

Późnoneogeńska aktywność tektoniczna w centralnej części zapadliska przedkarpackiego (Witów koło Nowego Brzeska)

Marta Rauch-Włodarska*, Witold Zuchiewicz**, Wojciech Włodarski***



M. Rauch
-Włodarska



W. Zuchiewicz



W. Włodarski

Late Neogene tectonic activity of the central part of the Carpathian Foredeep (Witów near Nowe Brzesko, South Poland). *Prz. Geol.*, 54: 943–952.

S u m m a r y. Normal faults of different orientations appear to be the youngest manifestations of faulting in the Carpathian Foredeep which is filled with Lower to Middle Miocene sediments. Structural studies of the Late Miocene–Pliocene(?) fresh-water molasses of the Witów Series and the overlying Late Pleistocene loessial complex provide a possibility to reconstruct the Late Neogene to Recent (?) stress field in the central part of the Polish Carpathian Foredeep. Strata of such a young age are very rare in the foredeep, thus providing a key record of structural deformation during the latest stages of orogenic evolution of the Carpathian orogen. The

molasses are cut by joints, and normal and strike-slip faults, formed in two successive events: (1) a syn-depositional one for the molasses (Late Miocene–Pliocene?), proceeding under NNW–SSE to N–S-oriented horizontal compression, possibly coeval with reactivation of a NE-striking sinistral fault of the Kurdwanów–Zawichost Fault Zone in the basement; (2) a post-depositional one for the molasses (Pliocene to Middle Pleistocene) during N–S to NE–SW-oriented extension, and (3) both syn- and post-depositional ones for the loessial complex (Late Pleistocene). In the first event, reactivation of the NE-striking sinistral fault led to formation of N–S-oriented joints, as well as NW-striking dextral, and NNW-trending normal faults. In the second event, both W–E and NW–SE-oriented joints and WNW-striking normal faults were formed. The latter most probably originated due to reactivation of the Early Palaeocene WNW- and NW-striking normal faults in the basement. In the third event, both NE–SW and NW–SE-oriented joints and NE-striking normal faults formed as a result of reactivation of the SW- and WSW-striking faults in the basement. Therefore, normal faults detected in the Carpathian Foredeep appear to be a result of different successive events. This extensional episode lasted at least to the Late Pleistocene. We also provide evidence for the recent, N- to NNE-directed, tectonic compressive stress, typical for that segment of the Carpathian arc. This stress resulted in the formation of an orthogonal system of joints striking N–S and W–E, produced during the (4) event.

Key words: South Poland, Carpathian Foredeep, Miocene–Pliocene molasses, Late Vistulian loessial complex, small-scale tectonic structures

Celem artykułu jest rekonstrukcja orientacji późnoneogeńskiego pola naprężeń w centralnej części polskiego segmentu zapadliska przedkarpackiego na podstawie analizy drobnych struktur tektonicznych. Struktury te badano w Witowie, w obrębie górnomiocenijskich i być może dolnopliocenijskich, słodkowodnych osadów tzw. serii witowskiej oraz w nadległym kompleksie lessowym zdeponowanym w trakcie glacialnego piętra wisły.

Sytuacja geologiczna

Piaszczysto-żwirowe osady opisane przez Łyczewską (1948) jako seria witowska odsłaniają się w widłach rzek Szreniawy i Wisły, w obrębie centralnej części zapadliska przedkarpackiego (ryc. 1, 2). Są to słabo scementowane piaskowce, piaski, żwiry i mułowce (ryc. 3) występujące na starszych utworach miocenijskich. Bezpośrednio na osadach serii witowskiej niezgodnie leży górnoplejstocenijski kompleks lessowy.

Osady serii witowskiej reprezentują słodkowodne molasy, których wiek i geneza były przedmiotem licznych

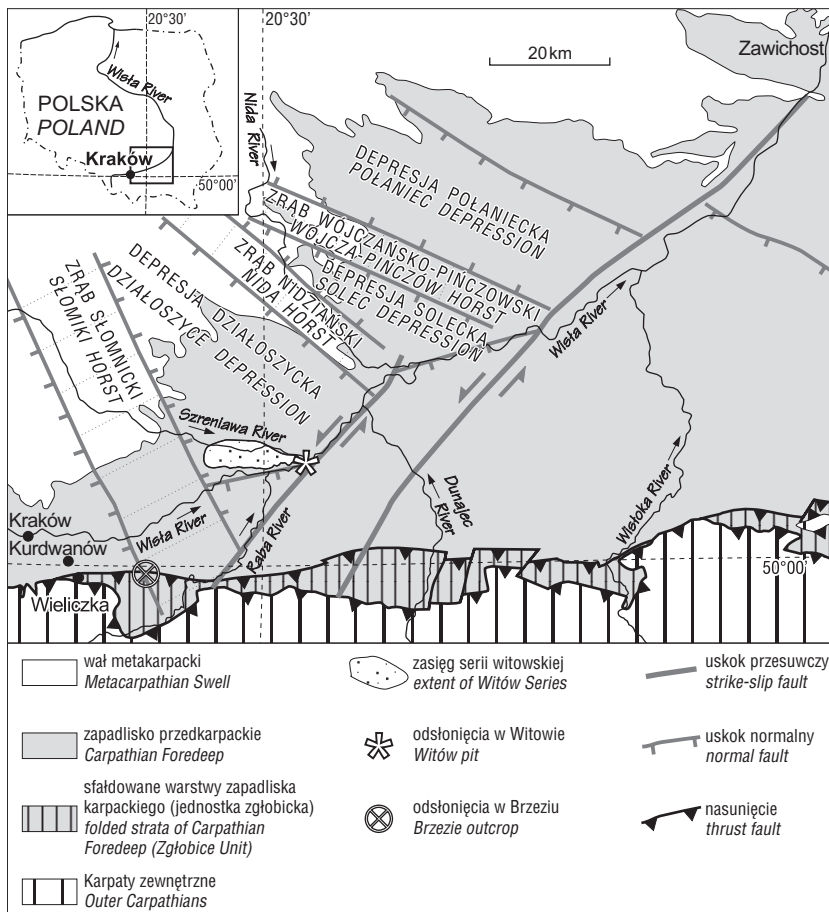
kontrowersji. Osady te odzwierciedlają epizod intensywnej erozji Karpat zewnętrznych wywołany ich późnoorogenicznym podnoszeniem (por. Dżułyński i in., 1968; Starkel, 1972). Zespół litofacji obecny w serii witowskiej jest charakterystyczny dla rzeki roztokowej, płynącej od strony Karpat i akumulującej materiał pochodzenia karpackiego. Rezultatem poprzednich badań były różne opinie na temat wieku i genezy tych osadów: od koncepcji miocenijskich osadów morskich przez eoplejstocenijskie, po środkowoplejstocenijskie osady lądowe (por. Brud, 2002, 2004; Brud & Worobiec, 2003; Brud i in., 2003 oraz prace tam cytowane). Najnowsze wyniki interdyscyplinarnych badań, w tym sedymentologicznych, petrograficznych i paleobotanicznych sugerują, że osady serii witowskiej były deponowane w późnym miocenie i być może wczesnym pliocenie (Brud, 2002, 2004; Brud & Worobiec, 2003).

Seria witowska leży niezgodnie na badeńsko-sarmackich (środkowomiocenijskich) osadach wypełniających środkową część zapadliska przedkarpackiego. Basen zapadliska uformował się na proterozoiczno-mezozoicznych skałach platformy europejskiej, u czoła nasuwających się Karpat zewnętrznych i wypełniony jest osadami dolnego i środkowego miocenu (Oszczypko, 1998; Olszewska, 1999). Utwory miocenijskie leżą zazwyczaj poziomo i jedynie lokalnie są sfałdowane. W południowej części zapadliska natomiast, wzdłuż frontального nasunięcia Karpat zewnętrznych, ciągnie się strefa silnie sfałdowanych i zuskokowanych skał miocenijskich (ryc. 1) zwana jednostką zglębicką (Kotlarczyk, 1985). W tej jednostce osie regionalnych fałdów i biegi regionalnych nasunięć są zoriento-

*Instytut Nauk Geologicznych PAN, ul. Senacka 1, 31-002 Kraków; ndrauch@cyf-kr.edu.pl;

**Instytut Nauk Geologicznych, Uniwersytet Jagielloński, ul. Oleandry 2A, 30-063 Kraków; witold@ing.uj.edu.pl;

***Instytut Geologii, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, ul. Maków Polnych 16, 61-686 Poznań; wojtekw@amu.edu.pl



Ryc. 1. Szkic tektoniczny centralnej części zapadliska przedkarpackiego (Krysiak, 2000), ilustrujący zasięg serii witowskiej (Brud, 2002) i lokalizację żwirowni w Witowie. Jednostka zgłobicka za Połtowiczem (1991; uproszczone)
Fig. 1. Tectonic sketch of the central part of the Carpathian Foredeep (after Krysiak, 2000), showing the extent of the Witów Series (Brud, 2002) and location of the Witów pit. The Zgłobice Unit after Połtowicz (1991; simplified)

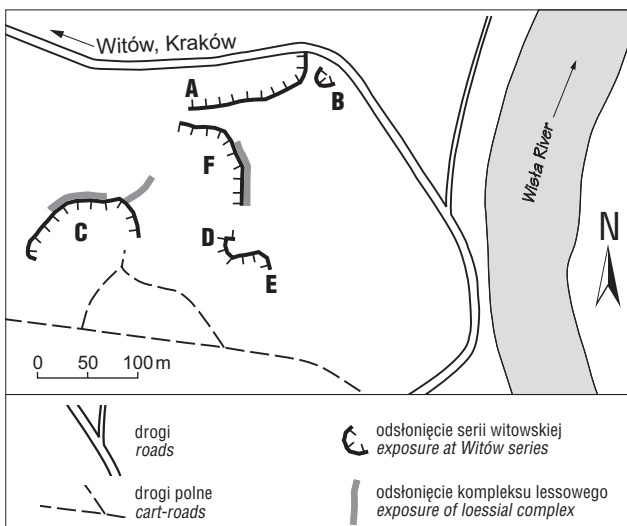
WSW–ENE. Ograniczają one szereg jednostek tektonicznych o charakterze rowów (depresji) i zrębów (Krysiak, 2000). Obszar badań jest zlokalizowany w obrębie rowu zwanego depresją działoszycką, obciętego dwoma uskoka-
 mi o przebiegu NW–SE. Analiza przekrojów sejsmicznych wykazała, że w podłożu centralnej części zapadliska uskoki normalne (WNW–ESE i NW–SE) wykazywały aktywność w późnym badenie (Krzywiec, 2001). Pozostałe uskoki o biegu od NE–SW do NNE–SSW są zwykle uskoki przesuwczymi lub normalno-przesuwczymi (Krysiak, 2000 i prace tam cytowane). Jeden z takich uskoku-
 wów o kierunku NE–SW, zaliczanych do strefy przesuwczej Kurdwanów–Zawichost, biegnie w pobliżu badanego odsłonięcia w Witowie (ryc. 1). Według Osmólskiego i in. (1978) strefa przesuwcza Kurdwanów–Zawichost była reaktywo-
 wana jako uskok lewoprzesuwczy w środkowym miocenie. Krysiak (2000) natomiast sugeruje, że mioceni-
 ska aktywność tej strefy uskokuwej rozpoczęła się uskokuwaniem normalnym u schyłku środkowego miocenu, a nastę-
 pnie w późnym miocenie nastąpiło usko-
 kowanie lewoprzesuwcze. Jarosiński (1992) potwierdził obecność lewoprze-
 suwczą reaktywacji strefy Kurdwa-
 nów–Zawichost pod wpływem
 południkowej kompresji wywołanej
 nasuwaniem się Karpat zewnętrznych
 w sarmacie lub później. Również i ten
 okres reaktywacji strefy uskokuwej
 Kurdwanów–Zawichost jako uskoku

wane od W–E do WNW–ESE (Mitura & Moskała-Martini, 1954; Kirchner & Połtowicz, 1974; Połtowicz, 1991, 1998; Krzywiec, 2001).

Skały podłoża centralnej części zapadliska przedkarpackiego (ryc. 1) są pocięte przez regionalne uskoki normalne i przesuwcze (Krzywiec, 1997, 2001; Krysiak, 2000 i prace tam cytowane). Wczesnopaleoceńskie uskoki normalne mają orientację NW–SE, rzadziej NNW–SSE i

lewoprzesuwczego zakończył się uskokuwaniem normalnym.

W Brzeziu (ryc. 1), w obrębie jednostki zgłobickiej w centralnej części zapadliska przedkarpackiego, w lessach piętra Wisły rozpoznano obecność kopalnego rowu ograniczonego uskoki normalnymi o kierunkach NNW–SSE i NE–SW (Rauch-Włodarska i in., 2005). Wspomniani autorzy sugerują, że uskoki te powstały w wyniku reaktywacji uskoku lewoprzesuwczego o kierunku NE–SW, należącego do strefy Kurdwanów–Zawichost, który znajduje się w badanym rejonie w podłożu zapadliska.



Ryc. 2. Lokalizacja odsłonieć w Witowie
Fig. 2. Location sketch of the Witów exposures

Wyniki badań struktur zniszczeniowych *breakouts* sugerują, że współczesne pole naprężeń w centralnej części zapadliska przedkarpackiego charakteryzuje się poziomą kompresją zorientowaną N–S do NNE–SSW (Jarosiński, 1998; Zuchiewicz i in., 2002; Kłęk i in., 2003).

Drobne struktury tektoniczne w centralnej części zapadliska przedkarpackiego

Miocenne skały zapadliska przedkarpackiego są pocięte spękaniami ciosowymi, rzadziej uskokami normalnymi (Krysiak, 1986; Rauch, 1995, 1998; Rauch & Tokarski, 1995; Krzywiec, 2001). Nie istnieje powszechnie akceptowana definicja ciosu (Twiss & Moores, 1992). Dlatego też, w niniejszej pracy termin ten traktujemy jako użyteczne pojęcie terenowe, oznaczające planarne, zamknięte spękania bez widocznej przesunięcia w skali obserwacji, które zwykle wykazują regularną orientację, co umożliwia ich grupowanie w zespoły o niemal równoległych powierzchniach (por. Hancock, 1985; Jackson, 1997). Cios, jako struktura powszechnie występująca w odsłonięciach w całym zapadlisku przedkarpackim, stanowi istotny wskaźnik orientacji dawnego pola naprężeń. Osady centralnej części polskiego segmentu zapadliska przedkarpackiego wykazują obecność czterech zespołów ciosu o rozciągłości: (I) 70–110°; (II) 165–185°; (III) 10–60° i (IV) 125–155° (Rauch & Tokarski, 1995; por. też Krysiak, 1986). Wiek powstania ciosu zespołu (I) określono na późny baden, zespołu (II) na późny baden–wczesny sarmat, zespołu (III) na późny miocen, a zespołu (IV) na pliocen (Rauch & Tokarski, 1995; Rauch, 1998).

Seria witowska — przegląd dotychczasowych badań tektonicznych

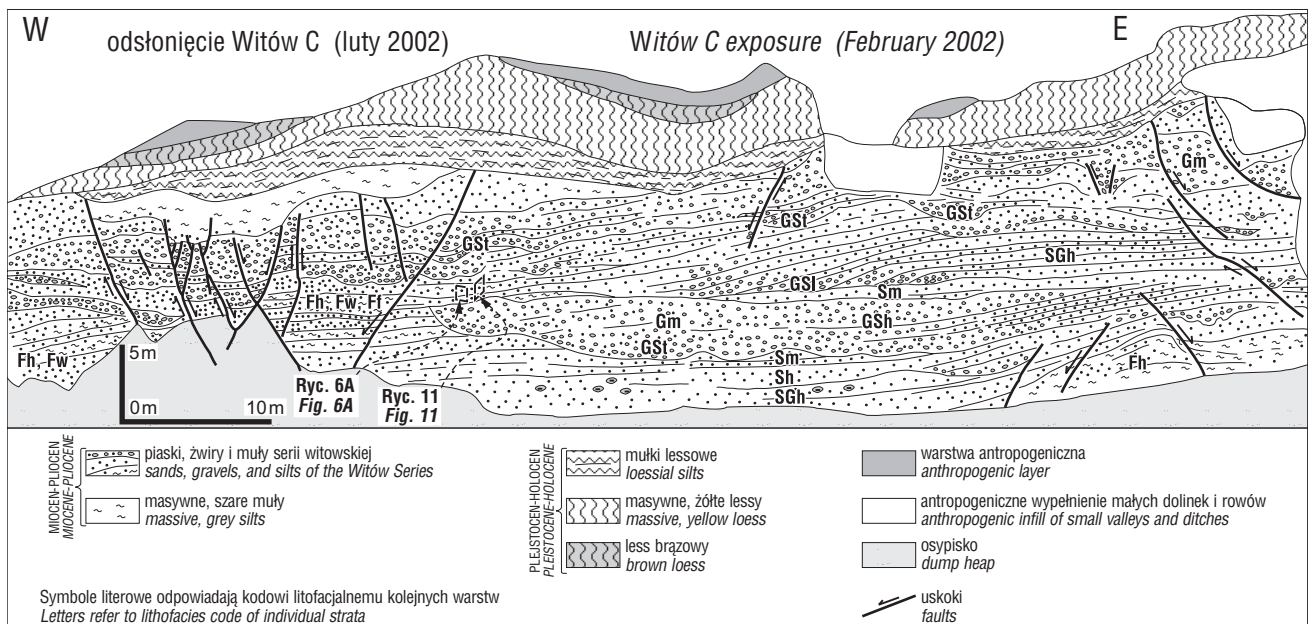
Deformacje tektoniczne w osadach serii witowskiej po raz pierwszy zostały opisane przez Łyczewską (1948), która znalazła drobne uskoki normalne i fałdy w górnej części

serii i zasugerowała ich glacitektoniczną genezę. Krysiak (1986, 1987) udokumentowała obecność uskoków normalnych, które cięły całą odsłoniętą część profilu serii witowskiej i charakteryzowały się listryczną geometrią. Uskoki normalne zapadają pod kątami 45–70°, a ich rozciągłość zwykle wynosi 130–170°, rzadziej 100–110°. Cytowana autorka (Krysiak, 1987) nie znalazła dowodów na synsedymacyjny charakter uskoków i zasugerowała, że brak wzrostu intensywności deformacji ku stropowi serii witowskiej zaprzecza ich glacitektonicznej genezie, postulowanej przez Łyczewską (1948). Natomiast biorąc pod uwagę zbliżoną orientację drobnych uskoków normalnych w obrębie tej serii i regionalnych uskoków normalnych w podłożu analizowanego fragmentu zapadliska przedkarpackiego, wysunęła hipotezę, iż drobne uskoki w serii witowskiej powstały w wyniku wstrząsów sejsmicznych wywołanych relaksacją glaciostatyczną po zlodowaceniu sanu 2. Do podobnych wniosków przychylił się Zuchiewicz (1995), który rozpoznał w serii witowskiej dwa zespoły ciosu W–E i NNW–SSE oraz dwa zespoły uskoków normalnych NE–SW i NNW–SSE, odpowiednio w północnej i zachodniej części odsłonięcia w Witowie. Według Krysiak (2000) uskoki o kierunku NW–SE były formowane w późnym neogenie, natomiast etap E–W do ENE–WSW zorientowanej ekstensji nastąpił w czwartorzędzie. Wspomniana autorka wnioskowała o synsedymacyjnym charakterze obu etapów uskokuwania.

W kompleksie lessowym zapadliska przedkarpackiego nie analizowano dotychczas drobnych struktur tektonicznych, za wyjątkiem sygnałnych pomiarów Bruda (2002).

Drobne struktury tektoniczne w odsłonięciu w Witowie — wyniki obserwacji

Badania przeprowadzono na terenie żwirowni w Witowie, w obrębie odsłoneń oznaczonych jako Witów A, B, C, D, E i F (ryc. 2). Leżące niemal poziomo osady serii witowskiej (ryc. 3) są pocięte licznymi spękaniami cioso-

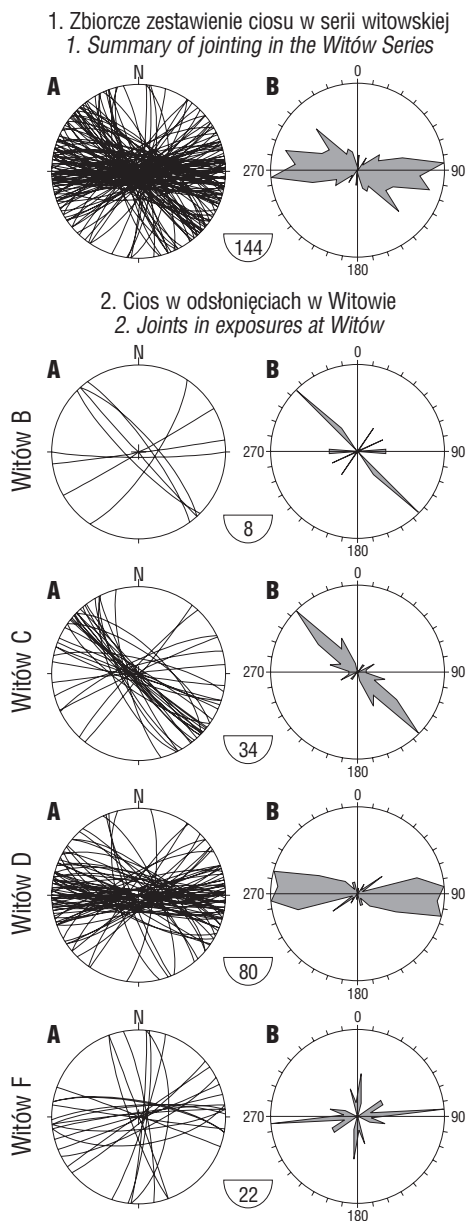


Ryc. 3. Odsłonięcie C, główne odsłonięcie w Witowie, widok od południa (wg Bruda, 2004)

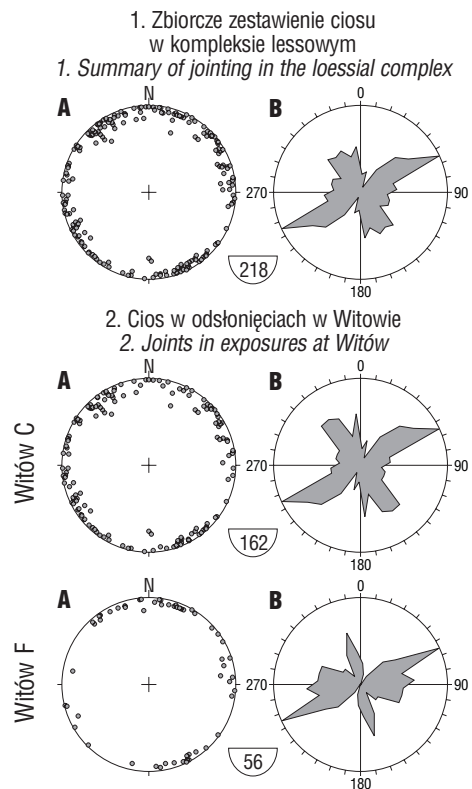
Fig. 3. Exposure C, the principal exposure at Witów, viewed from the south (based on Brud, 2004)

wymi oraz uskokami normalnymi i przesuwczymi. Komplex lessowy pokrywający osady serii witowskiej odsłania się najlepiej w odsłonięciach C i F, gdzie też przeprowadzono obserwacje drobnych struktur. Komplex ten jest pocięty licznymi spękaniemiosowymi oraz uskokami normalnymi.

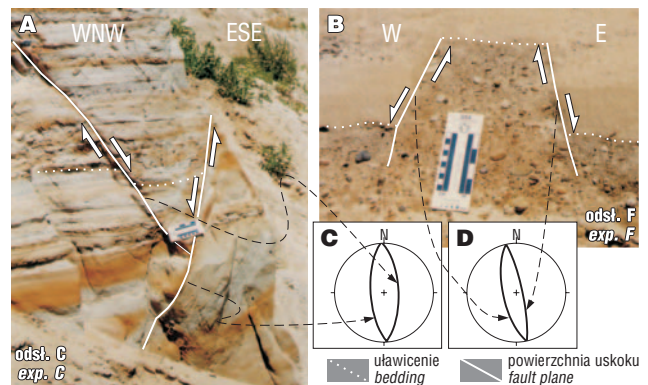
Cios w serii witowskiej obserwowano we wszystkich odsłonięciach w Witowie; łącznie pomierzono orientację 144 powierzchni ciosowych (ryc. 4). Powierzchnie te zapadają stromo, zwykle ok. 85°. Azymut linii biegu powierzchni ciosowych wykazuje dużą zmienność, jednak najczęściej mieści się w zakresie od 85 do 105°. Wyraźnie zaznacza się również cios o rozciągłości 135°. W poszczególnych odsłonięciach rozkład orientacji linii kierunku powierzchni ciosowych jest zmienny. W odsłonięciach B i C cios układa się zazwyczaj NW–SE, a podrzędne zespoły mają rozciągłość 65, 40 i 105°. W odsłonięciach D i F dominuje cios o rozciągłości W–E. Niektóre z równoleżnikowych powierzchni ciosowych reprezentują spękania przewodnie, ponieważ tną całą odsłoniętą część serii witowskiej. Zagęszczenie powierzchni ciosowych obserwuje się lokalnie w pobliżu uskoków normalnych o orientacji WNW–ESE i W–E.



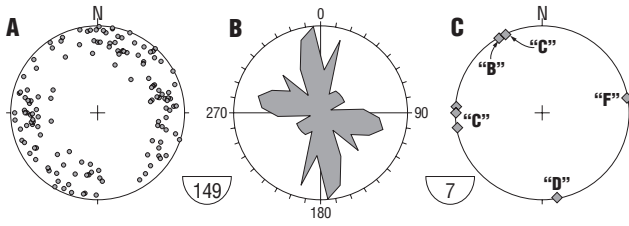
Ryc. 4. Zespoły ciosu w poszczególnych odsłonięciach serii witowskiej w Witowie (wszystkie projekcje tej i następujących rycin na dolną półkulę): A — projekcja powierzchni ciosu; B — diagram rozetowy linii kierunku powierzchni ciosu
Fig. 4. Joint sets at individual exposures of the Witów Series at Witów; lower hemisphere plots: A — great circle plots, B — rose-diagram of joint surface strikes



Ryc. 5. Zespoły ciosu w kompleksie lessowym w Witowie: A — projekcja normalnych do powierzchni ciosu; B — diagram rozetowy linii kierunku powierzchni ciosu
Fig. 5. Joint sets in the loessial complex at Witów: A — poles to joint surfaces, B — rose-diagram of joint surface strikes



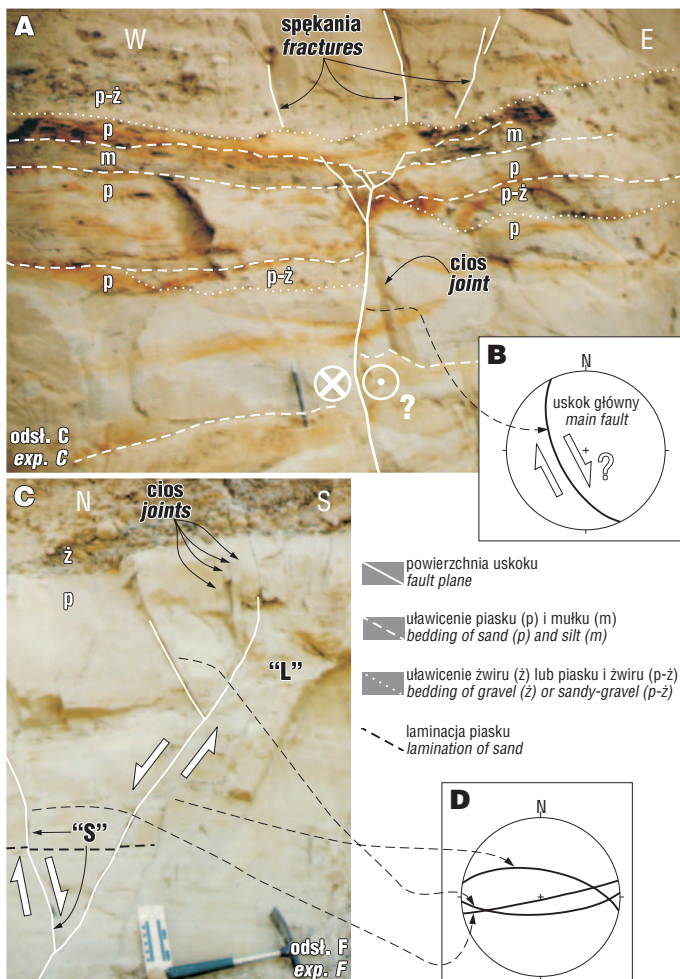
Ryc. 6. Przykłady uskoków normalnych tnących osady serii witowskiej: A — rów w odsłonięciu C, B — zrąb w odsłonięciu F
Fig. 6. Examples of normal faults cutting sediments of the Witów Series: A — graben at exposure C, B — horst at exposure F



Ryc. 7. Orientacja uskoków normalnych (A, B) i osi kanałów o wypełnieniu żwirowym (C) w serii witowskiej: A — projekcja normalnych do powierzchni uskokowych; B — diagram rozetowy linii kierunku uskoków. Duże litery na szkicu (C) odpowiadają poszczególnym odsłonięciom w Witowie

Fig. 7. Orientation of normal faults (A, B), and axes of gravel-filled channels (C) in the Witów Series: A — poles to fault surfaces; B — rose-diagram of fault plane strikes. Uppercase letters in sketch (C) refer to individual Witów exposures

Cios w kompleksie lessowym. W dwóch odsłonięciach C i F pomierzono orientację 218 powierzchni ciosowych (ryc. 5). Powierzchnie ciosu zapadają zazwyczaj pod kątem ok. 85°. Azymut linii kierunku powierzchni ciosowych jest również zmienny, jednak dominuje tutaj orientacja 65°, a podrzędnie zaznaczają się spękania układające się w przedziale od 135 do 155° (ryc. 5, I). Powierzchnie ciosu obserwowane w pobliżu uskoków normalnych wygasają na tych uskokach. W odsłonięciu F są obecne spękania ciosowe o rozciągłości równoleżnikowej (ryc. 5, 2). W odsłonięciu C cios o takiej orientacji jest słabiej widoczny, a wyraźniej zaznaczają się spękania ułożone doń prostopadle.



Uskoki normalne w serii witowskiej wykazują zrzuty od kilku milimetrów do 2 m. Największe przemieszczenia notowano na uskokach NW–SE w odsłonięciu C (ryc. 3). Uskoki normalne często tworzą dwa zespoły, ograniczające rowy i — rzadziej — zręby (ryc. 6). Uskoki zwykle zapadają stromo: 65–85° (ryc. 7A). Pojedyncze powierzchnie uskokowe często zapadają pod stałym kątem, jednak zdarzają się również powierzchnie o kształcie listrycznym (ryc. 8C; uskoki L zapadający ku NNE) lub schodkowym (ryc. 8C; uskoki S zapadający na południe). Zmienny kąt zapadania powierzchni pojedynczego uskoku jest charakterystyczny dla uskoków normalnych o kierunkach W–E, WNW–ESE i NW–SE. Uskoki o schodkowym przekroju powierzchni odznaczają się niemal pionowymi segmentami. Taką geometrię ujawniają uskoki zorientowane W–E i WNW–ESE.

Azymuty linii kierunku uskoków normalnych zwykle mieszczą się w przedziale 85–195°, grupując się zazwyczaj wzdłuż orientacji 115 i 175° (ryc. 7A i B), z których druga jest dominującą. Zarówno uskoki zespołu NNW–SSE, jak i WNW–ESE są napotymane we wszystkich odsłonięciach (ryc. 9). Zespół uskoków NNW–SSE dominuje w odsłonięciach zachodnich (C i F), a zespół WNW–ESE — w odsłonięciach wschodnich (B i D).

Uskoki NNW–SSE towarzyszą zazwyczaj kanałom o żwirowym wypełnieniu: występują pod kanałami, zwykle nie przecinając ich wypełnienia (odsłonięcia D i C; ryc. 10, 11). Powierzchnie tych uskoków zapadają na ogół ku osiowej części kanałów (ryc. 7C, 10). W odsłonięciu C dominują kanały o osiach zorientowanych równoleżnikowo, rzadziej NNW–SSE, natomiast w odsłonięciu D stwierdzono pojedynczy kanał o osi NNW–SSE (ryc. 7C). W odsłonięciu F oś kanału kierunku ENE–WSW, a uskoki o kierunku NNW–SSE tną jego wypełnienie (ryc. 6B).

Obecność niewielkich stopni morfologicznych w powierzchni spągowej niektórych kanałów, co więcej założonych na uskokach o kierunku NNW–SSE w podłożu kanałów (ryc. 11; prawa część kanału) sugeruje, że uskoki te formowały się w trakcie wypełniania kanału. Wyrównana powierzchnia stropowa wypełnienia wskazuje, że uskokowanie ustało jeszcze przed końcem wypełniania kanału. Potwierdza to również obecność niezaburzonej warstwy mułowca leżącej poziomo nad kanałem.

W odsłonięciu C pod kieszeniami lessowymi zaobserwowano nagromadzenie uskoków NE–SW (ryc. 12), tnących osady serii witowskiej, ale nie konty-

Ryc. 8. Uskok przesuwczy i uskoki normalne o geometrii negatywnej struktury kwiatowej (A) oraz projekcja uskoku przesuwczego (B); listryczna "L" i schodkowa "S" geometria uskoków normalnych (C) wraz z orientacją uskoków (D)

Fig. 8. Negative flower geometry of normal faults and strike-slip fault (A) and plot of strike-slip fault (B); listric "L" and step-like "S" geometry of normal faults (C), including fault orientation (D)

nujących się w obrębie lessów. W serii witowskiej taki system uskoku normalnych jest słabo zaznaczony (ryc. 7A i B).

Tektoglify na powierzchniach uskoku normalnych są słabo widoczne, ponieważ badane osady są słabo zwięzłymi piaskami i żwirami. Rysy tektoniczne zaobserwowano tylko na 14 powierzchniach uskoku normalnych, co umożliwiło określenie orientacji ekstensji w badanym rejonie (ryc. 13). Rekonstrukcję pola naprężeń wykonano metodą numeryczno-dynamiczną (NDA), wykorzystując program komputerowy Tectonics FP1.5 (Reiter & Acs, 2000; Ortner i in., 2002). Trzy uskoki należące do zespołu NNW–SSE w odsłonięciu C sugerują WSW–ENE orientację osi najmniejszego naprężenia głównego (ryc. 13), a sześć uskoku systemu WNW–ESE w odsłonięciu D i jeden z odsłonięcia C wskazują na orientację SSW–NNE tego naprężenia (ryc. 13B). Uskoki NE–SW natomiast, obserwowane pod kieszeniami lessowymi w odsłonięciu C, sugerują obecność ekstensji NW–SE (ryc. 13C).

Zagęszczenie ciosu obserwuje się zwykle w pobliżu uskoku normalnych WNW–ESE i W–E (ryc. 8C).

Uskoki normalne obserwowano również w **kompleksie lessowym**. Dominują one w dolnej części kompleksu, obecne są licznie w mułkach lessowych i występują także w lessach właściwych. Powierzchnie uskoku normalnych zapadają zwykle pod kątem ok. 65° (ryc. 14A i B), a ich orientacja jest zbliżona do 60° (ryc. 14C). Zrzuty uskoku

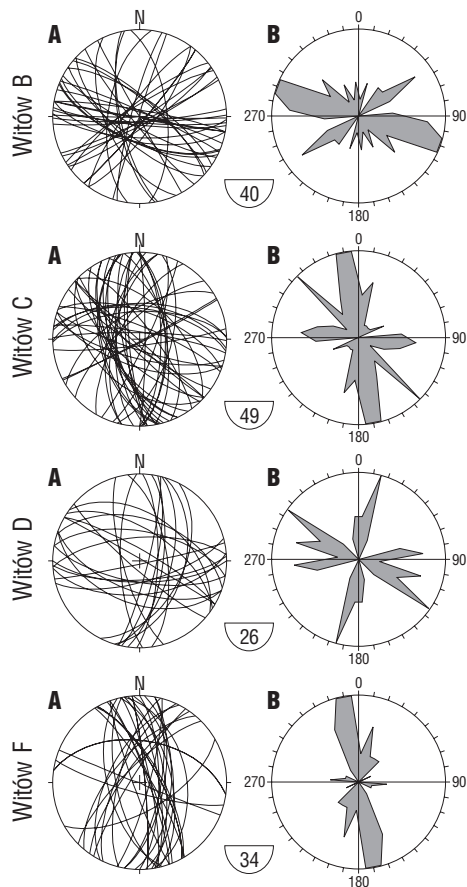
wynoszą od kilku milimetrów do kilku centymetrów, wyjątkowo sięgając 40 cm. W spągowej części kompleksu lessowego uskoki tnące warstwę mułku lessowego (ryc. 15; uskoki "1") są uskoki synsedymencyjnymi. Zarówno mułek lessowy, jak i wkładki piaszczysto-żwirowe mają większą miąższość w skrzydle zrzuconym (ryc. 15). Uskokowanie normalne trwało jeszcze po osadzeniu się mułków lessowych i nadległych lessów, na co wskazuje obecność uskoku normalnych tnących less (ryc. 15; uskoki "2"). Takim uskoku towarzyszy cios zorientowany prostopadle (ryc. 15) lub równoległe do rozciągłości uskoku.

Uskoki przesuwce obserwowano w odsłonięciu C (ryc. 16). Pomiędzy dwoma pionowymi, równoległymi uskoki pierwszego rzędu występowały uskoki podrzędne. O przesuwczym charakterze tych uskoku świadczyły poziome, równoległe rysy na ich powierzchniach. Uskoki główne przecinają uskoki towarzyszące pod niewielkimi kątami, ok. 30° (ryc. 16B). Uskoki podrzędne reprezentują prawdopodobnie ścięcia syntetyczne drugiego rzędu (ścięcia Riedla typu R) w odniesieniu do uskoku głównych prawoprzesuwczych, powstałych dzięki południkowej orientacji osi największego naprężenia głównego (ryc. 16C). Mała liczba pomiarów wymusiła zastosowanie metody sektorów prostokątnych, z wykorzystaniem programu Tectonics FP1.5 (por. Ortner i in., 2002). W odsłonięciu C występuje uskoku stromo zapadający ku WSW, a towarzyszą mu uskoki zapadające głównie ku ENE, tworzące wspólnie ujemną strukturę kwiatową (ryc. 8A i B). Strukturze tej towarzyszą spękania (ryc. 8A).

Drobne struktury tektoniczne w serii witowskiej — interpretacja

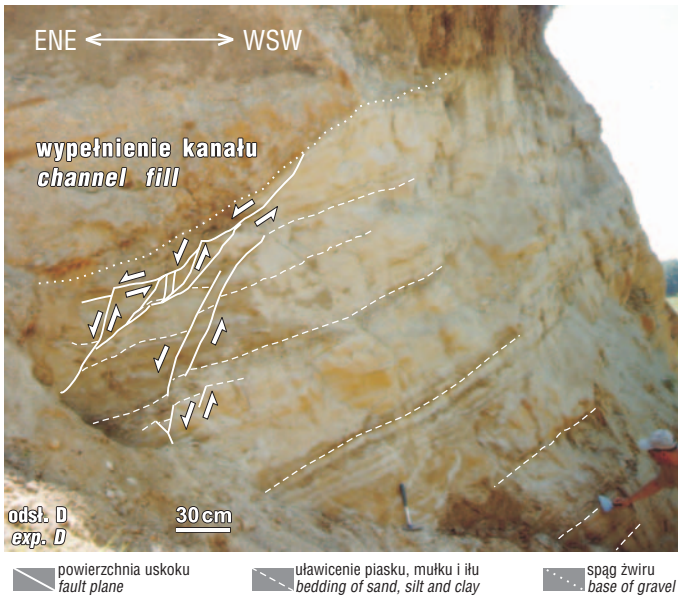
Spękania ciosowe w serii witowskiej mają na ogół kierunki NW–SE (odsłonięcia B i C) oraz W–E (odsłonięcie D), jak również N–S i W–E (odsłonięcie F). Cios NW–SE jest równoległy do wczesnopaleoceńskich (laramijskich) uskoku w podłożu, które ograniczają zręby i rowy na zachód od strefy uskoku Kurdwanów–Zawichost, podczas gdy cios równoleżnikowy zgadza się z orientacją uskoku normalnego, który biegnie równoległe do doliny Wisły (por. ryc. 1). Niektóre spośród spękań ciosowych były prawdopodobnie później reaktywowane jako uskoki normalne. Spękania zorientowane południkowo natomiast powstawały przypuszczalnie w trakcie reaktywacji uskoku lewoprzesuwczego, należącego do strefy Kurdwanów–Zawichost (NE–SW).

Specyficzne wykształcenie serii witowskiej jako głównie słabo zwięzłych piasków i żwirów wypełniających kanały (ryc. 3) spowodowało zapewne nieregularne rozmieszczenie powierzchni ciosowych oraz ich obecne słabe erozyjne wyeksponowanie, które bardzo utrudniało pomiary. Dany zespół ciosu występował w całym odsłonięciu. Przy uskoku normalnych W–E i WNW–ESE (ryc. 8C) obserwowano zagęszczenie powierzchni ciosowych równoległych do rozciągłości uskoku, co sugeruje synuskokową genezę tego ciosu. Te powierzchnie ciosowe zanikają na powierzchniach uskoku. Dlatego też, cios W–E i WNW–ESE może reprezentować spękania drugiego rzędu powstające w trakcie uskokuwania. Powszechnie jest znane formowanie się ekstensyjnych struktur spękaniowych przy uskoku normalnych (Stewart & Hancock, 1990; Kattenhorn i in., 2000). Takie powierzchnie ciosowe mają rozciągłość równoległą do uskoku, jednak równocześnie



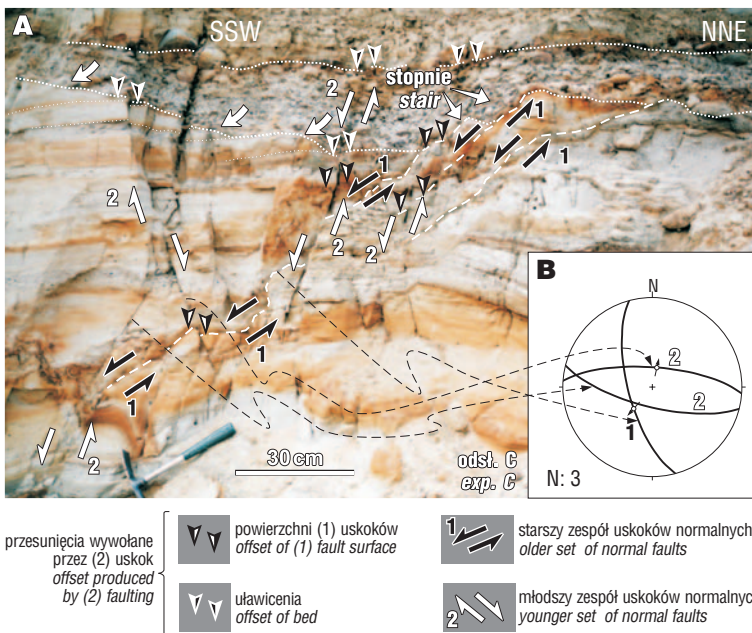
Ryc. 9. Porównanie orientacji uskoku normalnych w poszczególnych odsłonięciach. Objaśnienia na ryc. 4

Fig. 9. Comparison of normal fault orientations at particular exposures. For explanations see Fig. 4



Ryc. 10. Uskoki normalne o orientacji NNW–SSE poniżej kanału o żwirowym wypełnieniu w odsłonięciu D, utworzone prawdopodobnie pod obciążeniem osadami kanału

Fig. 10. NNW — striking normal faults below the gravel-filled channel at exposure D, probably formed due to loading of channel sediments

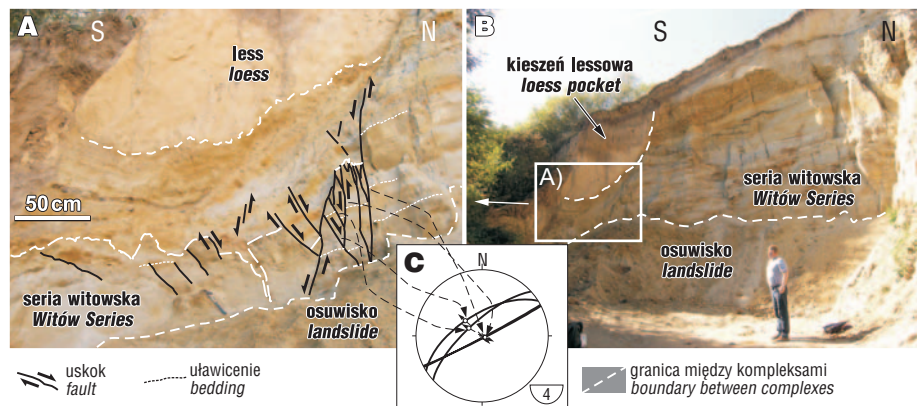


Ryc. 11. A — następstwo dwóch zespołów uskoku: (1) starszego, o kierunku NNW–SSE oraz (2) młodszego o kierunku WNW–ESE; B — projekcja powierzchni uskoku

Fig. 11. A — succession of two fault systems: (1) older, NNW-striking, and (2) younger, WNW-striking one; B — great circle plot

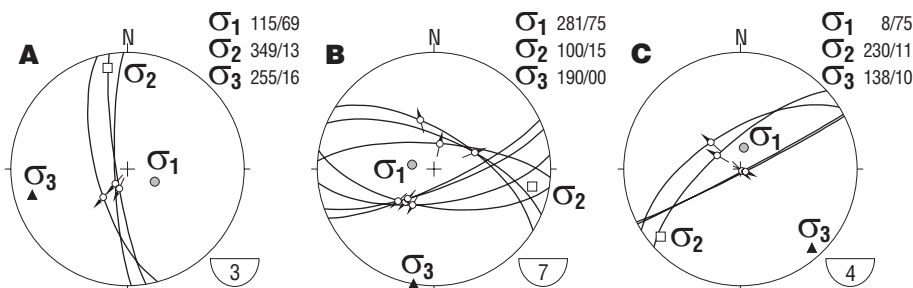
może tworzyć się drugi zespół ciosu o orientacji prostopadłej (np. ryc. 15; uskoki “2” i cios). W serii witowskiej dominują zespoły ciosu równoległe do uskoku normalnych.

Cios w kompleksie lessowym jest reprezentowany przez dwa systemy ortogonalne: (1) NE–SW i NW–SE oraz (2) N–S i W–E. Pierwszy z tych systemów jest dominujący i genetycznie związany z uskokami normalnymi obserwowanymi w kompleksie lessowym. Drugi natomiast system ciosu, słabo reprezentowany, jest najprawdopodobniej związany ze współczesnym polem naprężeń, o poziomej kom-



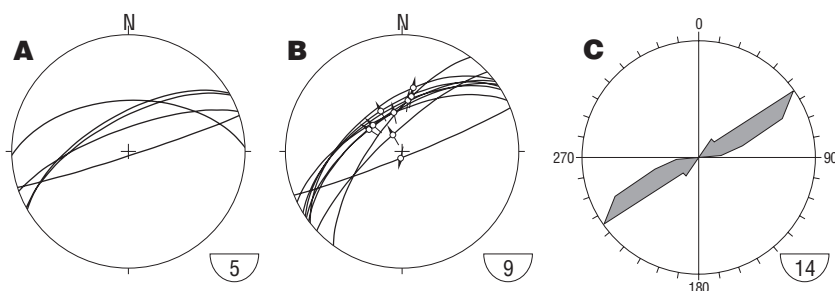
Ryc.12. Uskoki normalne w serii witowskiej (A) pod kieszenią lessową w odsłonięciu C (B) oraz ich projekcja (C)

Fig. 12. Normal faults in the Witów Series (A) under loess pocket at exposure C (B) and their plot (C)



Ryc. 13. Rekonstrukcja orientacji osi naprężeń głównych w oparciu o metodę numeryczno-dynamiczną, przy użyciu programu komputerowego TectonicsFP 1.5 dla uskoczków normalnych w odsłonięciu C (A i C) i D (B)

Fig. 13. Reconstruction of principal stress orientation based on numerical-dynamical method (NDA-calculation method), using computer programme TectonicsFP 1.5 for normal faults at exposures C (A and C) and D (B)



Ryc. 14. Orientacja uskoczków normalnych w kompleksie lessowym: A — projekcja powierzchni uskoczkowych; B — projekcja uskoczków z lineacją; C — zbiorczy diagram rozetowy powierzchni uskoczków normalnych

Fig. 14. Orientation of normal faults in the loessial complex: A — plot of fault planes; B — plot of fault planes with lineation; C — rose-diagram of fault plane strike, compilation of all faults

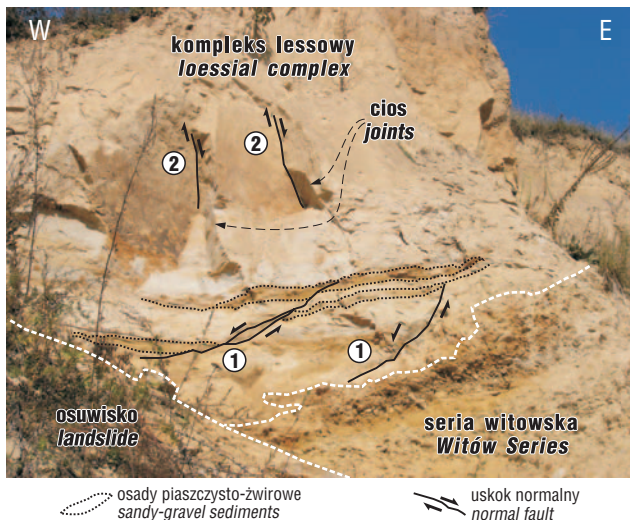
presji zorientowanej mniej więcej południkowo (Jarosiński, 1998; Kłęk i in., 2003).

Uskoki normalne w serii witowskiej tworzą pary zespołów o przeciwnych upadach, zorientowane: (1) NNW–SSE; (2) WNW–ESE i (3) NE–SW. Zespoły (1) i (2) porównują, przy czym dominuje zespół (1). Relacje intersekcyjne sugerują, że uskoki NNW–SSE są starsze od zorientowanych WNW–ESE (ryc. 11). Uskoki starsze mają prawdopodobnie genezę synsedymacyjną względem serii witowskiej, ponieważ wykazują silne związki z

kanalami o wypełnieniu żwirowym. W serii witowskiej (3) zespół uskoczków NE–SW zaznacza się słabo, głównie pod kieszeniami lessowymi. Ponieważ w kompleksie lessowym obserwuje się jedynie pojedynczy zespół uskoczków zorientowanych podobnie jak zespół (3) w serii witowskiej, uznano go za najmłodszy w całej serii.

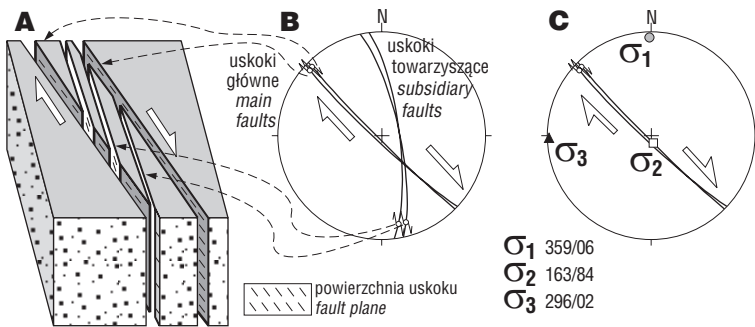
W osadach serii witowskiej uskoki normalne NW–SE, WNW–ESE i W–E wskazują na różne rodzaje geometrii, a niektóre z nich mają listyczny lub schodkowy kształt w przekroju. Ferill i Morris (2003) opisali strome segmenty w pojedynczym uskoku jako wynik obecności mniej podatnych warstw w obrębie deformowanej skały. Jednak w serii witowskiej w pojedynczym uskoku występują na przemian niemal pionowe i mniej strome segmenty, tworzące układ schodkowy w obrębie pojedynczej warstwy pylasto-piaszczystej (ryc. 8C). Warstwa taka jest zwykle słabo zwięzła, laminowana, ale niemal homogeniczna. Opisane stopnie interpretujemy jako pozostałość powierzchni ciosowych, które poprzedzały powstanie danego uskoku normalnego. Takie pierwotne spękania charakteryzowały się pionową geometrią kulisową, występując jako równoległy cios o niewielkich rozmiarach, którego powierzchnie występowały coraz niżej ku prawej lub lewej stronie, tworząc zarys stopni. Zbliżoną geometrię kulisową ciosu ścięciowego opisali Myers i Aydin (2004).

Uskoki normalne w kompleksie lessowym należą do jednego zespołu o orientacji NE–SW (ryc. 14). Niektóre z tych uskoczków wykazują charakter syndepozycyjny względem kompleksu lessowego i reprezentują najmłodsze przejawy uskokuwania na badanym obszarze. Późnoplejstocześnie uskoki normalne o orientacji NNW–SSE i NE–SW obramowujące rów tektoniczny rozpoznano także



Ryc. 15. Uskoki normalne synsedymacyjne (1) dla kompleksu lessowego i postdepozycyjne (2) wraz z towarzyszącym im ciosem

Fig. 15. Syndepositionary normal faults for the loessial complex (1) and post-depositional faults (2) with associated joints



Ryc. 16. Orientacja uskokuw przesuwczych w odsłonięciu C: A — blokdiagram; B — projekcja; C — rekonstrukcja orientacji osi naprężeń głównych w oparciu o metodę sektorów prostokątnych, przy użyciu programu komputerowego TectonicsFP 1.5

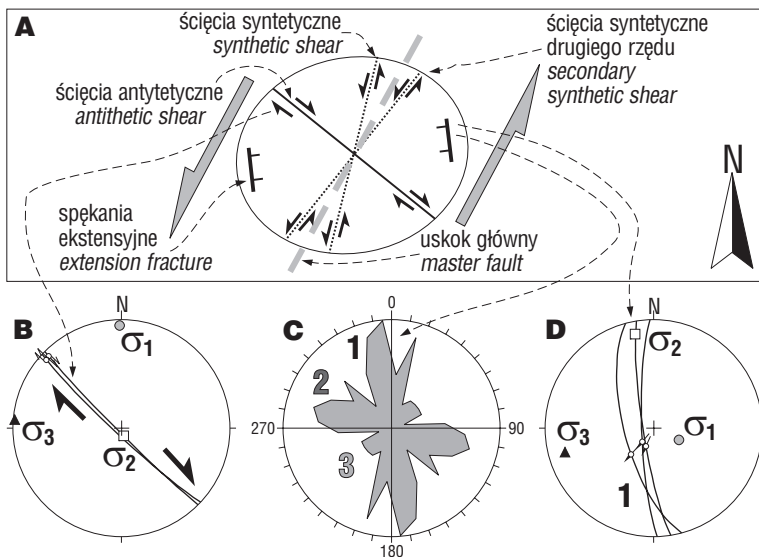
Fig. 16. Orientation of strike-slip faults at exposure C: A — block-diagram; B — plot; C — reconstruction of principal stress orientation based on the right dihedral-angle calculation method, using computer programme TectonicsFP 1.5

Zrekonstruowana orientacja poziomej ekstensji dla badanych uskokuw normalnych wynosi WSW–ENE, NNE–SSW i NW–SE (ryc. 13).

Dyskusja i wnioski

W centralnej części zapadliska przedkarpackiego w rejonie Witowa rozpoznano cztery etapy deformacji kruchych. Etap (1), syndepozycyjny dla serii witowskiej o wieku późnomiocenim i — być może — wczesnopliocenim, był związany z NNW–SSE do N–S orientacją osi poziomej kompresji, równoczesnej z transtensyjną reaktywacją lewoprzesuwczego (NE–SW) uskoku w podłożu. W czasie tego etapu uformowały się uskoki prawoprzesuwcze, uskoki normalne NNW–SSE oraz cios południkowy.

W etapie (2), następującym po zdeponowa-



Ryc. 17. Schemat obrazujący układ struktur formowanych nad reaktywowanym uskokiem lewoprzesuwczym (za Wilcoxem i in., 1973) (A), orientacja drobnych uskokuw przesuwczych (B) i normalnych (C i D) w Witowie oraz zrekonstruowana orientacja osi naprężeń głównych. Uskok główny NE–SW należy do strefy uskokuwej Kurdwanów–Zawichost

Fig. 17. Scheme showing the pattern of structures formed above a reactivated sinistral strike-slip fault (after Wilcox et al., 1973) (A), orientation of small-scale strike-slip (B) and normal faults (C and D) at Witów, and orientation of the reconstructed principal stress axes. The principal fault is a NE–SW trending fault that belongs to the Kurdwanów–Zawichost Fault Zone

w centralnej części zapadliska przedkarpackiego, w jednostce zgłobickiej w Brzeziu (ryc. 1; Rauch-Włodarska i in., 2005).

Seria witowska jest także przecięta przez **uskoki prawoprzesuwcze** NW–SE, którym towarzyszą ścienia Riedla typu R zorientowane NNW–SSE. Na obecność uskokuw przesuwczych wskazuje również struktura kwiatowa (ryc. 8A, B), której uskok główny o biegu NNW–SSE jest prawdopodobnie także prawoprzesuwczy. W podłożu zapadliska przedkarpackiego został rozpoznany regionalny uskok lewoprzesuwczy o rozciągłości NE–SW (ryc. 1). Teoretycznie, w pokrywie osadowej nad takim uskokiem reaktywowanym w polu naprężeń o poziomej kompresji NNW–SSE do N–S powinny powstać drobne uskoki prawoprzesuwcze o biegach zbliżonych do stwierdzonych w serii witowskiej, tj. NW–SE (ryc. 17). Podczas reaktywacji w pokrywie osadowej mogły powstać również uskoki normalne o orientacji NNW–SSE (por. model Wilcoxa i in., 1973), a zatem identycznej z orientacją uskokuw najczęściej występujących w odsłonięciach w Witowie.

niu serii witowskiej, panowała ekstensja zorientowana N–S i NE–SW. Tworzyły się wówczas uskoki normalne WNW–ESE oraz spękania ciosowe zorientowane W–E i NW–SE. Niektóre z uskokuw mogły wykorzystywać wcześniejsze spękania ciosowe. Uskoki normalne powstały prawdopodobnie podczas reaktywacji wczesnopaleoceńskich uskokuw w podłożu (WNW–ESE oraz NW–SE).

Ekstensyjny etap (2) wiązał się przypuszczalnie z uskokiowaniem normalnym w zachodnich Karpatach zewnętrznych. Uskoki normalne związane z ekstensją NE–SW uważano za najmłodsze struktury polskich Karpat zewnętrznych (Decker i in., 1997) oraz zapadliska przedkarpackiego (Jarosiński, 1992).

Ekstensyjny etap (3) wiązał się przypuszczalnie z reaktywacją uskoku normalnego w podłożu u schyłku piętra wisły, przy ekstensji zorientowanej NW–SE.

Współczesne pole naprężeń badanego obszaru odznacza się poziomą kompresją o orientacji N–S do NNE–SSW (Jarosiński, 1998; Zuchiewicz i in., 2002). Obecność dru-

giego systemu ciosu ortogonalnego w kompleksie lessowym (N–S i W–E) wydaje się sugerować, że również i współczesne pole naprężeń (etap 4) wywarło pewien wpływ na układ struktur w rejonie Witowa.

Autorzy dziękują Antoniemu K. Tokarskiemu, kierownikowi grantu KBN 2 P04D 03328, za sfinansowanie badań kompleksu lessowego oraz doceniają wnikliwe uwagi dwóch anonimowych Recenzentów.

Literatura

- BRUD S. 2002 — Ewolucja paleogeograficzna zachodniej części Kotliny Sandomierskiej w późnym neogenie i wczesnym czwartorzędzie (praca doktorska). Arch. ING UJ, Kraków.
- BRUD S. 2004 — Palaeogeography of the western Sandomierz Basin in Late Neogene and Early Quaternary times (Carpathian Foredeep, South Poland). *Ann. Soc. Geol. Polon.*, 74: 63–93.
- BRUD S. & WROBIEC G. 2003 — Wyniki badań makroszczatków roślin z serii witowskiej (południowa Polska). *Prz. Geol.*, 51: 392–401.
- BRUD S., ZUCHIEWICZ W. & RAUCH M. 2003 — Przejawy młodej tektoniki w obrębie serii witowskiej (zapadlisko przedkarpackie). [W:] Zuchiewicz W. (red.) — Materiały V Ogólnopolskiej Konferencji „Neotektonika Polski — Neotektonika a morfotektonika: metody badań”, Kraków, 26–27.09.2003. Komisja Neotektoniki Komitetu Badań Czwartorzędu PAN, Inst. Nauk Geol. UJ, Galicia T. Group, Kraków: 15–23.
- DECKER K., NESCIERUK P., REITER F., RUBINKIEWICZ J., RYŁKO W. & TOKARSKI A. K. 1997 — Heteroaxial shortening, strike-slip faulting and displacement transfer in the Polish Carpathians. *Prz. Geol.*, 45: 1070–1071.
- DŻUŁYŃSKI S., KRYSOWSKA-IWASZKIEWICZ M., OSZAST J. & STARKEL L. 1968 — O staroczwartorzędowych zwiarach w Kotlinie Sandomierskiej. *Studia Geomorph. Carpatho-Balcan.*, 2: 63–74.
- FERRILL D. A. & MORRIS A. P. 2003 — Dilatation normal faults. *J. Struct. Geol.*, 25: 183–196.
- HANCOCK P. L. 1985 — Brittle microtectonics: principles and practice. *J. Struct. Geol.*, 7: 437–457.
- JACKSON J. A. (ed.) 1997 — Glossary of geology. 4th ed., American Geological Institute, 769 pp.
- JAROSIŃSKI M. 1992 — Tektonika ilastych skał nadkładu złoza siaraki w Machowie k. Tarnobrzega w świetle analizy mezostrukturalnej. *Kwart. Geol.*, 36: 121–150.
- JAROSIŃSKI M. 1998 — Contemporary stress field distortion in the Polish part of the Western Outer Carpathians and their basement. *Tectonophysics*, 297: 91–119.
- KATTENHORN S. A., AYDIN A. & POLLARD D. D. 2000 — Joints at high angles to normal fault strike: an explanation using 3-D numerical models of fault-perturbed stress fields. *J. Struct. Geol.*, 22: 1–23.
- KIRCHNER Z. & POŁTOWICZ S. 1974 — Budowa geologiczna obszaru między Brzeskiem a Wojniczem. *Rocz. Pol. Tow. Geol.*, 44: 293–320.
- KŁĘK M., ROGOWSKI J. B. & JAROSIŃSKI M. 2003 — Study on deformation parameters in Poland obtained from tectonophysics and GPS data analysis. *Proc. 11th FIG Symp. on Deformation Measurements*, Santorini, Greece.
- KOTLARCIK J. 1985 — Evolution of the Carpathian tectogene in the Miocene. *Carpatho-Balkan Geological Association*, 13 Congr., Guide to Excursion 4, Geological Institute, Kraków: 21–32.
- KRYSIĄK Z. 1986 — Rozwój tektoniczny południowej części niecki nidziańskiej w miocenie (praca doktorska). Arch. Wydz. Geologii UW, Warszawa.
- KRYSIĄK Z. 1987 — Zjawiska tektoniczne w zwiarach witowskich. [W:] Rutkowski J. (red.) — Trzecio- i staroczwartorzędowe zwiary Kotliny Sandomierskiej. Materiały Sympozjum, Kraków 22–24.06.1987. Wyd. AGH, Kraków: 39–41.
- KRYSIĄK Z. 2000 — Tectonic evolution of the Carpathian Foredeep and its influence on Miocene sedimentation. *Geol. Quart.*, 44: 137–156.
- KRZYWIEC P. 1997 — Large-scale tectono-sedimentary Middle Miocene history of the central and eastern Polish Carpathian Foredeep Basin — results of seismic data interpretation. *Prz. Geol.*, 45: 1039–1053.
- KRZYWIEC P. 2001 — Contrasting tectonic and sedimentary history of the central and eastern parts of the Polish Carpathian foredeep basin — results of seismic data interpretation. *Marine and Petroleum Geol.*, 18: 13–38.
- ŁYCZEWSKA J. 1948 — Sprawozdanie z badań geologicznych w północno-zachodniej części arkusza Brzesko Nowe (1: 100 000). *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 42: 46–75.
- MITURA F. & MOSKAŁA-MARTINI Z. 1954 — Tymczasowe sprawozdanie z badań geologicznych na przedgórzu Karpat w rejonie Brzesko-Wojnicz w latach 1952–1953, na arkuszu Bochnia. *Biul. Inst. Geol.*, 137: 25–33.
- MYERS R. & AYDIN A. 2004 — The evolution of faults formed by shearing across joint zones in sandstone. *J. Struct. Geol.*, 26: 947–966.
- OLSZEWSKA B. 1999 — Biostratygrafia neogenu zapadliska przedkarpackiego w świetle nowych danych mikropaleontologicznych. *Pr. Państw. Inst. Geol.*, 168: 9–28.
- ORTNER H., REITER F. & ACS P. 2002 — Easy handling of tectonic data: the programs Tectonics VB for Mac and Tectonics FP for Windows™. *Computers & Geosciences*, 28: 1193–1200.
- OSMÓLSKI T., KRYSIAK Z. & WILCZYŃSKI M. S. 1978 — Nowe dane o strefie Kurdwanów–Zawichost i tektonice obszaru od Buska po Niłę i Wisłę. *Kwart. Geol.*, 22: 833–848.
- OSZCZYPKO N. 1998 — The Western Carpathian Foredeep — development of the foreland basin in front of the accretionary wedge and its burial history (Poland). *Geol. Carpathica*, 49: 415–431.
- POŁTOWICZ S. 1991 — Miocen strefy karpackiej między Wieliczką a Dębicą. *Zesz. Nauk. AGH, Geologia*, 17: 19–57.
- POŁTOWICZ S. 1998 — Jednostka zglobicka nad Dunajcem. [W:] Zuchiewicz W. (red.) — Materiały XIX Konferencji Terenowej Sekcji Tektonicznej Polskiego Towarzystwa Geologicznego — MAGURA'98 — „Rozwój strukturalny płaszczowiny magurskiej na tle tektoniki Karpat Zewnętrznych”, Szymbark 15–17.10. 1998, Kraków: 24–25.
- RAUCH M. 1995 — Joints in the Miocene rocks of the Carpathian Foreland (Poland). [W:] Rossmann H.-P. (ed.) — *Mechanics of Jointed and Faulted Rock*. Balkema, Rotterdam: 267–272.
- RAUCH M. 1998 — Rozwój strukturalny warstw chodenickich jednostki zglobickiej w Zglobicach. [W:] Zuchiewicz W. (red.) — *Materiały XIX Konferencji Terenowej Sekcji Tektonicznej Polskiego Towarzystwa Geologicznego — MAGURA'98 — „Rozwój strukturalny płaszczowiny magurskiej na tle tektoniki Karpat Zewnętrznych”*, Szymbark 15–17.10. 1998, Kraków: 26–28.
- RAUCH M. & TOKARSKI A. K. 1995 — An approach to structural history of Miocene strata in the Carpathian foreland (Poland). *Bull. INQUA Neotectonics Commission*, 18: 17–20.
- RAUCH-WŁODARSKA M., KALICKI T., WŁODARSKI W. & BUDEK A. 2005 — Kopalna forma w Brzeziu (zapadlisko przedkarpackie) — przejaw aktywności tektonicznej czy procesów geomorfologicznych? [W:] Zuchiewicz W., Przybylski B. & Badura J. (red.) — *Mater. VI Ogólnopolskiej Konferencji „Neotektonika Polski” Aktywne uskoki Europy Środkowej*. Komisja Neotektoniki Komitetu Badań Czwartorzędu PAN, Oddz. Dolnośląski P.I.G., ING UJ, Galicia T. Group, Wrocław: 83–84.
- REITER F. & ACS P. 2000 — Tectonics FP, ver.1.6. Structural analysis software.
- STARKEL L. 1972 — Karpaty Zewnętrzne. [W:] Klimaszewski M. (red.), *Geomorfologia Polski*, T. 1. PWN, Warszawa: 51–115.
- STEWART I. S. & HANCOCK P. L. 1990 — Brecciation and fracturing within neotectonic normal fault zones in the Aegean region. [W:] Knipe R. J. & Ruter E. H. (eds) — *Deformation Mechanisms, Rheology and Tectonics*. *Geol. Soc. Spec. Publ.*, 54: 105–112.
- TWISS R. J. & MOORES E. M. 1992 — *Structural geology*. W. H. Freeman & Co., New York: 37–50.
- FREEMAN R. E., HARDING T. P. & SEELY D. R. 1973 — Basic wrench tectonics. *AAPG Bull.*, 57: 74–96.
- ZUCHIEWICZ W. 1995 — Selected aspects of neotectonics of the Polish Carpathians. *Folia Quartern.*, 66: 145–204.
- ZUCHIEWICZ W., TOKARSKI A. K., JAROSIŃSKI M. & MÁRTON E. 2002 — Late Miocene to present day structural development of the Polish segment of the Outer Carpathians. *EGU Stephan Mueller Special Publication Series*, 3: 185–202.

Praca wpłynęła do redakcji 03.01.2006 r.
Akceptowano do druku 18.09.2006 r.