

MONITORING POWIERZCHNIOWY OSUWISK ZBIORCZY

dla powiatu strzyżowskiego

WYKONANY METODĄ
INTERFEROMETRII RADAROWEJ



RAPORT

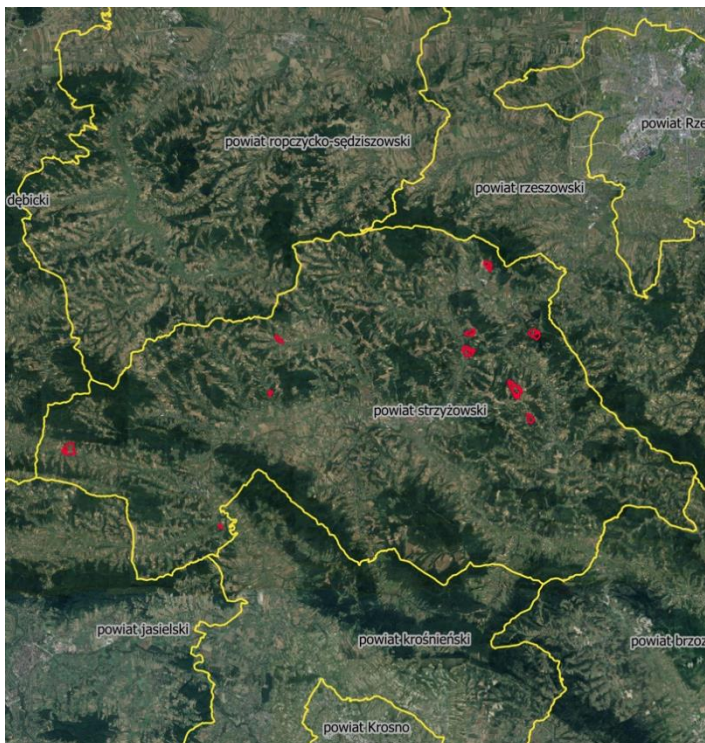
Kraków, 01.02.2022

Zlecniodawca:
Starostwo Powiatowe
w Strzyżowie

1

OBSZAR BADAŃ

Powiat strzyżowski znajduje się w województwie podkarpackim. Obszar badań obejmował **24 osuwiska** o łącznej powierzchni **ok. 2 km²**. Rzędne terenu objętego ruchami masowymi w najniższym jego punkcie wynoszą 220 m n.p.m. (wieś Zaborów), zaś najwyżżej położony punkt badanego obszaru wznosi się na wysokość około 400 m n.p.m. we wsi Połomia Zasięg współrzędnych geograficznych analizowanego obszaru to: 49°52'00"N - 49°57'10"N oraz 21°30'00"E - 21°53'40"E. Monitorowane osuwiska zostały przedstawione na rysunku poglądowym obok.



Spośród 24 osuwisk, **12** zostało zidentyfikowanych w ramach projektu SOPO jako **aktywne ciągle**, **7** jako **aktywne okresowo**, a **5** jako **nieaktywne**. Zasięg osuwiska 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 **7-letniego** (lata **2014-2021**). Analiza została wykonana na podstawie analizy 363 zobrazowań satelitarnych pochodzących z satelitów Sentinel-1, metodą interferometrii radarowej, techniką IPTA

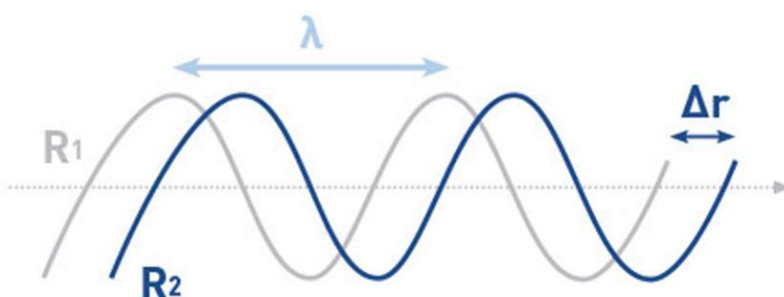
Raport ten przedstawia szczegółową analizę zbiorczą dla wszystkich monitorowanych osuwisk.

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).

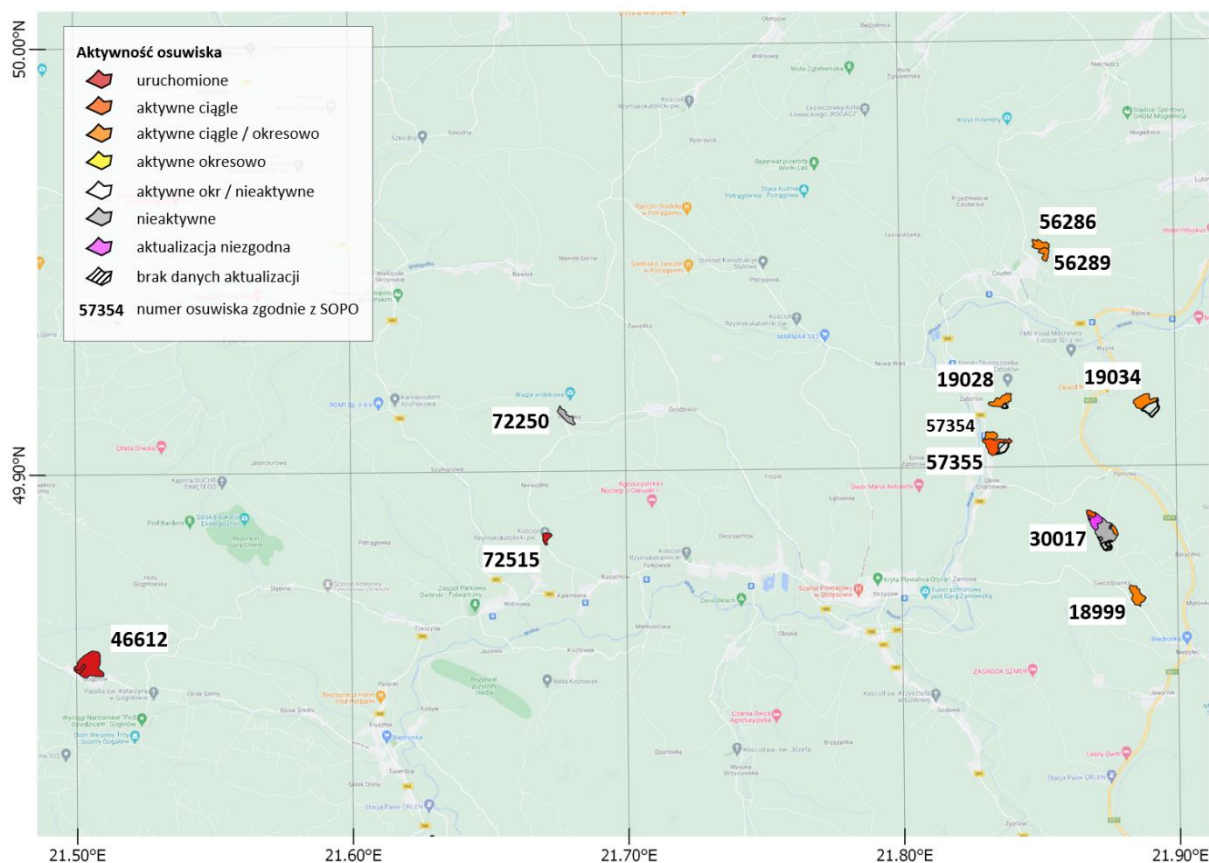
Techniki InSAR wykorzystywane są od wczesnych lat 90-tych XX wieku (Pratti C., et al., 1994; Hanssen R., 1999; Ferretti A., et al., 2007). Algorytmy obliczeń były i są udoskonalane przez wybitnych naukowców z całego świata. Początkiem XXI wieku powstały pierwsze analizy PS (Ferretti A., et al., 2000, 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.

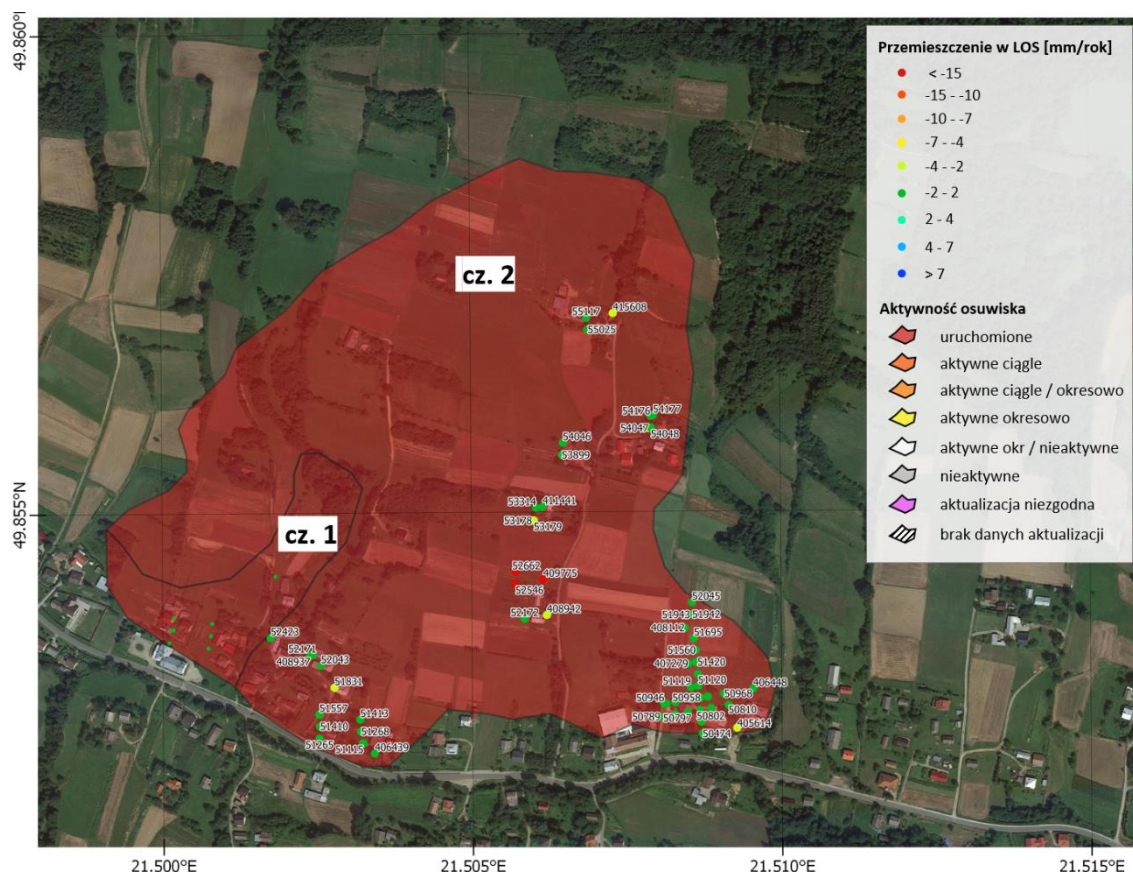
3

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



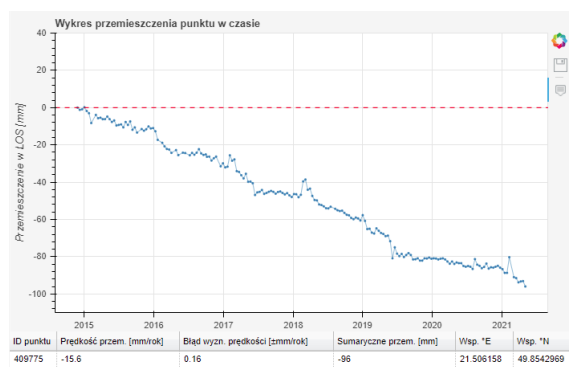
Rys. 3 Mapa osuwiska nr 46612 z punktami PS dla orbity ascending



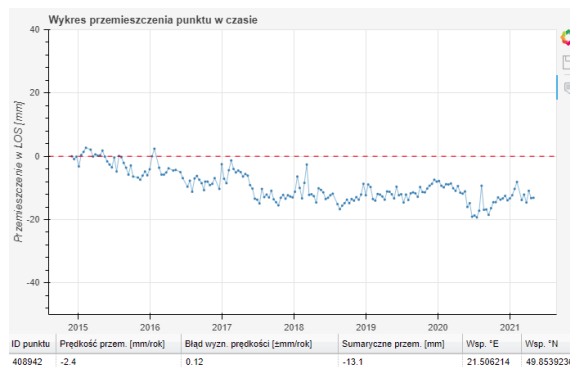
52662



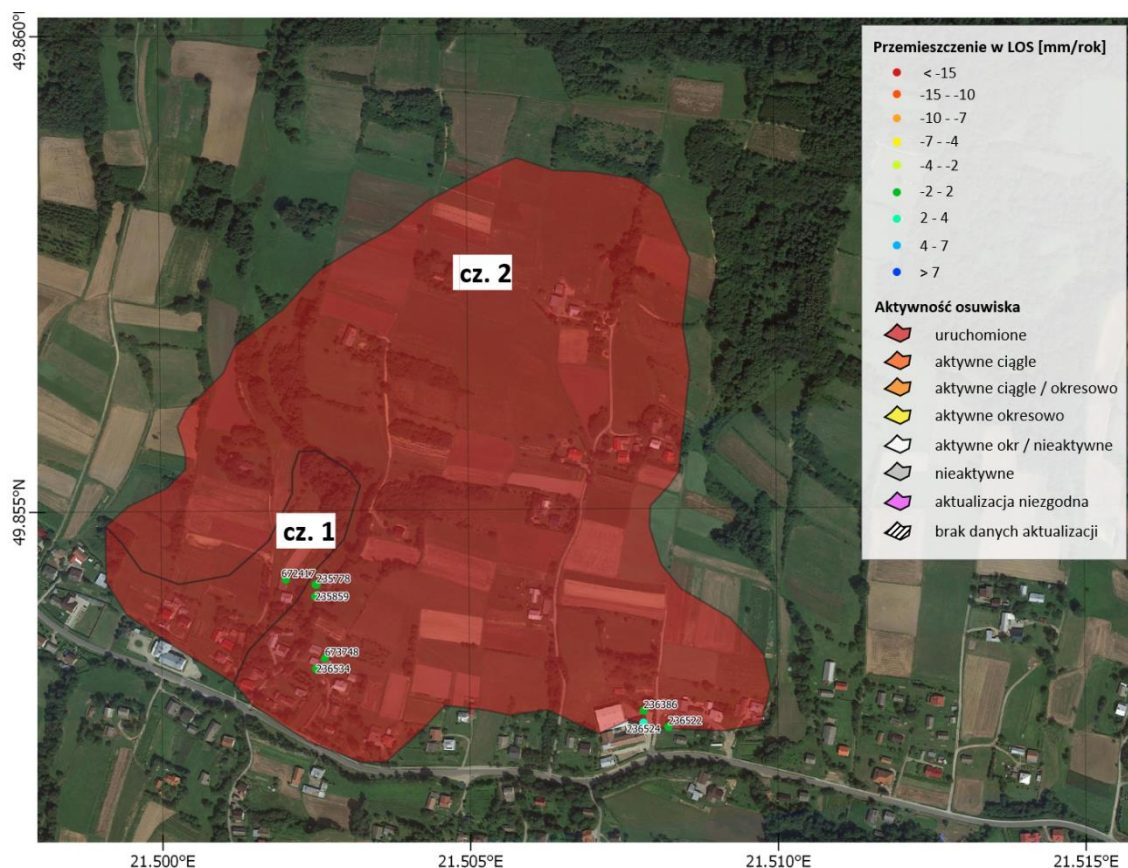
52546



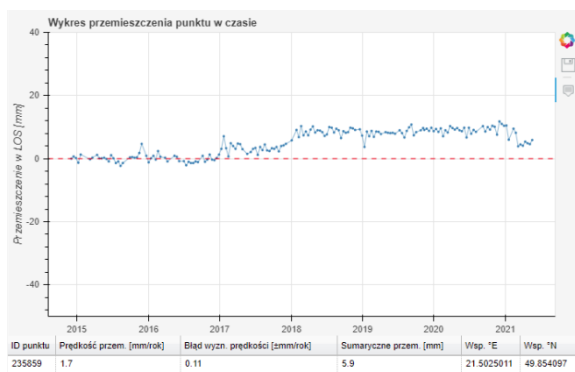
409225



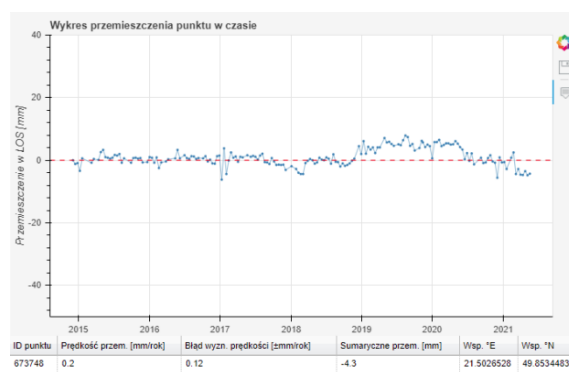
408942



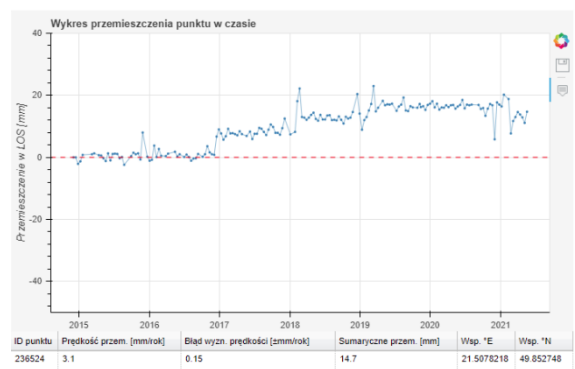
Rys. 4 Mapa osuwiska nr 46612 z punktami PS dla orbity descending



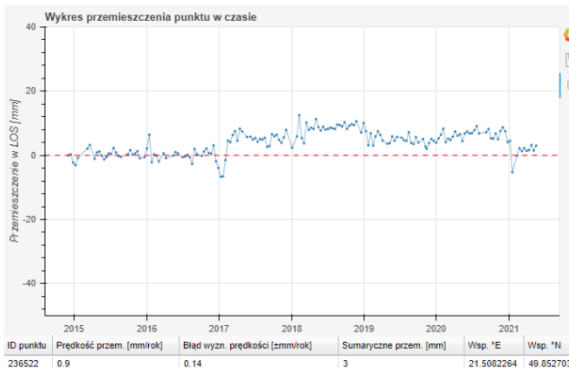
235859



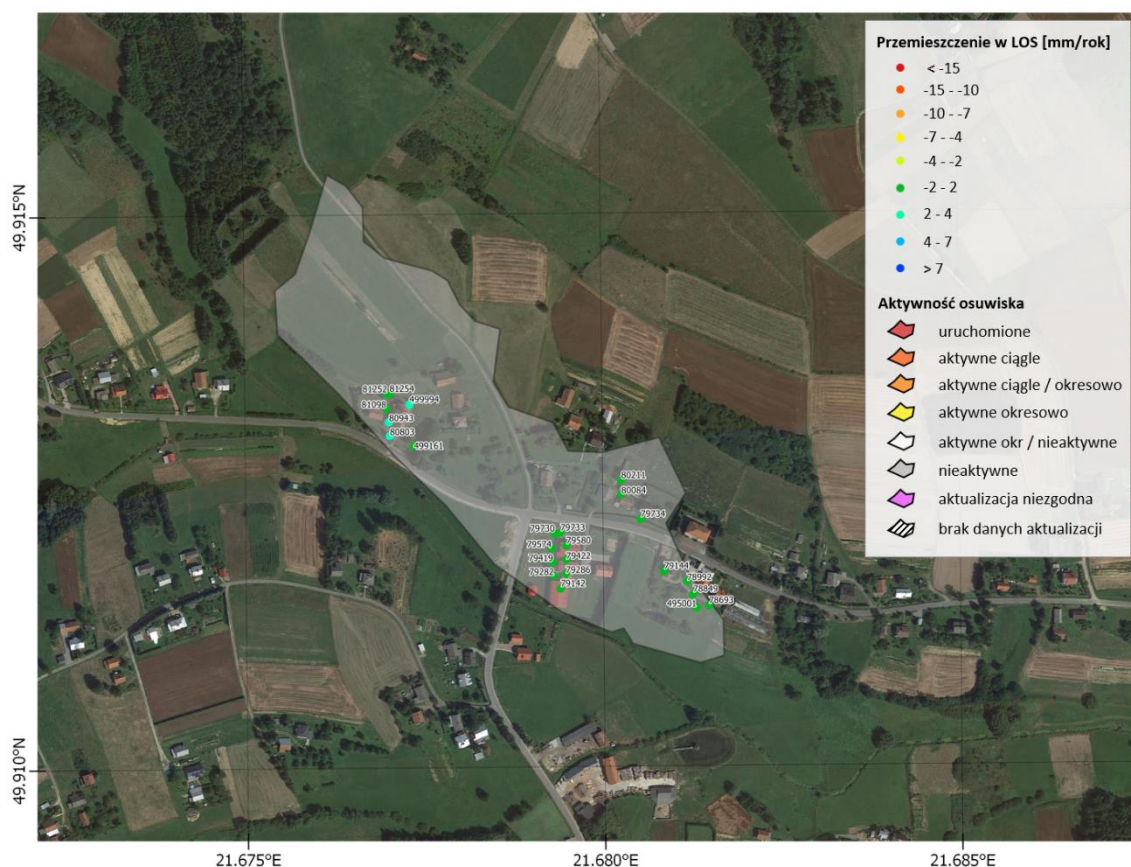
673748



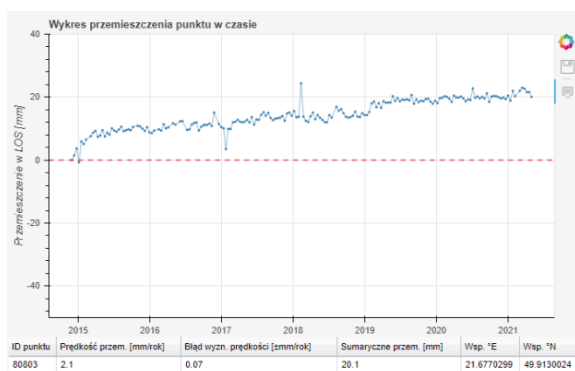
236524



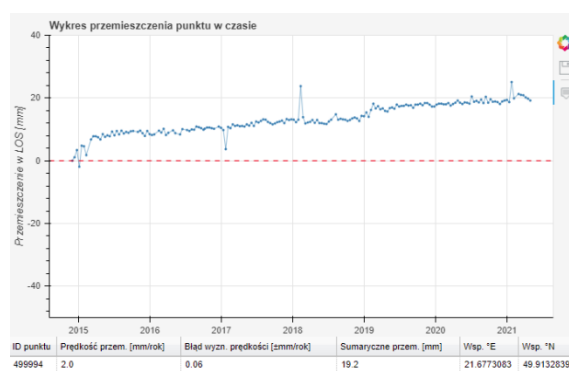
236522



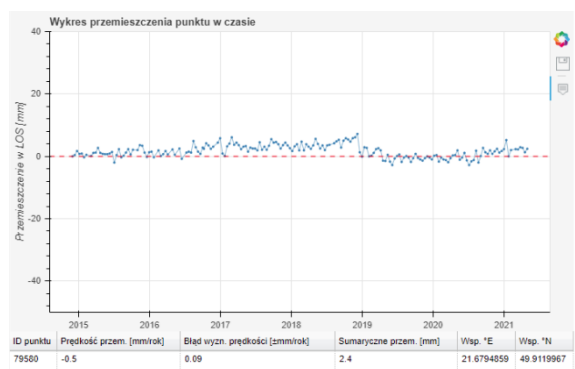
Rys. 5 Mapa osuwiska nr 72250 z punktami PS dla orbity ascending



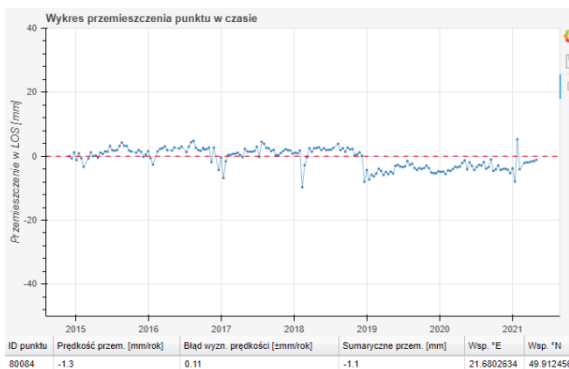
80803



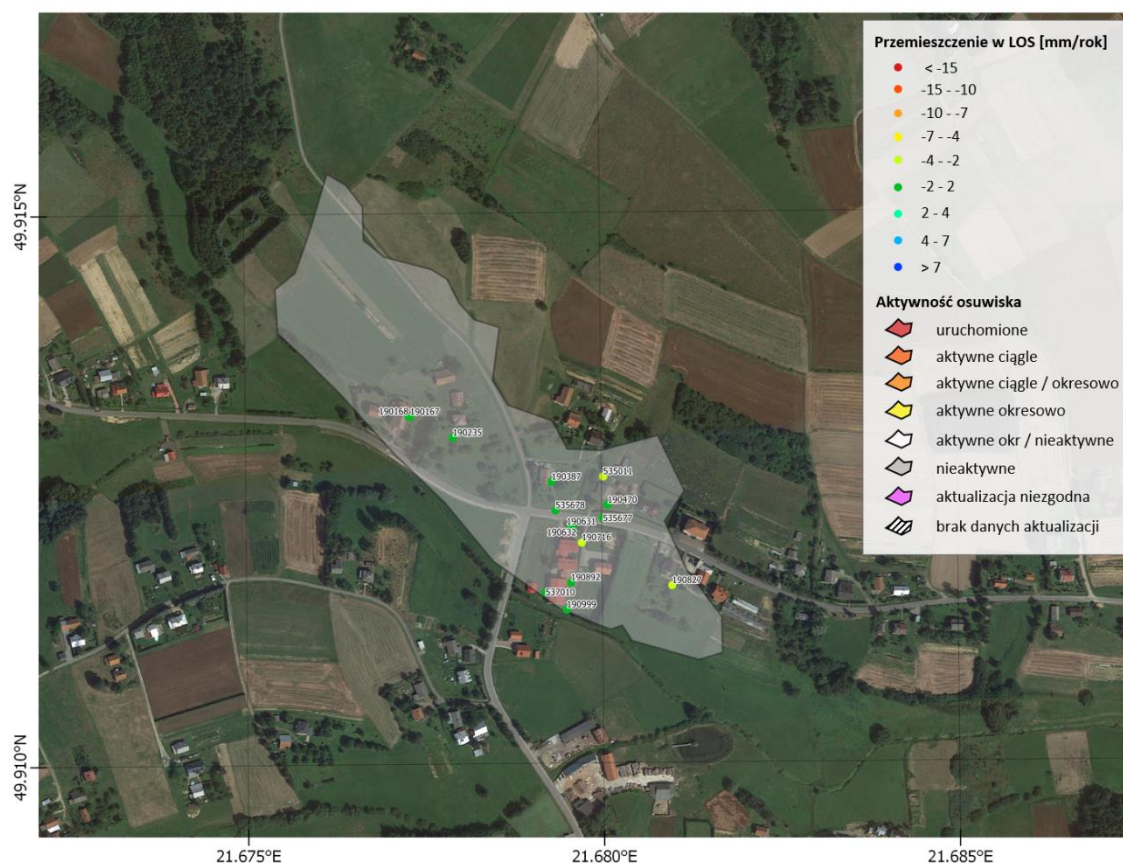
499994



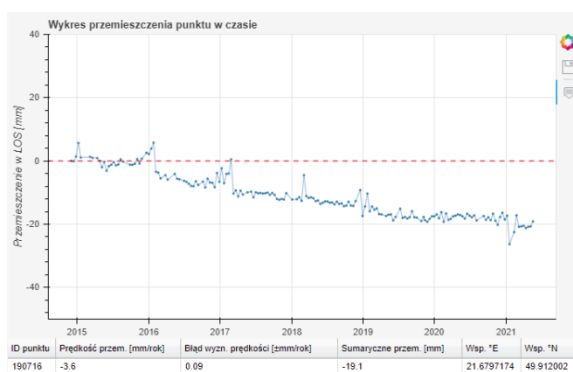
79580



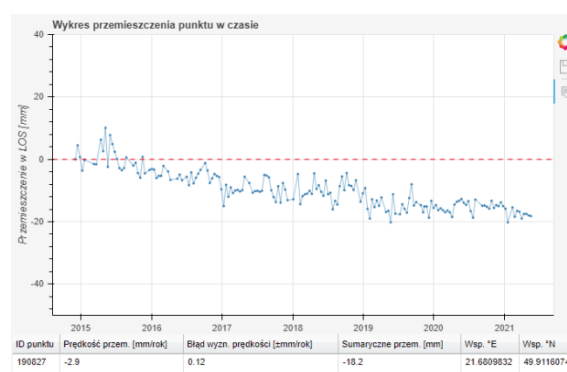
80084



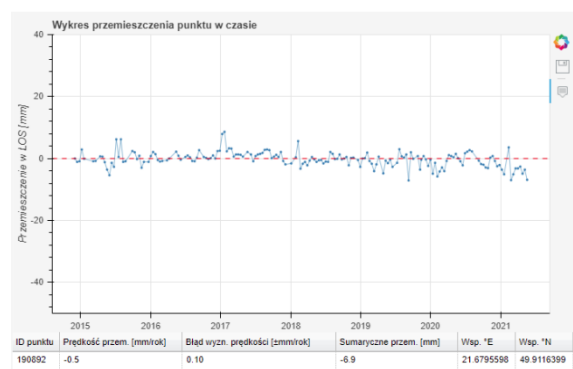
Rys. 6 Mapa osuwiska nr 72250 z punktami PS dla orbity descending



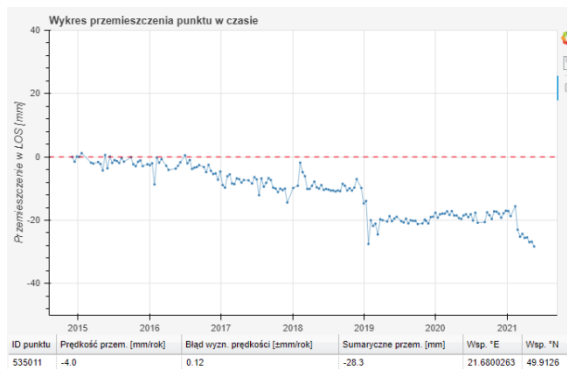
190716



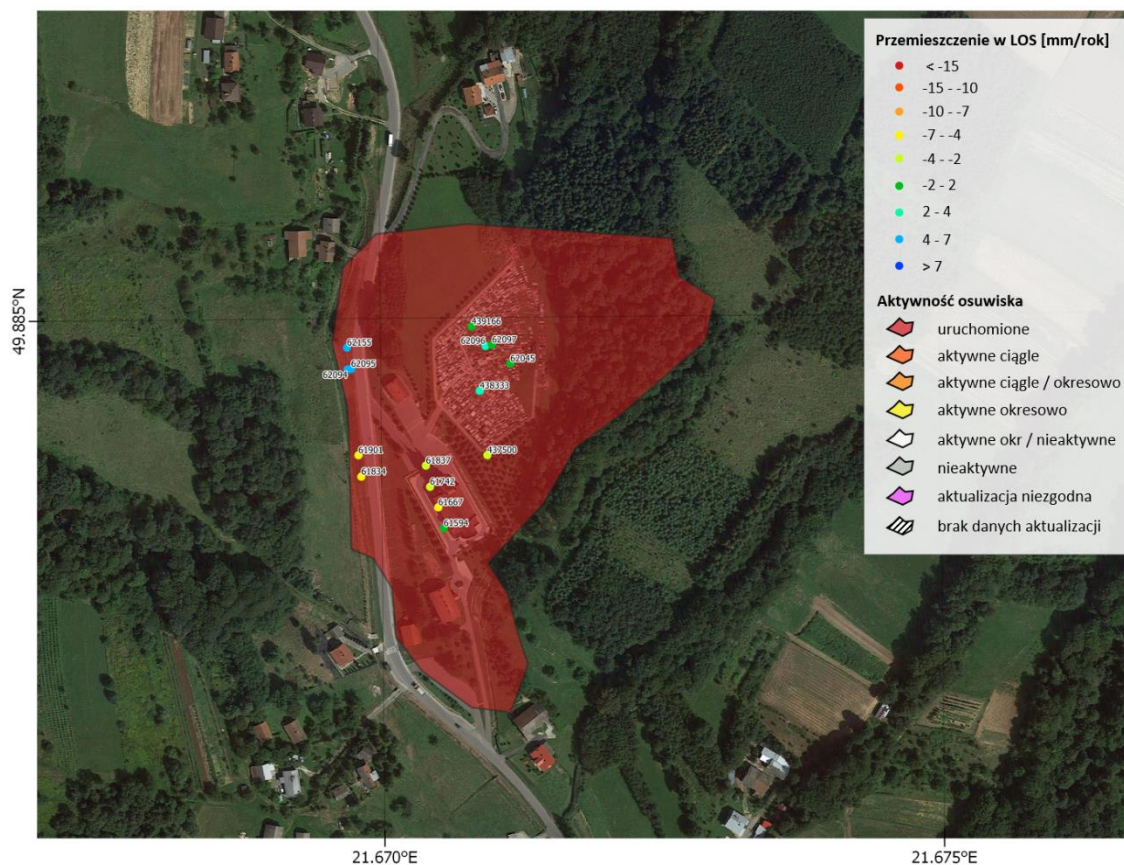
190827



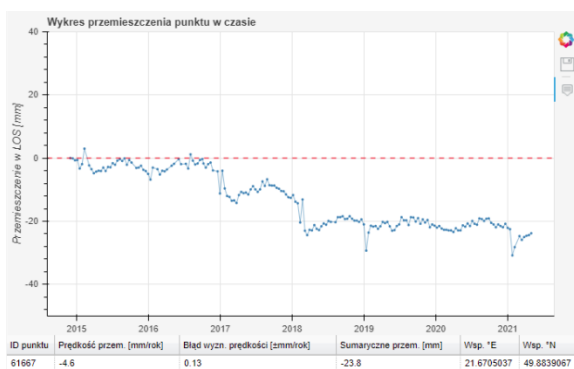
190892



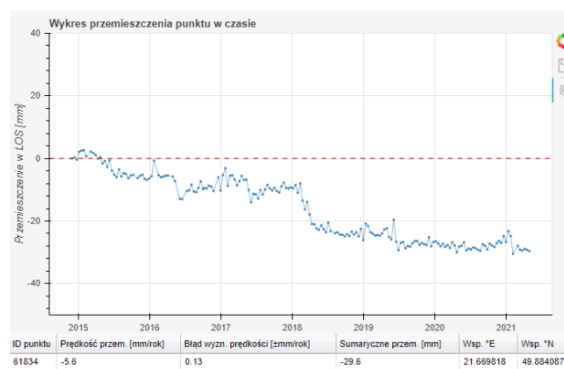
535011



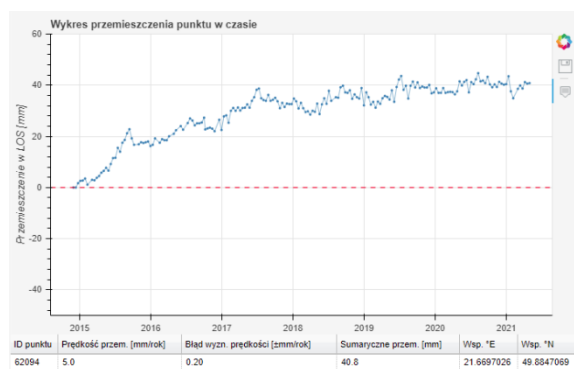
Rys. 7 Mapa osuwiska nr 72515 z punktami PS dla orbity ascending



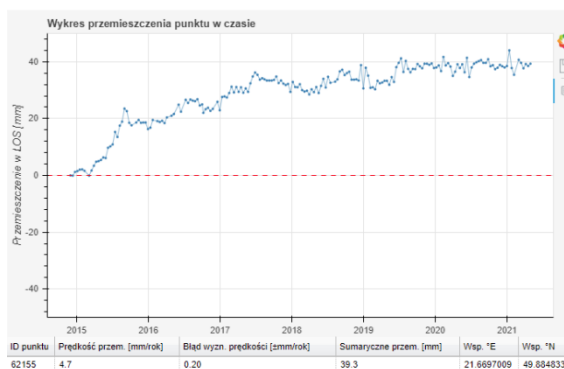
61667



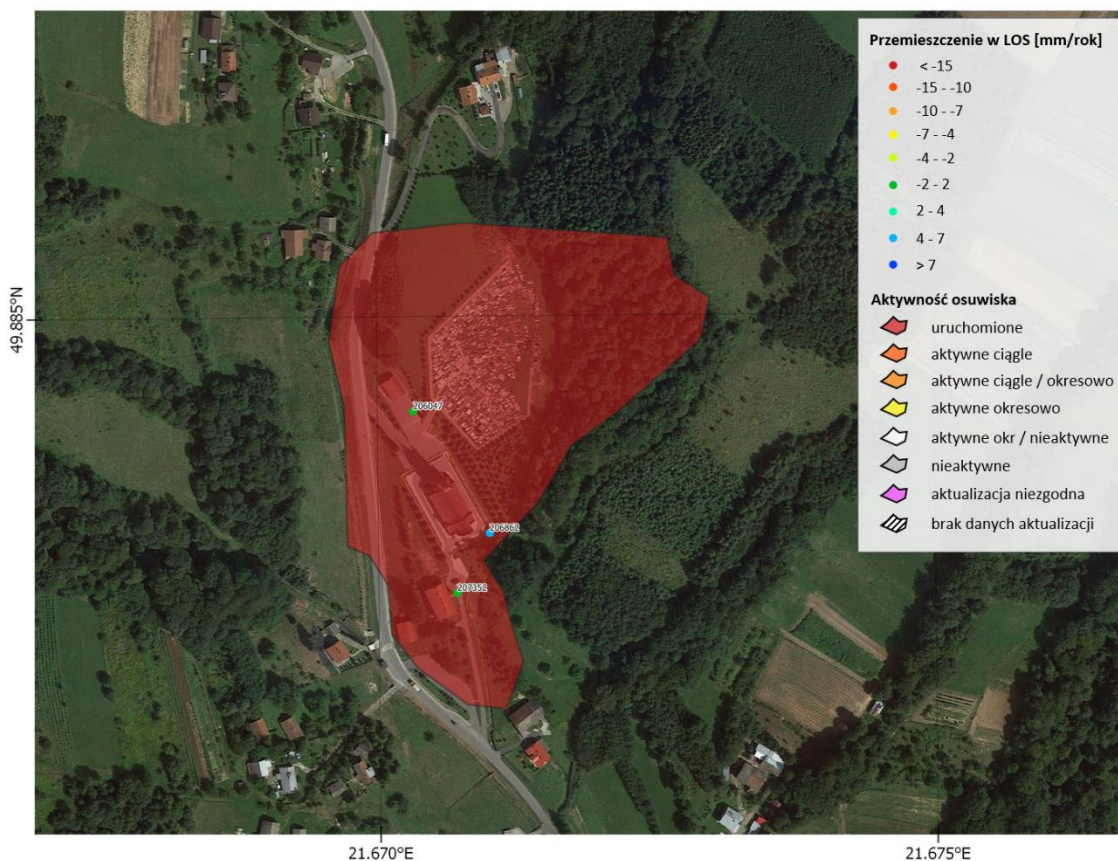
61834



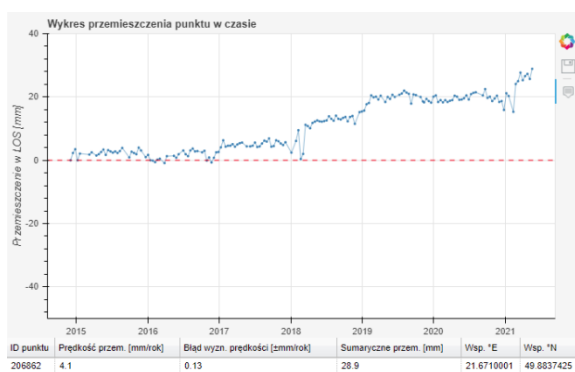
62094



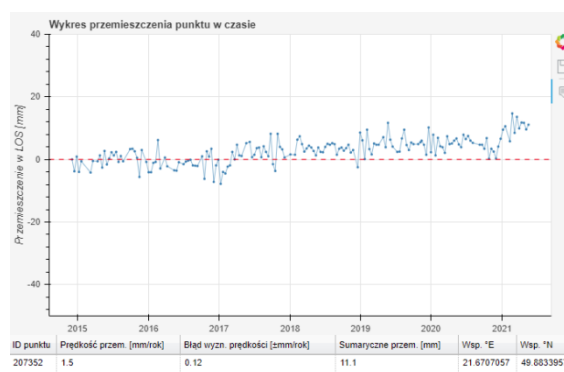
62155



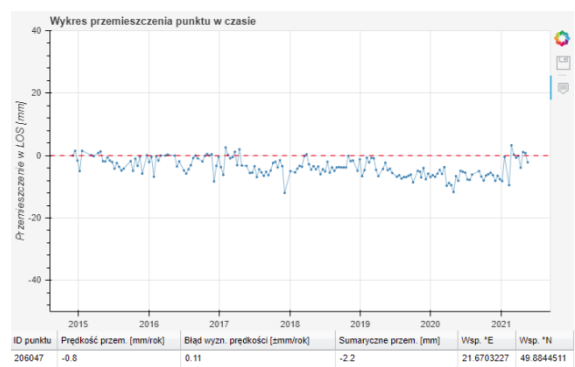
Rys. 8 Mapa osuwiska nr 72515 z punktami PS dla orbity descending



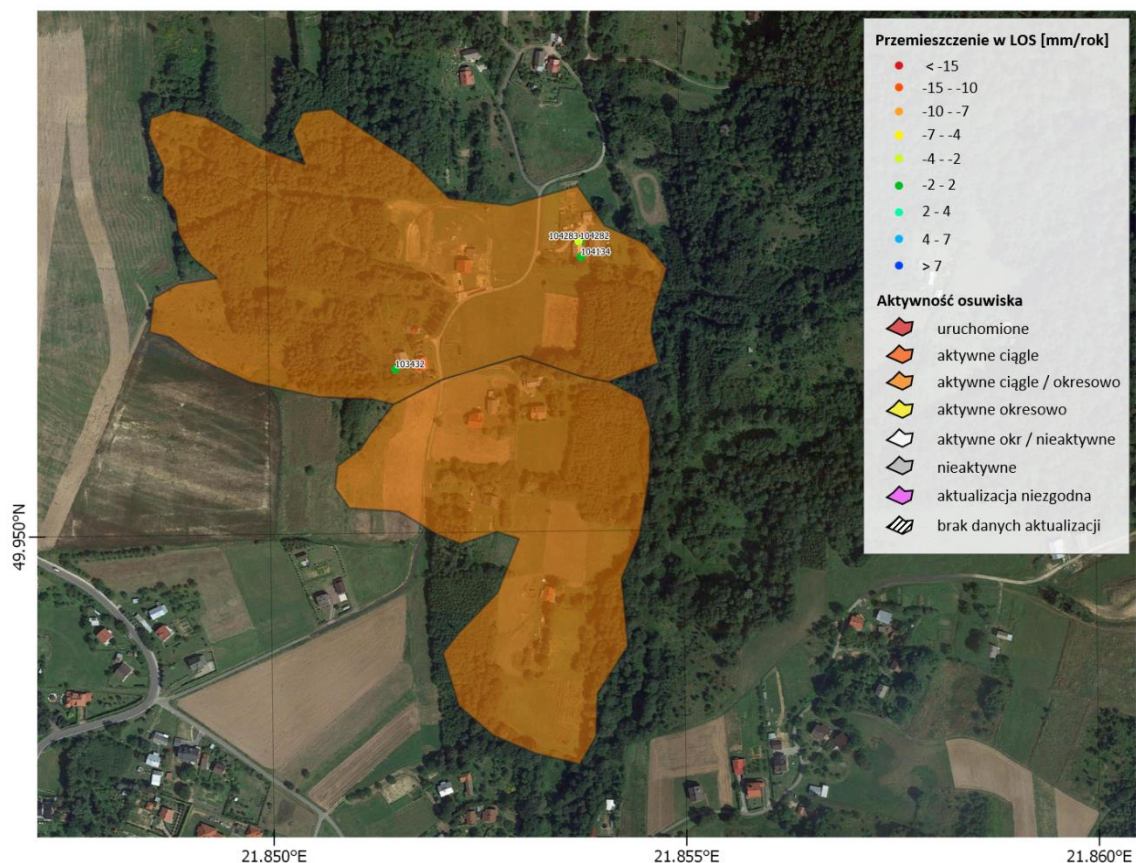
206862



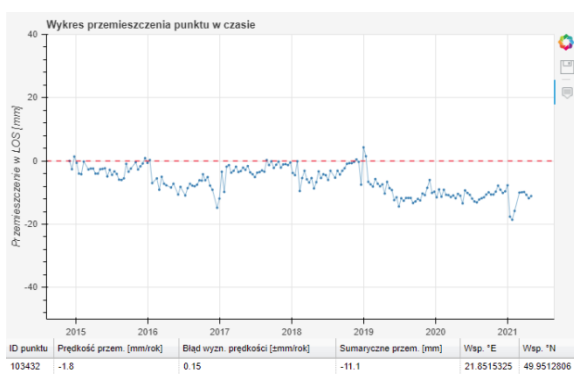
207352



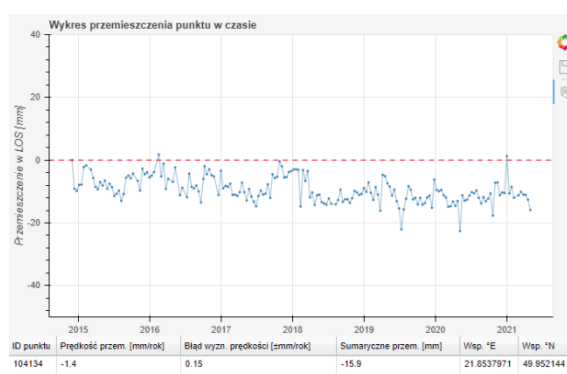
206047



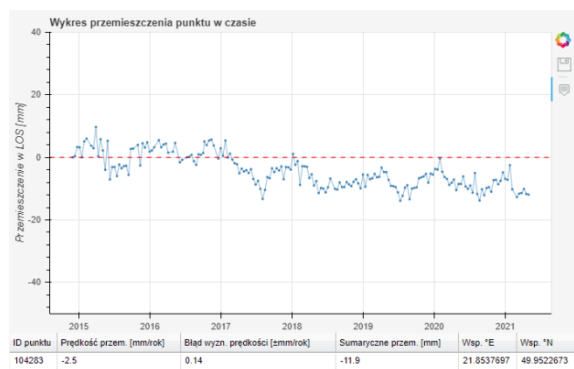
Rys. 9 Mapa osuwisk nr (od góry) 56286 oraz 56289 z punktami PS dla orbity ascending



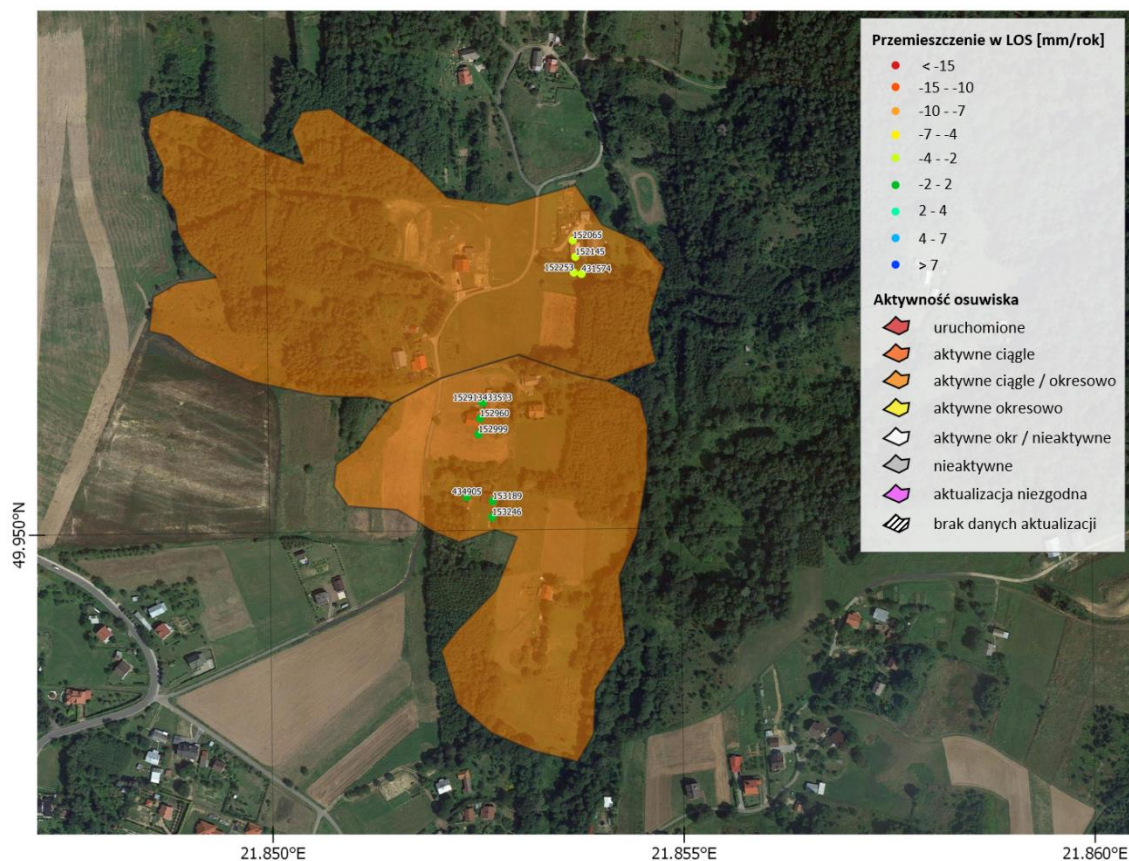
103432



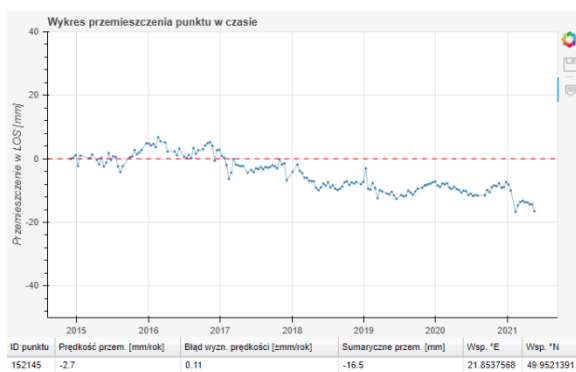
104134



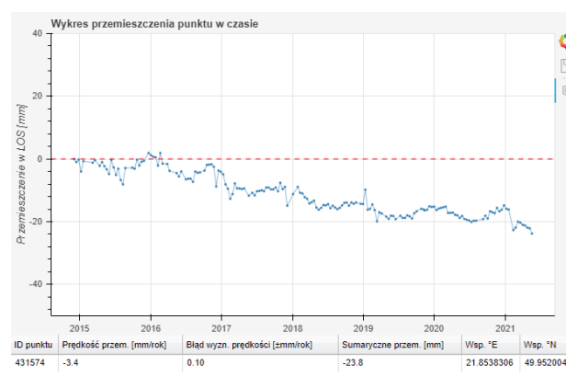
104283



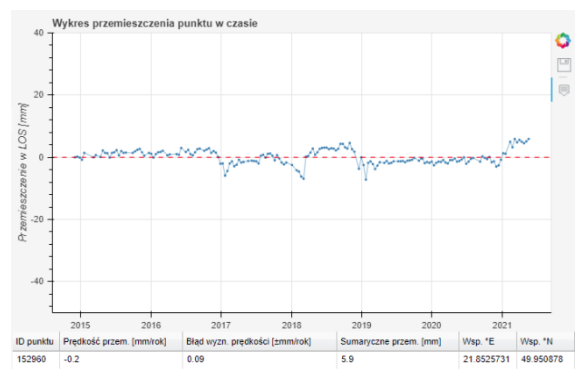
Rys. 10 Mapa osuwiska nr (od góry) 56286 oraz 56289 z punktami PS dla orbity descending



152145



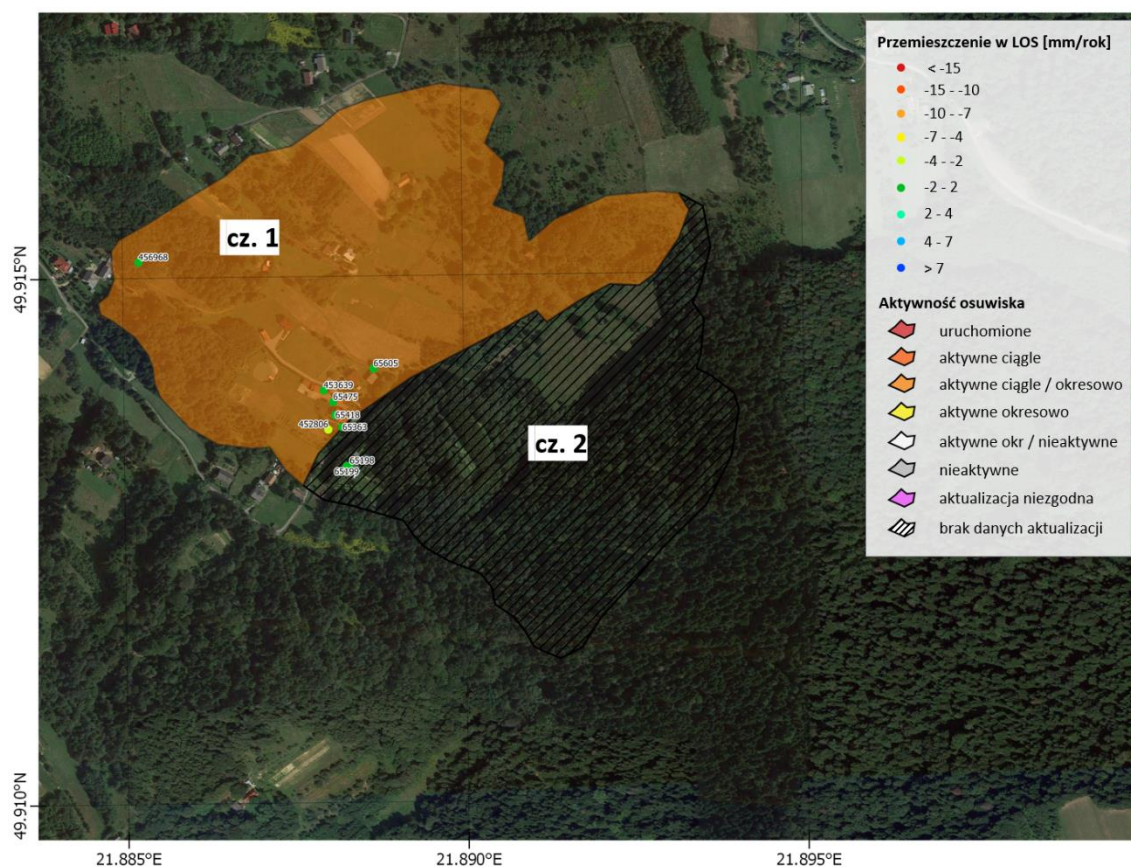
431574



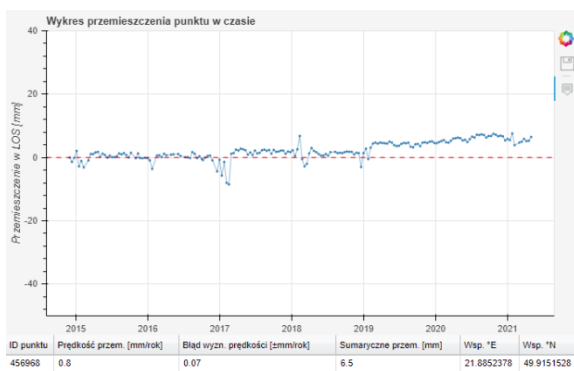
152960



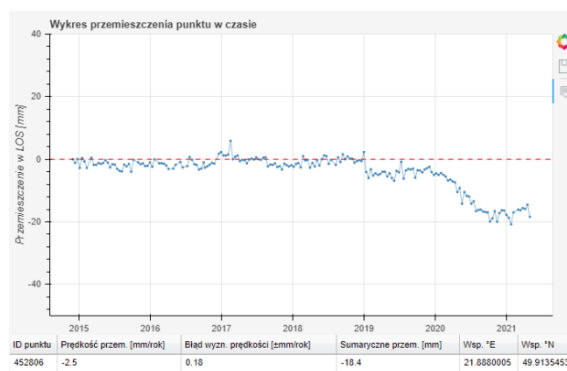
153246



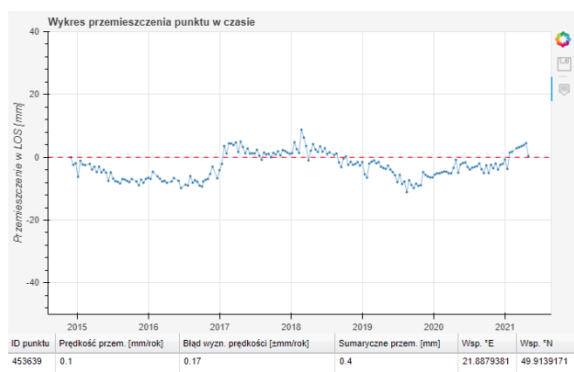
Rys. 11 Mapa osuwiska nr 19034 z punktami PS dla orbity ascending



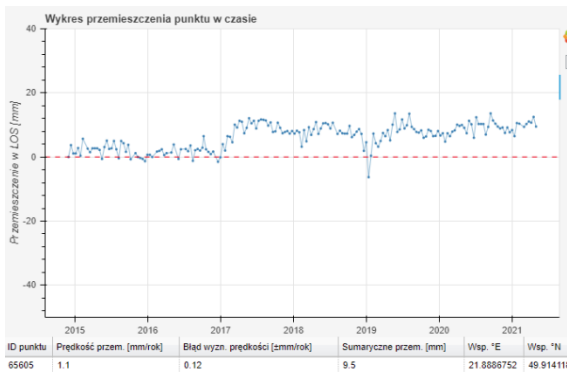
456968



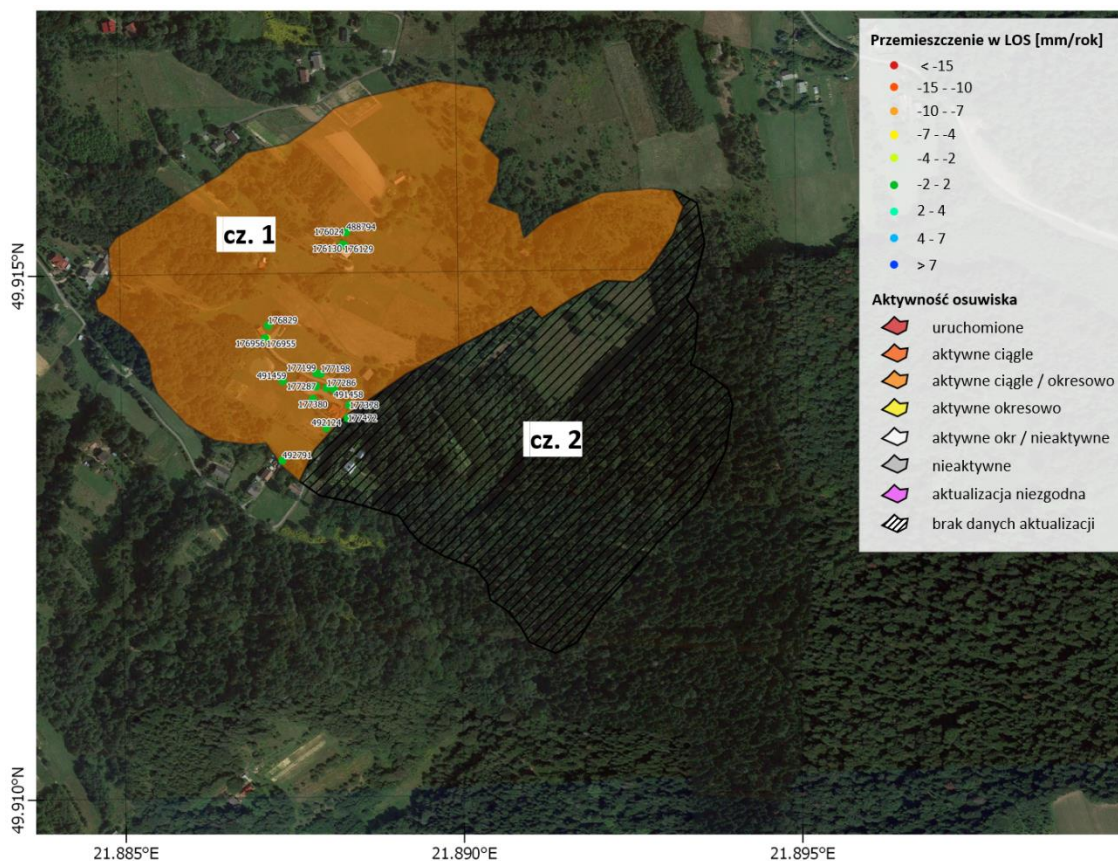
452806



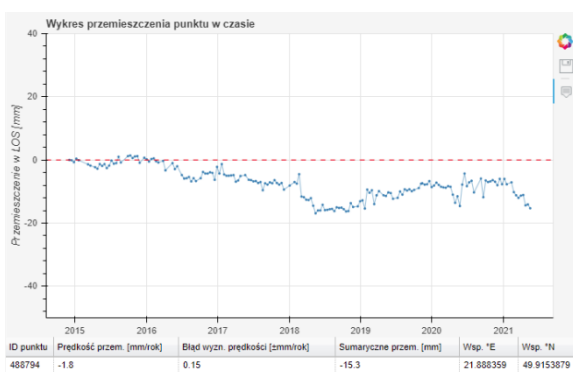
453639



65605



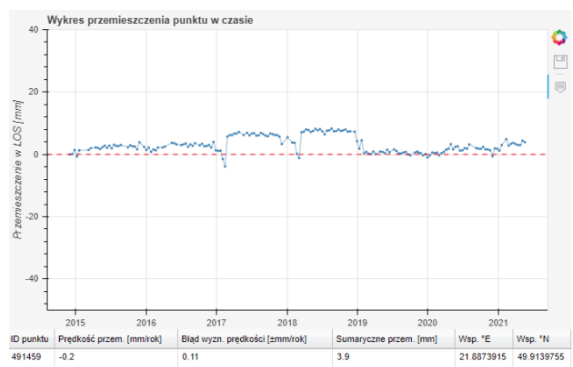
Rys. 12 Mapa osuwiska nr 19034 z punktami PS dla orbity descending



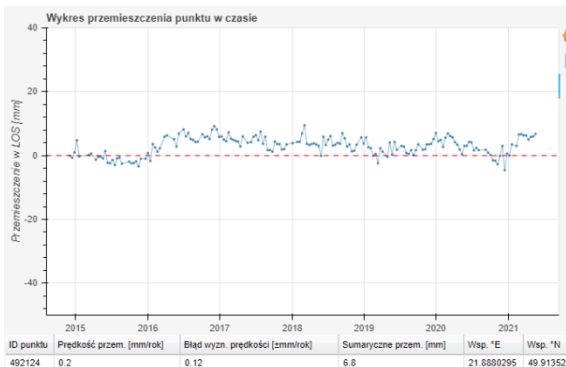
488794



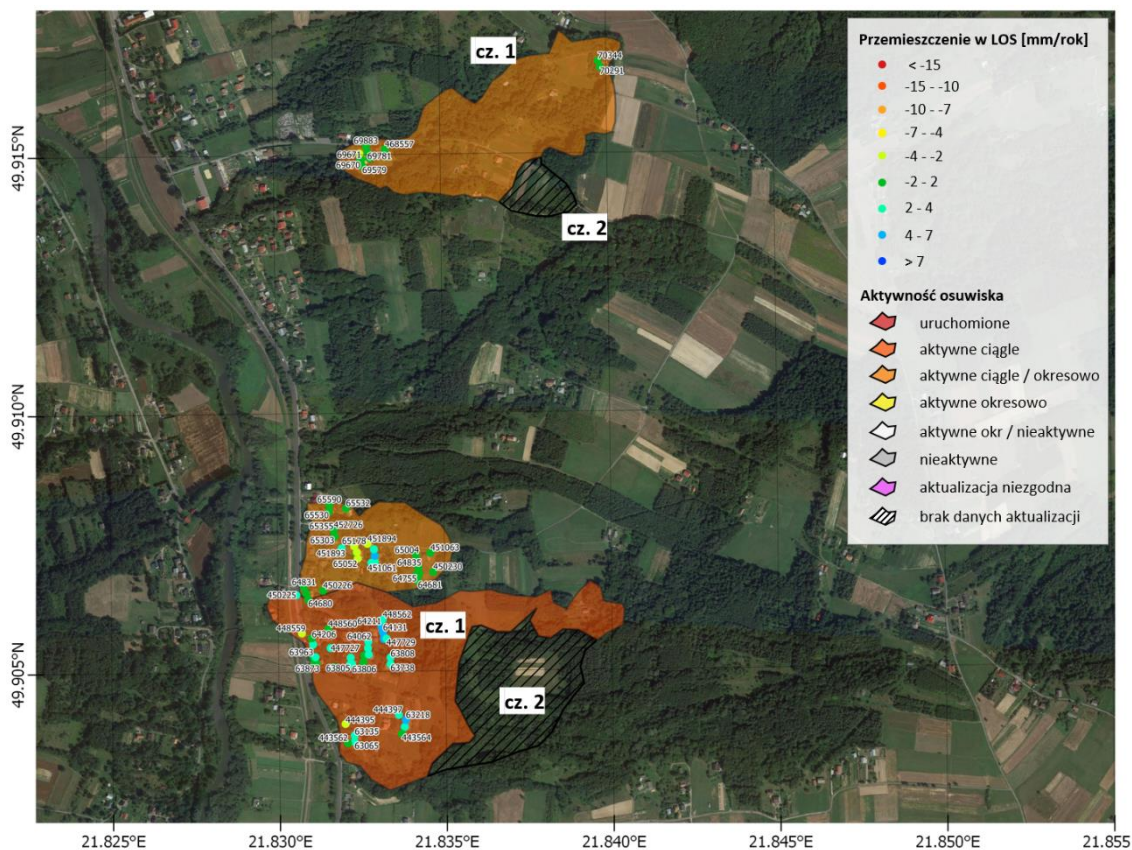
176955



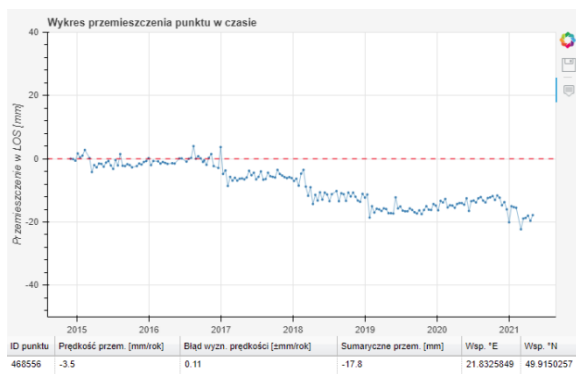
491459



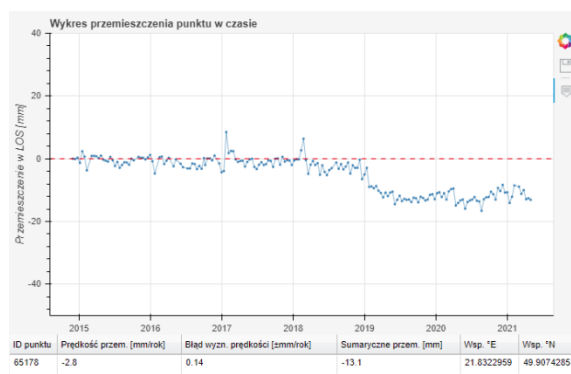
492124



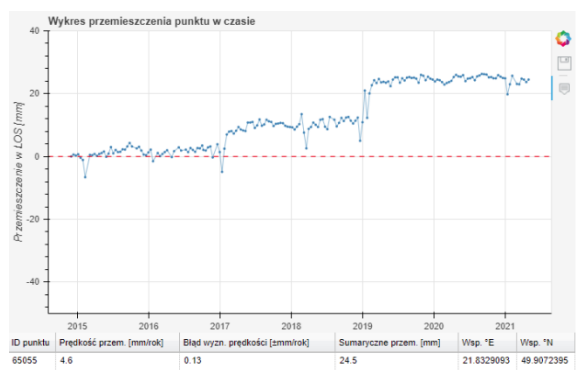
Rys. 13 Mapa osuwisk nr (od góry) 19028, 57354 oraz 57355 z punktami PS dla orbity ascending



468556



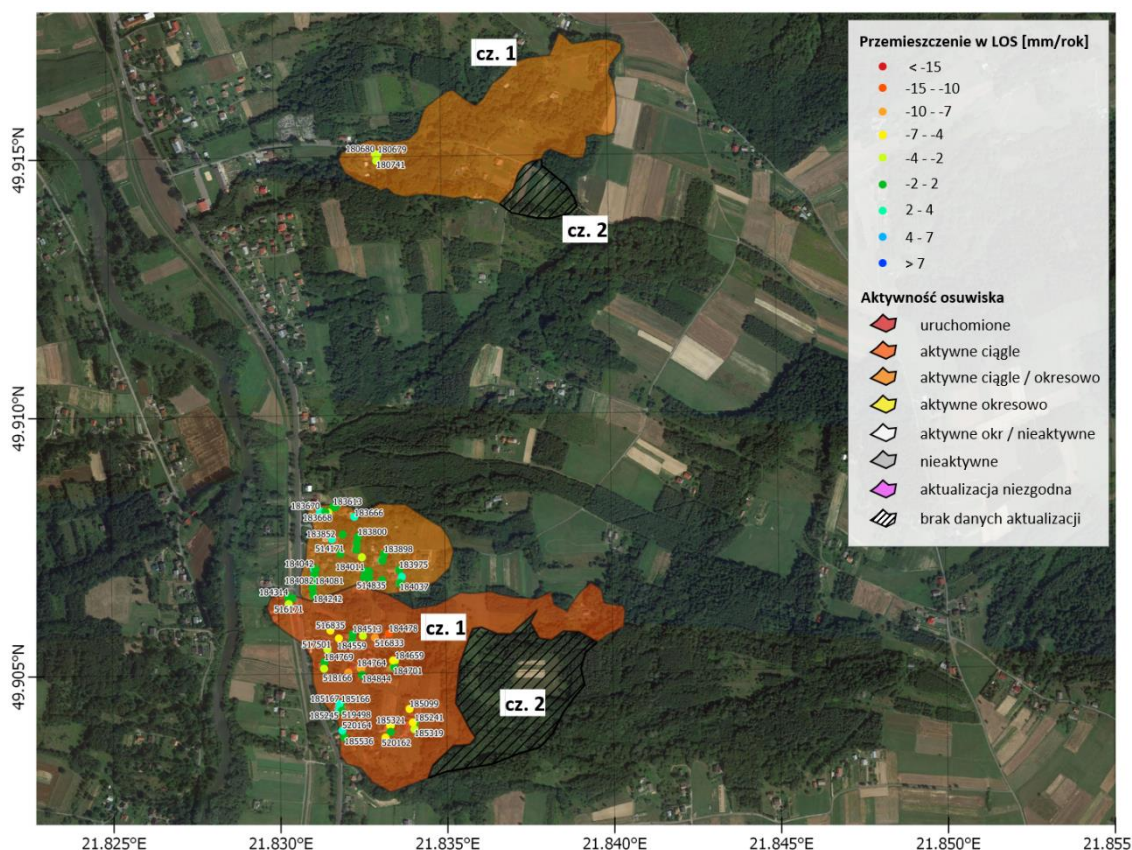
65178



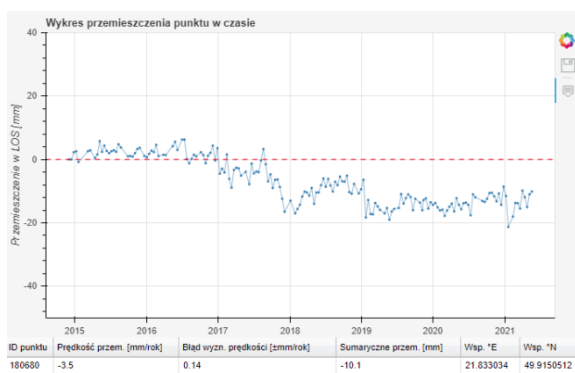
65055



64211



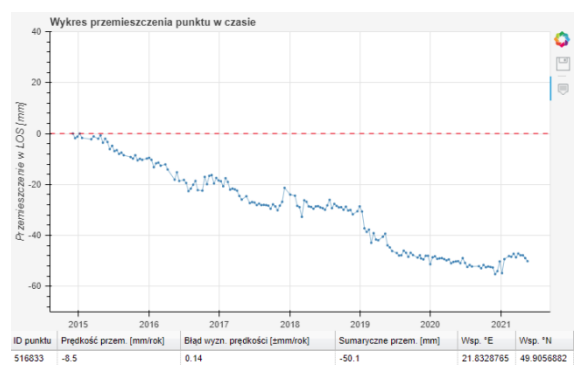
Rys. 14 Mapa osuwiska nr (od góry) 19028, 57354 oraz 57355 z punktami PS dla orbity descending



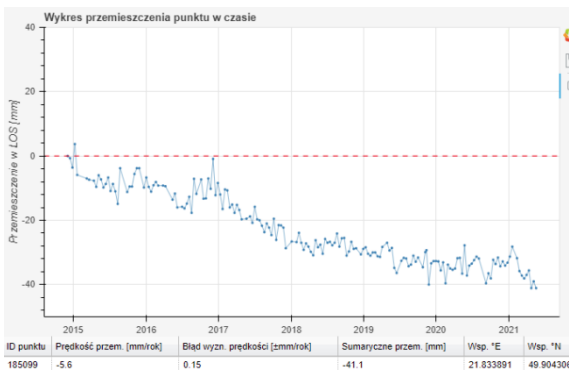
180680



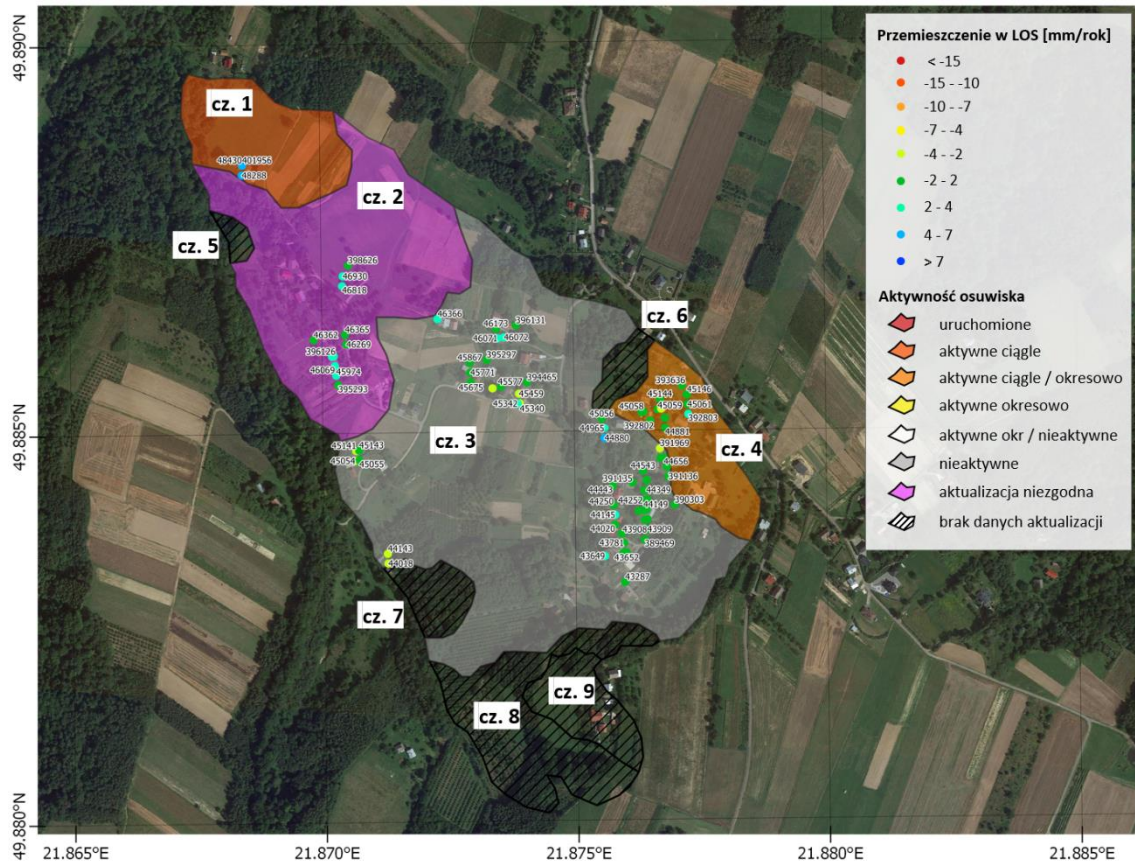
184478



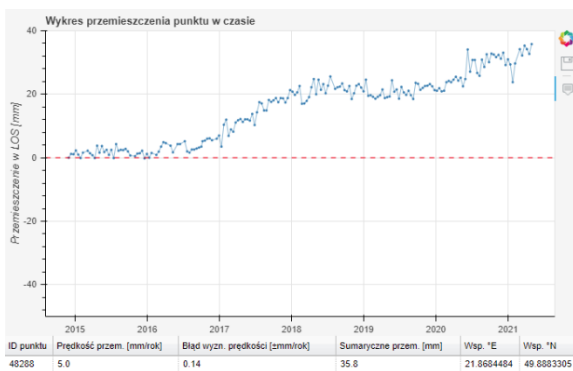
516833



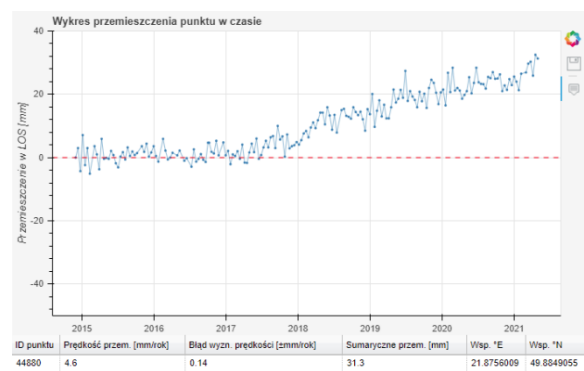
185099



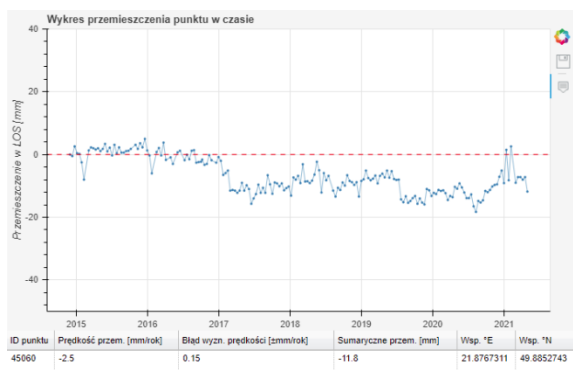
Rys. 15 Mapa osuwiska nr 30017 z punktami PS dla orbity ascending



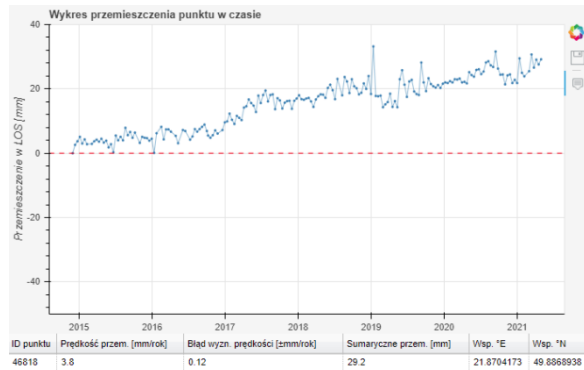
48288



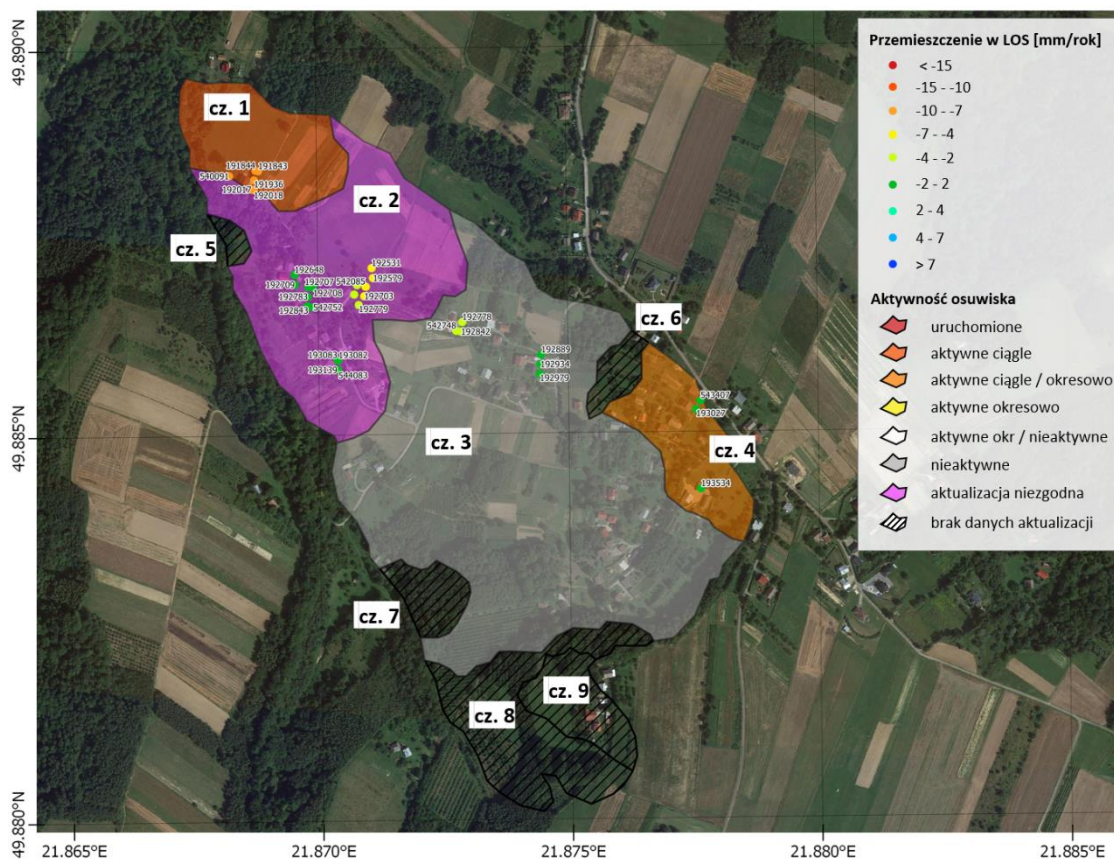
44880



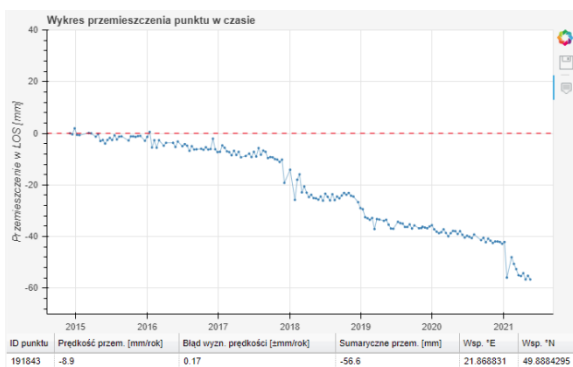
45060



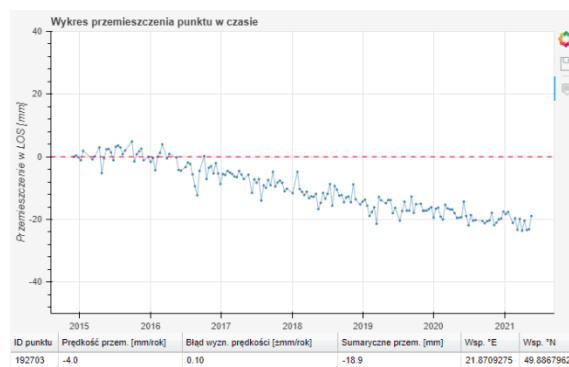
46818



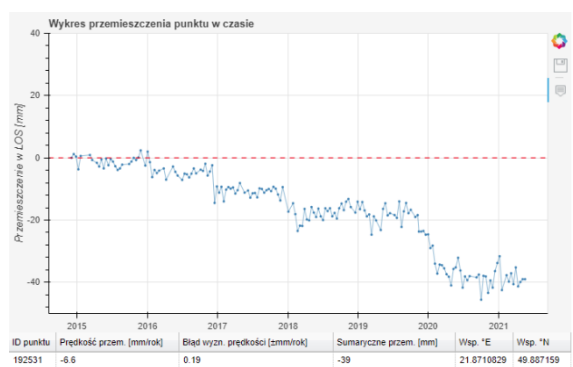
Rys. 16 Mapa osuwiska nr 30017 z punktami PS dla orbity descending



191843



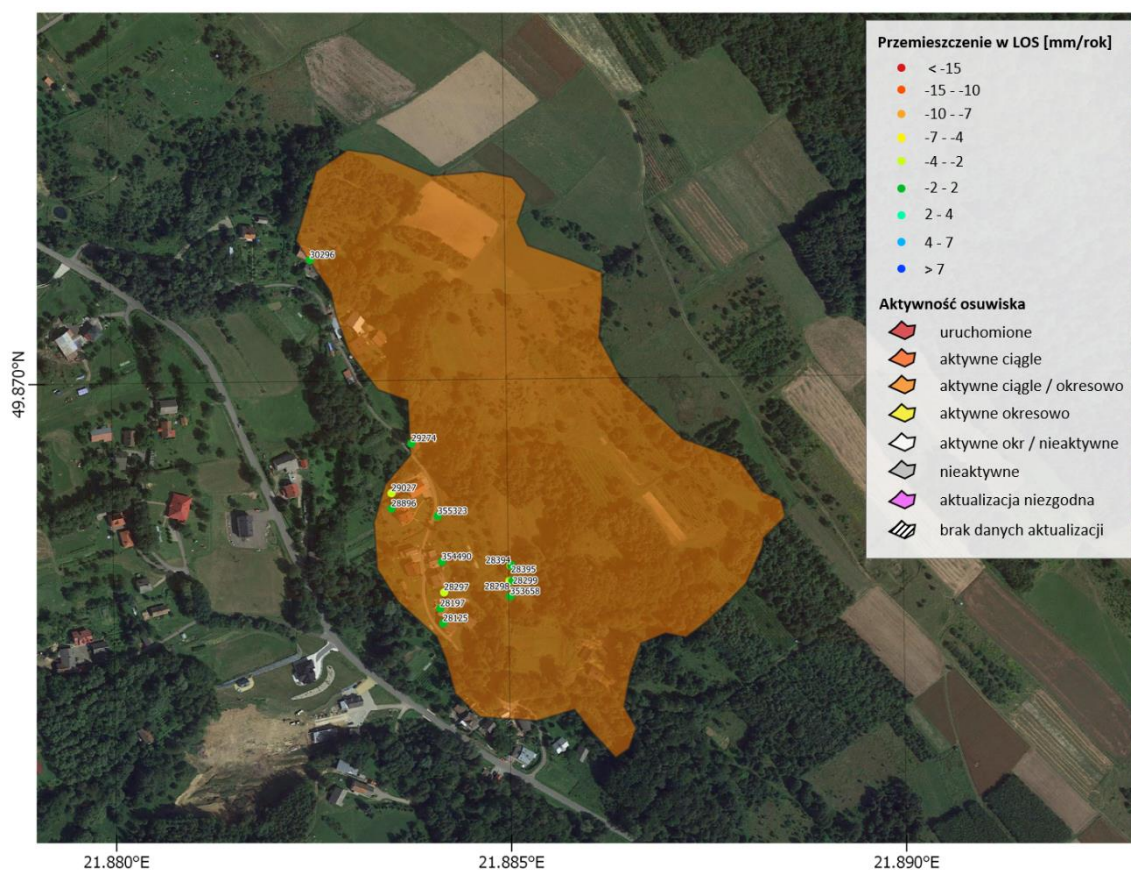
192703



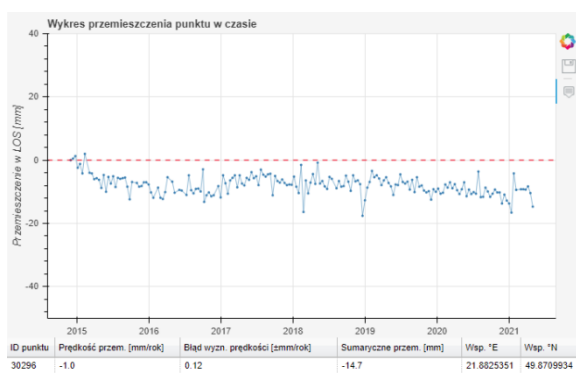
192531



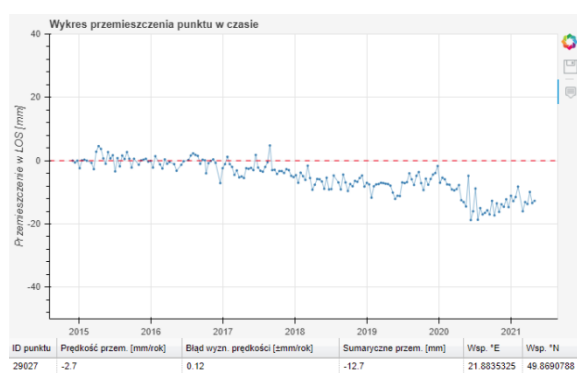
192778



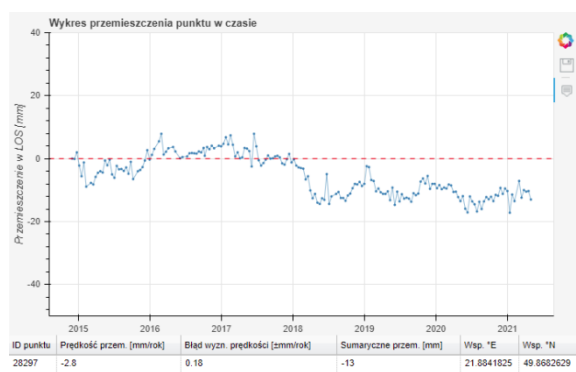
Rys. 17 Mapa osuwiska nr 18999 z punktami PS dla orbity ascending



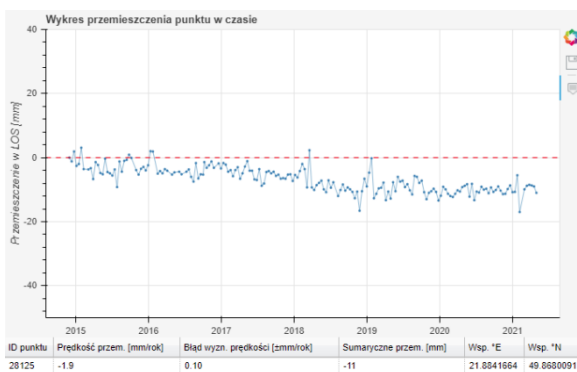
30296



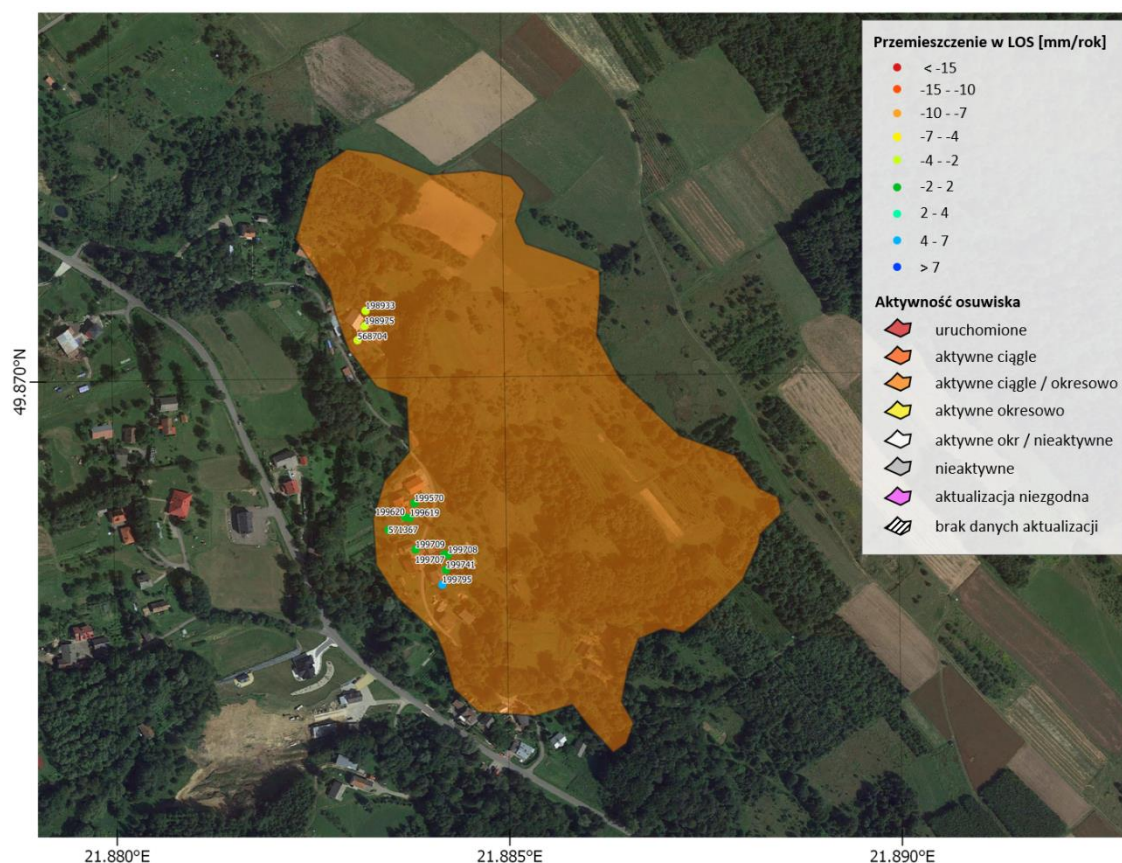
29027



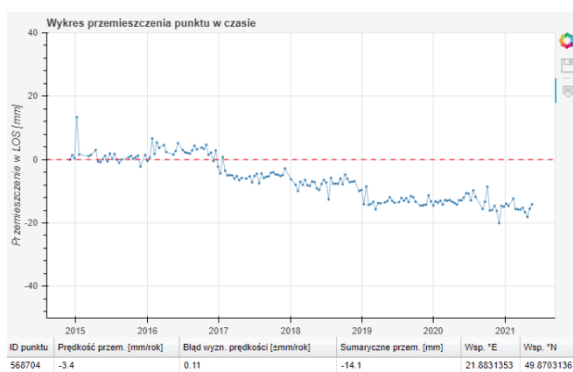
28297



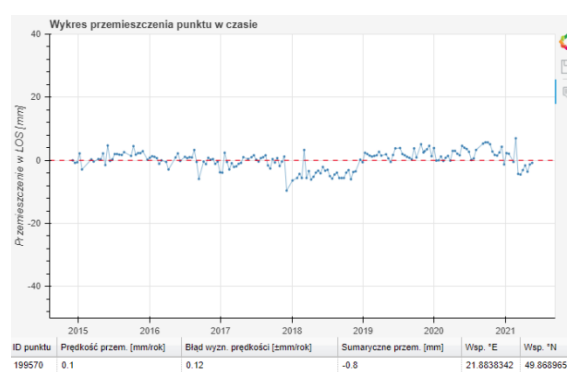
28125



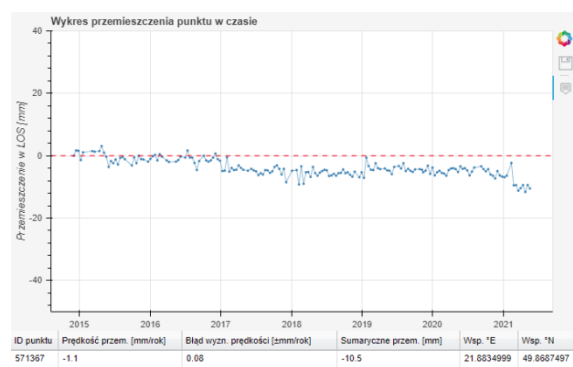
Rys. 18 Mapa osuwiska nr 18999 z punktami PS dla orbity descending



568704



199570



571367



199795

6

PODSUMOWANIE I OCENA WYNIKÓW

Podczas wykonywania niniejszego monitoringu dla obszarów 24 osuwisk na terenie powiatu strzyżowskiego, obliczono przemieszczenia dla **292 punktów** PS dla orbity ascending i **177 punktów** dla orbity descending.

Spśród 24 osuwisk konieczne było wyselekcjonowanie osuwisk, spełniających warunki odpowiedniej geometrii, aby analiza była w pełni funkcjonalna. Warunki te zostały spełnione dla **15 obszarów osuwiskowych (62 % całości)**.

Dla **7 osuwisk (29 %)** monitoring został prawidłowo wykonany dla obu orbit. Dla 6 z nich aktualizacja dała ten sam wynik (czyli tę samą klasę aktywności). Aktualizacja sprzeczna wystąpiła jedynie dla osuwiska o numerze SOPO 30017 – część północno-środkowa.

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.) [mm/rok]	Prędkość LOS (orbita desc.) [mm/rok]	Szacowana prędkość osuwiska [mm/rok]	Aktywność SOPO	Aktywność zaktualizowana	Intensywność ruchu
46612 cz. 1	-1,74	-	9,16	aktywne okresowo	uruchomione	ekstremalnie powolne
46612 cz. 2	-16,58	-	87,25	nieaktywne	uruchomione	bardzo powolne
72250	2,03	-	6,82	nieaktywne	nieaktywne	pomijalne
72515	-5,29	-	9,65	aktywne okresowo	uruchomione	ekstremalnie powolne
56286	-1,88	-2,92	2,80	aktywne ciągle	aktywne ciągle / okresowo	pomijalne
56289	-	0,64	0,72	aktywne ciągle	aktywne ciągle / okresowo	pomijalne
19034 cz. 1	-1,20	-1,85	4,02	aktywne ciągle	aktywne ciągle / okresowo	pomijalne
19028 cz. 1	-2,10	-	3,47	aktywne ciągle	aktywne ciągle / okresowo	pomijalne
57354	3,70	2,97	5,59	aktywne ciągle	aktywne ciągle / okresowo	pomijalne

57355	5,05	-8,92	14,63	aktywne ciągłe	aktywne ciągłe	ekstremal- nie po- wolne LUB bardzo po- wolne
30017 cz. 1 (od góry)	-	-8,96	14,61	aktywne ciągłe	aktywne ciągłe	bardzo po- wolne
30017 cz. 2	3,21	-8,10	8,61	aktywne okresowo	aktywne okresowo / nieaktywne LUB uru- chomione	pomijalne LUB eks- tremalnie powolne
30017 cz. 3	-3,62	-2,40	4,78	nieaktywne	nieaktywne	pomijalne
30017 cz. 4	2,44	-	4,73	aktywne ciągłe	aktywne ciągłe / okresowo	pomijalne
18999	-2,58	2,83	5,90	aktywne ciągłe	aktywne ciągłe / okresowo	pomijalne
19034 cz. 2	-	-	-	nieaktywne	-	-
19028 cz. 2	-	-	-	aktywne okresowo	-	-
57355	-	-	-	aktywne okresowo	-	-
30017 cz. 5	-	-	-	aktywne ciągłe	-	-
30017 cz. 6	-	-	-	aktywne okresowo	-	-
30017 cz. 7	-	-	-	aktywne ciągłe	-	-
30017 cz. 8	-	-	-	aktywne okresowo	-	-
30017 cz. 9	-	-	-	nieaktywne	-	-
46700	-	-	-	aktywne ciągłe	-	-

Spośród **15 osuwisk**, dla których przeprowadzono skuteczny monitoring.:

- dla **4 obszarów** zaktualizowana aktywność nie różni się od tej zdefiniowanej w SOPO,
- dla **10 obszarów** nastąpiła aktualizacja różniąca się od tej z SOPO,
- dla **1 obszaru** aktualizacja dała sprzeczny wynik.

Spośród **10 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: **46612 (części 1 i 2) oraz 72515**. Ponadto dla osuwiska o numerze **30017 (cz. 2)** 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 15 osuwisk:

- dla 9 obszarów zdefiniowano prędkości przemieszczeń jako pomijalne,

- dla 2 obszarów zdefiniowano prędkości przemieszczeń jako ekstremalnie powolne,
- dla 2 obszarów zdefiniowano prędkości przemieszczeń jako bardzo powolne (są to osuwiska nr 46612 cz. 2 oraz 30017 cz. 1).

Ponadto dla 2 osuwisk (tj. 57355 oraz 30017 cz. 2) uzyskano sprzeczne klasy intensywności ruchów. Sprzeczność ta w obu przypadkach nie jest jednak skrajna, tzn. różnią się o jedną klasę – odpowiednio osuwisko ekstremalnie powolne LUB bardzo powolne oraz pomijalne LUB ekstremalnie powolne.

Szczegółowe prędkości przemieszczeń dla każdego punktu pomiarowego analizowanego na każdym zobrazeniu satelitarnym można zobaczyć w załączonym pliku XLSX oraz pliku SHP.

7

PORÓWNANIE WYNIKÓW DO POMIARÓW GEODEZYJNYCH

Walidacja odnosiła się do raportów monitoringu na osuwiska Zaborów, prowadzonych przez Państwowy Instytut Geologiczny.

Pomiary były przeprowadzane w formie mniej więcej corocznego monitoringu między innymi przy wykorzystaniu **odbiorników GNSS**.

Dla pomiarów naziemnych prowadzonych **metodą GNSS**, błędy obserwacji to **3 cm** dla współrzędnych poziomych XY oraz **5 cm** dla wysokości. Punktów z wartościami przemieszczeń poziomych powyżej błędu pomiaru było bardzo niewiele, natomiast przemieszczeń pionowych czasem w ogóle nie interpretowano ze względu na dużą niedokładność pomiarów GPS.

Przemieszczenia poziome (ΔX , ΔY) w metrach pomiędzy pomiarem 04.2017 a 10.2018								
Numer	X _{10_2018}	Y _{10_2018}	X _{04_2017}	Y _{04_2017}	$\Delta X[m]$	$\Delta Y[m]$	$\Delta D[m]$	Az[°]
zab1	5531192,102	7560183,425	5531192,113	7560183,428	-0,011	-0,003		
zab2_inkl	5531241,325	7560209,181	5531241,310	7560209,168	0,015	0,013		
zab3	5531334,532	7560210,328	5531334,526	7560210,329	0,006	-0,001		
zab4	5531442,743	7560223,356	5531442,746	7560223,356	-0,003	0,000		
zab5	5531371,715	7560151,287	5531371,704	7560151,298	0,011	-0,011		
zab6	5531331,103	7560068,253	5531331,065	7560068,258	0,038	-0,005	0,038	353
zab7	5531324,658	7559992,396	5531324,653	7559992,405	0,005	-0,009		
zab8	5531328,424	7559912,773	5531328,408	7559912,792	0,016	-0,019		
zab9	5531341,103	7559732,105	5531341,065	7559732,085	0,038	0,020	0,043	28
zab10	5531296,183	7559651,573	5531296,177	7559651,556	0,006	0,017		
zab11	5531285,713	7559831,102	5531285,717	7559831,098	-0,004	0,004		
zab12	5531241,161	7559617,832	5531241,152	7559617,828	0,009	0,004		

KOMENTARZ DO WYKONANYCH POMIARÓW

Monitoring powierzchniowy przeprowadzony w okresie 01.04.17-18.10.18 wykazał, że przemieszczenia nie przekraczają dokładności pomiaru aparaturą GNSS. Tylko na dwóch punktach (zab6, zab9) wykazano niewielkie przemieszczenia około 4 cm ale spowodowane są one błędami pomiarowymi oraz zakryciem horyzontu przez drzewa. Osuwisko należy uznać za okresowo aktywne.

Rys. 19 Fragment z Raportu z prac monitoringowych przeprowadzonych w roku 2018 na osuwisku Zaborów

Walidacja wyników z metody IPTA jest bardzo trudna do uzyskania poprzez naziemne pomiary technikami GNSS ze względu na ich mniejszą czułość w porównaniu do metod interferometrycznych. Tam, gdzie kończy się dokładność metod GNSS, tam zaczynają się obserwacje przemieszczeń metodą interferometryczną IPTA.

Metody te można zatem uznać za komplementarne ze sobą, uzupełniające się. Metod GPS można używać do monitorowania ruchów szybkich. Natomiast metod interferometrycznych można używać do monitoringu, również groźnych, ruchów bardzo powolnych.