



Współczesne ruchy wysadu solnego Inowrocławia w świetle badań geodezyjnych

Zbigniew Szczerbowski¹, Rafał Gawalkiewicz¹



Z. Szczerbowski R. Gawalkiewicz

Contemporary movements of the Inowrocław Salt Dome in the light of geodetic surveys.
Prz. Geol., 68: 195–203; doi: 10.7306/2020.7

Abstract. The paper presents results of long-standing geodetic measurements including the most recent results of levelling measurements carried out by the authors. Based on the results, a model of ground surface movements was created, which roughly reflects contemporary tectonic activity of the Inowrocław salt structure. The performance of vertical displacements of benchmarks of the research network for the last quarter-century shows its significant mobility. The results of measurements were discussed in the context of the state of art of tectonic mobility of the area and the geological structure of the dome. Unusual agreement in rates of geological processes (salt diapir uplift) determined by geodetic measurements and estimated by geological methods for a long time interval confirms trueness of previous ideas about contemporary

diapir movements of the Inowrocław Salt Dome. Repeated levelling evaluated for two last time intervals provided similar regions and rates of uplifts, giving additional control of reliability of the measurements.

Keywords: salt dome, diapir movements, levelling, mining deformations, subsidence

Podstawowym celem pierwszych geologów wyjaśniających fenomen wysadowych struktur solnych (teoria halokinezy i halotektoniki) było znalezienie uniwersalnego modelu opisującego ich geologiczną ewolucję. Po kilkudziesięciu latach badań ostatecznie okazało się, że proste modele nie wyjaśniają genezy całej różnorodności struktur solnych, w tym również formowania się geometrii diapirów solnych w poszczególnych prowincjach solonośnych. Na przykład najwcześniej rozpoznane i przebadane struktury w Niemczech wykazują wiele morfologicznych odmienności wynikających z różnych modeli genetycznych i scenariuszy ewolucji geologicznej, a wiele z nich ma morfologię niezgodną z teorią halokinezy (Kockel, 2003). Modele ruchu struktur solnych, jak i zmian ich geometrii w czasie geologicznym, są często bardzo skomplikowane, o czym przekonują wyniki badań sejsmicznych 3D prowadzonych w ostatnich latach. Model ewolucji wysadu (wg Harding, Huuse, 2015), którego geometria zmieniała się radykalnie w zależności od zmieniających się w czasie geologicznym sił tektonicznych, jest przykładem trudności w odtworzeniu złożoności formowania się tego typu struktur.

Ruch wysadowy zazwyczaj jest ograniczany przez uwarunkowania hydrogeologiczne, ponieważ górna część struktury solnej jest modelowana przez wody meteoryczne, które poprzez ługowanie kontrolują proces wypiętrzania się zwierciadła soli. Prowadzone ostatnio badania hydrogeologiczne, ale również geofizyczne, wskazują na zaawansowaną infiltrację w rejonie wysadów solnych i mieszanie się wód z różnych poziomów wodonośnych, co jest przyczyną rozwoju zjawisk krasowych (Górski, Rasała, 2009; Zhang i in., 2013; Hulisz i in., 2017). W rejonie niemieckich wysadów solnych stwierdzono wielkoobszarowe osiadania terenu w efekcie podziemnej erozji (subrozji), co może być

oznaka ich kinematycznej aktywności (Krawczyk, 2018; Kersten i in., 2019). Z kolei wyniki innych badań świadczą o wpływie migracji wód głębszych na wzrost tempa ruchu wysadowego (Wagner, Burliga, 2014; Toboła, 2016).

Nie udało się sformułować uniwersalnej teorii diapiryzmu, jednak po wielu latach badań można wyróżnić wiele prawidłowości, którym podlega proces powstawania struktur solnych. W niemieckiej części basenu permskiego Kockel (2003) do najważniejszych z nich zalicza: konieczność wystąpienia tektonicznego impulsu w postaci ruchów rozciągających skały podłoża, inicjujących halokinetyczne płynięcie soli ku górze oraz występowanie uskoków w podłożu soli cechsztyńskich – a sam diapiryzm jest efektem wypełniania otwartych uskoków w nadkładzie soli. Wiele z tych spostrzeżeń okazało się aktualnych również w przypadku formowania się struktur w polskiej części środkowoeuropejskiej prowincji słupów solnych.

Polskie badania wysadów solnych prowadzono w znacznie węższym zakresie niż niemieckie, ale ich wyniki, publikowane m.in. na łamach *Przełęczu Geologicznego*, umożliwiły ustalenie podstawowych faktów istotnych dla ich kinematyki. Należy do nich wpływ tektoniki na proces formowania się wysadów, a szczególnie impulsu tektonicznego na inicjację procesu diapiryzmu lub wczesną fazę formowania się struktur solnych (Dadlez, 1974; Tarka, 1992; Burliga, 1996; Krzywiec, 2009). Zróznicowanie formowania się struktur solnych wynika z niestacjonarności pola przemieszczeń halokinetycznych, która, zdaniem Wilkosza (2006), była właśnie jednym z czynników modelujących wysad w Mogilnie. Rozwój tej struktury solnej, charakteryzowała zmienność prędkości wznoszenia się – w stadium poduszkowym wynosiła ona 0,012–0,015 mm/r, w stadium diapirowym – 0,014–0,018 mm/r, a w stadium

¹ AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; szczerbo@agh.edu.pl; gawalkie@agh.edu.pl

postdiapirowym – 0,005–0,1 mm/r. Jednak w plejstocenie i holocenie nastąpiła intensyfikacja podnoszenia się struktury, którą oszacowano na 0,3–0,5 mm/r, a nawet do 1 mm/r, co spowodowało podniesienie na tym obszarze powierzchni podplejstoceńskiej o ok. 50 m powyżej jej średniego położenia w szerokim otoczeniu wysadu (Wilkoosz, 2006). Świadczy to o jego dużej mobilności w stosunkowo niedawnej przeszłości geologicznej. Takie tempo ruchów powierzchni terenu umożliwia ich rejestrację metodami geodezyjnymi.

Z zastosowaniem metod geodezyjnych dokonano wstępnych, szacunkowych ocen współczesnej mobilności struktur solnych na obszarze Kujaw (Szczerbowski, 2005, 2007; Piątkowska i in., 2012; Szczerbowski, Piątkowska, 2015). Oceny te obejmowały krótki, kilkuletni okres obserwacji obszaru Inowrocławia, na którym przez ponad 100 lat była prowadzona działalność górnicza. Jednak samo stwierdzenie przemieszczeń powierzchni terenu, które nie są odniesione do konkretnych warunków, głównie sytuacji geologicznej podłoża, może budzić wątpliwości, bo pozostaje zasadnicze pytanie o przyczynę tych zmian. Problem ten był już wcześniej opisywany (Szczerbowski, 2009b), również w kontekście deformacji powierzchni na obszarze Inowrocławia.

W niniejszym artykule zawarto podsumowanie wieloletnich badań geodezyjnych wysadu solnego Inowrocławia, w tym wyniki pomiarów obejmujących ostatnie ćwierćwiecze, a celem pracy jest przedstawienie wiarygodnej charakterystyki przejawów ruchu wysadowego. Wiarygodność ta wynika zarówno z metodyki prowadzonych prac (duża liczba reperów, dokładność obserwacji itp.) jak również z długiego okresu, jaki upłynął od ustania efektów górniczych (osiadania powierzchni terenu, zapadliska i inne nieciągłe deformacje powierzchni terenu), które przez wiele lat towarzyszyły ruchom powierzchni terenu. Zarys uwarunkowań geologicznych, które rzutują na obraz tych ruchów, ograniczono do zagadnień istotnych dla zrozumienia charakterystyki pola prze-

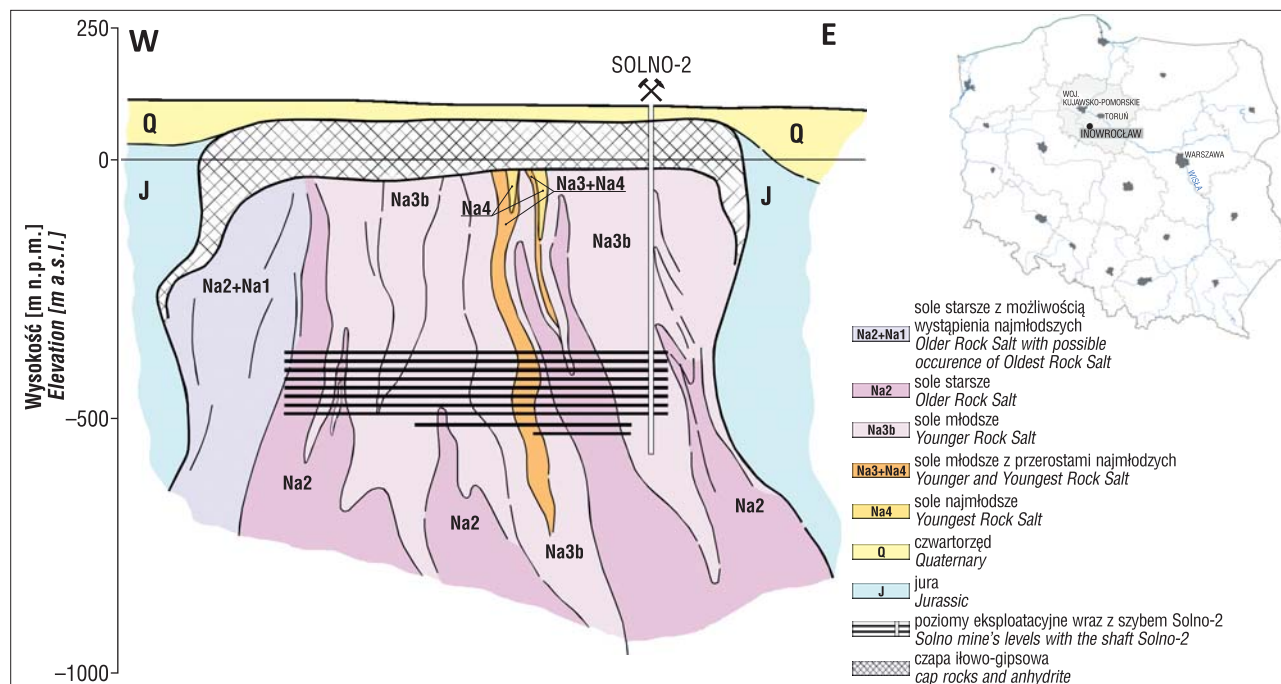
mieszceń powierzchni gruntu, wyznaczanego przez lata metodami geodezyjnymi.

ZARYS BUDOWY GEOLOGICZNEJ

Równinę Inowrocławską cechuje monotoność krajobrazu, w którym wyróżnia się niewielkie, kopulaste wzniesienie, powstałe na skutek pełnienia ku górze plastycznych utworów struktury solnej. Z tą geomorfologiczną monotonią równiny kontrastuje jej urozmaicona budowa geologiczna – w dużym stopniu uwarunkowana postglacialną kinematyką wysadu (Niewiarowski, 1983; Szczerbowski, 2010). Dzięki intensywnym pracom rozpoznawczym, eksploatacji górniczej, ale również badaniom zagrożeń, jakie wyniknęły z tej eksploatacji, wysad solny Inowrocławia został dobrze rozpoznany. Dane geologiczne uzyskano głównie z profili otworów badawczych oraz szybów, jakie wykonano w ciągu przeszło stuletniej górniczej historii tego obszaru. Stosunkowo duża liczba wierceń zapewniła dobrą szczegółowość obrazu przypowierzchniowej budowy geologicznej (ryc. 1 i 2), jednak nie umożliwiła dokładnego okonturowania granic wysadu w jego głębszej części, ponieważ wiercenia prowadzono zwykle do głębokości, na której stwierdzano występowanie zwierciadła solnego.

Interesujące jest już samo usytuowanie wysadu Inowrocławia na mapie tektonicznej podłoża podpermskiego. Wysad ten, na co zwracali uwagę Poborski (1957) oraz Marek i Raczyńska (1974), powstał na skrzyżowaniu dwóch dyslokacji tektonicznych: ESE-WNW (Góra–Inowrocław) i SSE-NNW (Gopło–Inowrocław), co mogło być, zdaniem tych badaczy, przyczyną jego wypiętrzenia.

Wśród wielu pozycji bogatej literatury krajowej, poświęconej geologii wysadu solnego Inowrocławia, należy wspomnieć pracę Budryka (1933). Dotyczy ona istotnego problemu deformacji nieciągłych, które w dużym stopniu były rezultatem prowadzonej wówczas eksploatacji górniczej, ale stanowi jednocześnie podsumowanie ówczesnego



Ryc. 1. Przekrój geologiczny przez złożo solne w Inowrocławiu (wg Poborskiego, 1957)

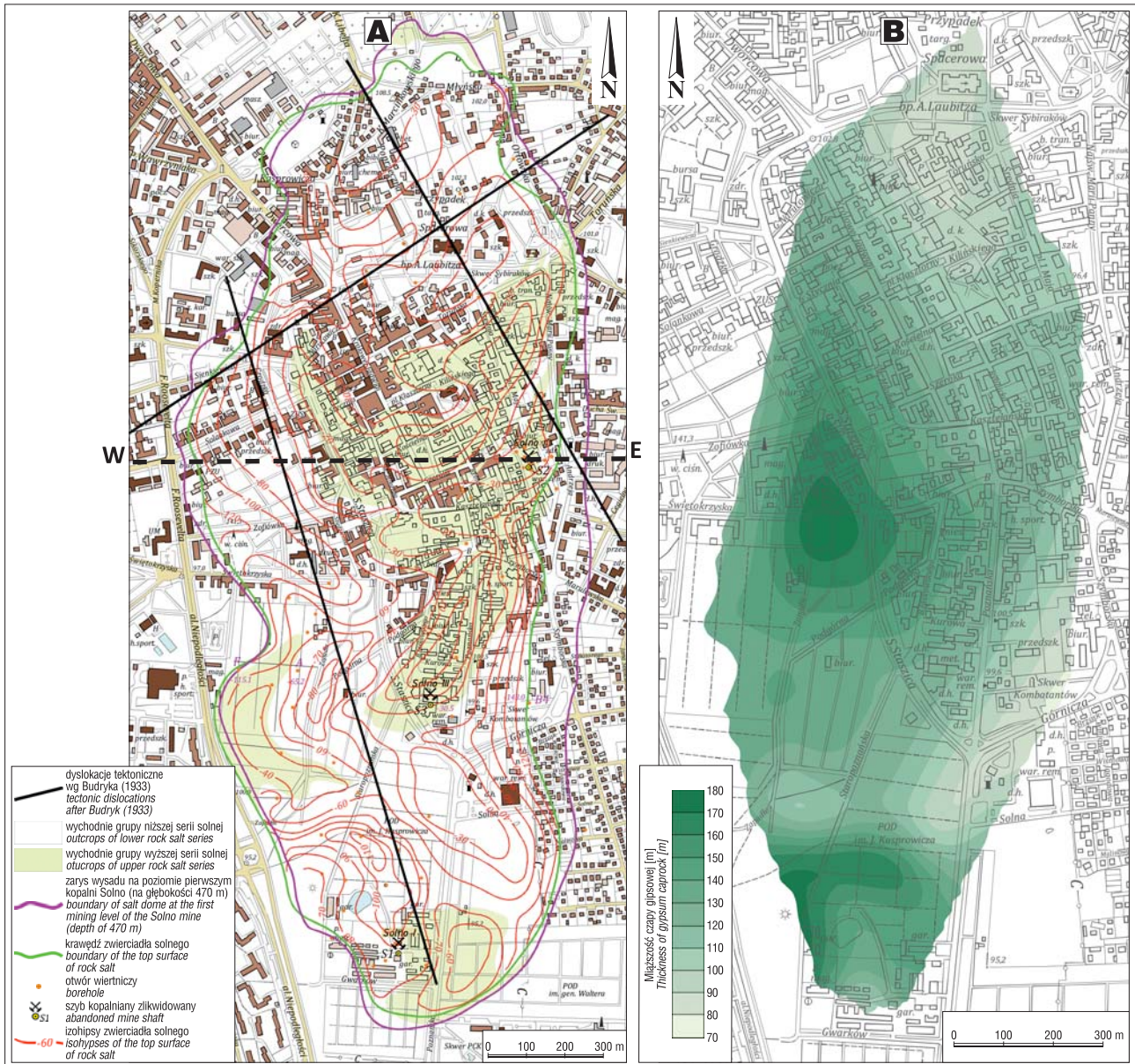
Fig. 1. Geological cross-section through a salt field in Inowrocław (according to Poborski, 1957)

stanu wiedzy o geologii złoża, przy czym w dużym stopniu bazuje na wynikach prac geologów niemieckich, głównie Beyschlaga (1913).

Liczne prace dotyczące geologii wysadu inowrocławskiego (Poborski, 1957; Bujakowski, 1986; Ney, Ślizowski, 1991; Tarka, 1992) powstawały dzięki danym z kolejnych wierceń, a w późniejszych latach także na podstawie danych pozyskiwanych w trakcie głębokiej eksploatacji wyrobisk kopalni *Solno*. Wewnętrzna struktura wysadu została dobrze poznana (Bujakowski, 1986; Ney, Ślizowski, 1991; Tarka, 1992). Badania strukturalne, istotne dla oceny kinematyki struktury solnej, wykonał Tarka (1992). Stwierdził on niezgodność wewnętrznej budowy wysadu z głównymi regionalnymi kierunkami tektonicznymi, co należy łączyć z autonomicznym ruchem mas soli, nie ulegających istotnym przekształceniom wewnętrznym w proce-

sie formowania się wysadu – zmianom tym podlegały jedynie jego zewnętrzne kontury (Tarka, 1992). W ten sposób można wytłumaczyć prosty model geometrii diapiru w przekroju pionowym, w którym głównym zaburzeniem jest brak symetrii w nachyleniu ściany wschodniej i zachodniej.

Duży wpływ na przemieszczenia powierzchni terenu nad wysadami solnymi mają procesy ługowania i subrozji, które modelują kształt zwierciadła solnego i powodują tworzenie się pustek w wysadzie, przez co przyczyniają się do powstawania deformacji nieciągłych na powierzchni terenu (Budryk, 1933; Poborski, 1957; Poborska-Młynarska, 1984; Szczerbowski, Gawalkiewicz, 2005; Szczerbowski, 2007, 2010). Procesy te, jak się podejrzewa, są genetycznie związane z dźwiganiem się struktury solnej (Poborska-Młynarska, 1984). Na podstawie analizy geomorfologicznej



Ryc. 2. A – Mapa strukturalno-geologiczna zwierciadła wysadu solnego w Inowrocławiu (wg Poborskiego, 1957); izohipsy zwierciadła solnego oznaczono w m n.p.m. oraz **B** – Mapa izopachytowa modelu miąższości czapy gipsowej (obie na podkładzie mapy topograficznej pozyskanej z portalu geoportal.gov.pl)

Fig. 2. A – Structural-geological map of the Inowrocław salt Dome (after Poborski, 1957); isohypses in m a.s.l. and **B** – Isopach map showing modelled thickness of gypsum caprock (both maps are based on topographic maps from the portal geoportal.gov.pl)

Niewiarowski oszacował, że w okresie postglacjalnym wypiętrzenie wysadu wyniosło 15 m i na tej podstawie wyznaczył prędkość tego procesu na ok. 1 mm/rok (Niewiarowski, 1983).

Kinematykę wysadu, jak również obserwowane ruchy powierzchni terenu można wiązać z 1) geometrią wysadu, 2) litologią serii solnych i utworów otaczających wysad, 3) usytuowaniem diapiru solnego, 4) topografią zwierciadła solnego.

1) Geometria wysadu. W rzucie poziomym góra część wysadu inowrocławskiego ma kształt elipsy o dłuższej osi zorientowanej mniej więcej południkowo, długości ok. 3 km i krótszej osi długości 1 km. Elipsoidalne wydłużenie poziomego przekroju wysadu i jego orientacja sugerują istnienie uprzywilejowanych kierunków przeciskania się soli ku powierzchni ziemi. Ściany wysadu, zachodnia i wschodnia, zapadają stromo, ale pod różnymi kątami (zachodnia jest niemal pionowa, a wschodnia zapada pod kątem ok. 70°. W uproszczonym schemacie struktura solna przebiegająca utwory mezozoiczne przedstawia się jako słup przechylony ze wschodu na zachód (ryc. 1). Utwory czapy gipsowo-iłowej zalegają płytko pod ziemią – miejscami zaledwie kilka metrów p.p.t, a utwory solne na głębokości ok. 120 m p.p.t.

2) Litologia serii solnej i utworów otaczających wysad. Seria solna złoża w Inowrocławiu składa się z naprzemianległych pokładów i warstw czystej soli kamiennej, soli zanieczyszczonej iłem i anhydrytem, zubru i anhydrytu. Wysad soli otaczają utwory jurajskie. Od strony zachodniej są to piaski oraz słabo zdiagenezowane piaskowce dolnej jury, natomiast od wschodniej – margle, wapienie i dolomity jury środkowej i górnej. Utwory te są stromo nachylone, często spękane, pocięte szczelinami i uskokami. Nad wysadem i otaczającymi go utworami jury zalegają osady czwartorzędowe miąższości od kilku do ok. 50 m, reprezentowane przez gliny zwałowe, piaski polodowcowe i żwiry (Hus i in., 1996).

Zwierciadło soli jest przykryte niejednorodnym utworem zwietrzelinowym, tzw. czapą gipsowo-iłową wysadu, która powstała na drodze ługowania soli przez krające wody podziemne (Poborski, 1957; Hus i in., 1996). Charakterystyczne jest zróżnicowanie wykształcenia litologicznego czapy jako utworu wtórnego. Nad wychodniami niższych warstw serii solnej wykształciła się czapa gipsowa (głównie w części północnej i zachodniej złoża), natomiast we wschodniej części złoża – nad wychodniami ławic zubrów powstała czapa iłowo-gipsowa o niewielkiej zawartości gipsu (Poborski, 1957).

3) Usytuowanie. Inowrocławski diapir solny wypiętrzył się na przecięciu dyslokacji, których istnienie rozpoznali już geolodzy niemieccy (Beyschlag, 1913). Ich przebieg wytyczył na podstawie rozmieszczenia zapadlisk Budryk (1933). Budryk (1933) wskazał też na istotną rolę w procesie deformacji powierzchni terenu reżimu hydrogeologicznego, który w dużym stopniu jest uwarunkowany występowaniem wspomnianych dyslokacji tektonicznych o przybliżonej orientacji NNW-SSE i ENE-WSW. Szczeliny te stworzyły dobre warunki do migracji wód podziemnych i intensywnego ługowania złoża (Poborski, 1957; Łąka i in., 1981; Poborska-Młynarska, 1984), czego skutkiem są deformacje ciągłe i nieciągłe powierzchni terenu. Ich występowanie zostało potwierdzone pomiarami geofizycznymi (Pilecki i in., 2003; Szczerbowski, 2009a).

4) Topografia zwierciadła solnego. Powierzchnia zwierciadła solnego jest nierówna, a jej urozmaicone ukształto-

wanie jest efektem ługowania soli przez wody podziemne (Poborski, 1957; Poborska-Młynarska, 1984). Spływ wód podziemnych (przeważnie na południe) odbywa się poprzez ciekły występujące na powierzchni zwierciadła solnego. Morfologia rowów i kanałów, którymi spływa po nim woda, przypomina sieć hydrograficzną w terenie górzystym – z deniwelacjami do 150 m (Poborski, 1957). Lokalizacja obniżen zwierciadła solnego jest uzależniona od występowania stref spływu wód podziemnych, przebiegu linii tektonicznych, od nierównomiernego ługowania soli na skutek zróżnicowanej zawartości składników nierozpuszczalnych oraz od nierównomiernego przemieszczania się mas solnych wyciskanych ku górze (Poborski, 1957; Poborska-Młynarska, 1984).

Proces podziemnego ługowania wysadu oraz sufozyjnego wynoszenia materiału skalnego prowadzi do obniżania się poziomu zwierciadła soli oraz do narastania na nim rezydium w postaci czapy gipsowej, a z czasem również do krasowienia tej czapy. Jest to przyczyną osiadania terenu oraz powstawania zapadlisk. Z tego powodu naturalna degradacja wysadu solnego odzwierciedla się w ukształtowaniu powierzchni terenu. Według Poborskiej-Młynarskiej (1984) miąższość czapy gipsowo-iałej może być miarą degradacji wysadu w skali czasu geologicznego i wskazuje, jak wysoki pionowy odcinek wysadu uległ degradacji. Natomiast położenie zwierciadła solnego jest wypadkową procesu jego obniżania się na skutek ługowania oraz wypiętrzenia struktury solnej.

Ukształtowanie powierzchni terenu nad wysadem charakteryzuje się asymetrią wzniesienia topograficznego, występowaniem garbów, bruzd, niecek itp. form. Odzwierciedla ono sytuację geologiczną, w tym m.in. asymetrię struktury solnej, występowanie dyslokacji tektonicznych oraz rejonu intensywnej erozji wgłębnej (Szczerbowski, 2010). Procesy geologiczne mają zatem wpływ na ruchy powierzchni terenu i formują jej ukształtowanie.

HISTORYCZNE POMIARY NIWELACYJNE

Od ponad 100 lat na obszarze Inowrocławia są prowadzone pomiary niwelacyjne. Ich wyniki – z lat 1871–1996 – są zachowane w dokumentacji mierniczo-geologicznej Kopalni *Solno*. Od 1913 r. do 1956 r. pomiary niwelacyjne prowadzono raz na kilka lat, a w latach późniejszych zwykle co roku (Hus i in., 1996).

W czasie, gdy prowadzono górnictwą eksploatację soli, zmiany wysokości reperów były wypadkową wpływów tej eksploatacji, ruchu wysadowego oraz erozji podziemnej (Budryk, 1933; Poborski, 1957; Poborska-Młynarska, 1984; Szczerbowski, 2009a). Ze względu na osiadania wywołane działalnością górnictwą, prowadzoną m.in. przez pompowanie naturalnych solanek, ługowanie złoża metodą otworową, a w ostatniej fazie górnictwej przez podziemne urabianie złoża (Szczerbowski, 2005), do połowy lat 90. XX w. uchwycenie ruchu wysadowego było utrudnione lub niemożliwe. W bogatej historii górnictwej miasta zdarzały się jednak epizody, gdy eksploatacja nie była prowadzona lub prowadzono ją w ograniczonym zakresie, a jej efekty mogły mieć niewielki zasięg przestrzenny. W tych interwałach możliwe było zaobserwowanie zmian, które w jednoznaczny sposób wskazywały na efekt diapiryzmu. Taka sytuacja nastąpiła w latach 20. i 30. XX w., gdy po pierwszej wojnie światowej utworzono polską administrację górnictwą i zakazano prowadzenia rabunkowej eksploata-

cji solanek z poziomu zwierciadła solnego oraz prowadzenia płytkiej podziemnej eksploatacji soli i gipsów, która przyczyniła się do wystąpienia całej serii katastrofalnych zapadlisk na obszarze dużej części miasta, a także znaczących pionowych przemieszczeń powierzchni terenu.

Po 1923 r. eksploatację prowadzono metodą otworową w głębszej partii złoża, w południowej części miasta. Wpływ tej działalności na powierzchnię terenu miał niewielki zasięg przestrzenny. W tym czasie budowano już nową podziemną kopalnię *Solno*. Wyniki pomiarów geodezyjnych wskazują, że pierwsze wpływy podziemnej kopalni *Solno* zaczęły się ujawniać dopiero w latach 50. XX w. Jednak wciąż zachodziły znaczące osiadania terenu w południowej części miasta (ryc. 3), na obszarze starych, płytkich i katastrofalnie zatopionych wyrobisk niemieckich kopalń.

W efekcie zakończenia eksploatacji górniczej (w 1986 r.) oraz podsadzenia wyrobisk górniczych, od 1991 r. zaczęto obserwować stopniowe zmniejszanie się tempa osiadania

powierzchni terenu, a następnie jego zanik. W 1995 r. zmiany wysokości terenu w odniesieniu do wartości obserwowanych w poprzedniej kampanii pomiarowej w większości mieściły się w granicach dokładności pomiarów. Tylko kilka reperów wykazywało istotne zmiany dodatnie, a ok. 70 reperów (tj. ok. 30%) istotne zmiany ujemne. Ponieważ wyniki pomiarów geodezyjnych prowadzonych w latach 1991–1995, już po likwidacji wyrobisk kopalni *Solno*, świadczyły o zaniku wpływów górniczych, podjęto decyzję o likwidacji obszaru górniczego, a tym samym zakończono górniczy epizod w historii miasta.

METODYKA OBSERWACJI GEODEZYJNYCH PROWADZONYCH W LATACH 2002–2018

Ponieważ wyniki pomiarów niwelacyjnych zrealizowanych na obszarze Inowrocławia w 1995 r. wciąż wykazywały niewielkie zmiany w topografii terenu (na pograniczu błędu pomiarowego), w 2002 r. zespół pracowników AGH



Ryc. 3. Mapa pionowych przemieszczeń powierzchni terenu [mm] zarejestrowanych w latach 1932–1956 w centrum Inowrocławia (na podkładzie mapy topograficznej pozyskanej z portalu geoportal.gov.pl)

Fig. 3. Map of vertical displacements of the terrain surface [mm] observed in the period 1932–1956 in the central part of the city of Inowrocław (based on topographic base map from the portal geoportal.gov.pl)

rozpoczął nowe badania. Te geofizyczne i geodezyjne prace badawcze, prowadzone w latach 2002–2018, miały na celu określenie efektów naturalnych procesów zachodzących w górotworze solnym, w tym przemieszczeń powierzchni terenu. W ramach tych badań, w nawiązaniu do punktów zlokalizowanych poza obszarem wpływów dawnej eksploatacji oraz udokumentowanych wpływów naturalnych procesów toczących się w złożu solnym, wykonano m.in. pomiary niwelacyjne państwowej osnowy wysokościowej oraz punktów założonej w 2002 r. geodynamicznej sieci badawczej. Otrzymano identyczne ciągi nawiązawcze, a wyniki pomiarów weryfikowano m.in. z zastosowaniem technik GNSS (*Global Navigation Satellite System* – Globalnego Satelitarnego Systemu Nawigacyjnego).

W celu scharakteryzowania pionowych przemieszczeń powierzchni terenu przez kilkanaście lat mierzono zmiany wysokości 90 reperów. Pomiary te prowadzono metodą precyzyjnej niwelacji geometrycznej, która wciąż jest uznawana za jedną z najbardziej dokładnych. W 2018 r. pomiarem objęto ok. 2,4 km² powierzchni miasta, przy długości ciągów niwelacyjnych ok. 18 km. Wyniki pomiarów wstępnie przeanalizowano, po czym przeprowadzono wyrównanie sieci reperów metodą ścisłą, z założeniem stałości dwóch punktów zlokalizowanych poza granicami dawnych wpływów górniczych. W wyniku wyrównania maksymalny błąd wyznaczenia wysokości punktu wyniósł $mH = \pm 1,32$ mm (punkt nr 85), natomiast błąd przeciętny $mH(\bar{s}) = \pm 0,94$ mm. Wartości przemieszczeń pionowych i-tego punktu określono z zależności:

$$\Delta H_i = H_i^{2018} - H_i^{2005}$$

a średnie błędy przemieszczenia pionowego i-tego punktu ze wzoru:

$$m_{\Delta H_i} = \pm \sqrt{m_{H^{2005}}^2 + m_{H^{2018}}^2}$$

gdzie:

mH^{2005} – średni błąd wysokości i-tego punktu po wyrównaniu, wyznaczony w pomiarach w 2005 r.

mH^{2018} – średni błąd wysokości i-tego punktu po wyrównaniu, wyznaczony w pomiarach w 2018 r.

Pionowe przemieszczenia terenu wyznaczono na podstawie interpolacji danych z zastosowaniem metody krigingu. Zmiany wysokości reperów w latach 2005–2018 odniesiono głównie do stanu z 1995 r., którą to datę przyjmuje się za moment wygaśnięcia ruchów górotworu po zakończeniu eksploatacji złoża i likwidacji wyrobisk górniczych. Pomiary zmian wysokości prowadzono w długim przedziale czasowym, zapewniającym wiarygodną interpretację wyników. Dodatkowo przeanalizowano zmiany ukształtowania terenu w krótkich (2–3 letnich) interwałach czasowych i odniesiono je do wyników badań z innych lat.

WYNIKI BADAŃ

Analiza wyników pomiarów przemieszczeń powierzchni terenu, wykonywanych w Inowrocławiu w roku 1995 (Hus i in., 1996) i w latach 2005–2018, doprowadziła do wniosku, że wartość pionowego przemieszczenia znacznej większości reperów (81,1%) jest statystycznie istotna, ponieważ przekracza podwójną wartość średniego błędu pomiaru. Jednak zmiany wysokości zachodzące w krótkim

czasie były nieznaczne (często na pograniczu błędu pomiarowego), a ich rozkłady przestrzenne są stosunkowo nieregularne, natomiast obszary osiadań i wypiętrzeń analizowane w większych przedziałach czasowych, w latach 1995–2005 i 2005–2018, dają jednoznaczny obraz o regularnych kształtach (ryc. 4 i 5). Co więcej, zmiany wysokości niemal wszystkich punktów wykazują wyraźny trend, a ich rozkłady charakteryzują się bardzo dużym podobieństwem.

Rozkład przemieszczeń pionowych w latach 1995–2005 (ryc. 4) jest podobny do rozkładu przemieszczeń w latach 2005–2018 (ryc. 5). Z uwagi na długość interwału czasowego rozpatrywanych zmian oraz odstęp czasowy od ustania wpływów górniczych w 1995 r. (w rzeczywistości mogły jeszcze występować ruchy wygasające) rozkład przemieszczeń pionowych w tym właśnie okresie może być przyjęty za reprezentatywny dla współczesnego kształtowania się powierzchni terenu nad wysadem solnym w Inowrocławiu. Wyznaczone parametry charakteryzujące ruch powierzchni terenu w tym okresie można przyjąć za najbardziej wiarygodne i reprezentatywne dla współczesnego procesu diapiryzmu.

Analiza wyników pomiarów przemieszczeń gruntu na obszarze Inowrocławia, z lat 1995, 2002, 2004, 2005, 2007 i 2018, doprowadziła do stwierdzenia pewnych prawidłowości:

- ❑ pionowe przemieszczenia gruntu cechują się niemal stałym tempem, a charakterystyka rozkładu zmian wskazuje, że proces ten nie wygasa;
- ❑ maksymalna roczna prędkość przemieszczeń zarówno dodatnich (wypiętrzenia), jak i ujemnych (osiadania) jest zaskakująco podobna i wynosi ok. 1 mm/rok. Chociaż w obrazie zmian wysokości powierzchni terenu nie można wykluczyć zanikających wpływów ruchów pogórnich, zachodzących w podszonych wyrobiskach byłej kopalni *Solno*, to jednak wpływy te są bardzo niewielkie i nie zaburzają znacząco obrazu analizowanych zmian. Z pewnością jest tak w północnej części miasta, co można stwierdzić na podstawie analizy dawnych rozkładów osiadań (ryc. 3);
- ❑ wypiętrzenia gruntu występują głównie w środkowej i północnej części miasta. Centrum wypiętrzeń niezmiennie od lat znajduje się pod rynkiem inowrocławskim;
- ❑ osiadanie gruntu jest widoczne na mapie rozkładu pionowych przemieszczeń w formie niecek (ryc. 3);
- ❑ północno-zachodnia niecka osiadań – obszar występowania starych zapadlisk (w tym tych sprzed rozpoczęcia działalności górniczej), rozpoznany przez geologów niemieckich jako rejon silnej degradacji górotworu – jest miejscem przecinania się dyslokacji tektonicznych, które stanowią drogi migracji wód podziemnych w kierunku południowej części wysadu;
- ❑ południowa niecka osiadań obejmuje rozległy obszar występowania starych kopalń oraz późniejszej eksploatacji otworowej, sięgający do centrum miasta, z maksimum przemieszczeń w rejonie szybu *Solno III* (S3) dawnej kopalni *Solno*.

Brak odpowiednio zlokalizowanych reperów sprawił, że nie można dokładnie opisać przebiegu niektórych granic obszarów wypiętrzeń i osiadań. Niemniej jednak zasięgi tych obszarów zostały uchwycone w przybliżonych zarysach,



Rys. 4. Mapa pionowych przemieszczeń powierzchni terenu zarejestrowanych w latach 1995–2005 [mm]. Podkład – mapa topograficzna pozyskana z portalu geoportal.gov.pl

Fig. 4. Map of vertical displacements of the terrain surface observed in the period 1995–2005 [mm] (based on topographic base map from the portal geoportal.gov.pl)

odpowiadających mniej więcej tym, które obserwowano w poprzednich latach (ryc. 3–5).

Rozkład zmian pionowych przemieszczeń gruntu w czasie wskazuje, że zasięg obszarów osiadań zmniejsza się (ryc. 3–5). Niecki osiadań gruntu (północno-zachodnia i południowa) są oddzielone pasem wypiętrzeń długości ok. 1,5 km i szerokości 500–700 m, który ciągnie się wzdłuż ulicy Toruńskiej w Inowrocławiu. SW-NE orientacja tego pasa wypiętrzeń nawiązuje do biegu jednej z linii dyslokacji tektonicznych, co może świadczyć o sprzyjających warunkach migracji soli ku górze. Natomiast jego geometria nie nawiązuje do topografii analizowanego obszaru.

Osiadanie gruntu w południowej części Inowrocławia prawdopodobnie jest efektem starej eksploatacji z początku XX w. Po jej zakończeniu wraz z ograniczeniem działalności górniczej w północnej części wysadu można było do lat 50. XX w. (tj. do czasu ujawnienia się znaczących wpływów kopalni *Solno*) zaobserwować niewielkie wypiętrzenia powierzchni terenu (ryc. 3), niespotykane wówczas w polskim górnictwie, którym jednak nie poświęcono należytej uwagi.



Ryc. 5. Mapa pionowych przemieszczeń powierzchni terenu zarejestrowanych w latach 2005–2018 [mm]. Podkład – mapa topograficzna pozyskana z portalu geoportal.gov.pl

Fig. 5. Map of vertical displacements of the terrain surface observed in the period 2005–2018 [mm] (based on topographic base map from the portal geoportal.gov.pl)

Przyczyny obserwowanych osiadań można upatrywać w podziemnej erozji złoże. Zaskakujące jest duże tempo osiadania gruntu na wschód od zlikwidowanego już szybu Solno III (S3), gdzie w przeszłości nie występowały zapadliska pochodzenia górniczego i, jak sugerowały dotychczasowe wyniki badań, nie ma warunków do ługowania złoże na większą skalę. Jest to rejon, gdzie granica złoże gwałtownie zapada i gdzie występuje prawdopodobnie kontakt skał złoże z węglanowymi skałami jury górnej. Trudno jest jednak wyjaśnić genezę tych osiadań zarówno na podstawie sytuacji górniczej, jak i geologicznej.

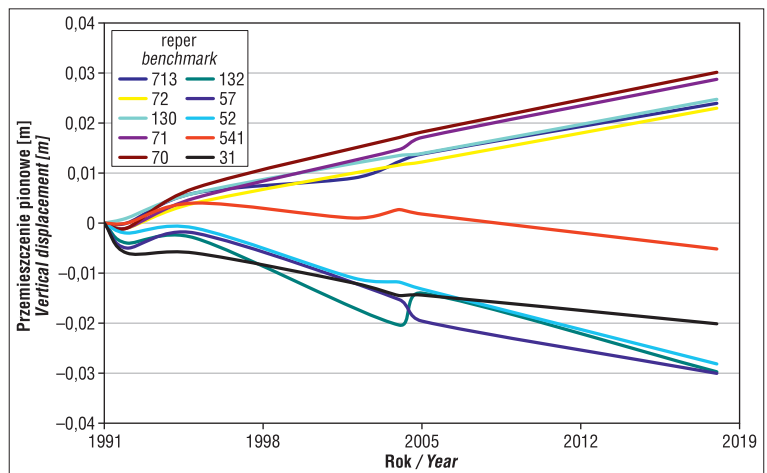
WNIOSKI

Zarówno w czasie eksploatacji złoże soli, jak i obecnie, główne przyczyny deformacji powierzchni terenu w Inowrocławiu są złożone – stanowią one wypadkową różnych procesów naturalnych i pogórnicznych. Deformacje obserwowane na terenie Inowrocławia obejmują przede wszystkim osiadania gruntu na skutek podziemnej erozji złoże i jego wypiętrzenia wynikające z naturalnego ruchu

wysadowego soli. Osiedlenia w południowej części wysadu najprawdopodobniej zostały wywołane eksploatacją złoża na początku XX w. i mają ograniczony zasięg.

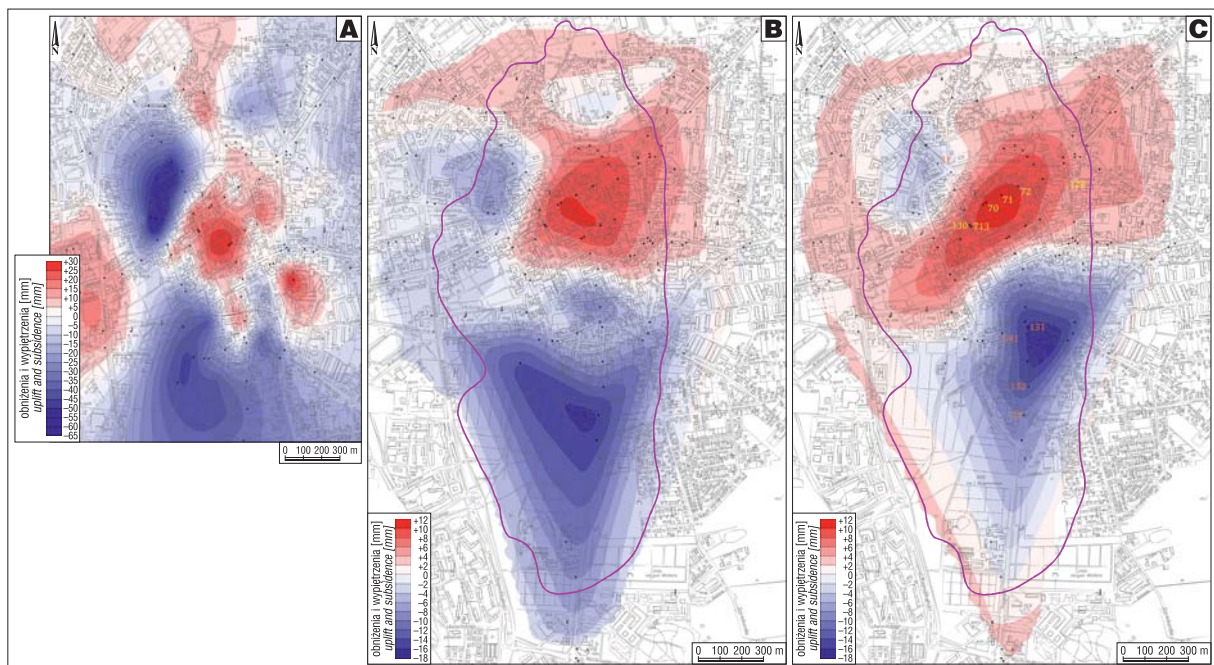
Charakterystyczny jest rozkład osiadań terenu w formie trzech niecek, które powstały przed 100 laty. Według Budryka (1933) geneza tych niecek nie ma związku z działalnością górniczą, tylko zależy od sytuacji hydrogeologicznej i erozji podziemnej, w odróżnieniu od osiadań, które stwierdzono w południowej części miasta, w rejonie starych, zatopionych kopalń niemieckich.

Wyznaczona geodezyjnie prędkość dźwignia się struktury solnej Inowrocławia odpowiada tej wyliczonej na podstawie wyników badań geologicznych – ok. 1 mm/rok. W porównaniu z mobilnością innych wysadów na Niżu Europejskim jest to prędkość znacząca. W Niemczech średnie tempo ruchu wysadów wynosi ok. 0,3 mm/rok (Trusheim, 1957).



Ryc. 6. Pionowe przemieszczenia wybranych reperów osnowy wysokościowej Inowrocławia w latach 1991–2018

Fig. 6. Vertical displacements of selected benchmarks of vertical control network in the area of Inowrocław in the years 1991–2018



Rys. 7. Pionowe przemieszczenia powierzchni terenu na obszarze Inowrocławia w latach: A – 1932–1956, B – 1995–2005, C – 2005–2018 (na podkładzie topograficznym w skali 1:10 000, pozyskanym z portalu geoportal.gov.pl)

Fig. 7. Vertical displacements of terrain surface in the area of Inowrocław in periods: A – 1932–1956, B – 1995–2005, C – 2005–2018 (based on 1:10,000 topographic base map from the portal geoportal.gov.pl)

Pas gruntu podlegający wypiętrzeniu, o rozciągłości SW-NE, ma inną orientację niż wysad (S-N). Można to wyjaśnić tym, że granice i geometria pasa wypiętrzeń są uwarunkowane i ograniczone podziemną erozją, która w niektórych miejscach jest niezwykle intensywna i tempo redukcji horyzontu solnego jest szybsze niż jego wypiętrzenie na skutek ruchu wysadowego.

Na uwagę zasługuje tempo pionowych przemieszczeń reperów – w ciągu kilku lat było ono bardzo stabilne, jednak w krótszych okresach (rocznych lub 2-letnich) zaobserwowano jego znaczące oscylacje. Ilustrują to charakterystyki pionowych przemieszczeń wybranych reperów z poszczególnych rejonów miasta (ryc. 6). Nie wielkie i niemal stałe tempo osiadań, które obserwuje się od wielu lat, oraz ich stosunkowo duży zasięg wskazują na

naturalną przyczynę przemieszczeń powierzchni terenu – podziemną erozję, która wynika z kontaktu podatnych na ługowanie soli z poziomami wodonośnymi.

Obserwowane wypiętrzenia gruntu niewątpliwie są związane z ruchem wysadowym struktury solnej. Występowanie wypiętrzeń w północnej części Inowrocławia może dowodzić, że w rejonie tym nie zachodzą procesy erozyjne lub są one powolne. Przestrzenny układ pionowych przemieszczeń terenu, gdy wpływy eksploatacji górniczej były minimalne lub wręcz zanikły, ilustruje ryc. 7. Widoczne na rycinie zróżnicowanie przemieszczeń pionowych na stosunkowo niewielkim obszarze świadczy o jego specyfice i jest przejawem aktywności procesów geologicznych, a opisana charakterystyka kinematyczna jest wyjątkowa na obszarze Polski.

Składamy serdeczne podziękowania Recenzentom za niezwykle cenne uwagi merytoryczne i wnikliwie spostrzeżenia umożliwiające udoskonalenie treści artykułu.

LITERATURA

- BEYSCHLAG F. 1913 – Das Salzvorkommen von Hohensalza. [W:] Der Bergbau im Osten des Königreichs Preussen. Festschrift zum XII Allgemeinen Deutschen Bergmannstage in Breslau, Wrocław: 7–12.
- BUDRYK W. 1933 – Zapadliska na terenie miasta Inowrocławia. *Prz. Gór.-Hut.*, 25 (8): 431–444.
- BUJAKOWSKI W. 1986 – Kartograficzne opracowanie północnej części wysadu solnego Inowrocławia. *Kwart. Zesz. Nauk. AGH*, 10: 121–128.
- BURLIGA S. 1996 – Implications for early basin dynamics of the Mid-Polish Trough from deformational structures within salt deposits in central Poland. *Kwart. Geol.*, 40: 185–202.
- DADLEZ R. 1974 – Types of local tectonic structures in the Zechstein-Mesozoic complex of northwestern Poland. *Biul. Inst. Geol.*, 274: 149–177.
- GÓRSKI J., RASAŁA M. 2009 – Warunki hydrogeologiczne w rejonie wysadów solnych i ich znaczenie dla bezpieczeństwa gospodarczego wykorzystania struktur solnych. *Biul. Państw. Instyt. Geol.*, 436: 121–128.
- HARDING R., HUUSE M. 2015 – Salt on the move: Multi stage evolution of salt diapirs in the Netherlands North Sea. *Marine and Petrol. Geol.*, 61: 39–55.
- HULISZ P., KRAWIEC A., PINDRAL S., MENDYK Ł., PAWLIKOWSKA K. 2017 – The impact of environmental conditions on water salinity in the area of the city of Inowrocław (north-central Poland). *Bull. Geogr.*, 13: 5–15.
- HUS M., JABŁOŃSKI S., JASIŃSKI Z., LEPIARZ J. 1996 – Działalność górnicza na złożu Inowrocław w latach 1871–1995. *Arch. Inowrocł. Kop. Soli Solino S.A.*, Inowrocław.
- KOCKEL F. 2003 – Problemy diapiryzmu solnego w północnych Niemczech. *Geologos*, 6: 57–88.
- KERSTEN T., KOBE M., GABRIEL G. 2017 – Geodetic monitoring of subsidence-induced subsidence processes in urban areas. *J. App. Geodesy*, 11: 21–29.
- KRAWCZYK C.M. 2018 – Joint project SIMULTAN – Sinkhole characterization and monitoring with supplementing geophysical methods. *Proceedings, 15th Multidisciplinary Conference on Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst and the 3rd Appalachian Karst Symposium*, Shepherdstown, West Virginia, USA; https://scholarcommons.usf.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=https://www.google.com/&httpsredir=1&article=1005&context=sinkhole_2018
- KRZYWIEC P. 2009 – Geometria i ewolucja wybranych struktur solnych z obszaru Niżu Polskiego w świetle danych sejsmicznych. *Prz. Geol.*, 57 (9): 812–818.
- ŁĄKA M. 1981 – Dokumentacja szczegółowych badań grawimetrycznych. Temat: wysad solny Inowrocław. *Arch. Przedsięb. Bad. Geofiz.*, Warszawa.
- MAREK S., RACZYŃSKA A. 1974 – Lokalne formy strukturalne Polski środkowej. [W:] Pożaryski W. (red.), *Budowa geologiczna Polski*, t. 4, Tektonika, cz. 1, Niż Polski. *Wyd. Geol.*, Warszawa: 279–313.
- NEY R., ŚLIZOWSKI K. 1991 – Kopalnia *Solno* poligonem doświadczalnym w skali cechsztyńskiego Zagłębia solnego Europy Wschodniej. *Gosp. Sur. Miner.*, 7 (4): 957–979.
- NIEMIAROWSKI W. 1983 – Postglacialne ruchy skorupy ziemskiej na Pojezierzu Kujawskim w świetle badań geomorfologicznych. *Prz. Geogr.*, 55 (1): 13–27.
- PIĄTKOWSKA A., SURAŁA M., PERSKI Z., GRANICZNY M. 2012 – Application of the SAR interferometric methods to identify the mobility of the area above the salt diapir in Inowrocław and the regional salt structures in central Poland. *Geol., Geophys. Environ.*, 38 (2): 209–220.
- PILECKI Z., SZCZERBOWSKI Z., KŁOSIŃSKI J., KOSTER M. 2003 – Sejsmiczne badanie stanu górotworu na terenie wysadu solnego Inowrocław. *Bezp. Pr. Ochr. Środ. Gór.*, 5 (105): 48–50.
- POBORSKA-MŁYNARSKA K. 1984 – Naturalna degradacja wysadu solnego w Inowrocławiu. *Kwart. Geol.*, 28 (2): 341–352.
- POBORSKI J. 1957 – Wyzształcenie czapy gipsowej i rozwój zjawisk kraśowych na wysadzie solnym w Inowrocławiu. *Arch. Gór.*, 4: 225–248.
- SZCZERBOWSKI Z., GAWAŁKIEWICZ R. 2005 – Użyteczność geodezyjnych pomiarów w diagnostyce zabytkowych obiektów na przykładzie kościoła w Inowrocławiu. *Prz. Budow.*, 2: 22–28.
- SZCZERBOWSKI Z. 2005 – Initial Interpretation of Post-mining Movements of the Surface in the Area of Inowrocław. *Arch. Mining Sci.*, 50 (2): 235–249.
- SZCZERBOWSKI Z. 2007 – The evaluation of salt dome vertical movements in Inowrocław detected by classical precise levelling and GPS surveying techniques. *Acta Geodynam. Geomat.*, 4, 4 (148): 1–10.
- SZCZERBOWSKI Z. 2009a – Geodetic surveys in detection of geological features: a case study of Inowrocław area, central Poland. *Ann. Soc. Geol. Polon.*, 79: 169–176.
- SZCZERBOWSKI Z. 2009b – Toward the reliability of geodetic surveys in study of geodynamics – a problem of influence of seasonal variations. *Acta Geodyn. Geomat.*, 6, 3 (155): 253–263.
- SZCZERBOWSKI Z. 2010 – The use of land information system in geomorphostructural analysis on the example of Inowrocław. *Acta Geodyn. Geomat.*, 7, 2 (158): 153–166.
- SZCZERBOWSKI Z., PIĄTKOWSKA A. 2015 – Towards Data Integration and Analysis in the Detection of Terrain Surface Deformation in the Case of the Inowrocław Salt Dome. *Geomat. Environmen. Engin.*, 9 (4): 85–100.
- TARKA R. 1992 – Tektonika wybranych złóż soli w Polsce na podstawie badań mezostrukturalnych. *Pr. Państw. Inst. Geol.*, 147: 1–47.
- TRUSHEIM F. 1957 – Über Halokinese und ihre Bedeutung für die strukturelle Entwicklung Norddeutschlands. *Deutsche Geol. Gesell. Zeitschr.*, 109: 111–151.
- WAGNER M., BURLIGA S. 2014 – Coalified bitumens from the Kłodawa Salt Structure (central Poland) as evidence of migration of hydrothermal fluids in Zechstein (Upper Permian) deposits. *Geol. Quart.*, 58 (3): 555–564.
- WILKOSZ P. 2006 – Ewolucja geologiczna i kinematyka struktury solnej Mogilno. *Prz. Geol.*, 54 (4): 307.
- ZHANG Y., KRAUSE M., MUTTI M. 2013 – The Formation and Structure Evolution of Zechstein (Upper Permian) Salt in Northeast German Basin. *A Rev. Op. J. Geol.*, 3: 411–426; <http://dx.doi.org/10.4236/ojg.2013.38047>

Praca wpłynęła do redakcji 3.07.2019 r.

Akceptowano do druku 17.01.2020 r.