

## Rozwarstwienie współczesnego pola naprężeń w zachodniej części polskich Karpat zewnętrznych

Marek Jarosiński\*

Od 1991 roku są prowadzone w Polsce pomiary kierunków kompresji tektonicznej metodą analizy struktur zniszczeniowych ścian otworów wiertniczych — *breakouts* (Jarosiński, 1994a, 1994b). Do końca 1996 r., na terenie całego kraju badania te objęły ok. 50 otworów wiertniczych, zlokalizowanych przeważnie w obszarach poszukiwań węglowodorów. W opracowaniu niniejszym zostaną przedstawione wyniki analizy współczesnych naprężeń dla zachodniej części polskich Karpat zewnętrznych wraz z ich podłożem autochtonicznym, niewiele wykraczającym poza zasięg masywu górnośląskiego. Obszar ten jest interesujący zarówno z punktu widzenia współczesnej geodynamiki płyty europejskiej, jak i pod względem lokalnego zróżnicowania kierunków naprężeń pomiędzy poziomami strukturalnymi. Leży on pomiędzy rozległymi prowincjami naprężeniowymi o odmiennych kierunkach kompresji tektonicznej: prowincją zachodnioeuropejską o dominującym NW kierunku naprężeń (Müller i in., 1992), a wydzieloną przez autora (Jarosiński, 1994b) prowincją środkowoeuropejską o kompresji subpołudnikowej. Badania kierunków naprężeń na tym obszarze powinny wyjaśnić charakter geodynamicznego przejścia pomiędzy tymi prowincjami a zarazem wskazać na możliwe mechanizmy transmisji naprężeń i źródła sił je generujących.

Podjęty w ostatnich latach przez Polskie Górnictwo Naftowe i Gazownictwo program eksploracji zachodniej części Karpat zewnętrznych wraz z zapadliskiem przedkarpackim, doprowadził do lepszego rozpoznania geologii tego obszaru a zwłaszcza podłoża jednostek karpackich. Do potrzeb analizy geodynamicznej autor posłużył się uproszczonym schematem budowy geologicznej, odpowiednim dla rozważań o dystrybucji współczesnych naprężeń, w obecnym stadium ich rozpoznania. Założenia strukturalne badanego fragmentu Karpat zewnętrznych były przedmiotem licznych opracowań (m.in. Książkiewicz, 1972; Ślęczka, 1976; Aleksandrowski, 1985; Oszczypko & Ślęczka, 1989; Poprawa & Nemčok, 1989; Paul i in., 1996a, 1996b; Baran i in., 1997). Górny poziom strukturalny na tym obszarze jest zbudowany z płaszczowin fliszowych o stosunkowo niewielkiej miąższości, wzrastającej ku południowi i wschodowi. Płaszczowiny nasunięte są na autochtoniczne utwory miocenijskiej molasy, które oblekają starsze kompleksy osadowe bloku górnośląskiego (ryc. 1). Do autochtonicznej pokrywy osadowej zaliczają się przede wszystkim serie paleozoiczne, które we wschodniej części masywu przykryte są utworami mezozoiku. Fundament masywu górnośląskiego stanowią proterozoiczne skały metamorficzne. Ze względu na blokową budowę masywu w podłożu Karpat fliszowych, jego autochtoniczna pokrywa osadowa ma zróżnicowaną miąższość. Blok górnośląski jest ograniczony od WNW strefą tektoniczną śląsko-morawską oraz od NE strefą dyslokacyjną Kraków–Lubliniec. Obie te strefy zanurzają się pod Karpatami i stanowią prawdopodobnie regionalne strefy osłabienia skorupy ziemskiej.

Z punktu widzenia badań geodynamicznych istotne jest zróżnicowanie reologiczne poszczególnych poziomów stru-

kturalnych; pośród nich podwyższoną kompetencją wyróżnia się podłoże metamorficzne, większą zaś podatnością molasa miocenijska. Zniszczone tektonicznie i zdeformowane płaszczowiny fliszowe, cechuje wewnętrzne zróżnicowanie właściwości mechanicznych poszczególnych jednostek fliszowych.

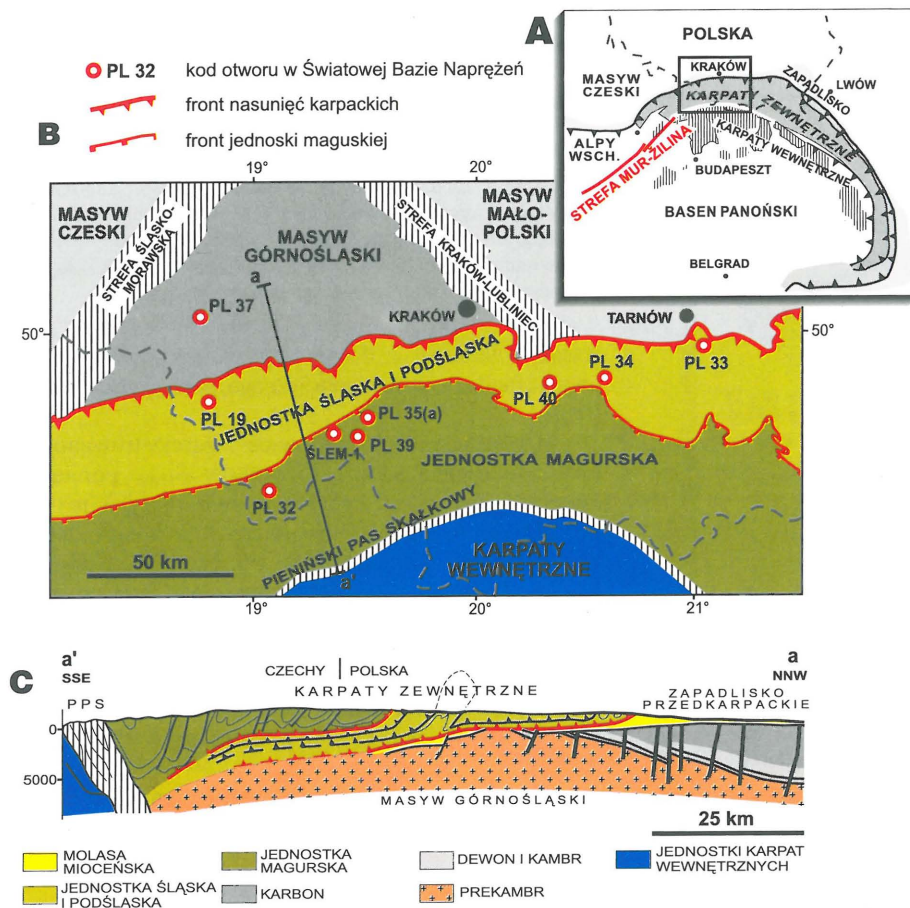
W zasięgu penetracji otworów wiertniczych, będących przedmiotem opracowania, znalazły się wszystkie powyższe kompleksy strukturalne. Wykonane do końca 1996 r. karotaże nowoczesnymi sondami Halliburtona, pozwoliły na przeprowadzenie analizy kierunków kompresji dla dziewięciu otworów wiertniczych. Osiem spośród nich osiągnęło paleozoiczną pokrywę osadową masywu górnośląskiego, a cztery weszły w jego podłoże metamorficzne. Wszystkie karotaże zostały wykonane przez Geofizykę-Kraków. Wydzielenia jednostek strukturalnych przyjęto na podstawie dokumentacji wierceń znajdującymi się w archiwum Biura Geologicznego GEONAFTA (częściowo opublikowane — Baran i in., 1997).

### Metoda analizy *breakouts*

Zastosowana w tym opracowaniu analiza struktur *breakouts* jest powszechnie stosowaną od początku lat osiemdziesiątych metodą wyznaczania kierunków współczesnych naprężeń poziomych (Zoback & Zoback, 1980). Struktury *breakouts* powstają na skutek zniszczenia ścian otworów wiertniczych w anizotropowym polu naprężeń poziomych (Bell & Gough, 1979; Jarosiński, 1994a). Wymycie spękanej skały przez płuczkę prowadzi do utworzenia symetrycznych zagłębień tzw. *breakouts* po przeciwległych stronach otworu wiertniczego. Zasadniczą cechą *breakouts* jest ich stała, prostopadła orientacja względem kierunku największego naprężenia normalnego do osi otworu (Bell & Gough, 1979). Ponieważ w opracowaniu tym wykorzystano, z jednym wyjątkiem, otwory w przybliżeniu pionowe, struktury te będą wskaźnikiem kierunków naprężeń poziomych. Na tej podstawie określony zostanie kierunek największego naprężenia poziomego ( $S_{Hmax}$ ) zwanego również kompresją poziomą.

*Breakouts* są rozpoznawane dzięki karotażom geometrii ściany otworu wiertniczego (Jarosiński, 1994b), która w przypadku tego opracowania została zarejestrowana upadomierzem sześcioramiennym SED oraz skanerem akustycznym CAST. Karotaże upadomierza są wykonywane standardowo prawie we wszystkich głębokich otworach wiertniczych w Polsce. Daje to unikalną sposobność do rejestracji zmienności kierunków  $S_{Hmax}$  w profilach pionowych otworów o długości kilku tysięcy metrów. Struktury *breakouts* są bezpośrednio widoczne w zapisie skanera akustycznego, jednak ze względu na znaczny koszt tych karotaży, są wykonywane one zwykle w krótkich interwałach głębokościowych. Mimo to, akustyczne obrazy ściany otworów wiertniczych stanowią cenne źródło informacji, pozwalające na weryfikację wyników analizy karotaży upadomierza. Analiza *breakouts* z cyfrowego zapisu upadomierza — SED została przeprowadzona programem komputerowym SPIDER. Wyniki automatycznej interpretacji kontrolowane były przez projekcję ramion upadomierza na

\*Państwowy Instytut Geologiczny, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa



Ryc. 1. A — lokalizacja obszaru badań na tle łuku Karpat z zaznaczoną strefą uskoku Mur–Żilina; B — lokalizacja otworów, dla których wykonana została analiza *breakouts* na tle głównych jednostek strukturalnych; B — Schematyczny przekrój geologiczny wzdłuż linii a–a wg Żyto i in. (1989)

powierzchnię prostopadłą do osi otworów dla każdej wyodrębnionej struktury *breakout* (Jarosiński, 1994a). W celu przesłania zmienności kierunków naprężeń w profilach otworów, analizę przeprowadzono osobno dla wyodrębnionych fragmentów karotażu (nie zawsze pokrywających się z wydzieleniami stratygraficznymi), które cechuje względnie stabilna orientacja *breakouts* (ryc. 2–4). Kierunki  $S_{Hmax}$  dla analizowanych odcinków wyliczono jako prostopadłe do średniej statystycznej orientacji *breakouts* (statystyka na danych kątowych zgodnie z Mardia, 1972).

Typowe zniszczenia *breakouts* o charakterystycznym, symetrycznym wykształceniu oraz zaokrąglonym dnie zagłębień zostały stwierdzone w skałach podłoża autochtonicznego pod nasunięciami karpackimi, zarówno w metamorficznym fundamencie masywu górnośląskiego, w obrębie jego pokrywy osadowej, jak i w niesfałdowanej miocenijskiej molasie. W otworach fliszowych, w znacznych fragmentach profili, *breakouts* były trudne do rozpoznania ze względu na tektoniczne zaburzenia górotworu oraz technologiczne zniszczenia ścian otworów. Mimo to w profilach fliszowych trzech otworów wiertniczych udało się wyodrębnić symetryczne struktury *breakouts*.

#### Pomiary kierunków naprężeń w otworach wiertniczych

Wyniki interpretacji kierunków naprężeń zostały przedstawione na rycinach 2, 3 i 4. Na ryc. 5 zaprezentowano kierunki kompresji w obrębie wydzielonych poziomów strukturalnych.

Przy nazwach otworów zamieszczono kody zgodne z ich numeracją w światowej bazie danych o współczesnych naprężeniach skorupy ziemskiej (WSMDB — World Stress Map Data Base) (Zoback, 1992). Przegląd wyników analizy *breakouts* zostanie rozpoczęty od najlepiej udokumentowanej, centralnej części badanego obszaru.

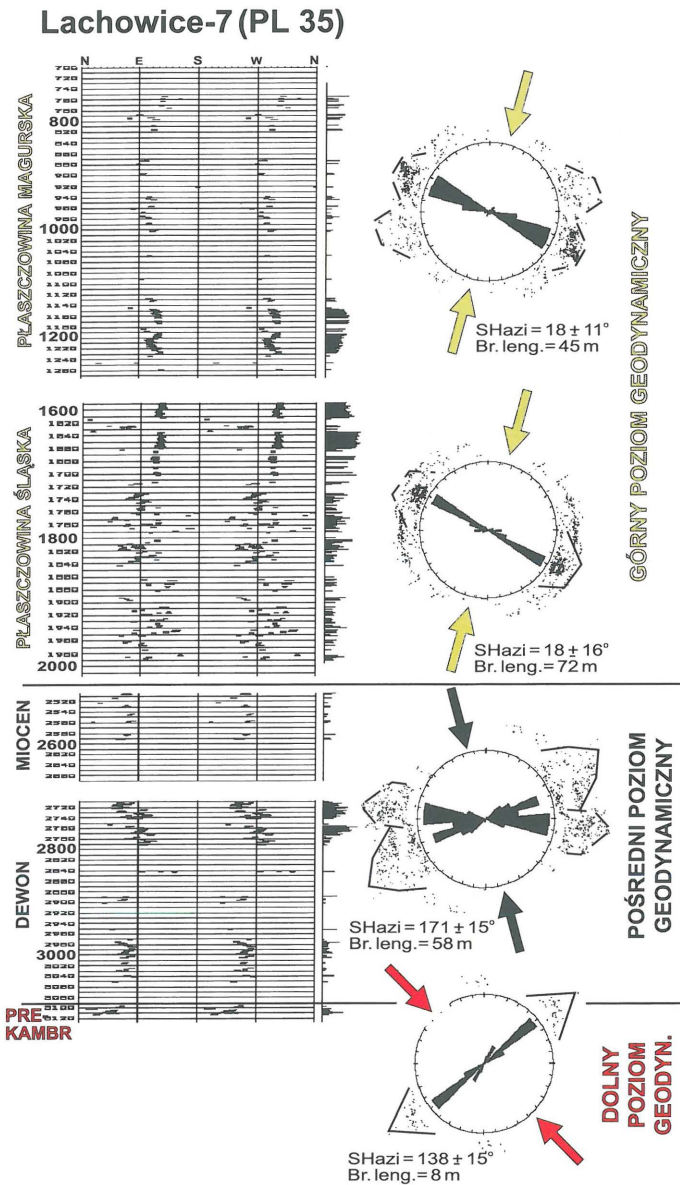
#### Centralny segment domeny karpackiej masywu górnośląskiego

Znajdujące się na tym obszarze otwory: Lachowice-7 (PL 35), Stryżawa-1, Lachowice-4 (PL 39), Ślemień-1 oraz Sól-8 (PL 32) skupione są w obrębie zachodniego segmentu jednostki magurskiej (ryc. 1). Spośród nich, wiercenie Lachowice-7 (PL 35) wyróżnia się najpełniejszym profilem karotazu SED, obejmującym zarówno jednostki Karpat fliszowych jak i sekwencję autochtonicznej pokrywy paleozoicznej masywu górnośląskiego oraz krótki odcinek jego fundamentu prekambryjskiego (ryc. 2). W obrębie jednostki magurskiej na głębokości 740–1300 m stwierdzono występowanie *breakouts* wskazujących na kompresję w kierunku od NNE do NEN\*. W obrębie jednostki śląskiej typowe *breakouts*

nie występują. W jednostce podśląskiej na głębokości 1570–2140 m, prawidłowo wykształcone *breakouts* wskazują na ten sam NNE kierunek  $S_{Hmax}$ , skręcający do położenia południkowego w spągu kompleksu fliszowego. Bepośrednio poniżej fliszu, w sfałdowanych utworach miocenu *breakouts* nie występują. W autochtonicznym miocenie płytkie *breakouts* dowodzą zmiany kierunku kompresji ku NNW. Dobrze rozwinięte *breakouts* w kompleksie paleozoicznym (2740–3096 m) ujawniają zmienną orientację  $S_{Hmax}$  w granicach od NWN do NNE. Jak wykazały szczegółowe badania tektoniczne kompleksu dewońskiego, wsparte analizą karotazu skanera akustycznego (Jarosiński & Krysiak, 1995; Jarosiński, 1997), kierunek kompresji NNE jest skutkiem rotacji naprężeń w stropowym skrzydle uskoku (przewierconego na głębokości 2900 m), związanej z obecnością licznych zespołów stromych luster tektonicznych uskokuw przesuwających o biegach w granicach od NEN do ENE. Podobnego charakteru choć mniejszej rangi rotacja występuje w sąsiedztwie uskoku na głębokości 1990 m. Przyuskokowe rotacje *breakouts* są na ogół świadectwem współczesnej reaktywacji tych struktur (Barton & Zoback, 1994). Pominąwszy jednak tego typu anomalie, generalny kierunek  $S_{Hmax}$  w obrębie kompleksu paleozoicznego wynosi NWN. Kolejna zmiana orientacji  $S_{Hmax}$  do położenia NW

\*W artykule tym autor przyjął niekonwencjonalną, precyzyjną skalę orientacji struktur, w której poszczególne stopnie następują w interwałach  $15^\circ$ ; np.: N, NNE, NEN, NE, ENE, EEN, E... itd. Podział taki był pomocny w opisie niewielkich aczkolwiek znaczących rotacji kierunków naprężeń





Ryc. 2. Pionowy profil orientacji *breakouts* w otworze Lachowice-7. Większy rozrzut kierunków *breakouts* we fragmentach profilu wynika ze zmiany położenia upadomierza w obrębie szerszych struktur zniszczeniowych. Diagramy rozetowe statystycznej dystrybucji kierunków *breakouts* z poziomą projekcją punktów obrazujących rozmiary struktur zniszczeniowych oraz wynikami analizy statystycznej. Strzałki wskazują średni kierunek kompresji dla poszczególnych poziomów geodynamicznych

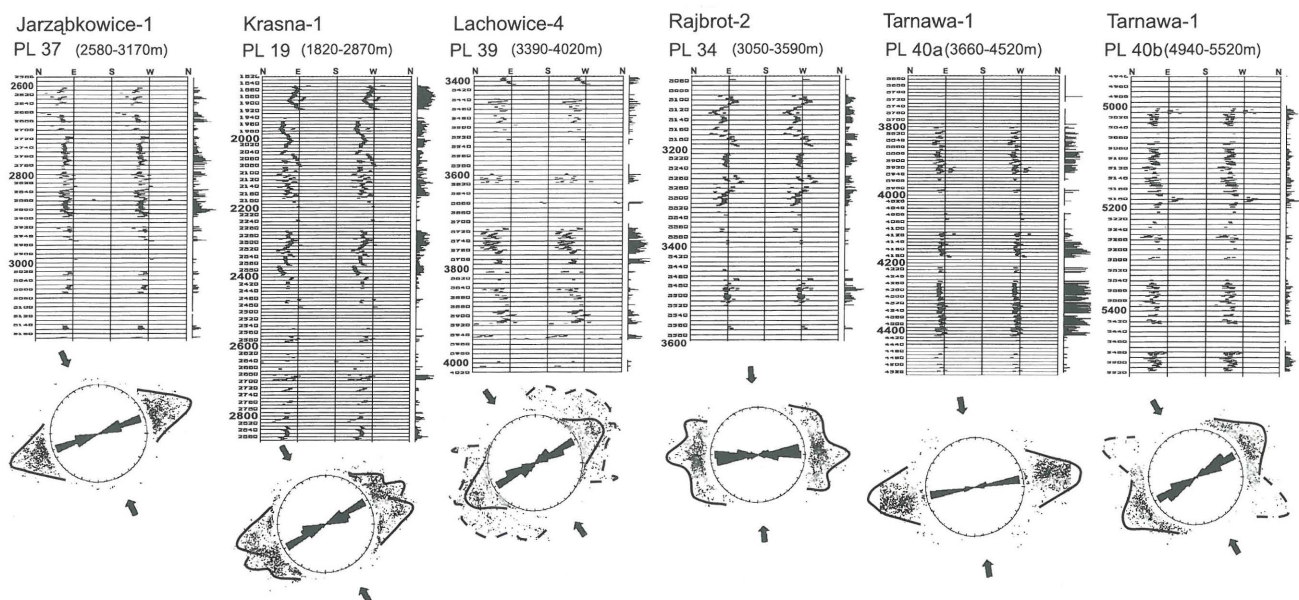
została wyliczona z dobrej jakości zapisu *breakouts*, w obrębie fundamentu metamorficznego, poniżej głęb. 3100 m (ryc. 2).

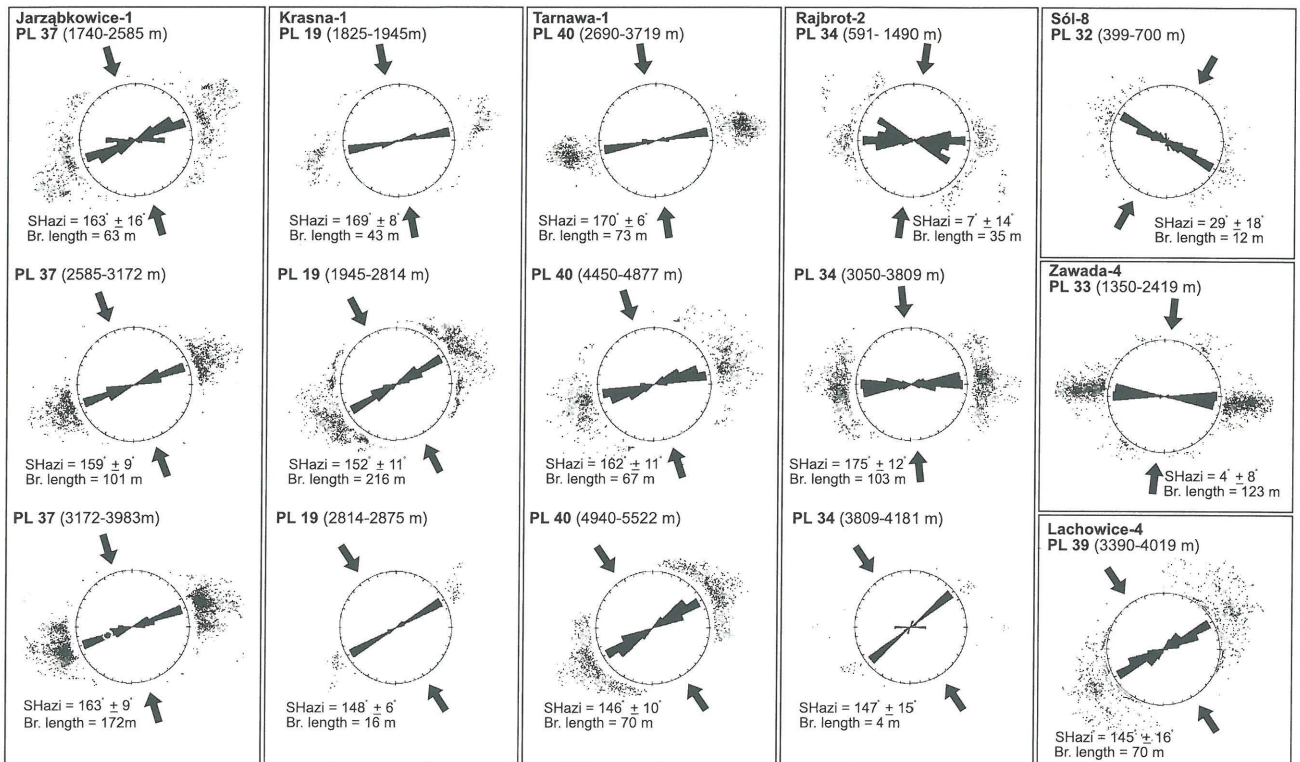
W profilu otworu Lachowice-7 zarejestrowano zatem sumaryczną rotację kierunków  $S_{Hmax}$  pomiędzy utworami fliszowymi a podłożem prekambryjskim o kąt  $60^\circ$ . Nie jest to jednak płynna rotacja lecz zmiany kierunków kompresji następują skokowo. Na tej podstawie w otworze Lachowice-7 zostały wyróżnione trzy poziomy geodynamiczne (ryc. 2):

- I — górny, obejmujący jednostki fliszowe, charakteryzujący się kompresją w kierunku NNE,
- II — pośredni, obejmujący autochtoniczne kompleksy miocenu i paleozoiku z kompresją w kierunku NNW,
- III — dolny, obejmujący skały metamorficzne prekambru z kompresją w kierunku NW.

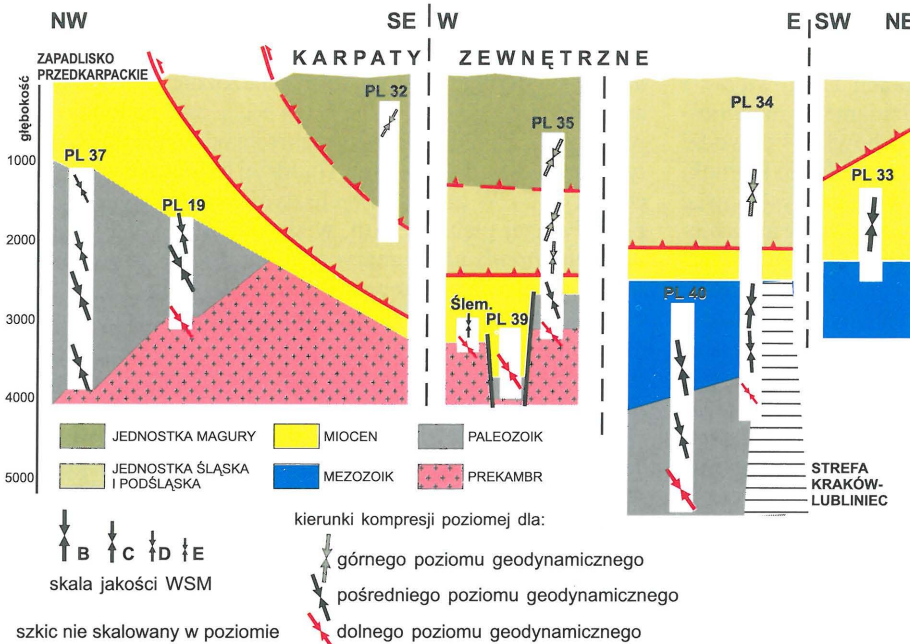


Ryc. 3. Przykłady profili i odpowiadających im diagramów rozetowych orientacji *breakouts* dla fragmentów wybranych otworów. Zamieszczone z boku profili wykresy kreskowe obrazują względną głębokość *breakouts*. Wąskie, wyraźnie zarysowany zapis *breakouts* (np. PL 37 i PL 40a) powstaje w przypadku głębokich, ostro zakończonych struktur. Rozmazane, szerokie profile *breakouts* (np. PL 39, PL 40b) zapisują się zwykle w dolnych partiach otworów na skutek szybkiej rotacji upadomierza w płytszych strukturach *breakouts*. Widoczna w otworach: PL 19, PL 39, PL 34 oraz PL 40 niestabilność kierunków *breakouts* wynika z rotacji naprężeń w sąsiedztwie stref uskokowych oraz, w niektórych przypadkach, ze zmiany położenia upadomierza w obrębie mniej regularnych struktur zniszczeniowych





Ryc. 4. Diagramy rozetowe oraz wyniki analizy statystycznej orientacji *breakouts* dla wyodrębnionych odcinków otworów; pozostałe objaśnienia jak na ryc. 2



Ryc. 5. Profil obrazujący pionowy zasięg danych upadomierza SED w badanych otworach oraz zmienność kierunków kompresji poziomej w obrębie wydzielonych jednostek strukturalnych (wielkość strzałek obrazuje jakość pomiaru zgodną ze standardami jakości Światowej Bazy Naprężeń)

W obrębie II poziomu geodynamicznego obserwowano przyskokowe rotacje naprężeń, powodujące widoczny na ryc. 2 bimodalny rozkład kierunków *breakouts*.

Z otworu Lachowice-7 rozwiercony został otwór kierunkowy Stryszawa-K1 (PL 35a), w którym w utworach molasy miocenijskiej i kompleksie paleozoicznym, na głębokości

2320–3090 m stwierdzono względnie stabilny kierunek kompresji NNW, potwierdzający przynależność tej części profilu do pośredniego poziomu geodynamicznego. Maksymalne odchylenie tego otworu od pionu wynosi  $25^\circ$ , zatem orientacja *breakouts* może odbiegać nieco od rzeczywistej orientacji  $S_{Hmax}$ . Jak wynika z modelowań Pavla Peški (Zoback i in., 1995) odchylenie to nie powinno przekraczać kilku stopni. W pobliskim otworze Lachowice-4 (PL 39) karotaż SED wykonano w interwale głębokościowym 3390–4020 m (ryc. 3, 4) w utworach autochtonicznego miocenu (do głęb. 3829 m) oraz w kompleksie paleozoicznym. Dobrze wykształcone *breakouts* wskazują, że zarówno w profilu miocenu, jak i w skałach dewonu kierunki kompresji są zmienne w granicach od NNW do NW. W dolnych partiach otworu (poniżej 3940 m) były obserwowane niestabilne odchylenia  $S_{Hmax}$  nawet ku WNW. Średnia orientacja  $S_{Hmax}$  w otworze Lachowice-4 jest charakterystyczna dla najniższego poziomu geodynamicznego, jaki wyodrębniono dla otworu Lachowice-7. W kolejnym otworze Ślemień-1, karotaż SED wykonano w krótkim interwale na głębokości 3040–3304 m, obejmującym utwory autochtonicznego miocenu (do głęb. 3188 m) zalegające wprost na skałach prekambryj-

mu geodynamicznego, jaki wyodrębniono dla otworu Lachowice-7. W kolejnym otworze Ślemień-1, karotaż SED wykonano w krótkim interwale na głębokości 3040–3304 m, obejmującym utwory autochtonicznego miocenu (do głęb. 3188 m) zalegające wprost na skałach prekambryj-



skich. Pojedyncze, słabo wykształcone *breakouts* wskazują na skokową zmianę kierunku kompresji z N-S dla odcinka mioceńskiego, do NW dla prekambriu. Ze względu na krótką sumaryczną długość *breakouts* (3 m) przesądzającej o słabej jakości pomiaru, wyniki interpretacji nie zostały umieszczone w Światowej Bazie Naprężeń.

W większej odległości od wyżej opisanych otworów, w obrębie płaszczowiny magurskiej przy granicy z Czechami, zlokalizowany jest otwór S61-8 (PL 32). Profil SED obejmuje wyłącznie skały fliszowe znajdujące się na głębokości 780–2000 m. Struktury *breakouts* są tu słabo wykształcone i występują tylko w krótkim interwale głębokości 400–700 m, w obrębie jednostki magurskiej. Wskazują one na średnią orientację  $S_{Hmax}$  w kierunku NEN (ryc. 4), a więc zgodnym z kompresją w obrębie najwyższego poziomu geodynamicznego jaki wyodrębniono dla płaszczowin fliszowych w otworze Lachowice-7. Ze względu na małą sumaryczną długość oraz słabe wykształcenie *breakouts* pomiar w otworze S61-8 ma słabą jakość. Znaczący jest w nim brak struktur *breakouts* w jednostkach podmagurskich przemawiający za tym, że oddziaływanie kompresji tektonicznej nie wzmacnia się tu wraz z głębokością.

Wyniki analizy *breakouts* dla pięciu powyższych otworów wiertniczych ze środkowej części karpackiej domeny masywu górnośląskiego potwierdzają występowanie znacznej, lewoskrętnej rotacji kierunków kompresji wraz ze wzrastającą głębokością, sugerując możliwość wydzielenia trzech poziomów geodynamicznych: górnego, pośredniego i dolnego. Ponieważ kierunki kompresji NNE, charakterystyczne dla górnego poziomu geodynamicznego stwierdzone zostały tylko w utworach fliszowych, spąg tego poziomu można identyfikować z nasunięciem płaszczowin na miocen autochtoniczny. Granicę pomiędzy pośrednim a dolnym poziomem geodynamicznym w otworach Lachowice-7 i Ślemień-1 postawić można w stropie fundamentu metamorficznego. Profil *breakouts* z otworu Lachowice-4 dowodzi jednak, że charakterystyczne dla poziomu dolnego kierunki kompresji w granicach od NWN do NW mogą występować również w pokrywie osadowej masywu a nawet w autochtonicznych seriach miocenu. Przyczyną takiego zjawiska jest prawdopodobnie głębokie zaleganie utworów miocenu (do 3829), znajdujących się na obniżonym bloku tektonicznym. Na tej samej głębokości w sąsiednich otworach występują prekambryjskie skały metamorficzne. Ze względu na blokowy styl tektoniczny masywu górnośląskiego pod allochtonem fliszowym, zasięg sugerowanych poziomów geodynamicznych nie pokrywa się zasięgiem kontrastujących pod względem reologii jednostek strukturalnych. Strop dolnego poziomu geodynamicznego w tej części Karpat określić można raczej w kategoriach głębokości i przeprowadzić go umownie na głęb. ok. 3000–3200 m.

### Wschodni skraj masywu górnośląskiego i masyw małopolski

We wschodniej części opisywanego obszaru orientacja kompresji poziomej wyznaczona została dla dwóch otworów, zlokalizowanych w obrębie płaszczowiny śląskiej, na skraju masywu górnośląskiego oraz jednego otworu zlokalizowanego u czoła nasunięć karpackich ponad fundamentem masywu małopolskiego (ryc. 1).

W otworze Tarnawa-1 (PL 40) karotaż SED wykonany został na głębokości 2700–5530 m, w obrębie mezozoicznego i paleozoicznego podłoża autochtonicznego Karpat fliszowych. Dobrej jakości profil *breakouts* z karotażu SAD pozwala na prześledzenie zmienności kierunków  $S_{Hmax}$  w

interwale głębokości prawie 3 km (ryc. 3, 4). W całym górnym odcinku otworu do głębokości 4540 m, w kompleksie permomezozoicznym, azymut  $S_{Hmax}$  jest stabilny i wynosi  $170^\circ \pm 7^\circ$ . Poniżej, w skałach silezu kierunek kompresji zmienia się płynnie w głąb otworu od  $175^\circ$  do  $140^\circ$ , podczas gdy w utworach dinantu przyjmuje znowu względnie stałą orientację ok.  $170^\circ$  (ryc. 3, 4). Pomiedzy kompleksem karbońskim a dewońskim, występuje generalna zmiana kierunku kompresji o kąt ok.  $20^\circ$  i poniżej głębokości 4940 m,  $S_{Hmax}$  zajmuje średnie położenie  $146^\circ \pm 10^\circ$  (ryc. 3). Ten kierunek kompresji, który utrzymuje się aż do spodu otworu na długości ok. 700 m, zbliżony jest do najniższego poziomu geodynamicznego. W paleozoicznej części profilu otworu Tarnawa-1 odnotowano również liczne rotacje naprężeń mniejszej rangi. Z porównania profilu *breakouts* z wynikami analizy strukturalnej upadomierza (Aleksandrowski i in., 1996) wynika, że kierunki naprężeń rotują w sąsiedztwie uskoków o biegach zbliżonych do WNW i NNW a częstość występowania tych rotacji wzrasta wraz z głębokością. Pojedyncze *breakouts* w najniższej partii otworu wskazują na kompresję dokładnie ku NW co pozwala przypuszczać, że lewoskrętna rotacja  $S_{Hmax}$  wraz z głębokością kontynuuje się również poniżej dna otworu. Badania *breakouts* w otworze Tarnawa-1 potwierdziły, że podobnie jak w centralnej części obszaru badań, rotacja pola naprężeń w profilu pionowym jest zjawiskiem dużej rangi.

W otworze Rajbrot-2 (PL 34) znajdującym się na skraju masywu górnośląskiego (ryc. 1), karotaż SED wykonany na głębokości 600–4180 m objął zarówno nasunięcia fliszu karpackiego jak i jego podłoże autochtoniczne aż do dewonu (ryc. 4, 5). W profilu fliszu (591–2100 m), średniej jakości zapis *breakouts* wskazuje na niestabilny, subpołudnikowy kierunek kompresji z odchyleniami zarówno ku NNW, jak i ku NEN. W utworach miocenu autochtonicznego *breakouts* nie występują. W kompleksie mezozoicznym podłoża autochtonicznego (2378–3050 m)  $S_{Hmax}$  ma, podobnie jak we fliszu, kierunki zmienne w zakresie od NWN do NNE, z tym, że *breakouts* są tu długie i bardziej regularnie wykształcone (ryc. 3). W utworach cechsztynu *breakouts* nie występują. Poniżej głęb. 3650 m, w skałach karbonu i dewonu nieliczne *breakouts* (sumarycznej długości 4 m) wskazują na zmianę kierunku kompresji ku NW. W otworze Rajbrot-2 nie obserwuje się zatem istotnej zmiany kierunku kompresji pomiędzy płaszczowinami fliszowymi a ich mezozoicznym podłożem. W obydwu kompleksach występują kierunki charakterystyczne dla dwóch najwyższych poziomów geodynamicznych (wydzielonych dla otworu Lachowice-7) lecz są one ze sobą przemieszane w pionowym profilu otworu. W obrębie skał paleozoicznych słabo udokumentowana kompresja ma orientację najniższego poziomu geodynamicznego.

Najdalej na wschód wysunięty otwór Zawada-4 (PL 33) znajduje się u czoła nasunięć karpackich koło Tarnowa (ryc. 1). Profil SED wykonany na głębokości 1350–2419 m pod nasunięciem fliszu, obejmuje mioceński kompleks molasowy (do 2375 m) i strop mezozoiku (ryc. 4, 5). Dobrej jakości zapis *breakouts* wskazuje na stabilny południkowy kierunek kompresji w utworach miocenu. W krótkim odcinku mezozoiku *breakouts* nie występują. Podobną orientację  $S_{Hmax}$  z nieznacznym odchyleniem ku NNE stwierdzono również dla autochtonicznego podłoża Karpat zewnętrznych położonych na wschód od badanego obszaru (Jarosiński, 1994b).

Pomiary naprężeń we wschodniej części obszaru badań wskazują, że nie ma istotnej różnicy kierunków  $S_{Hmax}$  pomiędzy płaszczowinami fliszu a mioceńskim i mezozoicznym podłożem autochtonicznym. W obrębie kompleksu paleo-

zoicznego następuje natomiast wyraźna zmiana kierunku kompresji ku NWN lub nawet NW. W otworze Tarnawa-1, bardziej oddalonym od krawędzi masywu w obrębie długiego profilu mezozoiku kierunki naprężeń są względnie stabilne, podczas gdy w obrębie paleozoiku wykazują małej rangi rotacje. W otworze Rajbrot-2, położonym na krawędzi masywu, kierunki naprężeń są niestabilne zarówno w obrębie fliszu jak i mezozoicznego podłoża. Tej rangi cykliczne rotacje naprężeń związane są prawdopodobnie z uaktywnieniem uskoku lub występowaniem stref mechanicznej anizotropii pochodzenia strukturalnego (Aleksandrowski i in., 1992; Barton & Zoback, 1994).

### Zachodni skraj masywu górnośląskiego

W najbardziej zachodniej części opisywanego obszaru badania *breakouts* przeprowadzono w podłożu czoła nasunięć karpaccich i w podłożu zapadliska przedkarpacciego, w dwóch otworach wiertniczych (ryc. 1).

Otwór Krasna-1 (PL 19) znajduje się w obrębie jednostki śląskiej przy granicy z Czechami. Karotaż SED i CAST wykonany został w nim na głębokości 1825–2875 m w autochtonicznym podłożu Karpat obejmującym kompleks górnego paleozoiku oraz krótki (60 m) odcinek metamorfiku prekambryjskiego (ryc. 3–5). W najwyższej partii otworu, w skałach karbonu, do głębokości 1950 m, azymut  $S_{Hmax}$  wyznaczono na  $169^{\circ} \pm 8^{\circ}$ . Na głębokości 1950–2814 m, w skałach dewonu orientacja  $S_{Hmax}$  jest zmienna w zakresie od NNW do NWN ze średnią  $152^{\circ} \pm 11^{\circ}$ . Poniżej, na krótkim odcinku fundamentu metamorficznego średnie położenie  $S_{Hmax}$  wynosi  $148^{\circ} \pm 6^{\circ}$ . Odchylenia kompresji od dominującego w tym otworze kierunku NWN występują w interwałach o długości kilkudziesięciu do 100 m. W zapisie CAST obserwowano również rotacje kierunków *breakouts* niższego rzędu o zasięgu od kilku do kilkunastu metrów profilu, w sąsiedztwie stref uskoku. Charakter zmienności kierunków  $S_{Hmax}$  w otworze Krasna-1 nie pozwala na wyodrębnienie osobnych poziomów geodynamicznych, niemniej generalna lewoskrętna rotacja naprężeń wraz z głębokością jest dostrzegalna. Kierunki kompresji dla całego otworu są zgodne z kierunkami dla dwóch najniższych poziomów geodynamicznych wyznaczonych dla otworu Lachowice-7.

W obrębie najbardziej zachodniej, polskiej części zapadliska przedkarpacciego zlokalizowany jest otwór Jarząbkowice-1 (PL 37), w którym karotaż SED wykonany został na głębokości 960–3980 m, w obrębie skał dewonu i karbonu (ryc. 3 i 4). Bardzo dobrej jakości zapis *breakouts* w całym przeanalizowanym profilu wskazuje na generalnie stabilną orientację  $S_{Hmax}$  w azymucie  $160^{\circ} \pm 9^{\circ}$ . Mimo to obserwowane były małej rangi rotacje kompresji  $S_{Hmax}$  do  $150^{\circ}$  lub  $180^{\circ}$  na długości od kilku do kilkunastu metrów profilu. Natura tych rotacji nie była badana, niemniej przypominają one znane z innych wierceń rotacje przyskokowe. Dominujący w otworze Jarząbkowice-1 kierunek kompresji NNW jest charakterystyczny dla pośredniego poziomu geodynamicznego.

### Dyskusja wyników

Przeprowadzone badania kierunków współczesnej kompresji poziomej metodą analizy struktur *breakouts* w zachodniej części polskiego segmentu Karpat wskazują na systematyczne skreślenie kierunków kompresji poziomej w pionowych profilach otworów (ryc. 5). Dla centralnej części badanego obszaru możliwe było wydzielenie trzech poziomów geodynamicznych o odmiennych kierunkach naprężeń: NNE dla

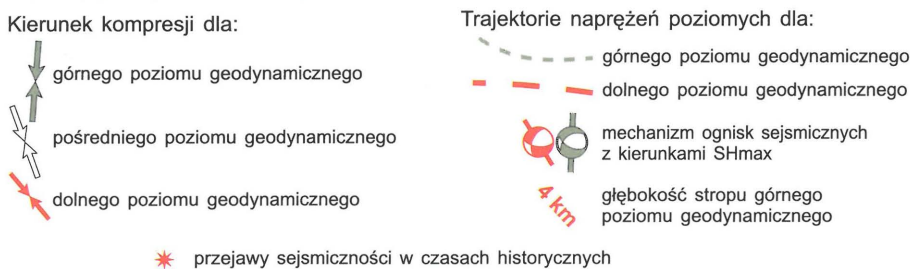
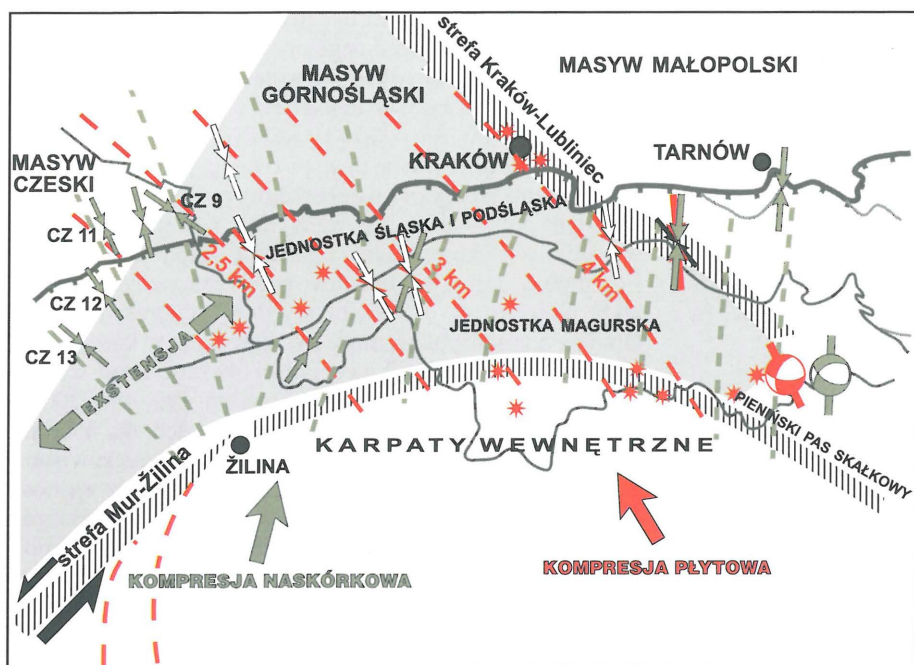
poziomu górnego, ograniczonego do jednostek fliszowych; NNE dla poziomu pośredniego obejmującego autochtoniczną pokrywę osadową masywu górnośląskiego; NW dla dolnego poziomu występującego w fundamencie metamorficznym lub głębiej zalegającej jego pokrywie osadowej.

Dotychczas uzyskane dane pozwalają przypuszczać, że granica pomiędzy górnym a pośrednim poziomem geodynamicznym pokrywa się z powierzchnią nasunięć fliszu. Ze względu na blokową budowę podłoża Karpat pionowy zasięg dwóch dolnych poziomów geodynamicznych nie zawsze pokrywa się z zasięgiem jednostek strukturalnych. Granica pomiędzy nimi może być określana w kategoriach głębokości. I tak w środkowej części obszaru badań u czoła jednostki magurskiej znajduje się ona na głęb. ok. 3200 m podczas gdy ku wschodowi obniża się do głęb. ok. 4500 m. Różnice w orientacji kompresji pomiędzy płaszczowinami fliszowymi a autochtonicznym podłożem zanikają we wschodniej części masywu górnośląskiego (Rajbrot-2), podczas gdy rotacja naprężeń w kierunku charakterystycznym dla najniższego poziomu geodynamicznego jest tu ciągle wyraźna (Tarnawa-1) i zachodzi w spągu kompleksu karbońskiego lub w obrębie kompleksu dewońskiego. W zachodniej części obszaru badań, w autochtonicznym podłożu jednostki śląskiej (Krasna-1), jest dostrzegalna generalna lewoskrętna rotacja naprężeń wraz z głębokością w granicach kierunków właściwych dwóm dolnym poziomom geodynamicznym. W długim profilu paleozoicznego podłoża zapadliska przedkarpacciego (Jarząbkowice-1) wyznaczone kierunki naprężeń są stałe i skierowane NNW, a więc zgodnie z pośrednim poziomem geodynamicznym. Ze względu na stabilność kierunków kompresji w długim interwale głębokościowym, wydzielenie poziomów geodynamicznych poza zasięgiem orogenu wydaje się jednak bezzasadne.

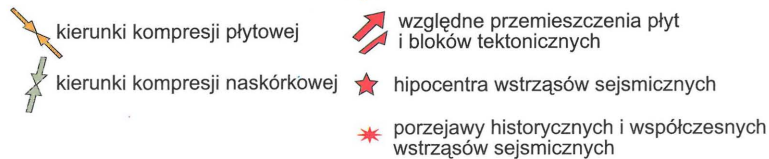
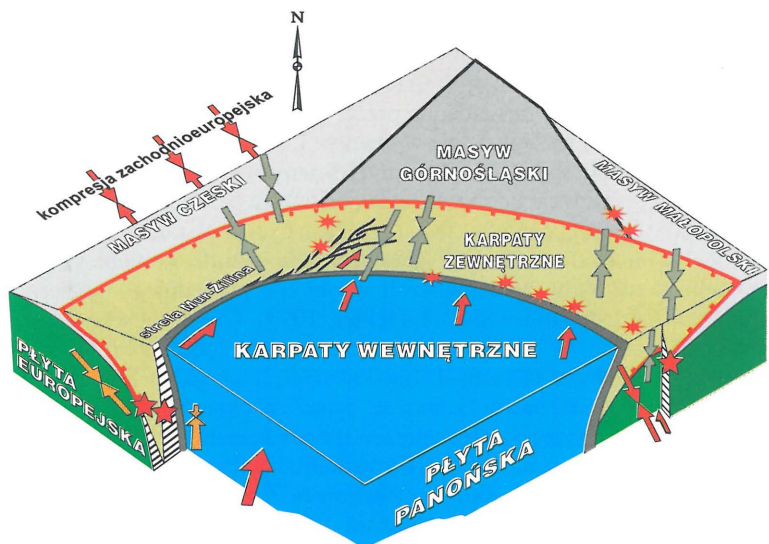
Wydzielone dla Karpat i ich podłoża poziomy geodynamiczne mogą wyróżniać się nie tylko odmiennymi kierunkami naprężeń, ale również reżimem tektonicznym. Dotychczasowe obserwacje nie są wystarczające dla rozstrzygnięcia tej kwestii. Mimo to, stwierdzone przez autora (Jarosiński & Krysiak, 1996) występowanie w otworze Lachowice-7, w skałach dewonu, spękań ekstensyjnych ściany otworu oraz charakterystycznych, undulowanych i osiowych pęknięć rdzenia (*core diskling, centeline fractures*) (Roeckel & Natau, 1991), przemawia na korzyść występowania reżimu kompresyjnego uskoku przesuwczego w obrębie pośredniego poziomu geodynamicznego (Engelder, 1993). Często obserwowane rotacje kierunków naprężeń niższego rzędu w obrębie tego poziomu (Krasna-1, Lachowice-7, Lachowice-4, Rajbrot-2 oraz Tarnawa-1), można uznać za charakterystyczne dla rotacyjnego pola naprężeń (proste ścinanie w płaszczyźnie poziomej lub skośnej do poziomu) i(lub) efekt współczesnej reaktywacji uskoku (Shamir & Zoback, 1989; Stephansson, Savilahti i Bjarnason, 1989). Jak wykazały badania strukturalne przeprowadzone w otworach Lachowice-7 (Jarosiński & Krysiak, 1995) i Tarnawa-1 (Aleksandrowski i in., 1996) rotacje naprężeń są związane z uskokami przesuwczymi lub mogącymi się reaktywować przesuwczo. Jest to dodatkowy argument przemawiający za możliwością występowania reżimu uskoku przesuwczego w podłożu nasunięć fliszowych. Na temat współczesnego reżimu naprężeń w obrębie płaszczowin autor nie ma na razie żadnych informacji.

Różnica kierunków kompresji pomiędzy najwyższym poziomem geodynamicznym obejmującym płaszczowiny, a najniższym w obrębie fundamentu autochtonicznego, osiąga w skrajnym przypadku  $60^{\circ}$ . Tak znacznego skreślenia nie można wytłumaczyć mechanizmem rotacji naprężeń pocho-





Ryc. 6. Rozmieszczenie w planie wyników pomiarów kierunków poziomych naprężeń dla poszczególnych poziomów geodynamicznych wraz z dołączonymi otworami z Czech (Peška, 1992). Naszkicowano najlepiej odpowiadające im trajektorie największych naprężeń poziomych dla górnego i dolnego poziomu geodynamicznego. Ugięcie trajektorii górnego poziomu geodynamicznego może być następstwem kompensacji lewoskrętnego ruchu przesuwczego wzdłuż strefy dyslokacyjnej Mur-Żilina. Rozmieszczenie przejawów sejsmiczności wskazuje na podwyższoną aktywność pienińskiego pasa skałkowego, strefy tektonicznej Kraków-Lubliniec oraz obszaru kompensacji strefy uskokuwej Mur-Żilina



Ryc. 7. Schemat oddziaływania pomiędzy płytami (przedstawiona część skorupowa) ilustrujący przestrzenne zależności pomiędzy kinematyką płyt a kierunkami naprężeń. Płyta pannońska wraz z Karpatami wewnętrznymi napiera na płaszczowiny Karpat zewnętrznych oraz po części na płaszcz podłoża autochtoniczne płyty europejskiej. Przesunięcie między płytami realizuje się wzdłuż strefy uskokuwej Mur-Żilina powodując prawdopodobnie rozdieranie pokrywy płaszczowinowej. Nacisk płyty pannońskiej jest również przyczyną prawoskrętnego ruchu przesuwczego pomiędzy masywem górnoszląskim a małopolskim

dzących z jednego źródła (kierunku). Należałoby zatem wskazać osobne siły generujące naprężenia na skrajnych poziomach geodynamicznych. W tym ujęciu, poziom pośredni można uznać za warstwę buforową, charakteryzującą się zmiennością orientacji  $S_{Hmax}$  w granicach charakterystycznych dla poziomów skrajnych oraz prawdopodobnie rotacyjnym polem naprężeń, związanym być może z odmiennymi kierunkami kompresji pomiędzy jego stropem a spagiem.

W obrębie najniższego (dostępnego wierceniom) poziomu geodynamicznego kompresja ma orientację zbliżoną do NW (ryc. 6). Ten sam kierunek  $S_{Hmax}$  stwierdzony został w masywie czeskim (Peška, 1992) oraz dalej ku zachodowi, w obrębie zachodnioeuropejskiej prowincji naprężeniowej (Brereton & Müller, 1991 oraz Światowa Baza Naprężeń). Pozwala to przypuszczać, że źródłem naprężeń w obrębie najniższego poziomu geodynamicznego są siły operujące w skali płyty litosferycznej m.in. parcie grzbietu północnoatlantyckiego transmitowane w poprzek pasywnej krawędzi kontynentu (Müller i in., 1992). Brak pomiarów współczesnych naprężeń w słowackiej części Karpat wewnętrznych, nie pozwala stwierdzić czy naprężenia te są również przenoszone na wskroś orogenu, czy też ulegają dyspersji lub zakrzywieniu wewnątrz łuku Karpat.

Pozostaje pytanie o źródło dodatkowej siły, generującej subpołudnikowe naprężenia w obrębie najwyższego poziomu geodynamicznego: nasunięcie fliszu oraz, we wschodniej części ob-

szażu badań również w wyższym fragmencie autochtonicznej pokrywy osadowej masywu górnośląskiego. Zdaniem autora ten kierunek kompresji wzbudzany jest aktywnym naciskiem z obszaru Karpat wewnętrznych.

Rozpatrując powyższe zjawisko w skali płyt litosfery przyjęto powszechnie akceptowany schemat (ryc. 6, 7), w którym fundament masywu górnośląskiego jest fragmentem zbudowanej płyty europejskiej zanurzonej pod orogenezą, natomiast Karpaty wewnętrzne są fragmentem mikro-płyty pannońskiej. O tym, że płyta pannońska współcześnie przemieszcza się względem płyty europejskiej dobitnie świadczy dynamika strefy uskokowej Mur–Žilina (ryc. 1A), która należy do najbardziej aktywnych sejsmicznie struktur w tej części Europy. Wzdłuż tej strefy Karpaty wewnętrzne przesuwane są względem Alp Wschodnich. W swoim północnym odcinku dyslokacja Mur–Žilina pokrywa się z przebiegiem pienińskiego pasa skałkowego, który jest z kolei najbardziej aktywną sejsmicznie strukturą w Karpatach polskich (Guterch & Lewandowska-Marciniak, 1975). Analiza mechanizmów ognisk sejsmicznych w środkowym segmencie strefy uskokowej Mur–Žiliny wskazuje, że jest ona lewoskrętnym uskokiem przesuwczym (Tomek, 1988). Hipocentra większości wstrząsów sejsmicznych występują na głębokości kilkunastu kilometrów co wyznacza minimalną miąższość kruchej warstwy skorupy ziemskiej, deformowanej przesuwczym. Tempo względnego poziomego przemieszczania wzdłuż tej strefy określone zostało na ok. 3 mm/rok. Z pomierzonych kierunków naprężeń wynika, że w miejscu ugięcia pasa skałkowego w kierunku równoleżnikowym (koło Žiliny) lewoskrętny ruch przesuwczy tej strefy uskokowej przeraża się w subpołudnikowy nacisk płyty pannońskiej na odskute od podłoża jednostki fliszowe, w obrębie których generowana jest naskórkowa kompresja najwyższego poziomu geodynamicznego. Kompresja ta angażuje również część autochtonicznej pokrywy osadowej masywu górnośląskiego. Wskazują na to zaburzenia kierunków kompresji i rotacyjny charakter pola naprężeń w pokrywie masywu górnośląskiego. Ponieważ kierunek naskórkowej kompresji nie jest już czytelny w metamorficznym fundamencie masywu górnośląskiego (a miejscami również w jego najgłębszej pokrywie osadowej) można zatem przypuszczać, że kolidujące ze sobą płyty w zachodniej części Karpat mają słabą powierzchnię kontaktu tzn. o niskim współczynniku tarcia.

Intensywna aktywność sejsmiczna strefy Mur–Žilina związana z ruchem przesuwczym wygasa tuż przed granicą Polski, w okolicach Žiliny. W obrębie jednostek fliszowych i płytkego podłoża autochtonicznego obszaru badań zachodzi zatem powinna kompensacja tego ruchu przesuwczego. Na przedłużeniu strefy Mur–Žilina w Karpaty zewnętrzne stwierdzono przejawy naturalnej sejsmiczności w XVIII i XIX wieku (Guterch & Lewandowska-Marciniak, 1975) (ryc. 6).

W celu zilustrowania sposobu kompensacji deformacji przesuwczych w północnym zakończeniu dyslokacji Mur–Žilina zostały wykreślone trajektorie naprężeń poziomych w obrębie najwyższego poziomu geodynamicznego (ryc. 6), najlepiej pasujące do wyników wykonanych pomiarów w otworach. Mimo niewielkiej ilości danych ich ekstrapolację uprawnia ogólna zgodność rotacji kierunków kompresji w badanych otworach. Kontrolę kierunków kompresji po zachodniej stronie dyslokacji umożliwiło przyłączenie wyników analizy *breakouts* wykonanej dla czeskiej części zapadliska i Karpat zewnętrznych przez Peškę (1992) (ryc. 6 — punkty: CZ 9, CZ 10, CZ 11, CZ 12, CZ 13 — kody w Światowej Bazie Naprężeń). Pomiaru te wykonane zostały na głęboko-

ściach nie przekraczających 1800 m, a średnie głębokości struktur *breakouts* wynoszą ok. 1000 m. Mimo iż *breakouts* zarejestrowane zostały w podłożu Karpat oraz serii molasowej miocenu, ze względu na małą głębokość pomiarów potraktowane zostały one jako wskaźniki kierunków kompresji w obrębie górnego poziomu geodynamicznego. Otrzymany kształt trajektorii naprężeń jest charakterystyczny dla teoretycznej strefy kompensacji uskoku przesuwczego (np. Price & Cosgrove, 1990), z jego domeną kompresyjną po stronie napierającego skrzydła uskoku i domeną ekstensyjną po stronie skrzydła pasywnego. I tak po wschodniej, kompresyjnej stronie trajektorie  $S_{Hmax}$  uginają się w kierunku stycznym do przedłużenia uskoku Mur–Žilina, natomiast po stronie zachodniej składowa ekstensyjna w kierunku równoległym do biegu uskoku powoduje odchylenie  $S_{Hmax}$  w kierunku do niego prostopadłym. U szczytu dyslokacji kompensacja ruchu przesuwczego (oraz nasuwczego) odbywa się prawdopodobnie w sposób dyskretny, prawie asejsmiczny na rozproszonych, mniejszych powierzchniach poślizgu w obrębie najwyższego i pośredniego poziomu geodynamicznego. Odpowiadające takiemu mechanizmowi liczne lustra stromych, lewoskrętnych uskoków przesuwczych o biegu w granicach od NEN do ENE autor opisał w otworze Lachowice-7. Jak wykazały przeprowadzone przez autora badania tektoniczno-geodynamiczne, struktury te są uruchamiane i rozwierane we współczesnym polu naprężeń stanowiąc dynamiczny kolektor gazu ziemnego (Jarosiński & Krysiak, 1995).

Cennym uzupełnieniem przedstawionego powyżej wводу jest informacja jaką niesie analiza mechanizmów ognisk wstrząsów sejsmicznych ze wschodniej części obszaru badań, z okolic Krynicy (Wiejacz, 1994) oraz informacja ustna). Wynika z nich, że kierunki naprężeń poziomych dla ognisk tych wstrząsów pokrywają się z kierunkami kompresji we wschodniej części masywu górnośląskiego wyznaczonymi z analizy *breakouts* (Tarnawa-1, Rajbrot-2; ryc. 6). Na głębokości hipocentrum (kilkanaście kilometrów) kompresji południkowej towarzyszy silny reżim kompresyjny uskoków odwróconych, natomiast z kierunkiem kompresji NWN jest związany większy komponent przesuwczy. Powyższe analizy sejsmologiczne wskazują, że koncentracja naprężeń zachodzi na skraju kontynentalnej płyty europejskiej (ok. 30 km na północ od pienińskiego pasa skałkowego), a zarazem na przedłużeniu pod Karpaty strefy dyslokacyjnej Kraków–Lubliniec, która oddziela masyw górnośląski od małopolskiego i nosi cechy poligenetycznej strefy przesuwczej (Žaba, 1996). W tym węźle tektonicznym zachodzić może zatem, zarówno nasuwanie jednostek fliszowych ku północy, jak i prawoskrętne ich rozrywanie na skutek przesuwczego przemieszczania pomiędzy masywami w podłożu Karpat. Prawoskrętny zwrot takiego ruchu przesuwczego jest zdeterminowany stwierdzonym kierunkiem kompresji. Wzdłuż tej samej, wschodniej krawędzi masywu górnośląskiego stwierdzone zostały również przejawy wstrząsów sejsmicznych w czasach historycznych w XVIII, XIX i na początku XX wieku (Guterch & Lewandowska-Marciniak, 1975) (ryc. 6).

## Wnioski

Badania kierunków poziomej kompresji ze struktur zniszczeniowych ścian otworów wiertniczych — *breakouts*, dla pokrywy fliszowej zachodniej części Karpat zewnętrznych oraz ich podłoża autochtonicznego wskazują na skrócenie i prawdopodobnie rozwarstwienie pola naprężeń na poziomy geodynamiczne. Najwyższy poziom geodynamiczny, obejmujący płaszczowiny karpackie, jak również me-



zozoiczny kompleks autochtoniczny (we wschodniej części badanego obszaru) charakteryzuje się kompresją w kierunku subpołudnikowym z odchyleniem ku NEN. W najniższym poziomie geodynamicznym obejmującym fundament metamorficzny masywu, a także lokalnie najniższą część jego pokrywy osadowej kompresja skierowana jest ku NW. Po między tymi skrajnymi poziomami występuje strefa buforowa o pośrednich kierunkach kompresji i prawdopodobnie rotacyjnym polu naprężeń.

Na wschodnim skraju masywu górnośląskiego zanika odmierność kierunków naprężeń pomiędzy płaszczowinami fliszowymi a płytszym podłożem mezozoicznym. Kompresja przyjmuje tu orientację południkową. W obrębie podłoża paleozoicznego kompresja rotuje do położenia NWN. W zachodniej części masywu górnośląskiego, w obrębie paleozoicznej pokrywy osadowej pod przykryciem zapadliska przedkarpackiego rotacja naprężeń zanika.

Orientacja kompresji na badanym obszarze kontrolowana jest dwoma czynnikami. W najgłębszym fundamencie masywu górnośląskiego (pod przykryciem płaszczowin fliszowych) zorientowana ku NW kompresja generowana jest prawdopodobnie przez siły oddziałujące w skali płyty litosferycznej, te same, które wzbudzają NW zorientowaną kompresję w zachodniej części płyty europejskiej. Drugim czynnikiem jest napierająca ku północy mikro płyta panońska wraz z Karpatami wewnętrznymi, która generuje naskórkową kompresję subpołudnikową w odkłutych od podłoża płaszczowinach Karpat zewnętrznych. Lewoskrętne przemieszczenie płyty panońskiej względem europejskiej zachodzi wzdłuż strefy przesuwczej Mur-Żilina. Rozproszona kompensacja ruchu przesuwczego w obrębie Karpat zewnętrznych i ich podłoża wyraża się współczesną reaktywacją uskoków, rotacjami kierunków naprężeń w profilach pionowych oraz charakterystycznym ugięciem trajektorii naprężeń w obrębie najwyższego, poziomu geodynamicznego. Północno-wschodnie obrzeżenie masywu górnośląskiego pod Karpatami jakie stanowi strefa tektoniczna Kraków-Lubliniec, jest prawdopodobnie współcześnie, prawoskrętnie reaktywną strefą przesuwczą.

Powyższe badania były przeprowadzone w ramach grantu Komitetu Badań Naukowych nr 9T 12B 020 09 kierowanego przez doc. dr hab. Antoniego Tokarskiego. Praca ta nie mogłaby powstać bez materiałów karotażowych, które zostały udostępnione na zasadach niekomercyjnych przez Polskie Górnictwo Naftowe i Gazownictwo.

Autor dziękuje dr Pawłowi Aleksandrowskiemu i dr Pawłowi Wiejaczowi za udostępnienie części niepublikowanych informacji oraz anonimowemu recenzentowi, którego krytyczne uwagi zainspirowały autora do poprawienia tekstu.

## Literatura

- ALEKSANDROWSKI P. 1985 — *Ann. Soc. Geol. Pol.*, 55: 375–422.
- ALEKSANDROWSKI P., INDERHUG O.H. & KNAPSTAD B. 1992 — [In:] *Rock Mechanics*, J.R. Tollerson & W.R. Wawersik (eds.). *Proc. 33rd U.S. Symp.* A.A. Balkema, Rotterdam: 29–37.
- ALEKSANDROWSKI P., MASTALERZ K. & JAROSIŃSKI M. 1996 — Kompleksowa interpretacja danych updomierza z otworu Tarnawa-1. *Arch. GEONFTA*.
- BARAN U., JAWOR E., JAWOR W. 1997 — *Prz. Geol.*, 45: 66–75.
- BARTON C.A. & ZOBACK M.D. 1994 — *J. Geoph. Res.*, 99, B5: 9373–9390.
- BELL J.S. & GOUGH D.I. 1979 — *Earth Planet. Sc. Lett.*, 45: 475–482.
- BRERETON R. & MÜLLER B. 1991 — [In:] *Tectonic Stress in the Lithosphere*, R.B. Whitmarsh, M.H.P. Bott, J.D. Fairhead & N.J. Kusznir (eds.). Royal Soc., London: 165–179.
- ENGELDER T. 1993 — *Stress Regimes in the Lithosphere*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey.
- GUTERCH B. & LEWANDOWSKA-MARCINIAK H. 1975 — [In:] *Współczesne i neotektoniczne ruchy skorupy ziemskiej w Polsce*. T.1. Wyd. Geol.
- JAROSIŃSKI M. 1994a — *Prz. Geol.*, 42: 564–569.
- JAROSIŃSKI M. 1994b — *Ibidem*, 42: 996–1003.
- JAROSIŃSKI M. & KRYSIAK Z. 1995 — [W:] *Badania sedimentologiczne, stratygraficzne, tektoniczne i geodynamiczne w otworze Lachowice-7*, M. Narkiewicz, M. Jarosiński & Z. Krysiak. Cz. II, *Tektonika i geodynamika*. *Arch. GEONFTA*.
- JAROSIŃSKI M. 1997 — *Reaktywacja struktur tektonicznych we współczesnym polu naprężeń na przykładzie otworu Lachowice 7 (Karpaty) — implikacje dla poszukiwań i eksploatacji bituminów*. Sprawozdania z Posiedzeń PIG (w druku).
- KSIAŻKIEWICZ M. 1972 — *Budowa geologiczna Polski*. T. IV. *Tektonika*. Karpaty. Wyd. Geol.
- MARDIA K.V. 1972 — *Statistics of directional data*. Acad. Press, London.
- MÜLLER B., ZOBACK M.L., FUCHS K., MASTIN L., GREGERSEN S., PVONI N., STEPHANSSON O. & LIUNGGREN C. 1992 — *J. Geoph. Res.*, 97, B8: 11783–11803.
- OSZCZYPKO N. & ŚLĄCZKA A. 1989 — *Geol. Carpat.*, 40: 23–37.
- PAUL Z., RYŁKO W. & TOMAŚ A. 1996a — *Geol. Quater.*, 40: 487–500
- PAUL Z., RYŁKO W. & TOMAŚ A. 1996b — *Ibidem*, 40: 501–520.
- PEŠKA P. 1992 — *Studia Geoph. and Geodet.*, 4: 307–324
- POPRAWA D. & NEMČOK J. (eds.) 1989 — *Geological Atlas of the Western Outer Carpathians and their Foreland*. Wyd. Państw. Inst. Geol.
- PRICE N.J. & COSGROVE J.W. 1990 — *Analysis of Geological Structures*. Cambridge University Press, Cambridge.
- ROECKEL TH. & NATAU O. 1993 — [In:] *KTB Report*, 93-2, R. Emmermann, J. Lauterjung & T. Umsonst (eds.). *Niedersächsisches Landesamt Für Bodenforschung*, Hannover: 203–209.
- SHAMIR G. & ZOBACK M.D. 1989 — [In:] *Rock at Great Depth*, V. Maury & D. Fourmaintraux (eds.). A.A. Balkema, Rotterdam: 1041–1048.
- STEPHANSSON O., SAVILAHTI T. & BJARNASON B. 1989 — [In:] *Rock at Great Depth*, V. Maury & D. Fourmaintraux (eds.). A.A. Balkema, Rotterdam: 863–870.
- ŚLĄCZKA A. 1976 — *Ann. Soc. Geol. Pol.*, 46: 337–350.
- TOMEK C. 1988 — [In:] *Evolution of the Northern Margin of Tethys*, M. Rakus, J. Dercourt & A.E.M. Nairn (eds.). *Occ. Publ. ESRI*, New Ser.: 3: 167–199.
- WIEJACZ P. 1994 — *Acta. Geoph. Pol.*, 3: 169–176.
- ZOBACK M.L. & ZOBACK M.D. 1980 — *J. Geoph. Res.*, 85: 6113–6156.
- ZOBACK M.D. 1991 — [In:] *Tectonic Stress in the Lithosphere*, R.B. Whitmarsh, M.H.P. Bott, J.D. Fairhead & N.J. Kusznir (eds.). Royal Soc., London: 141–150.
- ZOBACK M.L. 1992 — *J. Geoph. Res.*, 97, B8: 11703–11728.
- ZOBACK M.D., BARTON C., BRUDY M., CHANG C., MOOS D., PEŠKA P. & VERNIK L. 1995 — [In:] *Rock Stress in the North Sea*, Fejerskov M. & Myrvang A.M. Trondheim (eds.). Norway: 6–21.
- ŻYTKO K. i in. 1989 — [In:] *Geological Atlas of the Western Outer Carpathians and their Foreland*, D. Poprawa & J. Nemčok (eds.). Wyd. Państw. Inst. Geol.
- ŻABA J. 1996 — *Prz. Geol.*, 44: 173–180.