwyżżej położony punkt badanego obszaru wznosi się na wysokość około 370 m n.p.m. we wsi Trzemesna. Zasięg współrzędnych geograficznych analizowanego obszaru to: 49°51'40"N - 49°59'00"N oraz 20°50'00"E - 21°09'00"E. Monitorowane osuwiska zostały przedstawione na rysunku poglądowym obok.



Spśród 17 osuwisk, **9** zostało zidentyfikowanych w ramach projektu SOPO jako **aktywne ciągle**, **7** jako **aktywne okresowo** oraz **1** jako **nieaktywne**. Zasięg osuwisk oraz podział na strefy aktywności przedstawiony na mapach w niniejszym raporcie pochodzi z bazy danych Sytemu Osłony Przeciwosuwiskowej (SOPO) Państwowego Instytutu Geologicznego.

Obszar ten został poddany satelitarnemu monitoringowi powierzchniowemu dla okresu **5-letniego** (lata **2017-2022**). Analiza została wykonana na podstawie analizy 290 zobrażeń satelitarnych pochodzących z satelitów Sentinel-1, metodą interferometrii radarowej, technika IPTA.

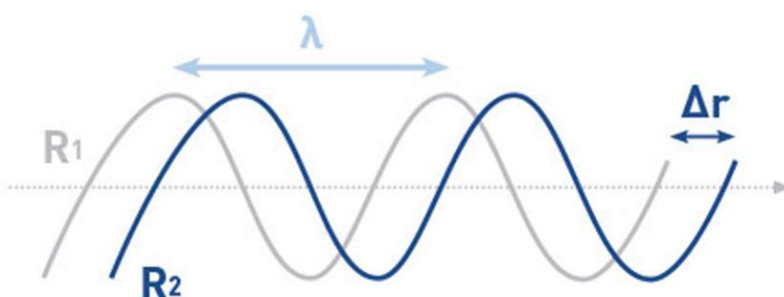
Raport ten przedstawia szczegółową analizę zbiorczą dla wszystkich monitorowanych osuwisk.

2 METODYKA BADAŃ

Satelitarna interferometria radarowa InSAR (ang. Interferometric Synthetic Aperture Radar) jest metodą teledetekcyjną, której istotą jest obliczenie przesunięcia fazy ech radarowych, zarejestrowanych na dwóch niezależnych obrazach typu SAR, dla tego samego terenu i w danym interwale czasowym. Obrazowanie SAR jest systemem aktywnym, czyli posiadającym własne źródło promieniowania elektromagnetycznego. Dzięki temu możliwe jest rejestrowanie obrazów SAR zarówno w dzień, jak i w nocy, bez względu na warunki pogodowe. Danymi źródłowymi w tej technice są zobrażenia radarowe SAR o wysokiej rozdzielczości przestrzennej i czasowej, obejmujące swym zasięgiem obszar nawet setek kilometrów kwadratowych. Poruszający się po orbicie satelita posiada antenę nadawczo-odbiorczą, która rejestruje amplitudę i fazę powracającej fali radarowej. Faza jest określoną częścią cyklu fali sinusoidalnej, dającą informację o zmiennej odległości rejestrowanego punktu od anteny.

Znając wartości fazy fal dla dwóch zobrażeń, możliwe jest obliczenie ich różnicy

i na jej podstawie wyliczenie przesunięcia fazowego danego obiektu pomiędzy tymi zobrażeniami (Δr). Przesunięcie fazowe może zostać następnie przeliczone na wartość przemieszczeń terenu.



Rys. 1 Wizualizacja przesunięcia fazowego fali

Jedną z najbardziej powszechnych zastosowań technik InSAR jest satelitarna interferometria różnicowa DInSAR (ang. Differential InSAR). Wykorzystuje ona dwa obrazy SAR do obliczenia interferogramu, czyli obrazu przesunięć fazowych. Następnie, przy użyciu numerycznego modelu terenu, odejmowana jest składowa topograficzna i obliczony jest interferogram różnicowy, który przedstawia przemieszczenia powierzchni terenu, objętego obrazami SAR. Wadą pomiarów DInSAR jest brak informacji o lokalnych deformacjach pojedynczych obiektów infrastruktury.

Drugą metodą stosowaną w zleconym badaniu jest technika IPTA (ang. Interferometric Point Target Analysis), która wykorzystuje zestaw obrazów SAR, między którymi obliczana jest wartość przesunięcia fazy dla każdego piksela. W ten sposób powstają interferogramy różnicowe. Analiza IPTA wykonywana jest jedynie dla stabilnych punktów koherentnych, czyli takich, które charakteryzują się niezmiennością sposobu odbicia fal w czasie. Przede

wszystkim są to punkty na terenach zabudowanych (głównie na elementach budynków), a ich gęstość sięga kilku tysięcy punktów na każdy km². Metoda ta pozwala na obliczenie przemieszczeń dla pojedynczych obiektów, również, gdy jest to tylko lokalna deformacja. Analizy IPTA prowadzi się dla długich okresów czasowych, np. całego roku. Można wykorzystać kilkanaście, a nawet kilkadziesiąt obrazów SAR, zarejestrowanych cyklicznie co kilka, kilkanaście dni (w zależności od rodzaju satelity). W ten sposób możliwe jest określenie wartości przemieszczeń dla wybranego okresu oraz prędkości tych deformacji. Wynikiem analiz IPTA jest zbiór przestrzenny punktów pomiarowych, dla których obliczone zostały wartości prędkości przemieszczenia obiektów (zazwyczaj w jednostce mm/rok) wzdłuż linii padania sygnału radarowego LOS (ang. Line Of Sight).

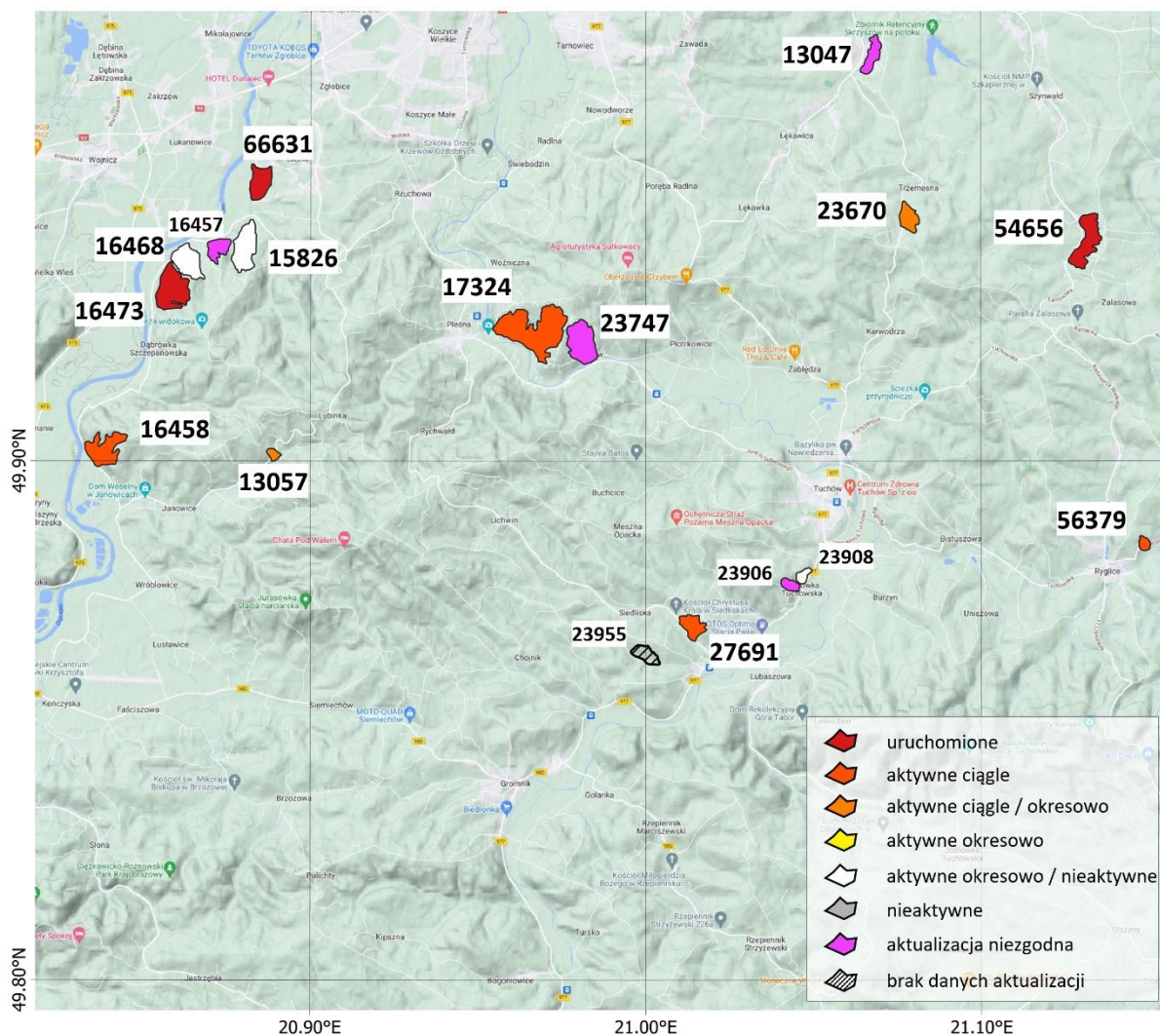
Głównym parametrem opisującym możliwość, dokładność i przede wszystkim gęstość stabilnych punktów pomiarowych PS dla analizy techniką IPTA jest wartość koherencji dla danego obszaru. Koherencja jest miarą spójności dwóch obrazów SAR. Na jej wartość wpływają przede wszystkim dwa czynniki: dekorelacja czasowa (związana głównie ze zmianą zagospodarowania lub wilgotności terenu między dwoma zobrazowaniami) oraz wpływ pokrycia terenu (analiza na obszarach leśnych, bagiennych oraz wodnych jest praktycznie niemożliwa, natomiast na terenach zabudowanych - najskuteczniejsza).

Techniki InSAR wykorzystywane są od wczesnych lat 90-tych XX wieku (Pratti C., et al., 1994; Hanssen R., 1999; Ferretti A., et al., 2007). Algorytmy obliczeń były i są udoskonalane przez wybitnych naukowców z całego świata. Początkiem XXI wieku powstały pierwsze analizy PS (Ferretti A., et al., 2000, 2001). Opublikowano również wiele artykułów naukowych, w których skupiono się na porównaniu techniki PS z naziemnymi metodami geodezyjnymi (Wei-Chia Hung, et al., 2011; Crosetto M. et al., 2009). Potwierdziły one milimetrową dokładność w skali roku dla technik wykorzystujących punkty PS. W niniejszym badaniu przyjęto dokładność wyznaczenia wartości przemieszczeń pionowych metodą IPTA za równą ± 2 mm w skali roku.

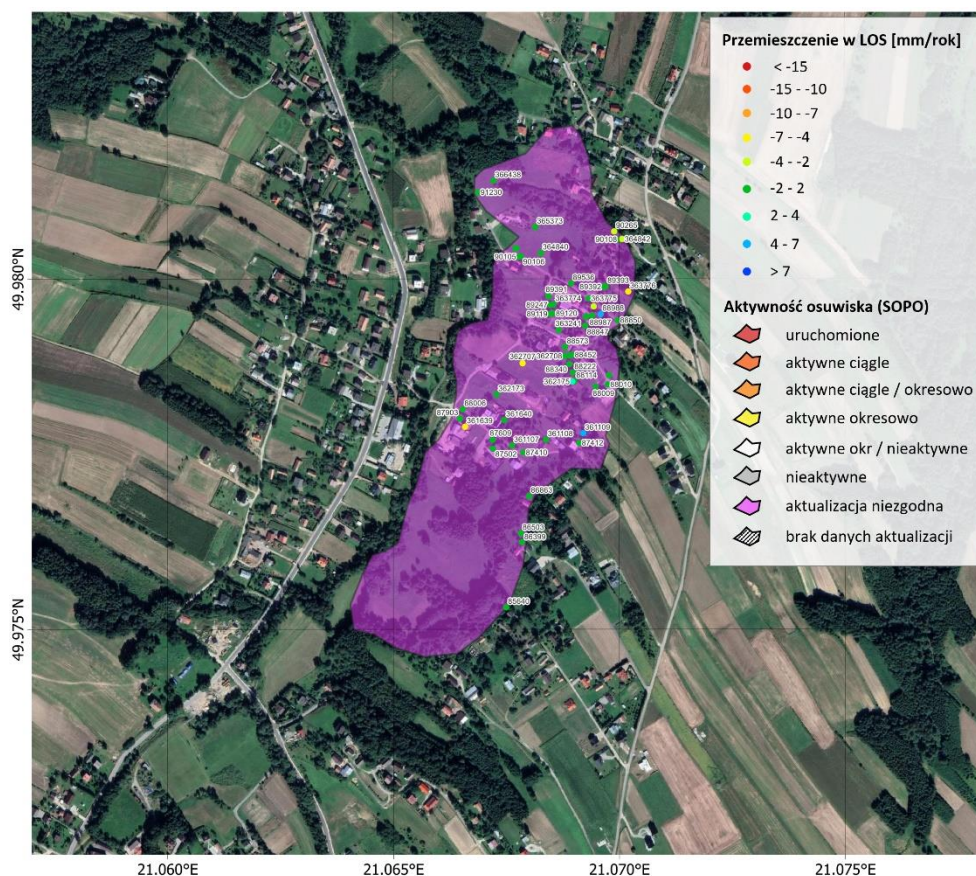
Zarówno wszystkie analizy obrazów SAR zostały przeprowadzone przez doświadczonych pracowników firmy SATIM, posiadających wyższe wykształcenie w dziedzinie geologii, geodezji, teledetekcji oraz informatyki.

MAPY PUNKTÓW POMIAROWYCH

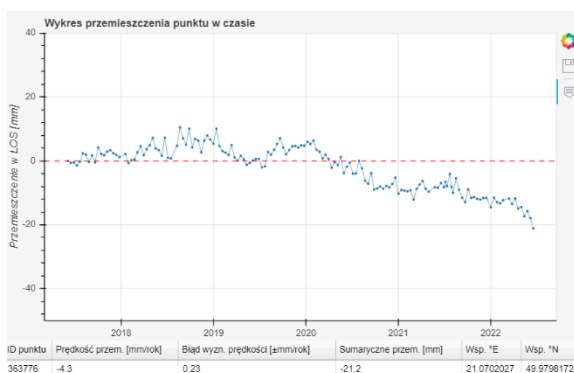
Przedstawiona mapa (Rys. 2) przedstawia lokalizację monitorowanych osuwisk wraz z ich numerami zgodnymi z bazą SOPO. Poniżej zostały zobrazowane poszczególne osuwiska wraz z punktami pomiarowymi oraz wykresami przemieszczeń w LOS dla niektórych punktów.



Rys. 2 Mapa monitorowanych osuwisk wraz z ich numeracją zgodną z SOPO



Rys. 3 Mapa osuwiska nr 13047 z punktami PS dla orbity ascending



363776



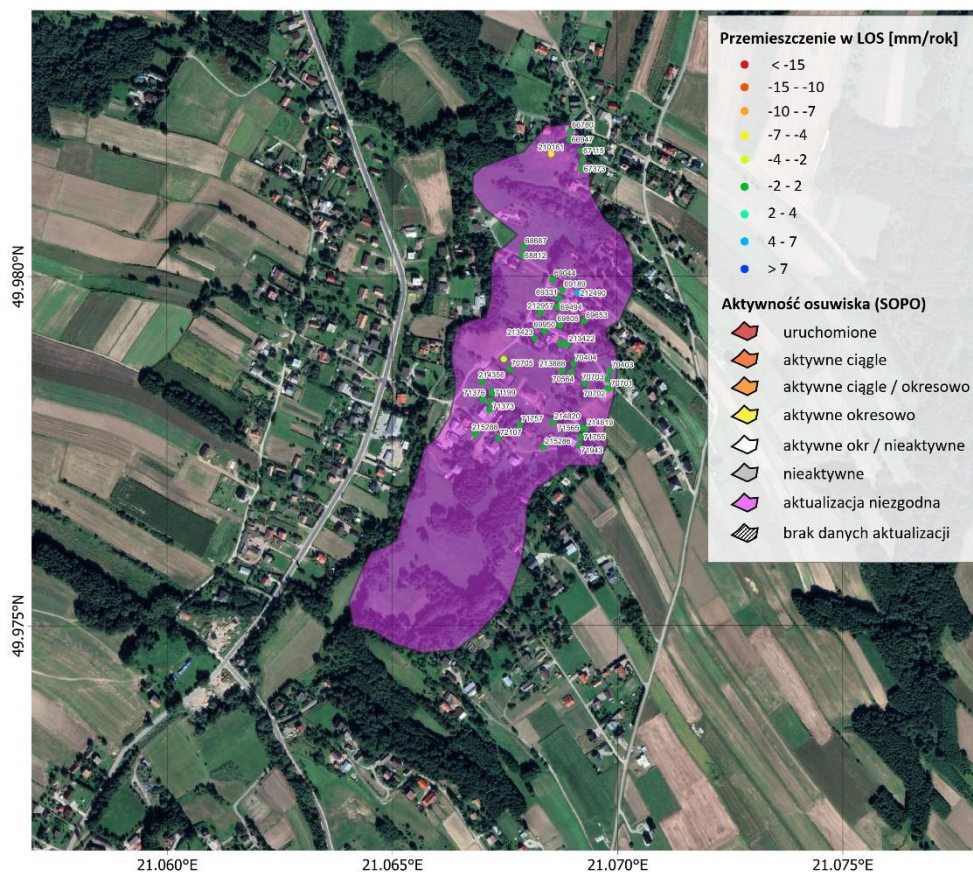
362707



88988



361109



Rys. 4 Mapa osuwiska nr 13047 z punktami PS dla orbity descending



210161



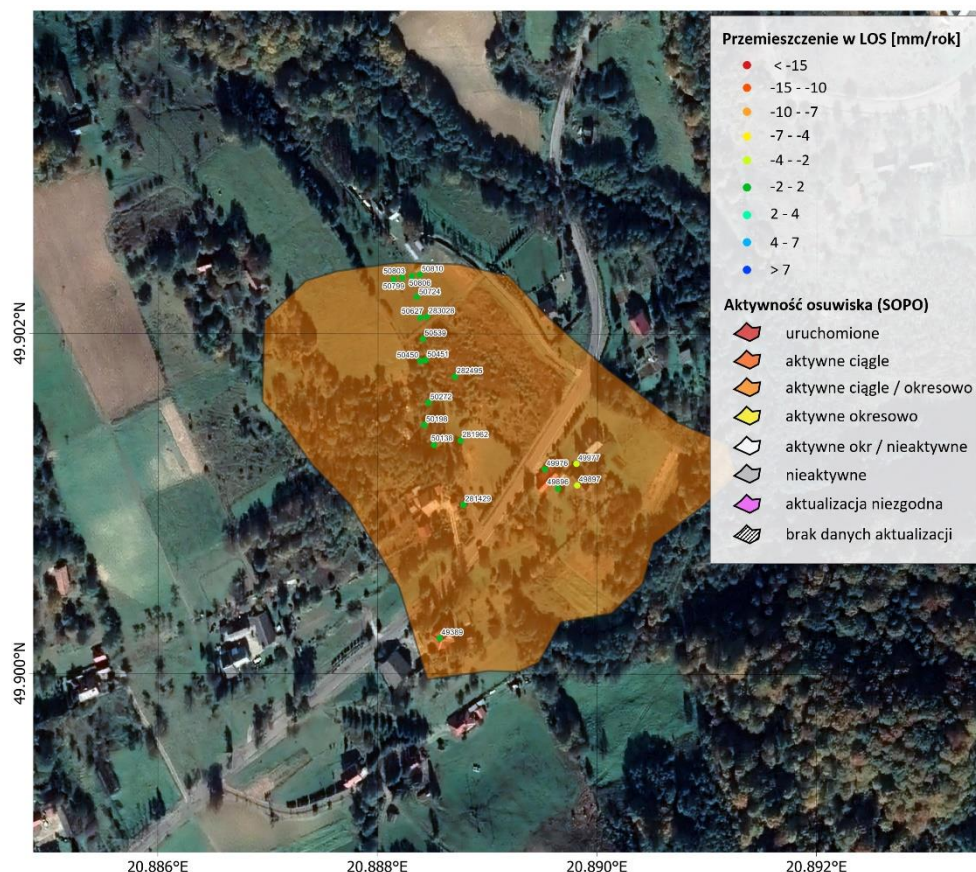
212490



68812



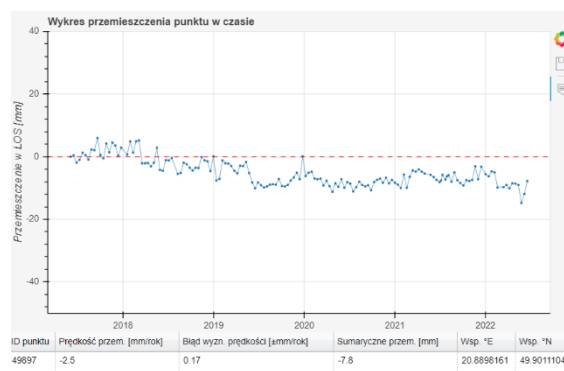
214820



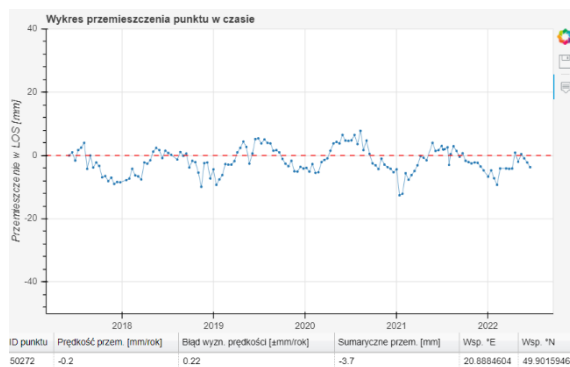
Rys. 5 Mapa osuwiska nr 13057 z punktami PS dla orbity ascending



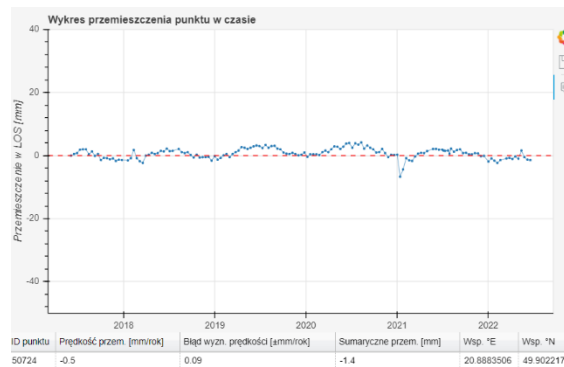
49977



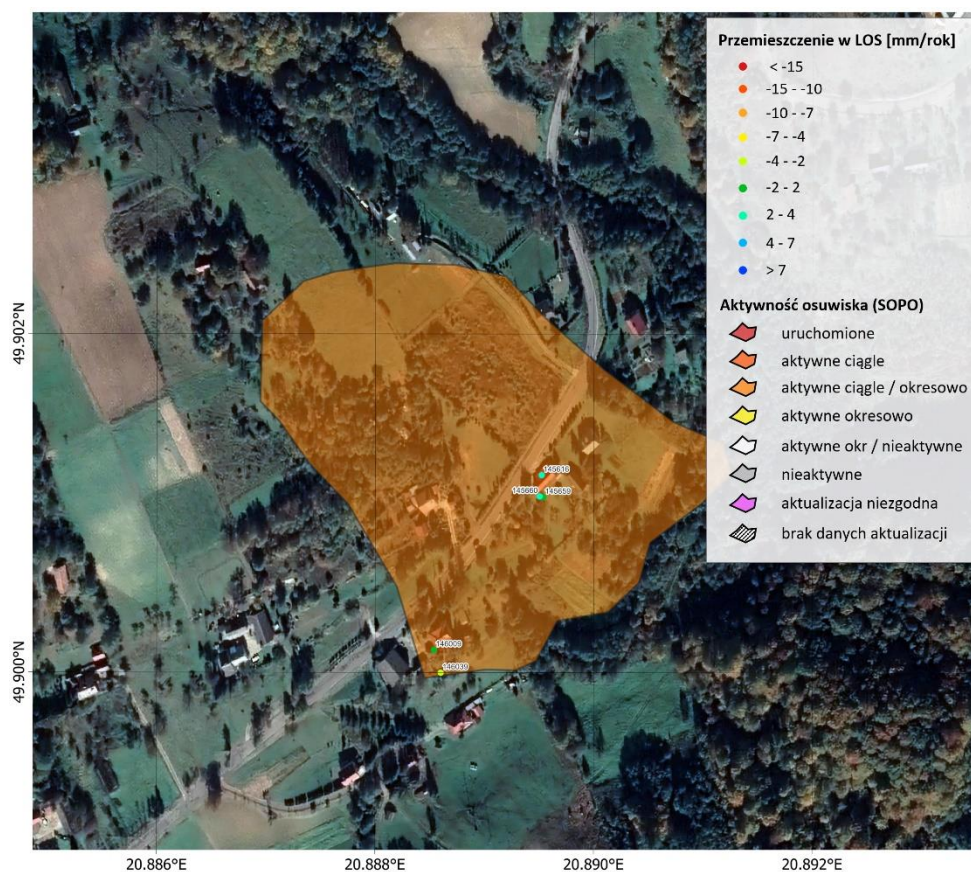
49897



50272



50724



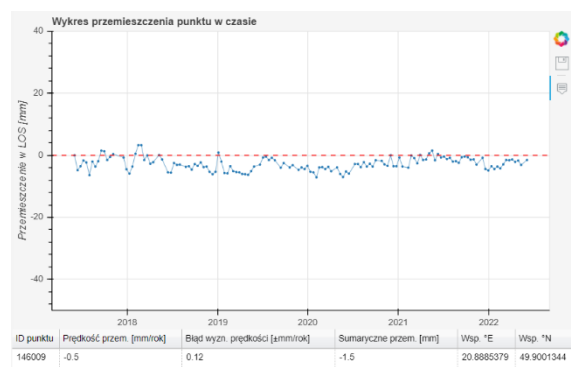
Rys. 6 Mapa osuwiska nr 13057 z punktami PS dla orbity descending



145616



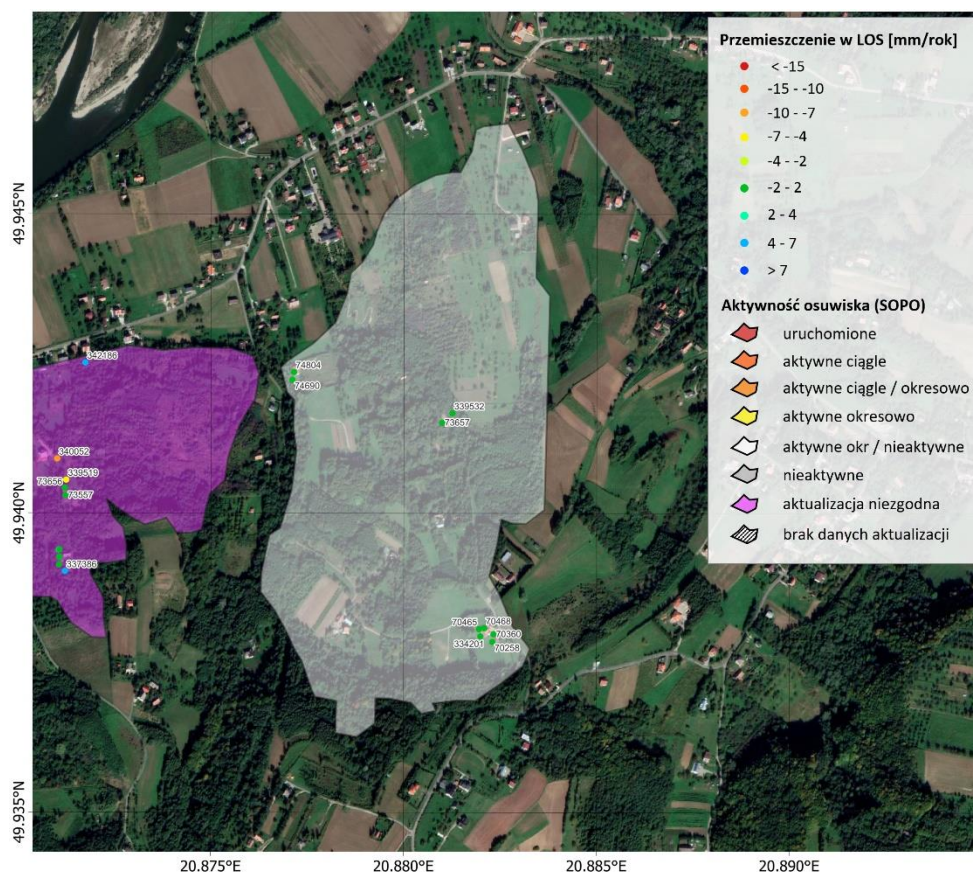
145660



146009



146039



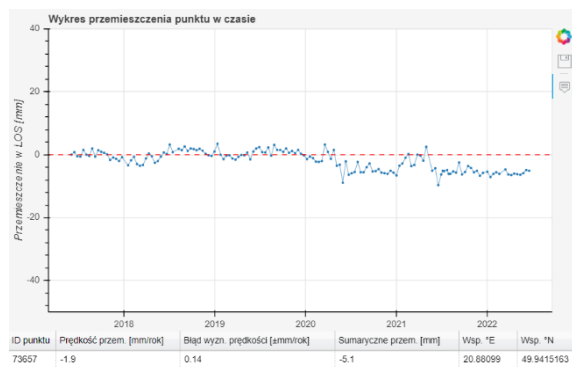
Rys. 7 Mapa osuwiska nr 15826 z punktami PS dla orbity ascending



334201



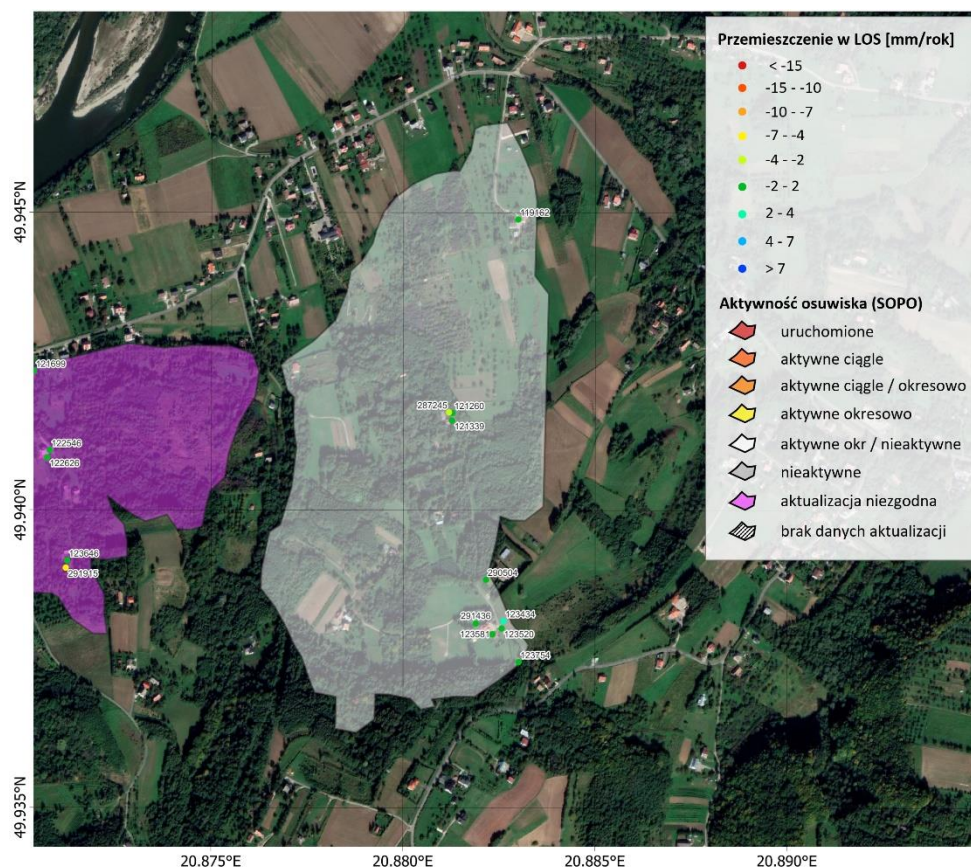
70258



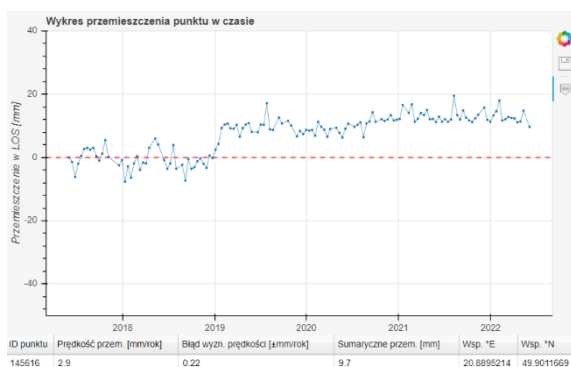
73657



74690



Rys. 8 Mapa osuwiska nr 15826 z punktami PS dla orbity descending



145616



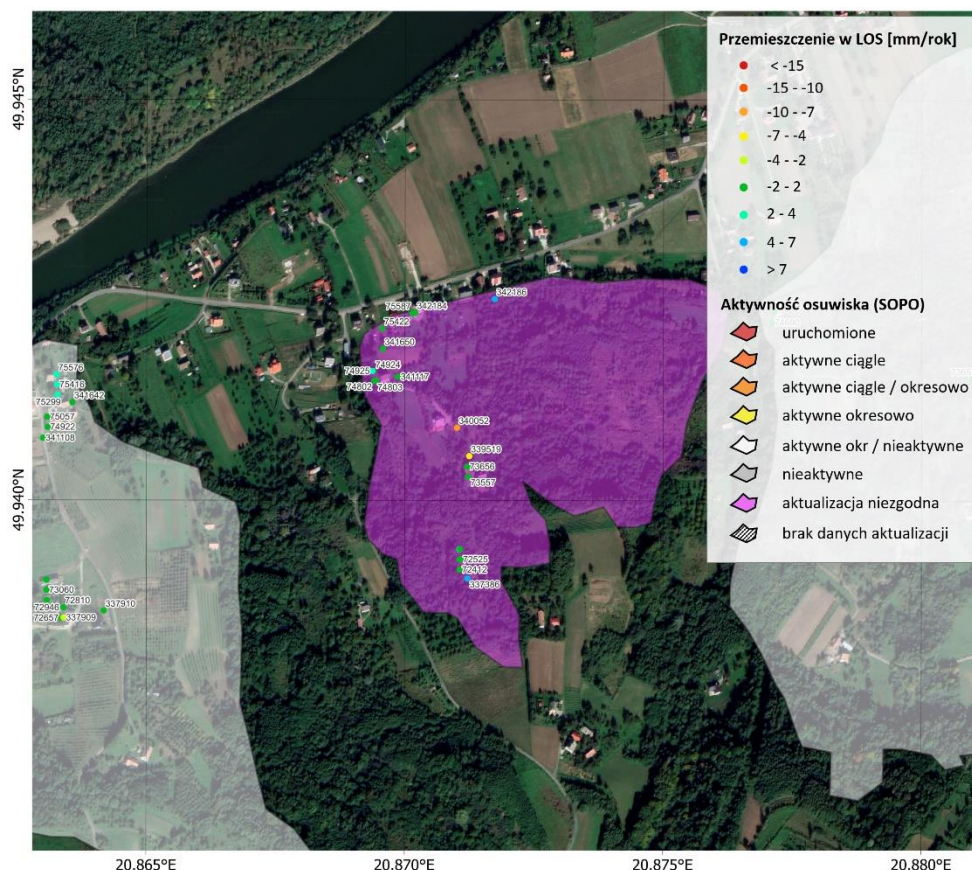
145660



146009



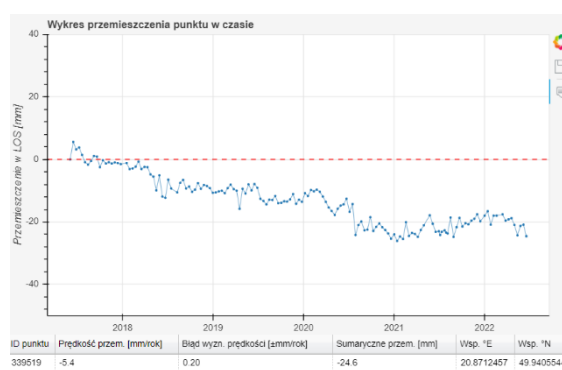
146039



Rys. 9 Mapa osuwiska nr 16457 z punktami PS dla orbity ascending



340052



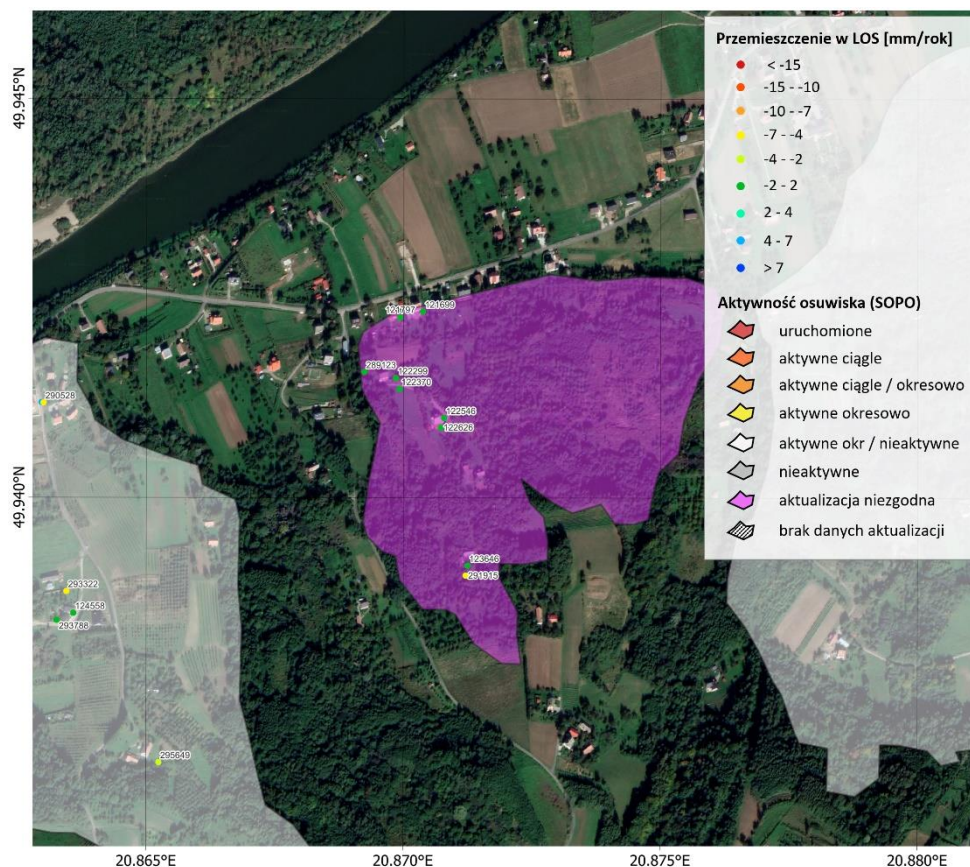
339519



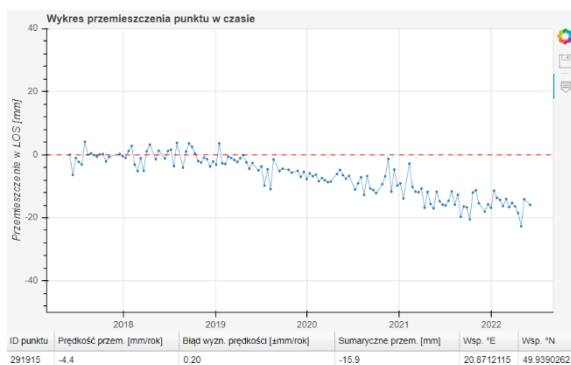
73557



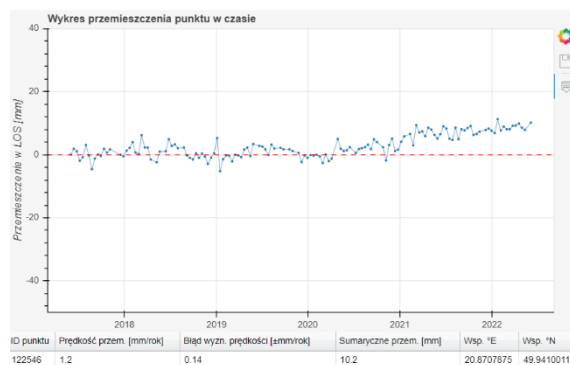
342186



Rys. 10 Mapa osuwiska nr 16457 z punktami PS dla orbity descending



291915



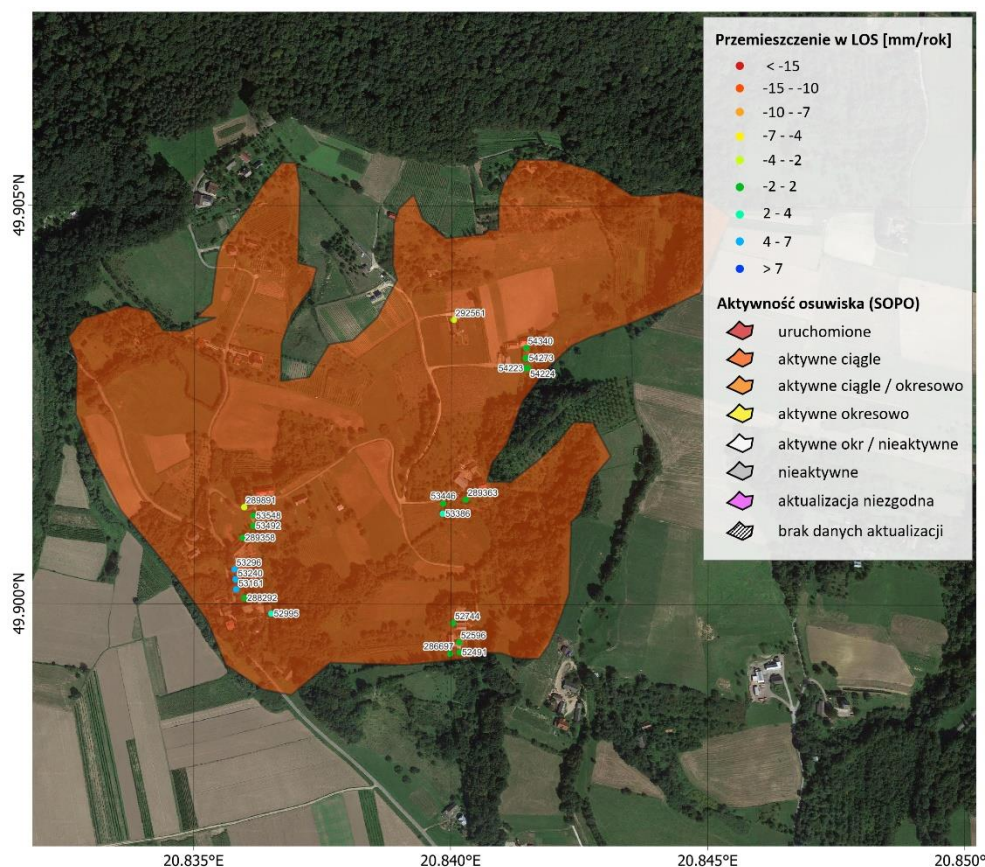
122546



121797



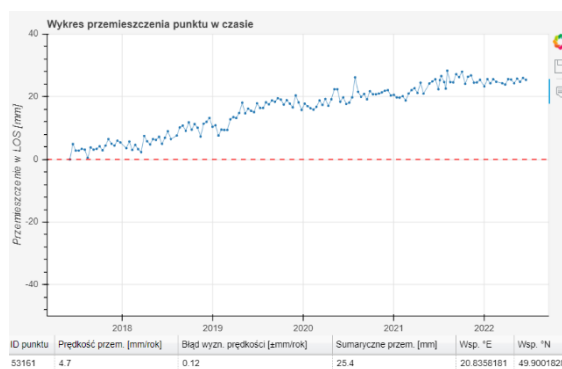
123646



Rys. 11 Mapa osuwiska nr 16458 z punktami PS dla orbity ascending



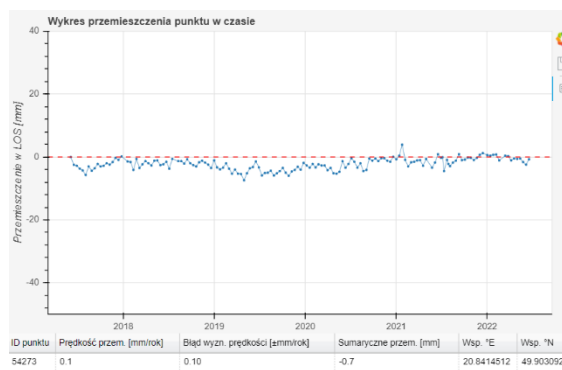
53296



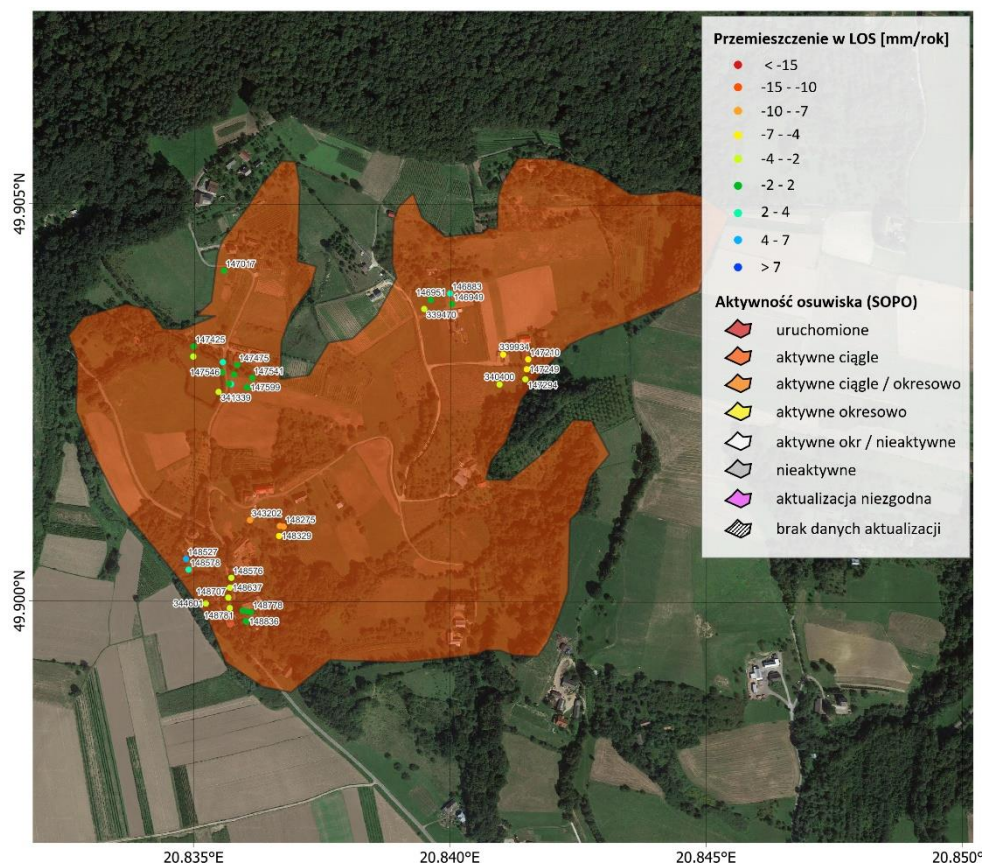
53161



53386



54273



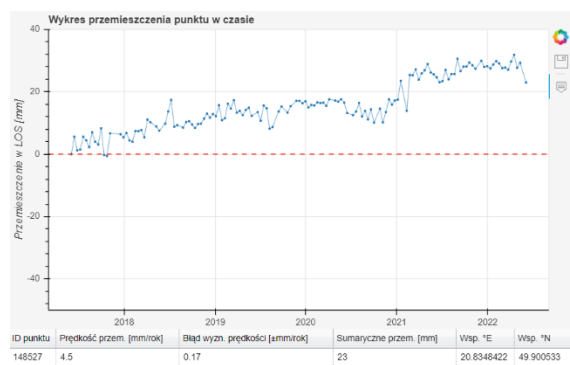
Rys. 12 Mapa osuwiska nr 16458 z punktami PS dla orbity descending



148275



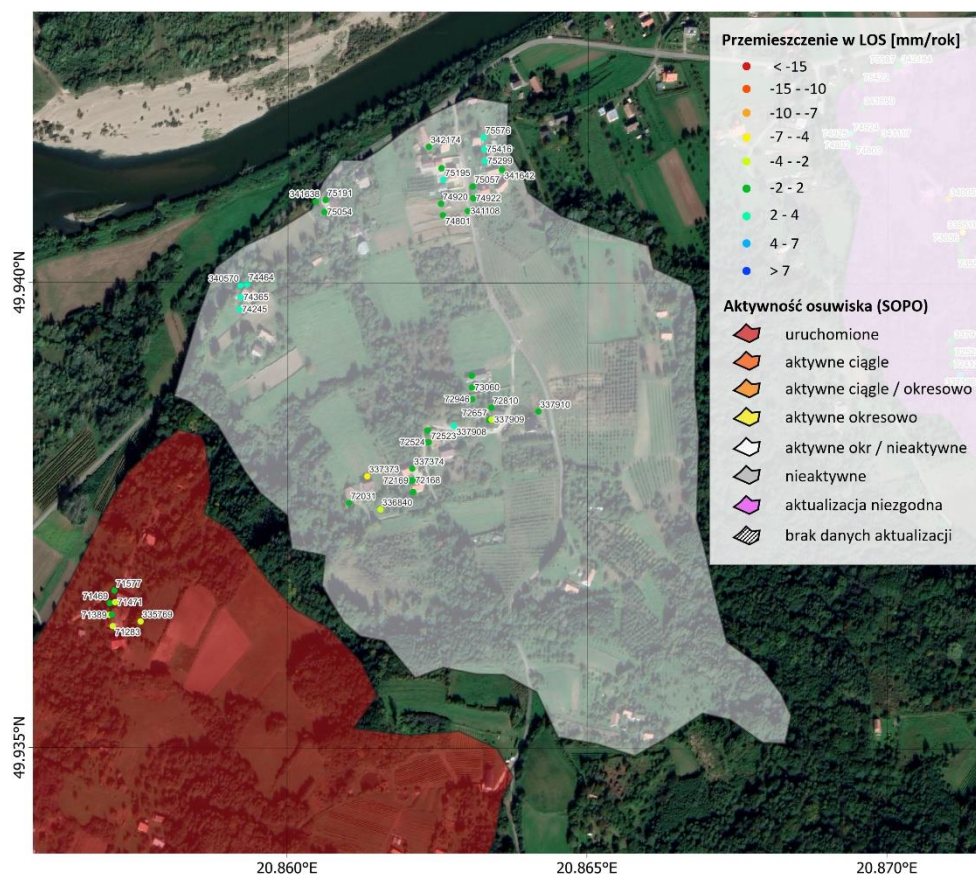
343202



148527



147210



Rys. 13 Mapa osuwiska nr 16468 z punktami PS dla orbity ascending



74464



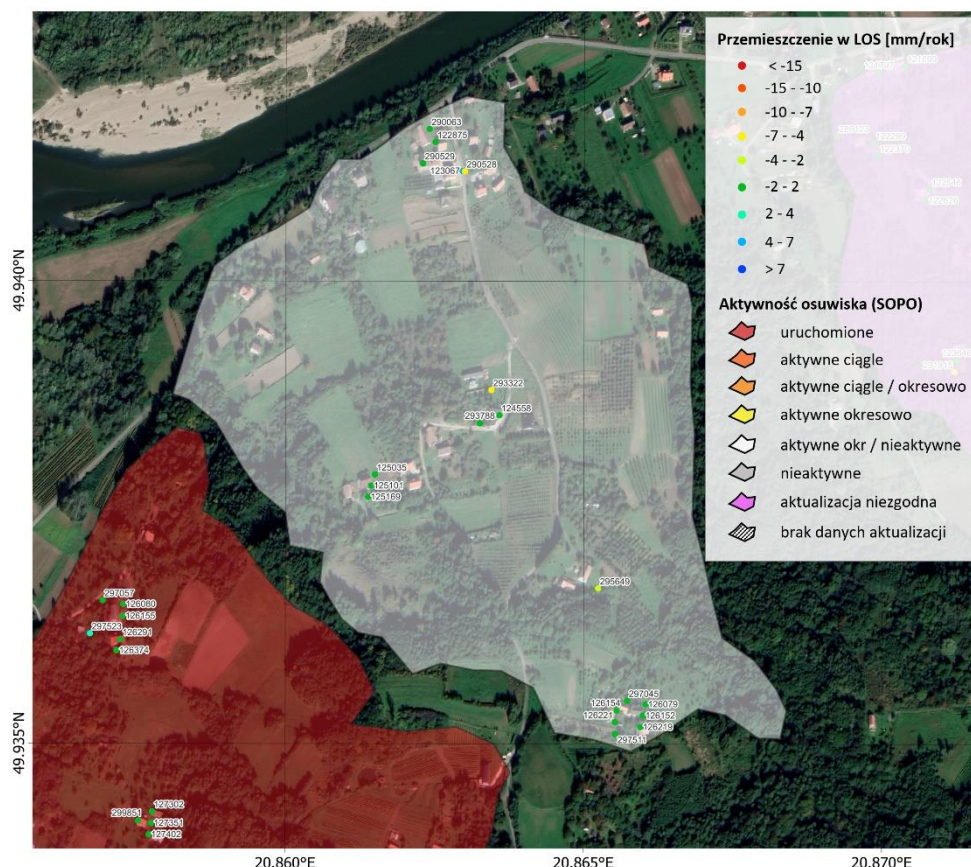
75299



71283



337373



Rys. 14 Mapa osuwiska nr 16468 z punktami PS dla orbity descending



293322



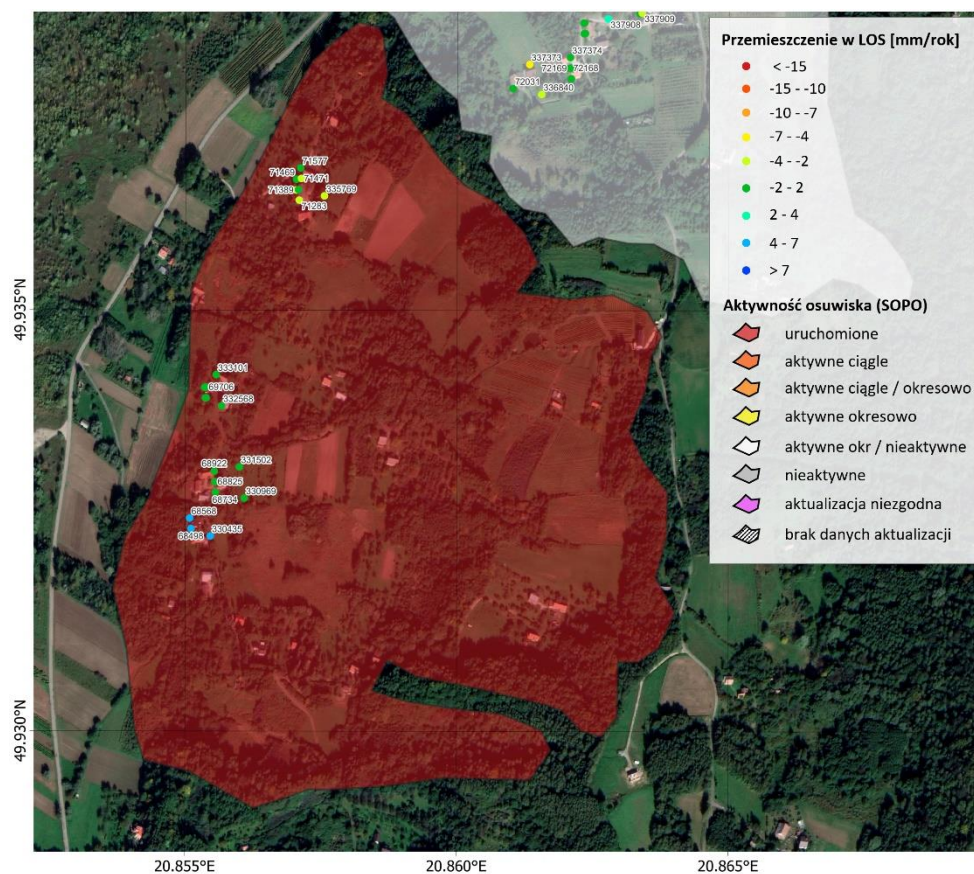
290528



122875



126221



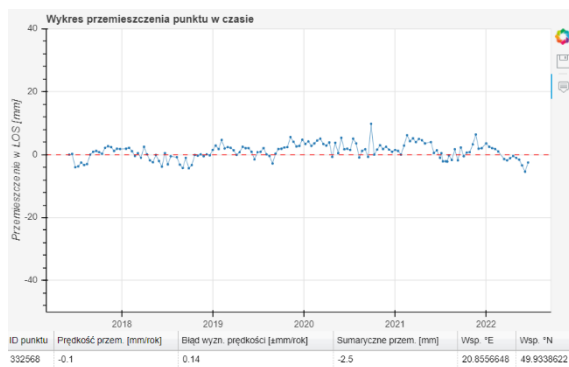
Rys. 15 Mapa osuwiska nr 16473 z punktami PS dla orbity ascending



330435



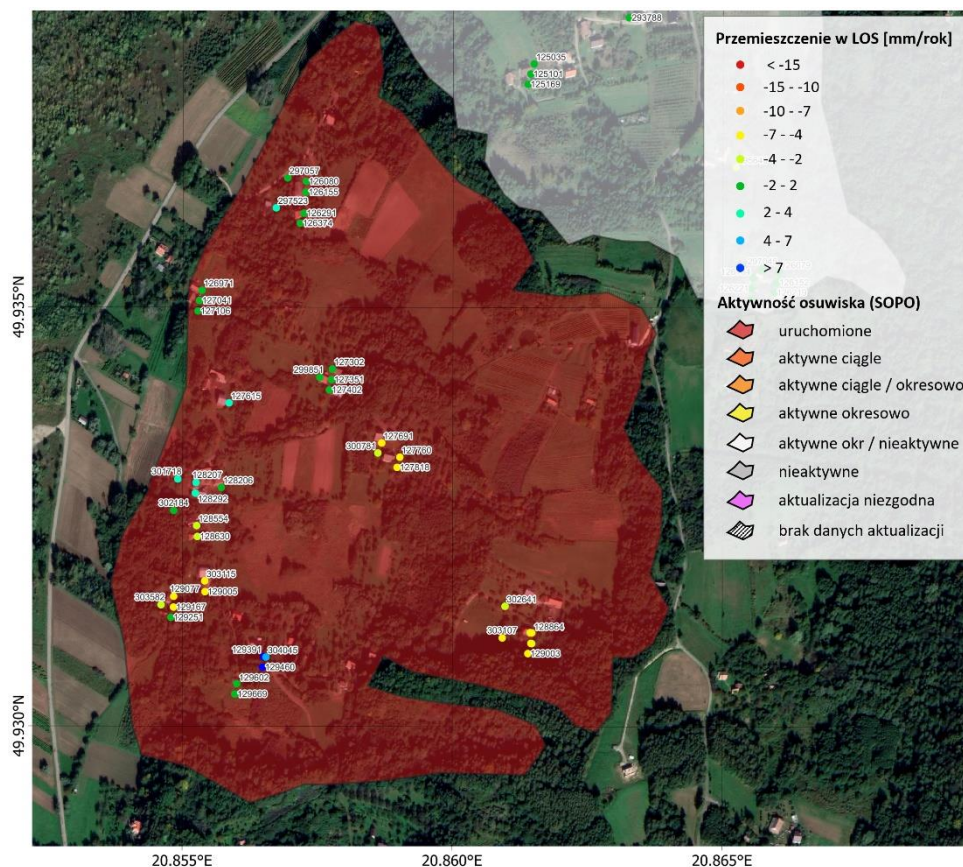
68568



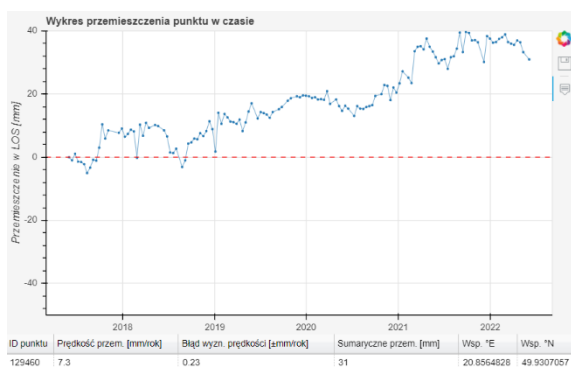
332568



335769



Rys. 16 Mapa osuwiska nr 16473 z punktami PS dla orbity descending



129460



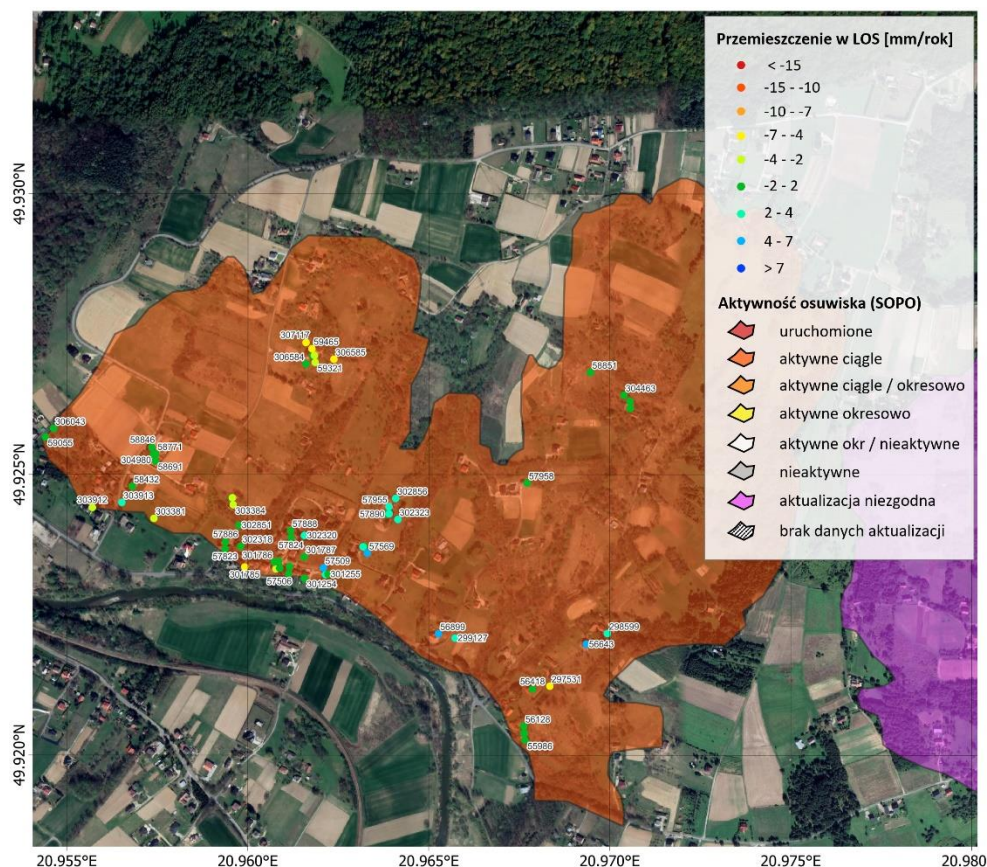
129391



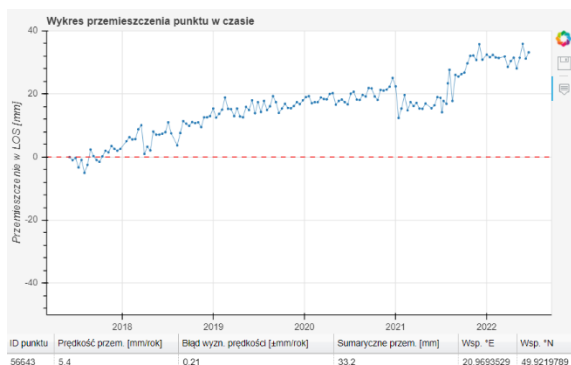
303115



303107



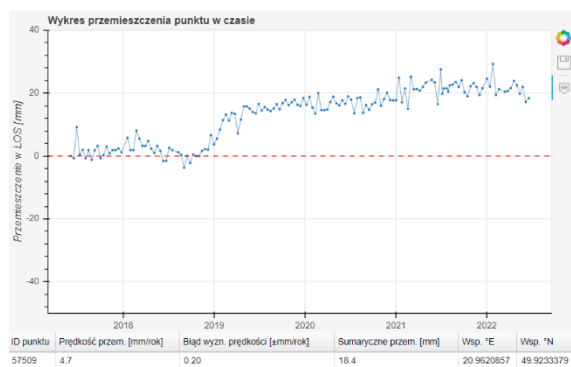
Rys. 17 Mapa osuwiska nr 17324 z punktami PS dla orbity ascending



56643



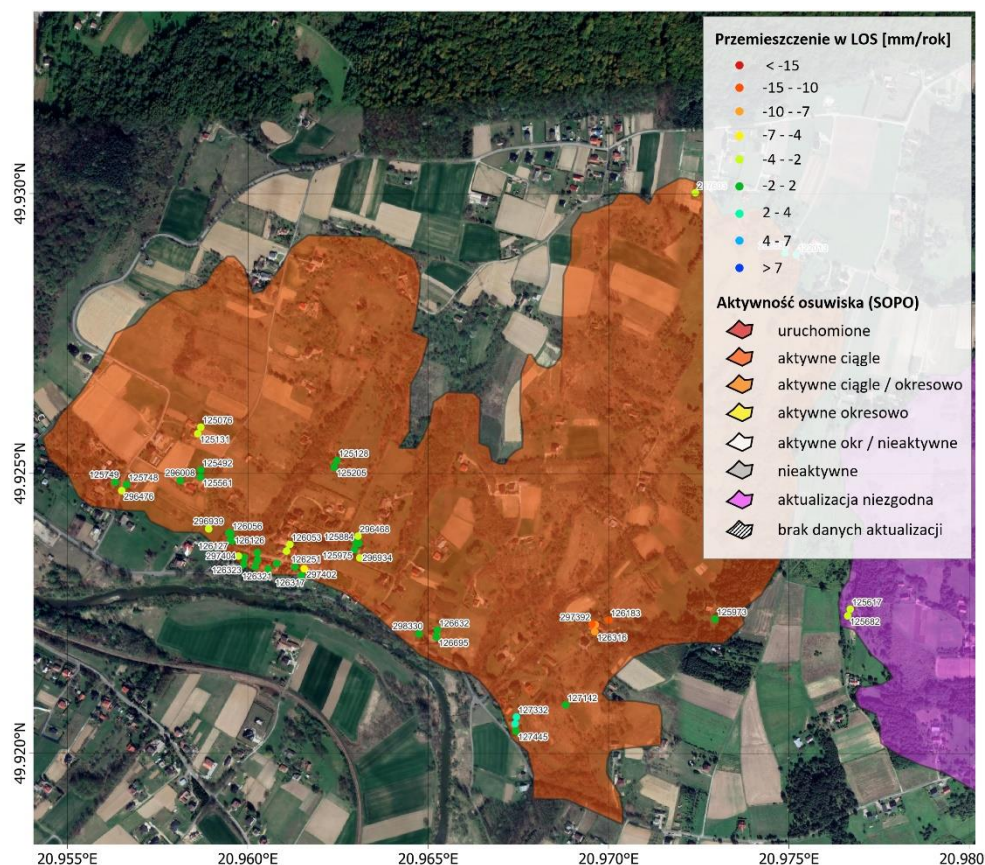
56899



57509



307117



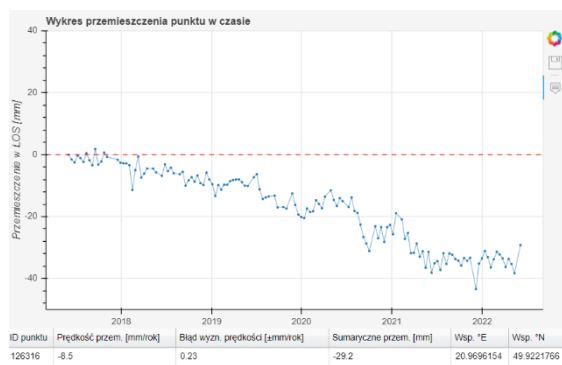
Rys. 18 Mapa osuwiska nr 17324 z punktami PS dla orbity descending



126183



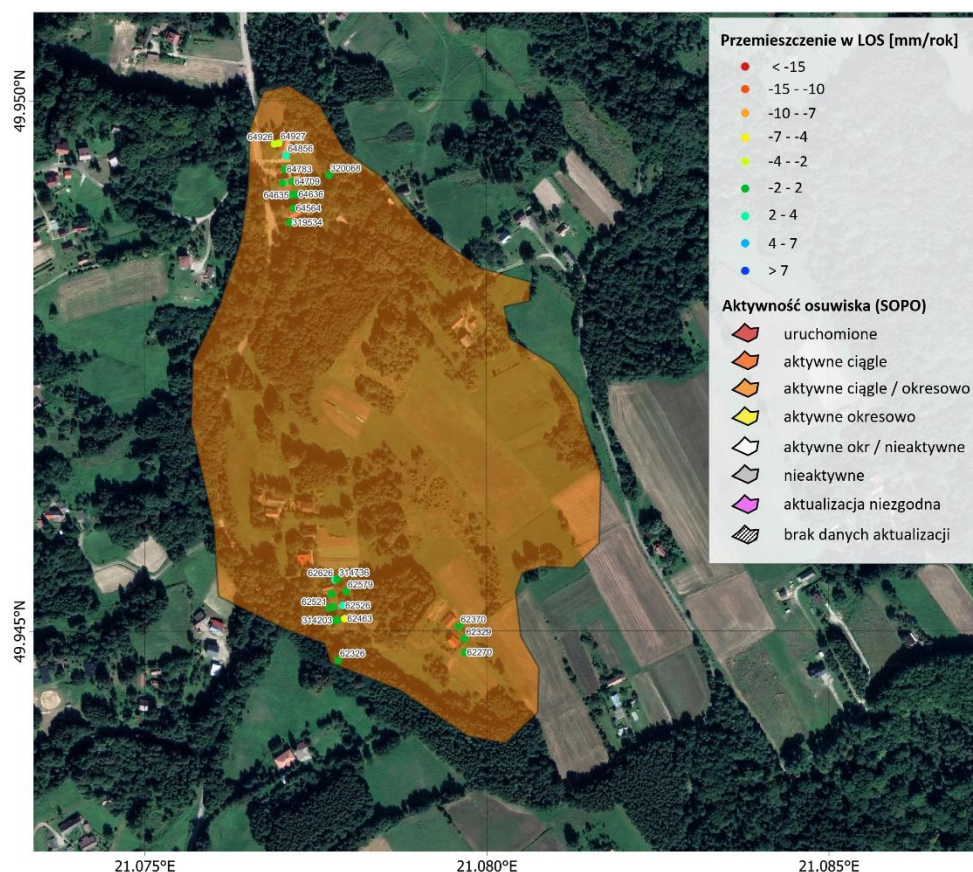
297392



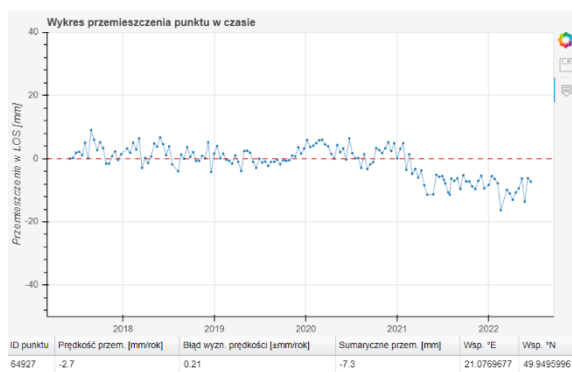
126316



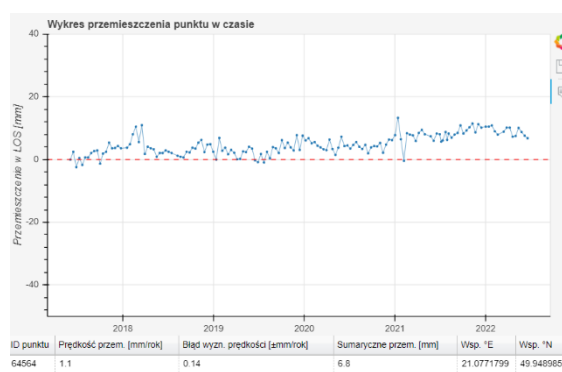
297402



Rys. 19 Mapa osuwiska nr 23670 z punktami PS dla orbity ascending



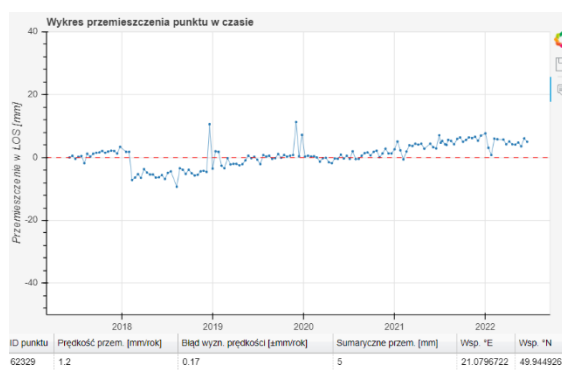
64927



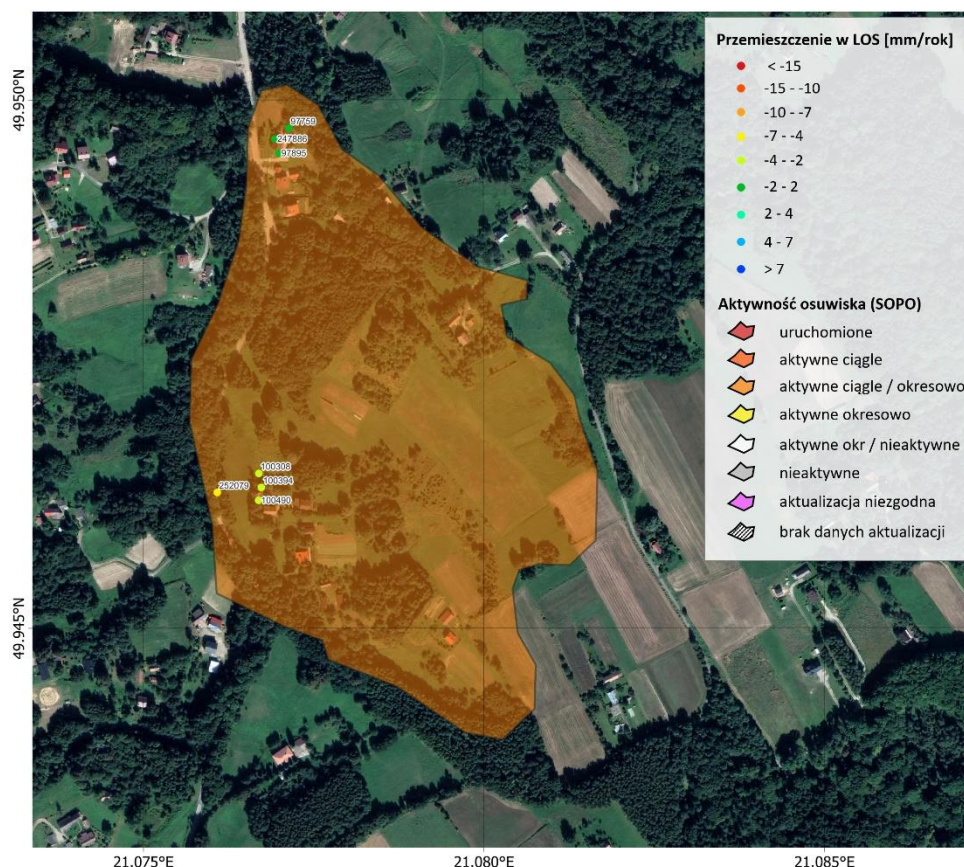
64564



62463



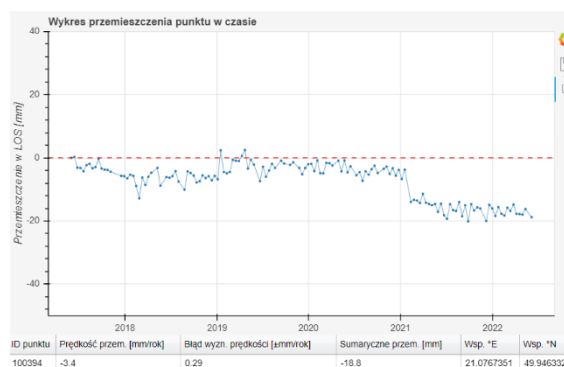
62329



Rys. 20 Mapa osuwiska nr 23670 z punktami PS dla orbity descending



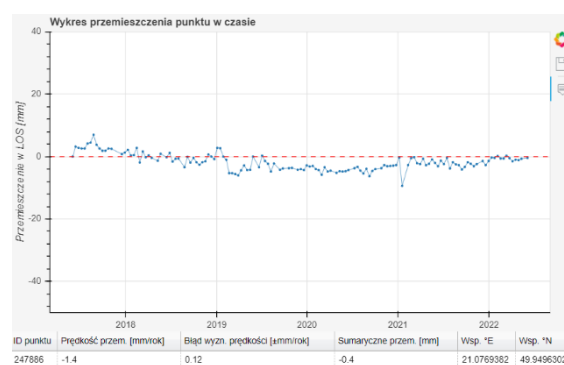
252079



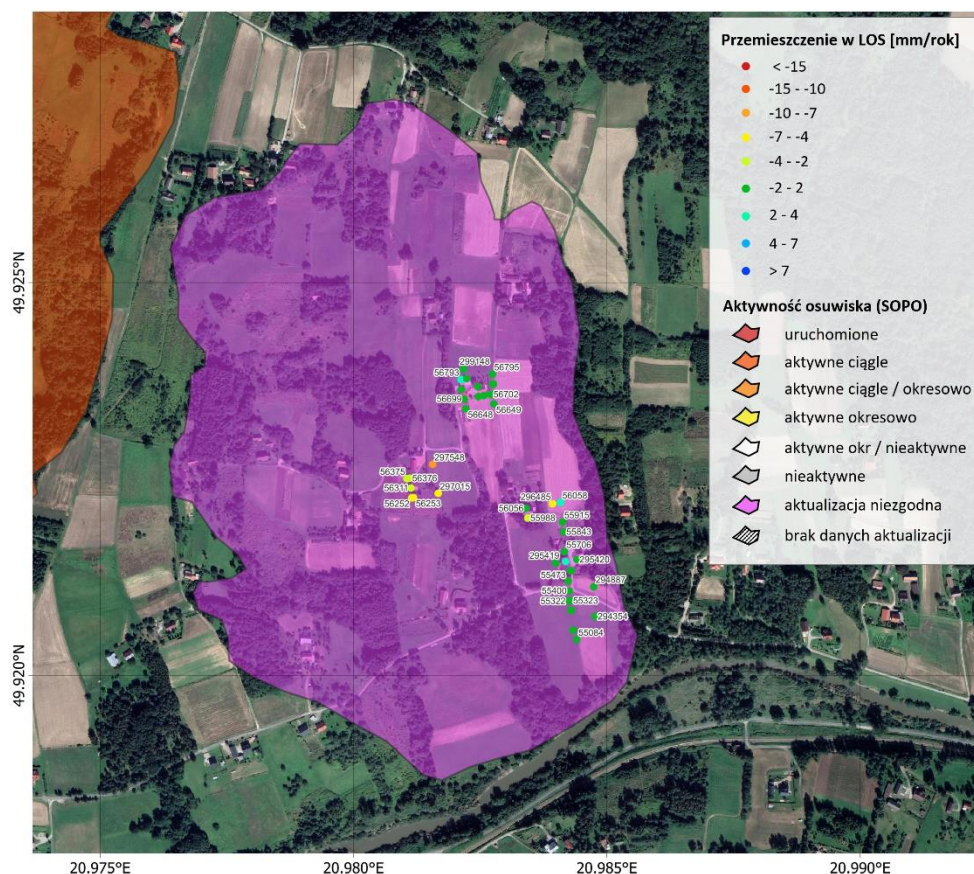
100394



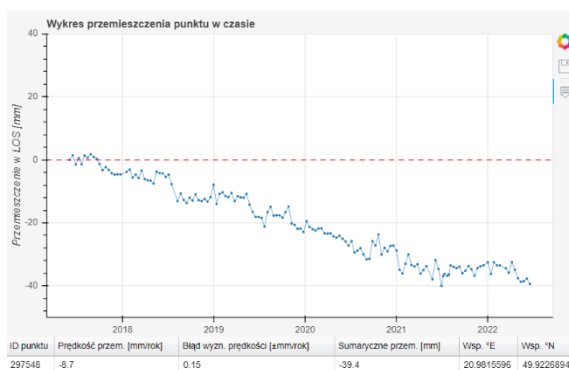
100308



247886



Rys. 21 Mapa osuwiska nr 23747 z punktami PS dla orbity ascending



297548



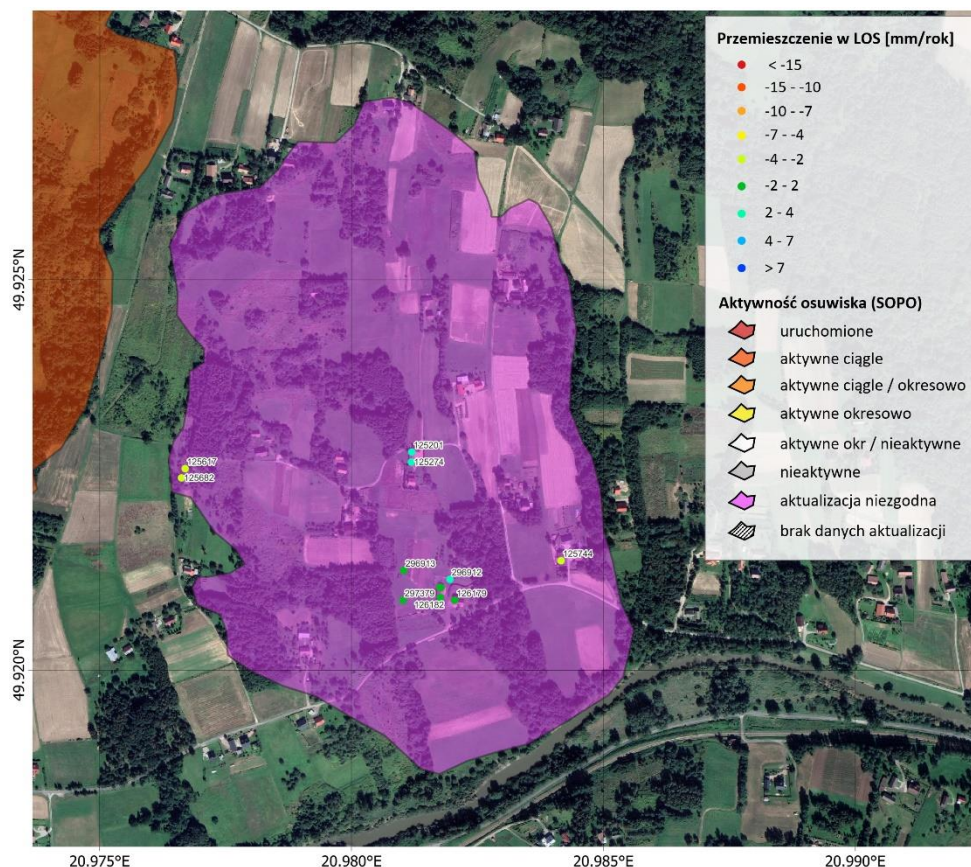
297015



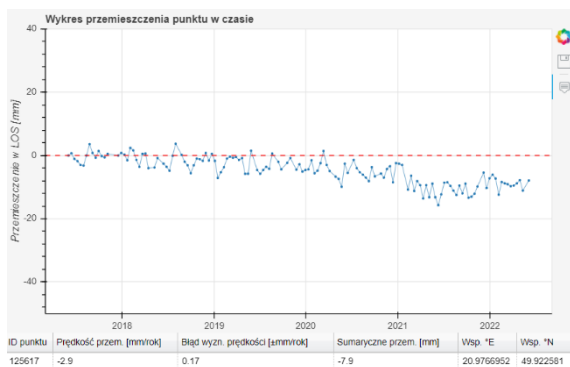
56744



294887



Rys. 22 Mapa osuwiska nr 23747 z punktami PS dla orbity descending



125617



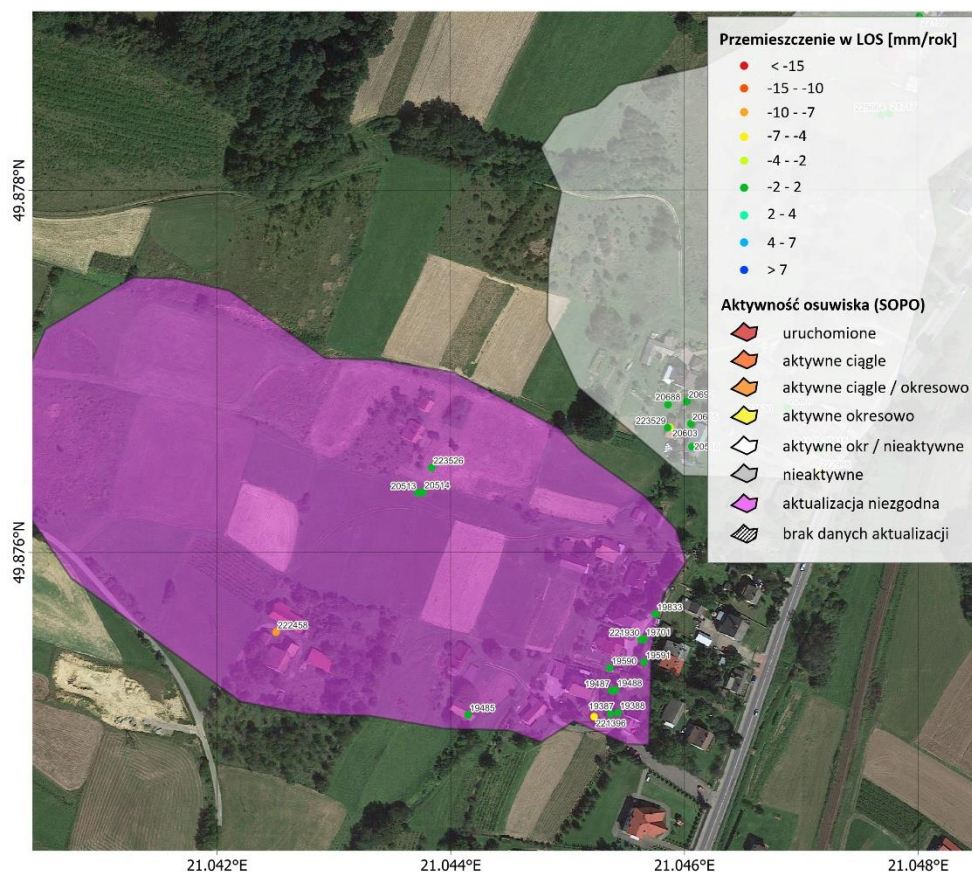
125682



125201



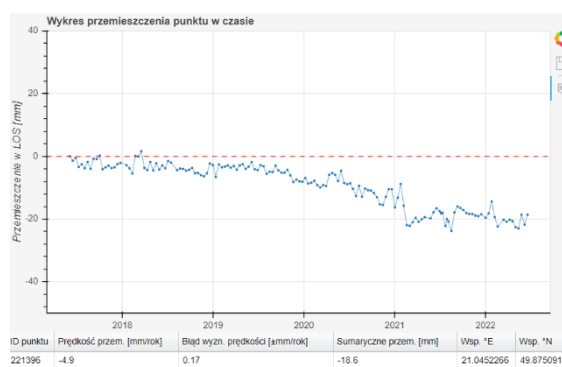
126179



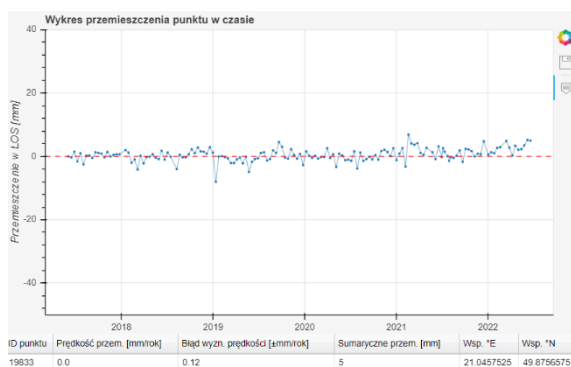
Rys. 23 Mapa osuwiska nr 23906 z punktami PS dla orbity ascending



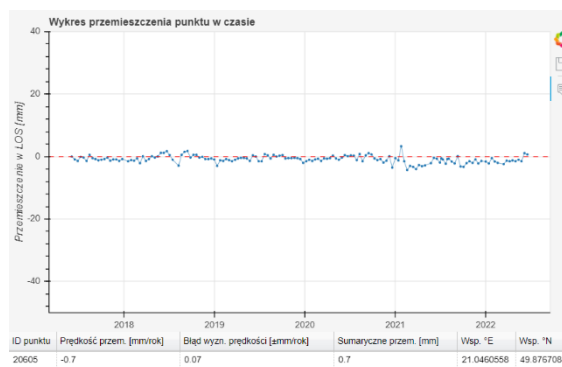
222458



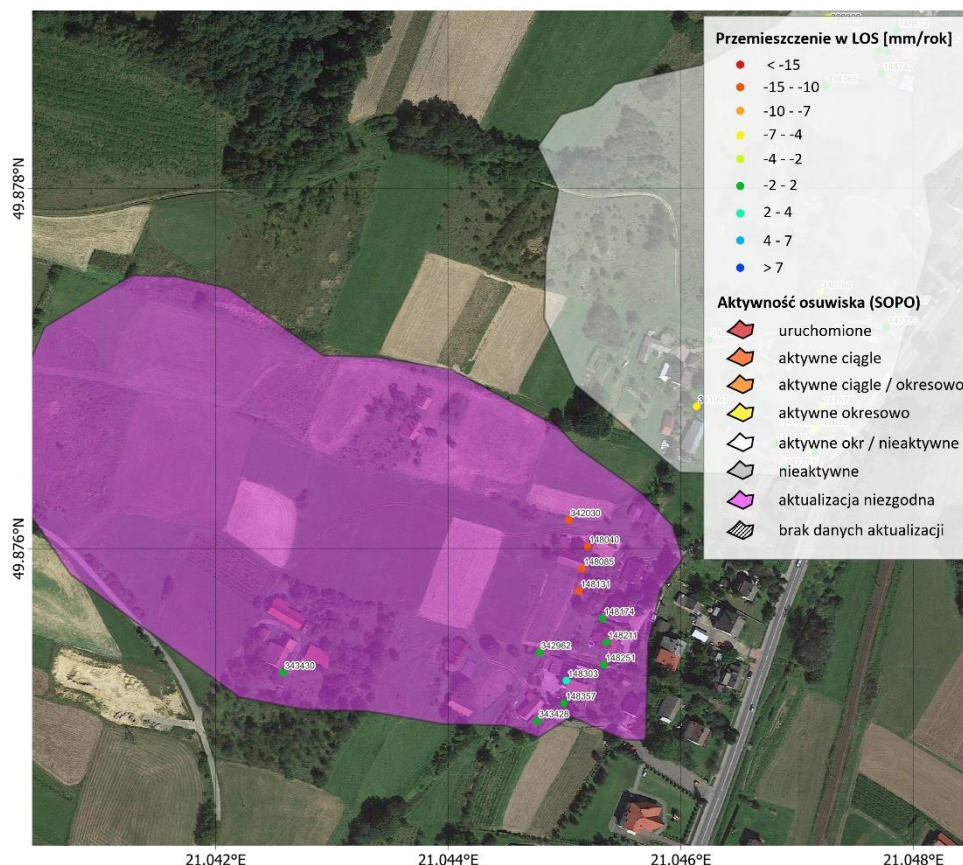
221396



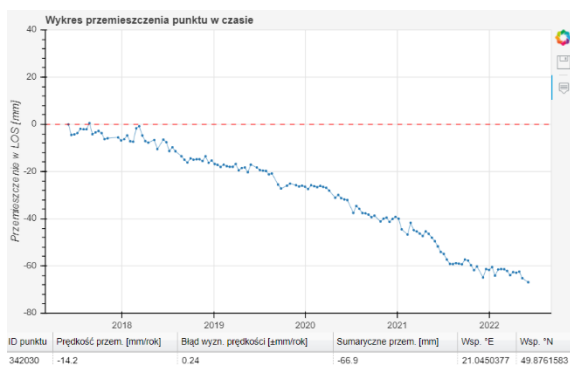
19833



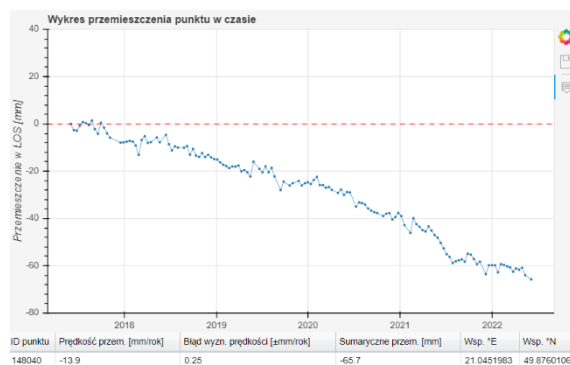
20605



Rys. 24 Mapa osuwiska nr 23906 z punktami PS dla orbity descending



342030



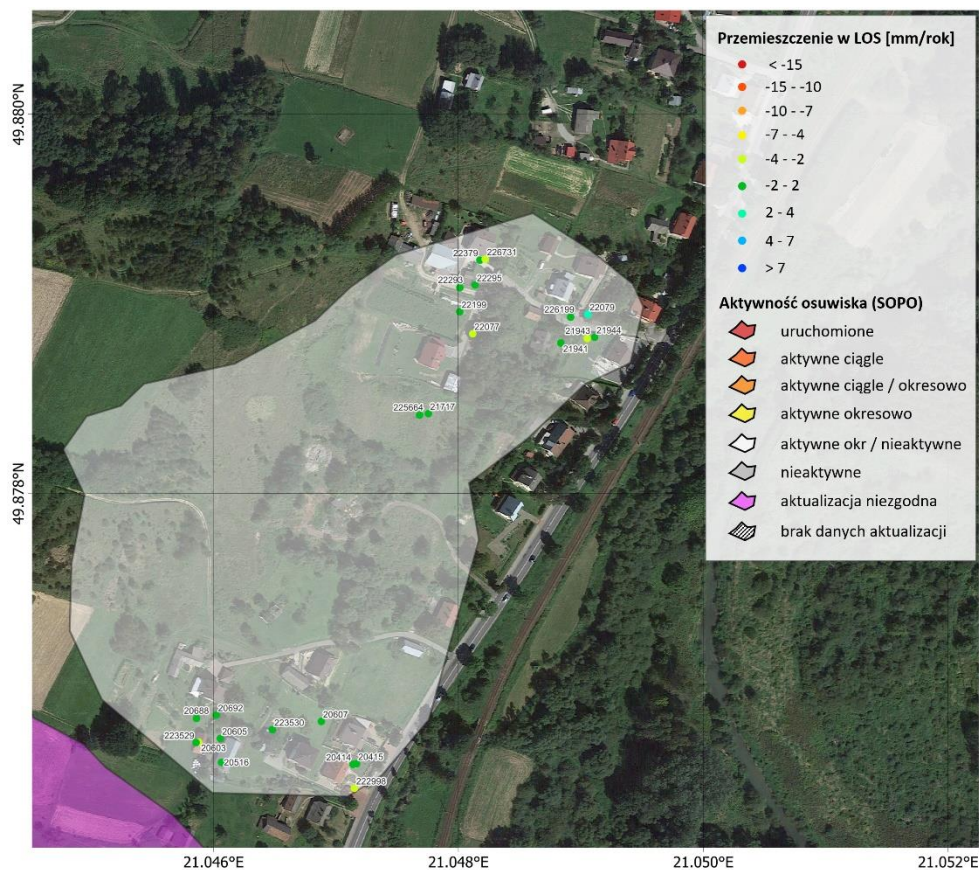
148040



148131



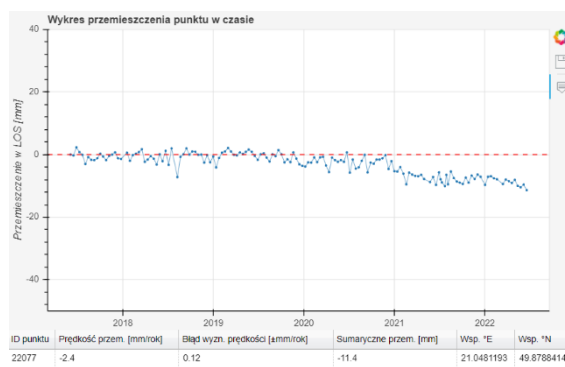
148211



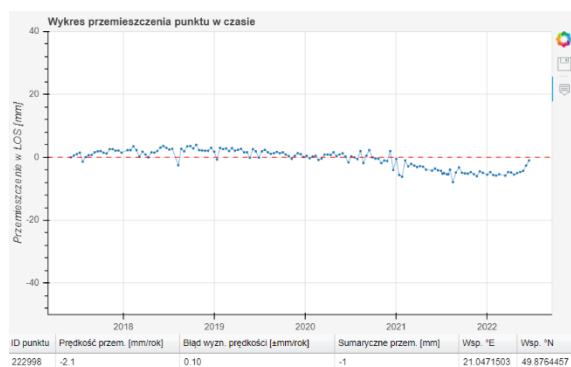
Rys. 25 Mapa osuwiska nr 23908 z punktami PS dla orbity ascending



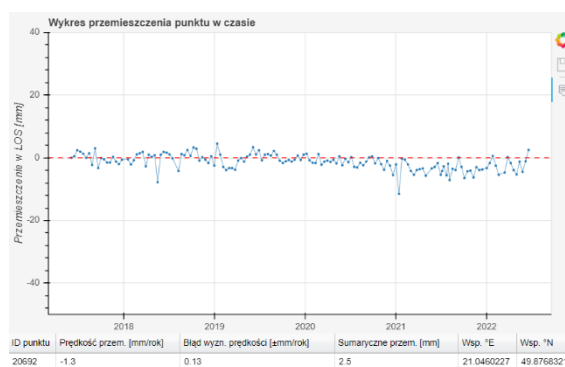
21943



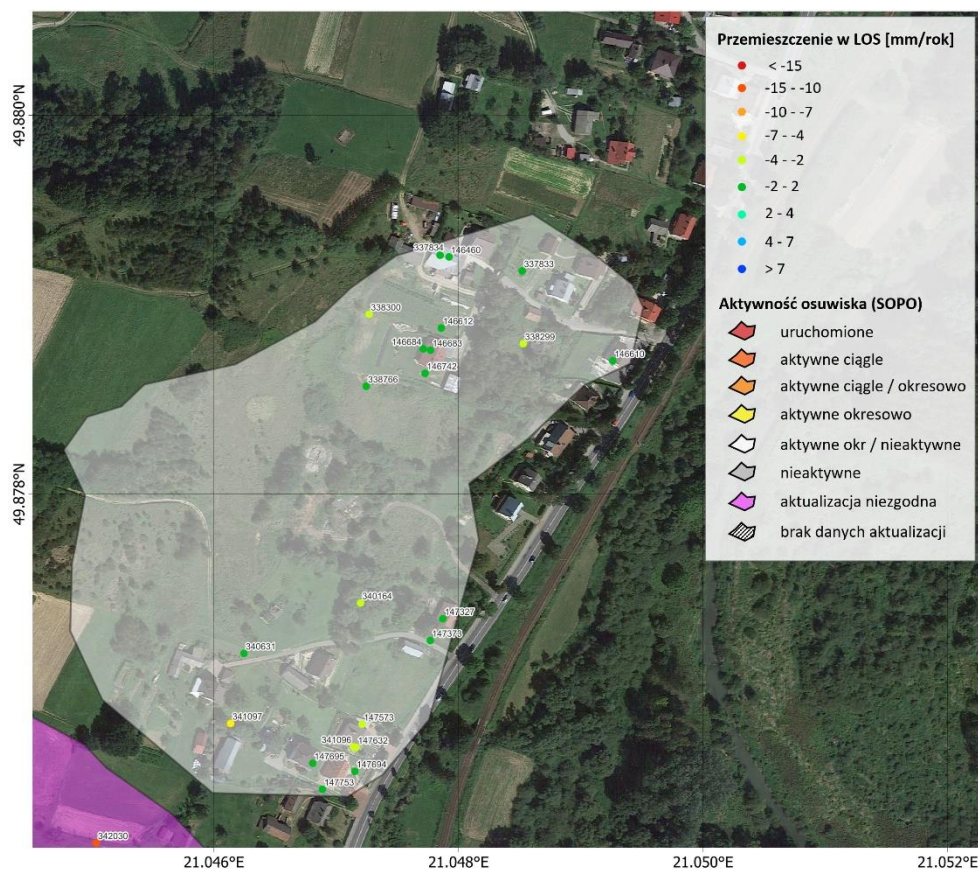
22077



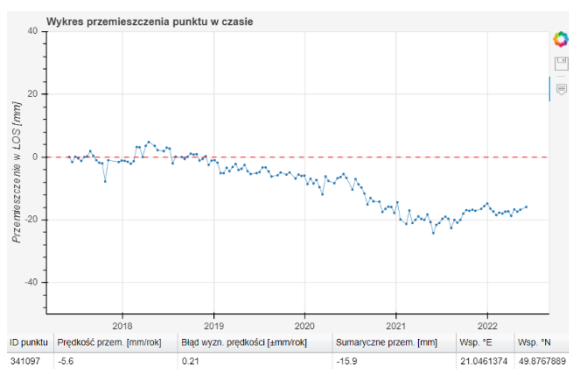
222998



20692



Rys. 26 Mapa osuwiska nr 23908 z punktami PS dla orbity descending



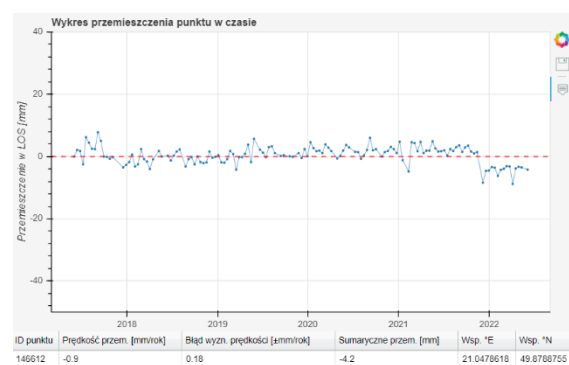
341097



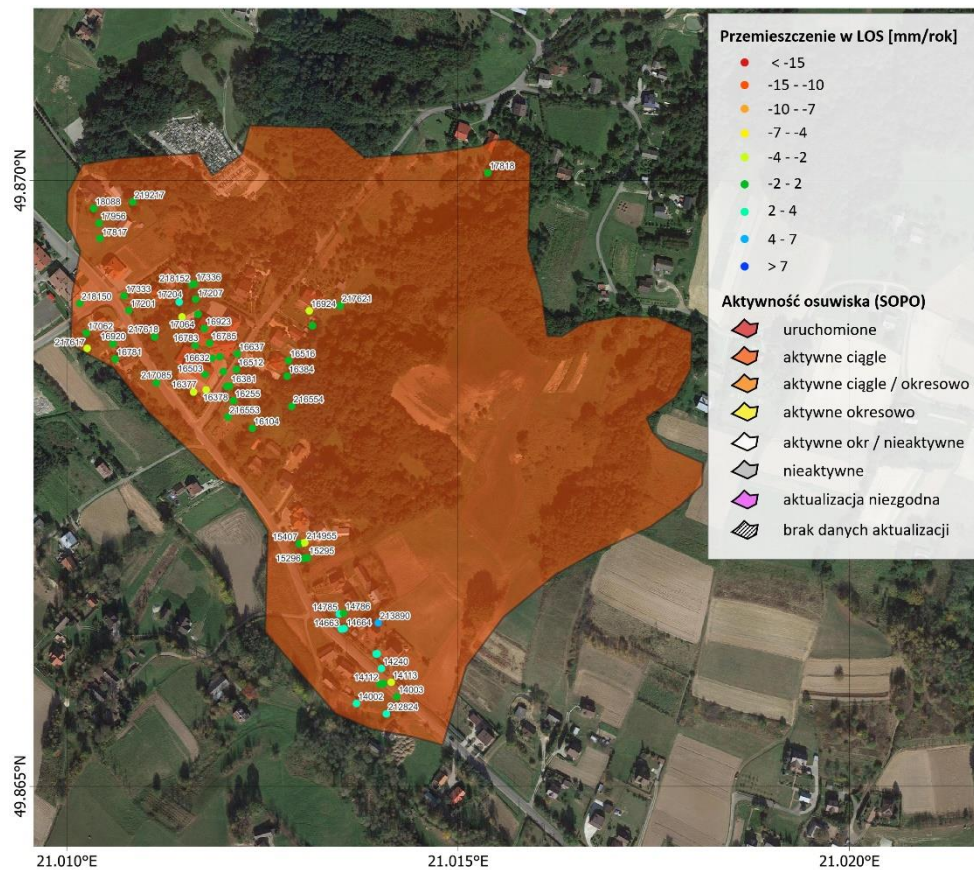
147573



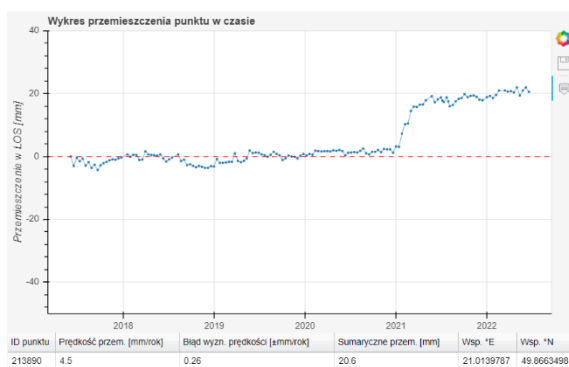
338300



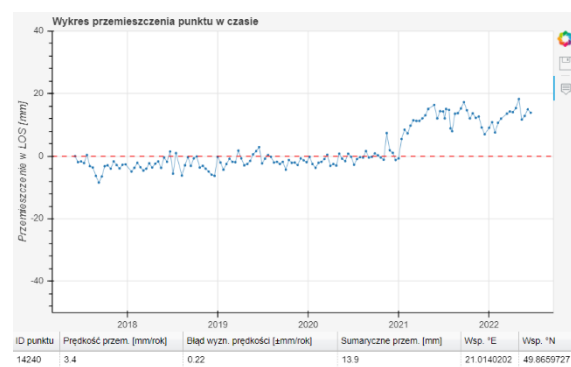
146612



Rys. 27 Mapa osuwiska nr 27691 z punktami PS dla orbity ascending



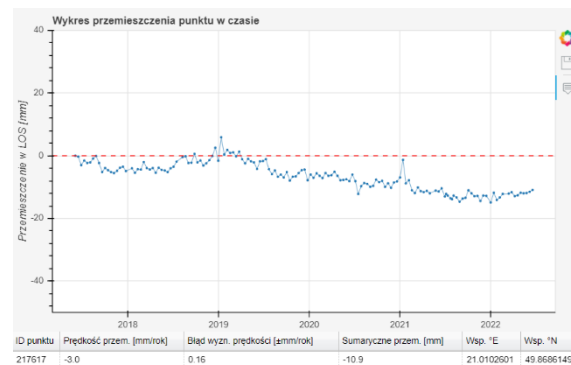
213890



14240

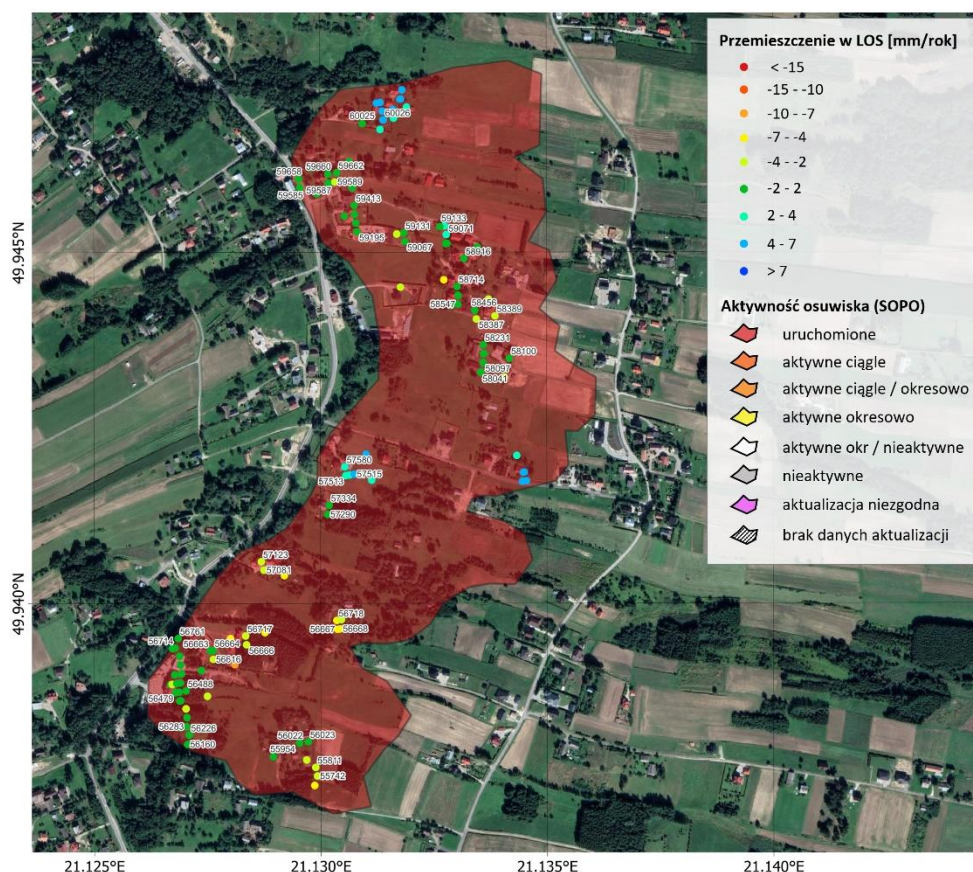


16384



217617





Rys. 29 Mapa osuwiska nr 54656 z punktami PS dla orbity ascending



60280



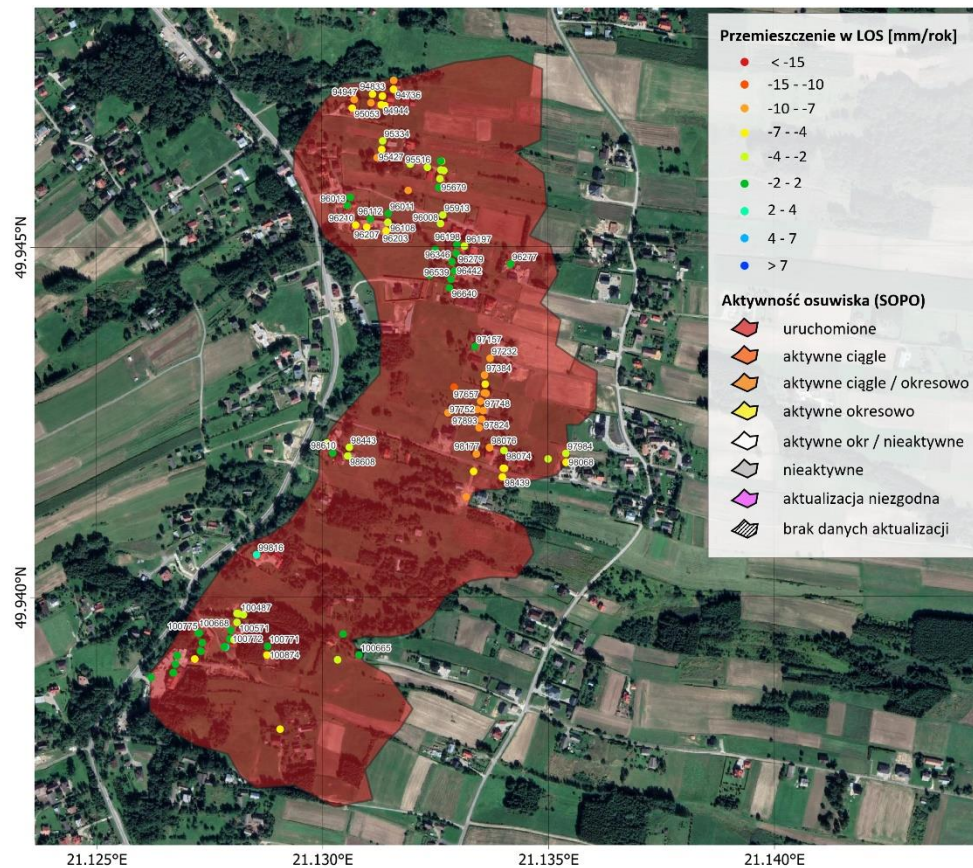
302014



57337



58097



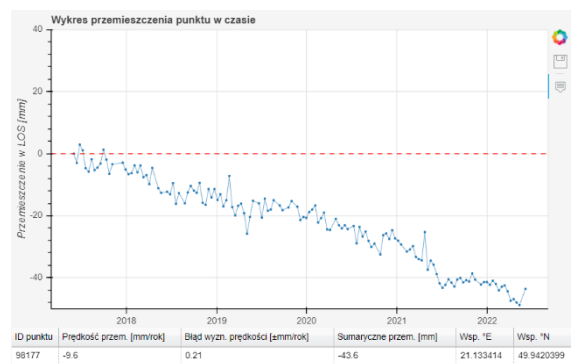
Rys. 30 Mapa osuwiska nr 54656 z punktami PS dla orbity descending



247357



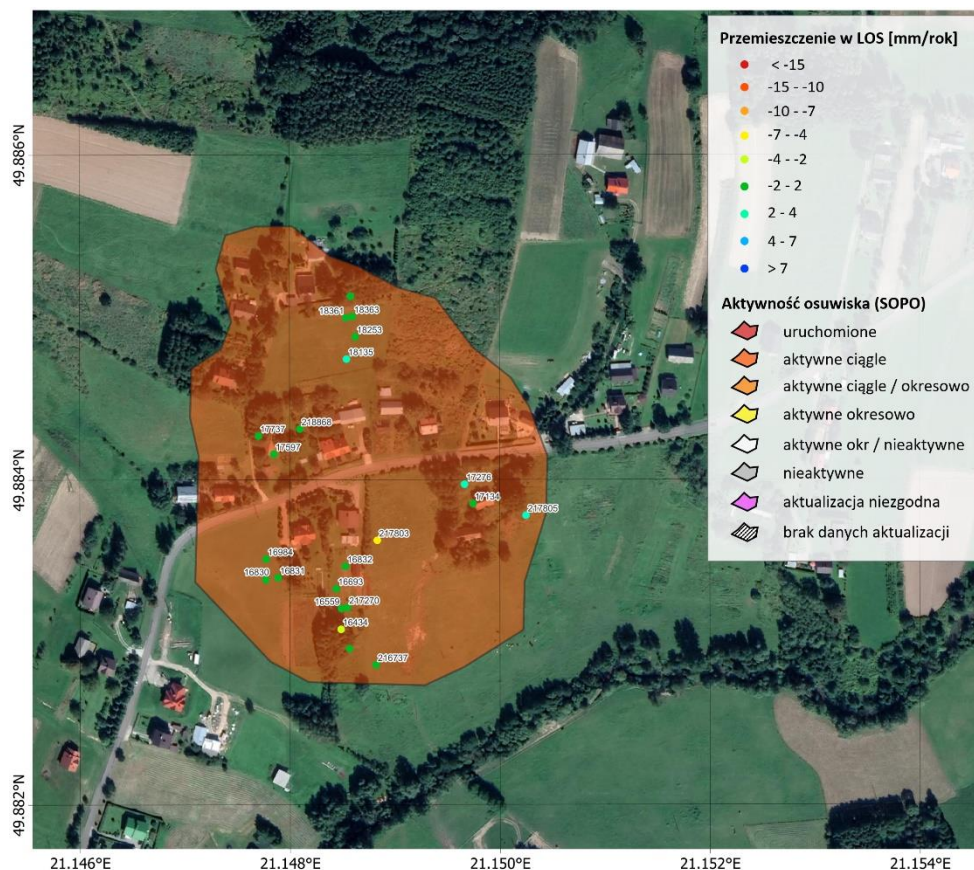
97384



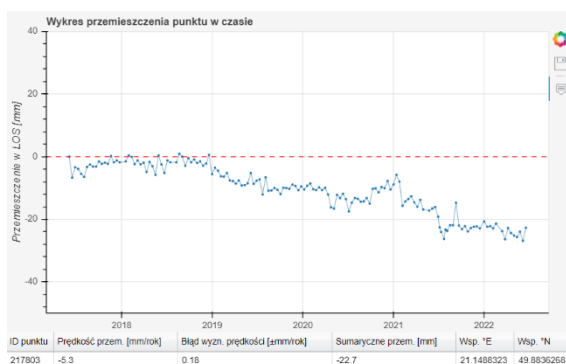
98177



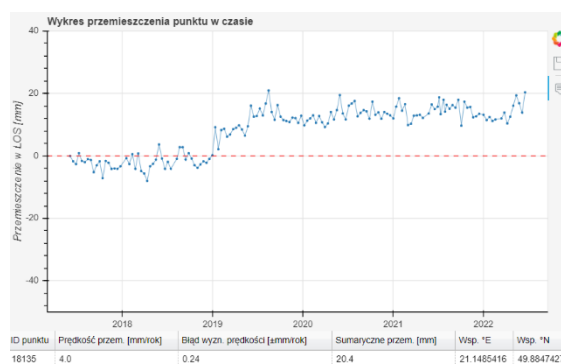
94946



Rys. 31 Mapa osuwiska nr 56379 z punktami PS dla orbity ascending



217803



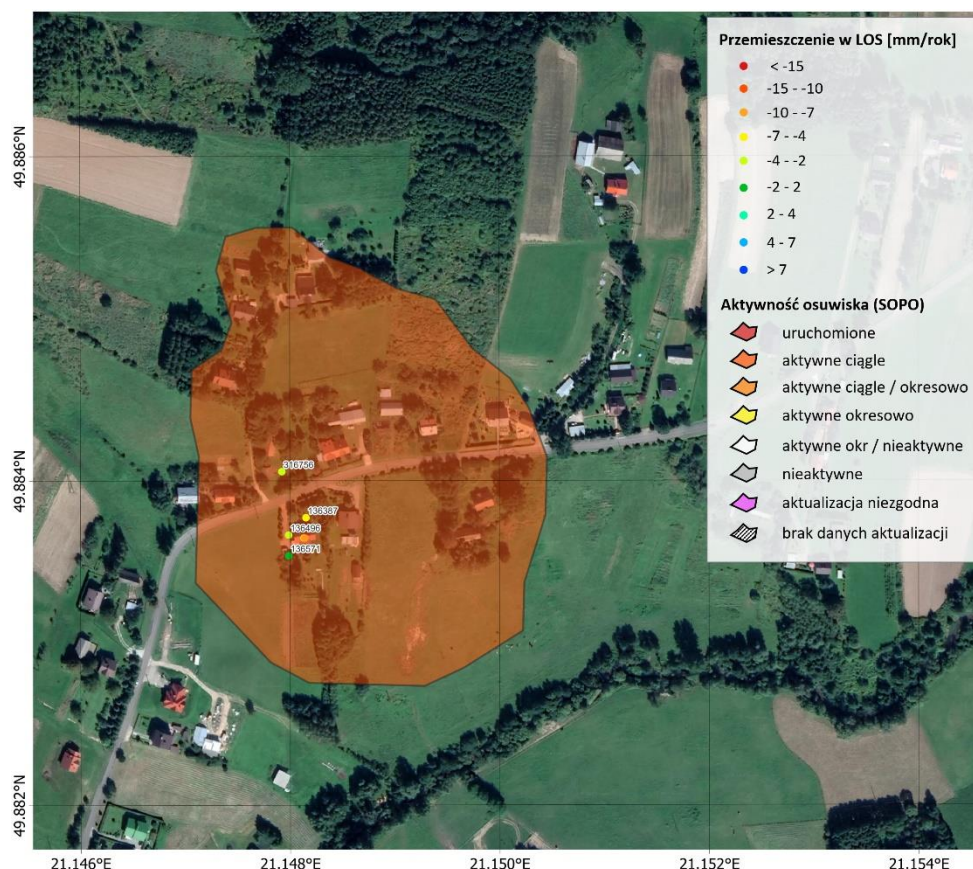
18135



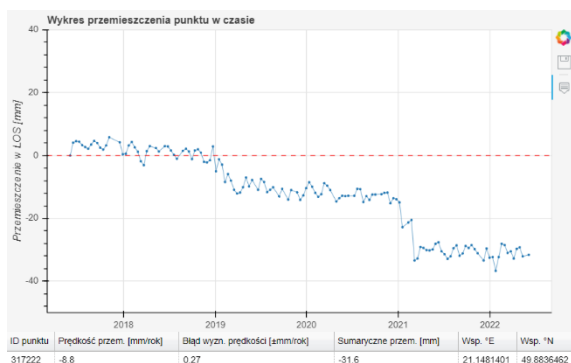
18363



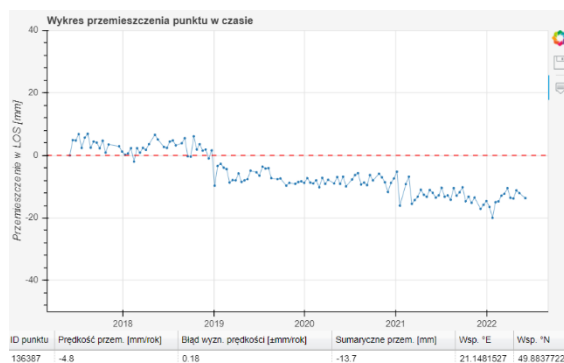
16831



Rys. 32 Mapa osuwiska nr 56379 z punktami PS dla orbity descending



317222



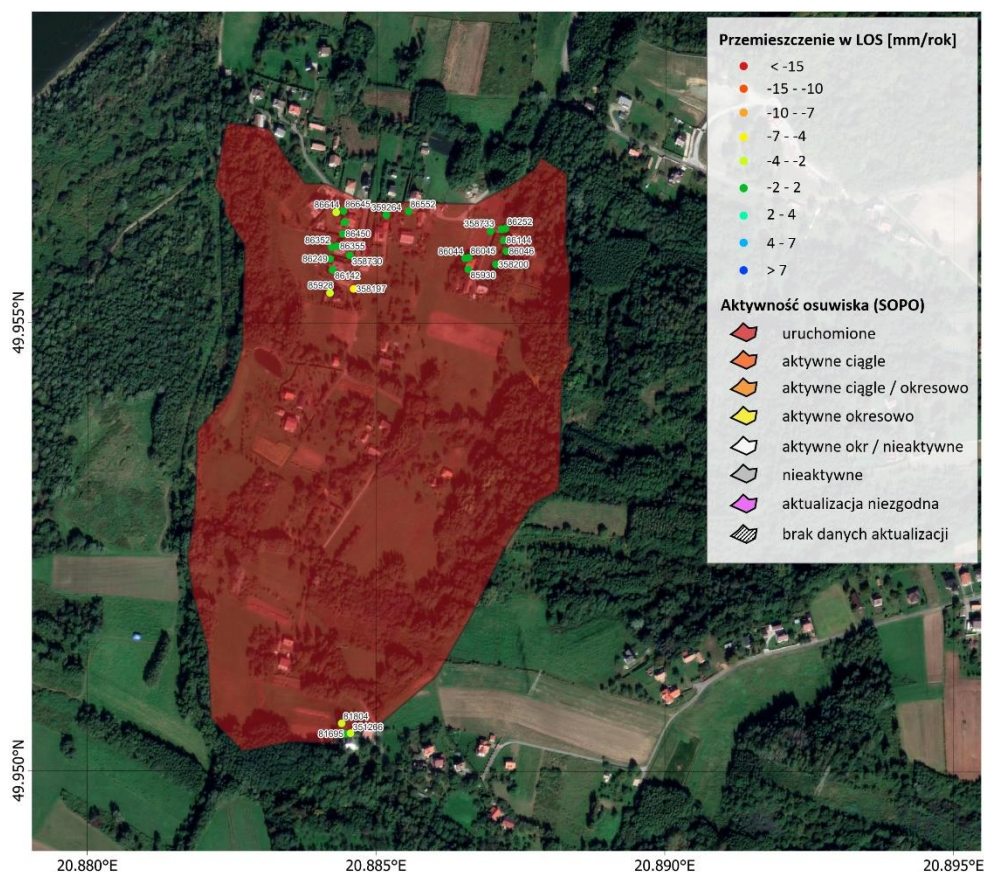
136387



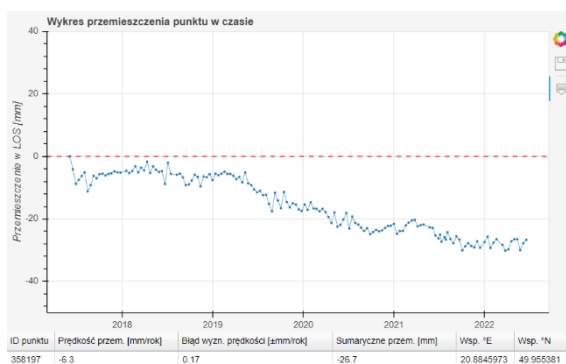
316756



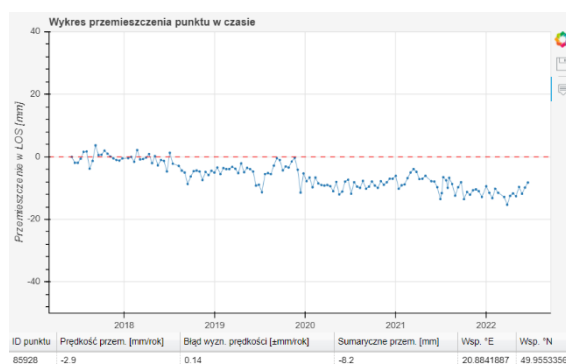
136495



Rys. 33 Mapa osuwiska nr 66631 z punktami PS dla orbity ascending



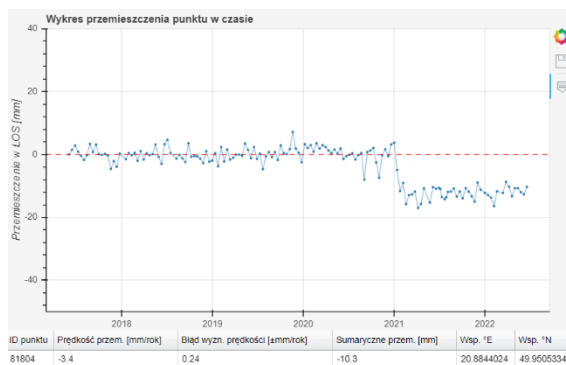
358197



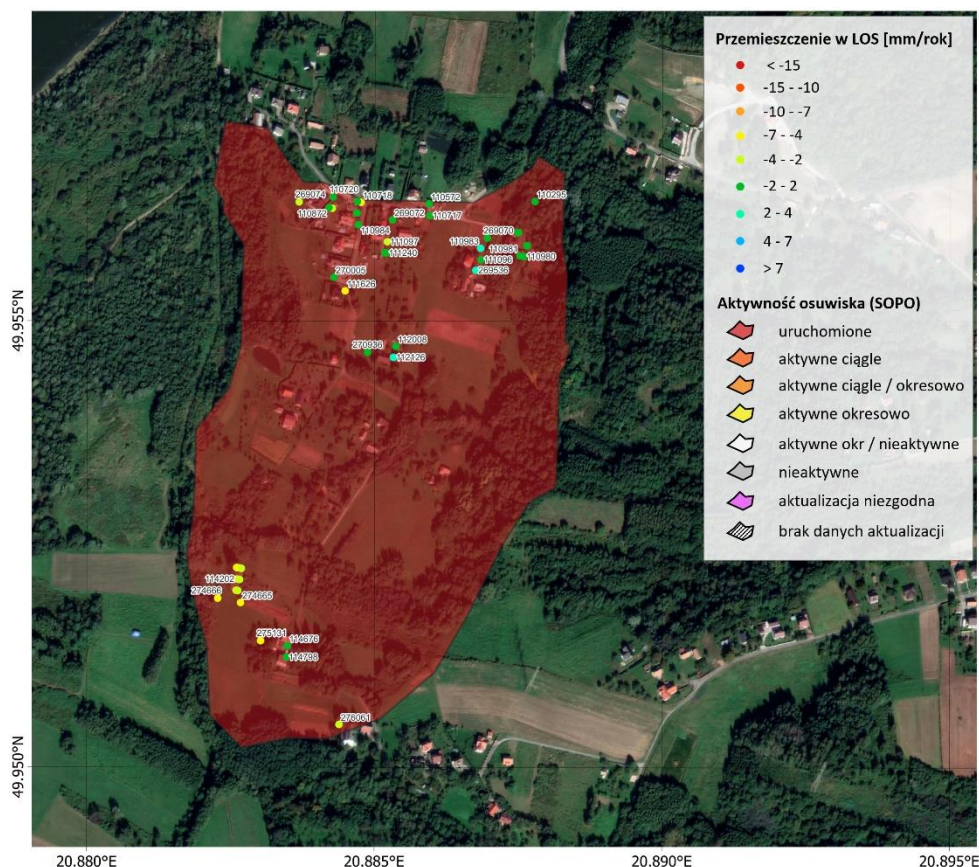
85928



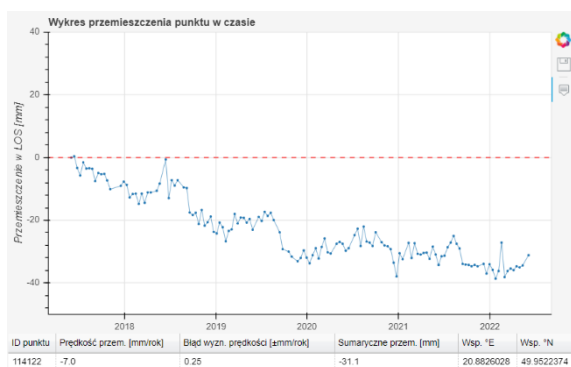
86144



81804



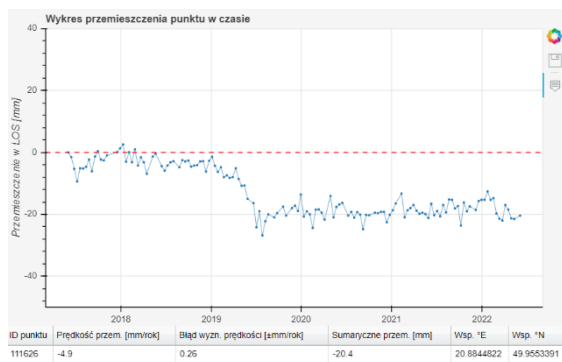
Rys. 34 Mapa osuwiska nr 66631 z punktami PS dla orbity descending



114122



114202



111626



269536

6

PODSUMOWANIE I OCENA WYNIKÓW

Poprzez przeprowadzone badanie dla wszystkich **17 analizowanych osuwisk** pomierzono **599 punktów PS** dla jednej orbity i **495 punktów** dla drugiej orbity.

Spośród 17 osuwisk konieczne było wyselekcjonowanie osuwisk, spełniających warunki odpowiedniej geometrii, aby analiza była w pełni funkcjonalna. Warunki te zostały spełnione dla **16 obszarów osuwiskowych (94 % całości)**.

Z kolei dla **14 osuwisk (82 %)** monitoring został prawidłowo wykonany dla obu orbit. Dla 10 z nich aktualizacja dała ten sam wynik (czyli tę samą klasę aktywności). Aktualizacja sprzeczna wystąpiła dla 4 osuwisk, jednak tylko dla 2 z nich (osuwisko 23747 oraz 23906) obliczone wartości przemieszczeń wzdłuż osuwiska różniły się zauważalnie.

Spis osuwisk i jego aktywności wraz z szacunkowymi prędkościami przemieszczeń został przedstawiony w tabeli poniżej.

Tab. 1. Spis aktywności monitorowanych osuwisk

Numer osuwiska	Prędkość LOS (orbita asc.) Imm/rok	Prędkość LOS (orbita desc.) Imm/rok	Szacowana prędkość osuwiska Imm/rok	Aktywność SOPO	Aktywność zaktualizowana	Intensywność ruchu (od stopnia 0 do stopnia 4)
13047	-5,10	-4,39	7,30	nieaktywne	uruchomione LUB nieaktywne	1 stopień
13057	-2,51	1,98	3,51	aktywne ciągłe	aktywne ciągłe / okresowo	0 stopień
15826	1,45	-1,96	2,90	aktywne okresowo	aktywne okresowo / nieaktywne	0 stopień
16457	-5,07	1,68	6,97	aktywne okresowo	uruchomione LUB aktywne okresowo / nieaktywne	1 stopień
16458	4,89	-8,21	15,33	aktywne ciągłe	aktywne ciągłe	3 stopień
16468	-3,37	-5,02	7,22	aktywne okresowo	aktywne okresowo / nieaktywne	1 stopień
16473	4,50	7,15	9,08	aktywne okresowo	uruchomione	2 stopień
17324	-6,14	-	17,48	aktywne ciągłe	aktywne ciągłe	4 stopień
23670	-3,27	-4,46	5,80	aktywne ciągłe	aktywne ciągłe / okresowo	0 stopień
23747	-6,33	2,84	10,39	aktywne ciągłe	aktywne ciągłe LUB aktywne ciągłe / okresowo	4 stopień LUB 0 stopień

23906	-4,43	-13,96	10,96	aktywne ciągle	aktywne ciągle / okresowo LUB aktywne ciągle	4 stopień LUB 0 stopień
23908	-3,00	-4,24	4,76	aktywne okresowo	aktywne okresowo / nieaktywne	0 stopień
27691	3,69	-4,60	9,01	aktywne ciągle	aktywne ciągle	1 stopień
54656	6,60	-9,71	11,52	aktywne okresowo	uruchomione	2 stopień
56379	-	-6,17	11,73	aktywne ciągle	aktywne ciągle	2 stopień
66631	-4,56	-6,42	7,56	aktywne okresowo	uruchomione	1 stopień
23955	-	-	-	aktywne ciągle	-	-

Spośród **16 osuwisk**, dla których przeprowadzono skuteczny monitoring,:

- dla **4 obszarów** zaktualizowana aktywność nie różni się od tej zdefiniowanej w SOPO,
- dla **8 obszarów** nastąpiła aktualizacja różniąca się od tej z SOPO,
- dla **4 obszaru** aktualizacja dała sprzeczny wynik.

Spośród **8 osuwisk**, dla których zaktualizowana aktywność różniła się od aktywności z SOPO, dla **3 obszarów** osuwisko zdefiniowano w wyniku monitoringu jako **osuwiska uruchomione**. Są to obszary: **16473** w Szczepanowicach, **54656** w Zalasowej oraz **66631** w Błoniach.

Ponadto dla osuwisk o numerach **13047** oraz **16457** uzyskano różne klasy aktywności dla dwóch orbit, a z jednej z nich uzyskano wynik klasy również jako **uruchomione**.

W kwestii intensywności ruchów osuwiskowych, spośród monitorowanych 16 osuwisk:

- dla 1 osuwiska (nr 17324) zdefiniowano przemieszczenia jako prędkości **4 stopnia**,
- dla 1 osuwiska (nr 16458) zdefiniowano przemieszczenia jako prędkości **3 stopnia**,
- dla 3 osuwisk (nr 16473, 54656, 56379) zdefiniowano przemieszczenia jako prędkości **2 stopnia**,
- dla 5 osuwisk zdefiniowano przemieszczenia jako prędkości **1 stopnia**,
- dla 4 osuwisk zdefiniowano przemieszczenia jako prędkości **0 stopnia**.

Ponadto dla 2 osuwisk (tj. 23906 oraz 23747) uzyskano sprzeczne klasy intensywności ruchów. Sprzeczność ta w obu przypadkach polega na przypisaniu stopnia 0 dla prędkości przemieszczeń z wyników z jednej orbity, a także przypisaniu stopnia 4 dla prędkości przemieszczeń z wyników z drugiej orbity.

Szczegółowe prędkości przemieszczeń dla każdego punktu pomiarowego analizowanego na każdym zobrażowaniu satelitarnym można zobaczyć w załączonym pliku XLSX oraz pliku SHP. W plikach .html można również zobaczyć obliczone punkty PS na interaktywnej mapie wraz z wykresami przemieszczeń dla każdego punktu, po kliknięciu na dany punkt.