

METODY STATYSTYCZNE

- Wprowadzenie
- Diagramy promieniste i rozetowe
- Diagram punktowy
- Diagram konturowy
- Interpretacja diagramów konturowych
- Opracowanie struktur ślizgowych

WPROWADZENIE

Metody statystyczne w geologii strukturalnej odgrywają bardzo dużą rolę, np. w badaniu zmienności przestrzennej struktur na podstawie położenia warstw, co w połączeniu z analizą geometrii zespołów spękań ciosowych i uskoków pozwala na wyciągnięcie szeregu wniosków dotyczących pola naprężeń odpowiedzialnego za ich powstanie. Pozwalają na przejście "od szczegółu do ogółu", na wnioskowanie o zbiorach na podstawie podzbiorów. Nigdy nie dysponujemy całym zbiorem: jesteśmy ograniczeni ilością odsłoneń, ich dostępnością i czytelnością struktur. W tektonice nie możemy stosować zbyt wyrafinowanych metod statystycznych, bo choć aparat matematyczny pozwala nam na obliczanie różnego rodzaju średnich (arytmetycznych, ważonych), określanie wiarygodności uzyskanych wyników (wykonanie testu losowości kierunków, podanie stożka ufności dla uśrednionych wektorów wyznaczonych z pomocą siatki stereograficznej), to jednak najważniejszą rolę odgrywa metoda zbierania danych w terenie. Możemy je zbierać w sposób losowy, bądź celowy. Ten pierwszy sposób, choć przez statystyków zapewne uważany za bardziej obiektywny, może nas wpędzić w szereg pułapek. Otóż zbierając np. wszystkie położenia warstw z danego obszaru, w którym większość odsłoneń usytuowana jest wzdłuż potoków, a potoki płyną wzdłuż uskoków (takie sytuacje są powszechne np. w Karpatach fliszowych) może się okazać, że nasz zbiór danych nadaje się bardziej do wnioskowania o geometrii uskoków na podstawie przyuskokowych zaburzeń niż o samych położeniach warstw. Nie oznacza to, że warstw zaburzonych przyuskokowo nie należy w ogóle mierzyć, lecz można takie pomiary rozpatrywać oddzielnie, a przynajmniej ze świadomością ich pochodzenia. Podobnie jest w przypadku uskoków: nie można bezdusznie robić pomiarów bez przynajmniej próby określenia, czy mamy do

czynienia z zespołami uskoków komplementarnych, bez świadomości, czy uskok jest uskokiem pierwotnym, czy wtórnym, podatnym, czy niepodatnym. Analizując pomiary rys ślizgowych na powierzchniach luster tektonicznych musimy już w terenie zdecydować, czy mamy do czynienia z zadziorami powstałymi "z prądem", czy "pod prąd" i właściwie określić zwrot ruchu. Mierząc spękania również musimy wykazać czujność i już w terenie starać się określić np., czy są to spękania o genezie ścięciowej, czy ekstensyjnej oraz odnotowywać charakter mineralizacji ich powierzchni (jej rodzaj, grubość, sposób wypełnienia szczeliny spękaniaowej itd.). Te dodatkowe informacje dotyczące każdego pomiaru pozwolą nam później na bardziej wnikliwą obróbkę danych sprowadzającą się nie tylko do analizy geometrycznej, lecz również pozwalającą na różnicowanie zbioru danych ze względu na jakąś cechę (np. może się okazać, że mineralizacja kwarcowa przywiązana jest do szczelin spękaniaowych o ekstensyjnej genezie i równoleżnikowych biegach).

Zbierając dane terenowe musimy również zadbać, aby były one reprezentatywne. Nigdy nie mamy do czynienia ze zbiorem całkowitym i wyciągamy wnioski dotyczące budowy geologicznej w oparciu o naturalne wychodnie, kamieniołomy czy wiercenia, które zwykle są nierównomiernie rozmieszczone. Musimy zadbać aby na całym obszarze badań pomiary były robione w ten sam sposób, według tych samych kryteriów i były porównywalne ze sobą. Jeżeli pomiary dotyczą np. uskoków, to nie można postępować w ten sposób, że raz mierzymy szerokość strefy uskokowej, raz wielkość przemieszczenia a innym razem odnotowujemy charakter mineralizacji czy zwrot ruchu (jednym słowem opisujemy to, co rzuca nam się w oczy, a nie szukamy odpowiedzi na z góry postawione pytania: o szerokość strefy uskokowej, o wielkość przemieszczenia, o charakter mineralizacji, o zwrot ruchu itp.). Nie możemy również dopuścić do sytuacji, gdy np. robimy pomiary położenia warstw w obszarze o budowie monoklinalnej i mniej więcej jednakowym stopniu odsłonięcia, że nasz obraz zostanie zafałszowany poprzez duży udział procentowy pomiarów zrobionych w jednym kamieniołomie, gdzie na dodatek warstwy są zaburzone przyuskokowo: powinniśmy wówczas uśrednić pomiary i traktować je jako jeden. Takiej operacji uśrednienia pomiarów z kamieniołomu nie możemy dokonać wówczas, gdy stopień złożoności budowy geologicznej obszaru, w którym pracujemy jest duży, a w kamieniołomie mamy szereg bardzo dobrze odsłoniętych struktur fałdowych (tu powinniśmy zebrać maksymalnie dużo pomiarów i cieszyć się z możliwości dokonania szeregu wnikliwych obserwacji).

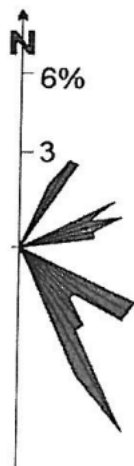
Pracując na obszarze, w którym występują fałdy pochylone i obalone o stromych skrzydłach brzusznych i połączonych grzbietowych możemy się spodziewać większego udziału procentowego pomiarów wskazujących na dominację warstw o niewielkich upadach, co wiąże się z faktem, że na powierzchni terenu wzdłuż przekrojów poprzecznych warstwy połogie będą się odsłaniały na dłuższym odcinku, niż strome.

Jeśli chodzi o zbieranie pomiarów położenia spękań w kamieniołomie to bez należytej czujności można łatwo zafałszować sobie obraz, np., jeśli zbierzemy pomiary z dwóch równoległych do siebie ścian (bo trzecia jest zapełniona, a zamiast czwartej jest wjazd do kamieniołomu), to prawdopodobnie pomierzemy najwięcej spękań z zespołu prostopadłego do biegu ścian a względnie mało spękań równoległych do ścian. Efekt będzie taki, że w opracowaniu statystycznym zaczną nienaturalnie dominować spękania jednego zespołu, co zostało uwarunkowane przypadkową orientacją ścian kamieniołomu.

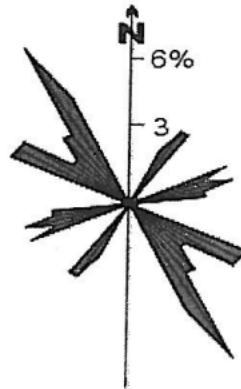
Musimy więc wykazywać dużą elastyczność w działaniu pamiętając, że tylko właściwie zebrany materiał terenowy pozwoli nam na uzyskanie wiarygodnych wyników. Jeżeli z prawidłowo zebranych danych po obróbce statystycznej uzyskamy zadowalające wyniki, to zachowajmy właściwe proporcje w ich interpretacji, tzn., jeżeli aparat matematyczny, którym się posługiwaliśmy pozwolił nam na określenie np. średniego położenia warstw z dokładnością do 1, to przed wyciągnięciem daleko idących wniosków o kilkustopniowej różnicy między obszarem A i B przypomnijmy sobie, z jaką dokładnością zbieraliśmy pomiary w terenie. Może były to pomiary położenia warstw wapieni bulastych o nierównych powierzchniach ławicowych robionych z dokładnością $\pm 5\%$, albo jeszcze mniejszą? Nie możemy też interpretować danych statystycznych bez znajomości realiów terenowych: np., jeżeli diagram położenia warstw wskazuje na płaskie, monoklinalne, zaleganie warstw, a pomiary zostały zebrane z obszaru fałdowego, to może to wynikać z faktu, że fałdy w tym terenie mają asymetryczną budowę (stromie skrzydła brzuszne i połogie grzbietowe) i na powierzchni terenu wzdłuż przekrojów poprzecznych warstwy połogie odstawiają się na znacznie dłuższym odcinku, niż strome i to jest powodem ich bardzo dużego udziału procentowego w opracowaniu statystycznym. Nie wolno więc interpretować budowy geologicznej opracowywanego terenu wyłącznie w oparciu o wyniki badań statystycznych i uznać go za monoklinę tylko dlatego, że tak wynika z diagramu.

DIAGRAMY PROMIENISTE I ROZETOWE

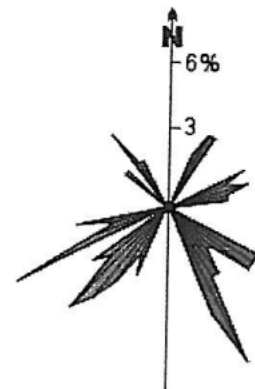
Najczęściej stosowaną w tektonice graficzną formą prezentacji wyników opracowań statystycznych są histogramy, diagramy rozetowe i promieniste oraz diagramy sporządzone w oparciu o siatki stereograficzne (konturowe i punktowe). Diagramy promieniste i rozetowe są rodzajem owiniętego wokół jednego punktu histogramu, sporządzone w odniesieniu do kierunków w terenie i na mapie. Są najczęściej używane do przedstawienia rozkładu kierunków w płaszczyźnie poziomej, np. biegów ciosu pionowego czy kierunków transportu w basenie sedymentacyjnym. Ponieważ w pierwszym przypadku istotny jest tylko bieg (w zakresie 0°-180°) do sporządzenia diagramu nie jest nam potrzebny pełny okrąg lecz wystarczy jego połowa. Jednak dla lepszej czytelności diagramów, dla których istotny jest tylko kierunek danej cechy bez jej zwrotu, często stosuje się nie tylko połówkę, ale całe koło, w którym obie połówki są względem siebie w symetrii środkowej. Do sporządzenia diagramu, na którym istotny jest nie tylko kierunek, ale i zwrot (np. kierunek i zwrot ruchu na powierzchni lustra tektonicznego lub prądu w basenie sedymentacyjnym) użyjemy całego koła (0°-360°).



rozeta biegów dla połówki koła



rozeta biegów dla pełnego koła



rozeta azymutów

Na diagramie promienistym przedstawiamy kreską pomierzoną w terenie orientację lineacji, zwielokrotniając jej długość w przypadku powtarzających się pomiarów. Do sporządzenia diagramu rozetowego potrzebna jest wcześniejsza obróbka zbioru danych, mająca na celu uzyskanie obrazu statystycznego umożliwiającego porównywanie diagramów między sobą. W pierwszej kolejności dzielimy zbiór na klasy, tzn. obieramy przedziały, zwykle o rozpiętości 5° lub 10°. Następnie określamy liczebność każdej klasy, a później udział procentowy pomiarów z danej klasy odnosimy do całości zbioru traktowanego jako 100%. Celem usprawnienia pracy możemy się posłużyć tabelką pomocniczą:

Klasa	Liczebność	Częstotliwość (%)
1-10		
11-20		
21-30		
.....		
171-180		

Mamy zasadniczo dwie formy graficznej prezentacji wyników: a) możemy uzależniając skalę diagramu od wielkości wartości maksymalnej zakresić promieniem odpowiadającym ilości procent wycinek koła odpowiadający danej klasie; b) w odległości równej udziałowi procentowemu pomiarów w danej klasie zaznaczamy punkt wzdłuż promieni środkowych dla danego przedziału (np. 15° dla przedziału 11°-20°), a po zaznaczeniu wszystkich łączymy je otrzymując rozetę. Zasady sporządzania diagramów promienistych i rozetowych wyjaśnia rysunek.



Diagramy rozetowe

Diagramy lineacji często przedstawiamy w parze z histogramem upadów sporządzonym w układzie prostokątnym (a) lub w postaci 1/4 wycinka koła (b), w którym przedstawiamy upady od 0° do 90° z podziałem na klasy (zwykle co 5° lub 10°) i w którym prosta pozioma odpowiada upadom poziomym, a pionowa

pionowym. Diagram taki jest również diagramem częstotliwości, tzn. odnosimy ilość pomiarów w każdej klasie do 100%.

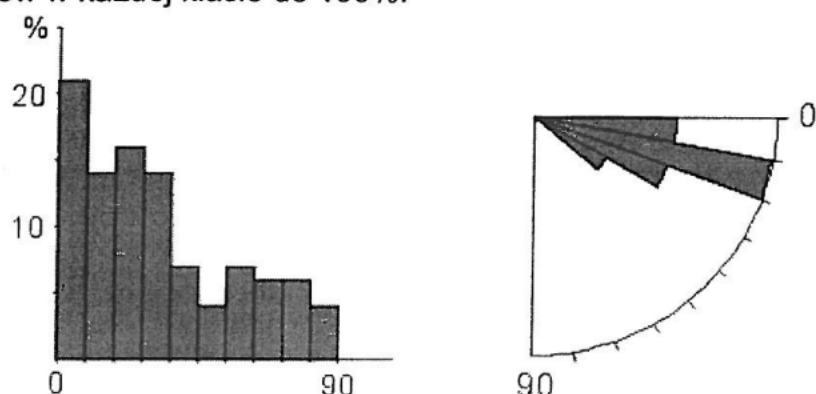
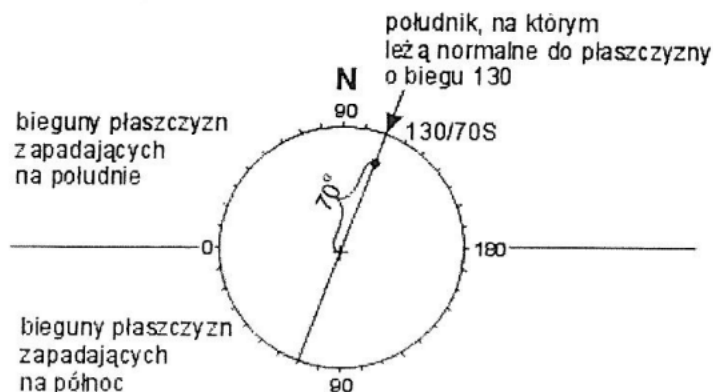


DIAGRAM PUNKTOWY

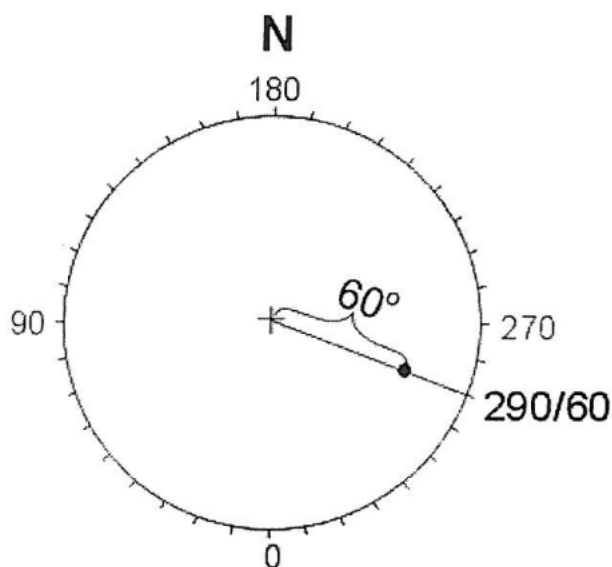
Opisane wyżej metody opracowań statystycznych mają tę wadę, że nie pozwalają jednocześnie uwzględnić dwóch zmiennych: azymutu (biegu) i upadu, i każdą z nich musimy opracowywać oddzielnie. Przedstawienie pełnej zmienności orientacji prostych i płaszczyzn (jako biegunów) w przestrzeni umożliwi nam siatka stereograficzna. Do nanoszenia położenia prostych i normalnych do płaszczyzn moglibyśmy posłużyć się znanymi metodami za pomocą siatki równoleżnikowej, ale dla zbioru o dużej liczebności przed końcem roboty mielibyśmy w siatce niezłą dziurę od kręcenia przy naprowadzaniu za każdym razem południka zerowego na linię biegu płaszczyzny bądź azymut linii upadu płaszczyzny. Możemy usprawnić sobie pracę korzystając z siatki biegunowej. Jeżeli opracowujemy zbiór prostych, to opisujemy siatkę w sposób klasyczny, tak jak azymuty w terenie. Jeżeli nanosimy położenia płaszczyzn, których orientację mamy podaną w wersji 3-stopniowej (bieg, upad i kierunek zapadania), to gdybyśmy opisali sobie tę siatkę dokładnie tak samo, jak poprzednią, to mając linię biegu warstwy za każdym razem musielibyśmy szukać normalnej w płaszczyźnie prostopadłej do warstwy, a więc dodawać lub odejmować 90° do jej biegu. Żeby wyeliminować to dodawanie i odejmowanie opisujemy siatkę tak, aby można było nanosić bezpośrednio normalne do płaszczyzn. Tak więc północ pozostaje na swoim miejscu, natomiast tylko opis siatki jest skręcony o 90° , bo jest to opis położenia normalnych, informujący nas, że na danym południku (opisanym np. jako 30°) leży normalna do warstwy o tym biegu (30°). Siatka ta pozwala więc na bezpośrednie nanoszenie normalnych do warstw z wyeliminowaniem kręcenia i kalkę możemy zamocować na siatce nieruchomo. Pamiętajmy, że nanosząc normalną odliczamy upad płaszczyzny od środka siatki. Pracując na dolnej półkuli warstwy o upadach północnych będą miały swoje normalne położone po południowej stronie siatki, a o południowych - po północnej. Normalna do warstwy poziomej jest pionowa i ma punkt przebicia w środku koła. Normalna do warstwy pionowej jest pozioma i ma dwa punkty przebicia (po obu stronach koła wielkiego). Jeśli się zdarzy, że kolejna normalna wypada nam w już istniejącym punkcie, to punkt ten bierzemy w kółko, a przy następnym razie - w drugie kółko itd.

Jeżeli nanosimy bieguny płaszczyzn zapisanych w wersji 2-stopniowej (jako azymut linii upadu), to opis siatki umożliwiający bezpośrednie nanoszenie normalnych musimy skręcić o 180° , tak, aby 0° było na dole siatki, a 180° na górze.

Upady tak, jak poprzednio odliczamy od środka siatki. Opisy siatek dla obydwu sposobów zapisu płaszczyzn przedstawia rysunek.



opis siatki do nanoszenia biegunów płaszczyzn w zapisie trójstopniowym

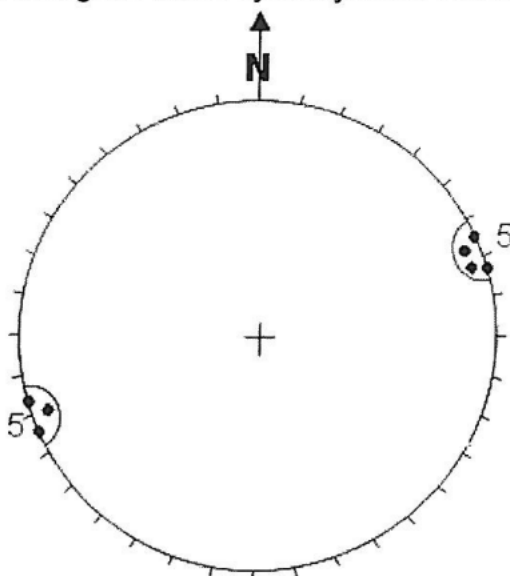


opis siatki do nanoszenia biegunów płaszczyzn w zapisie dwustopniowym

DIAGRAM KONTUROWY

Diagramy punktowe są często dla nas tylko materiałem wyjściowym do dalszego opracowania statystycznego, jakim jest diagram konturowy. Najlepiej do tego celu nadają się zbiory o liczebności w zakresie 100-300 pomiarów. Jego generalną zasadą niezależnie od metody wykonania jest określenie gęstości punktów na jednostkę powierzchni siatki. Po ustaleniu gęstości wykreślamy izolinie, które pomogą nam wyznaczyć maksimum, a tym samym najczęstsze położenia prostych czy płaszczyzn (zależny czego dotyczyło nasze opracowanie). Do określenia gęstości służą różnego rodzaju liczniki i szablony (Schmidta, Mellisa, Pronina, Dimitrijeviča). Ponieważ przy wykonywaniu tego typu opracowania posłużymy się zapewne jednym z programów komputerowych (np. StereoNet, GEOrient), to tylko dla uzmysłowienia sobie zasady przyjrzymy się bliżej jednemu z nich. Najbardziej popularny w naszym kraju jest licznik kółkowy Dimitrijeviča, złożony z ok. 300 kółek, z których każde ma powierzchnię równą 1% powierzchni siatki. Kółka te zachodzą na siebie i w sumie stanowią 3-krotne pokrycie siatki. Korzystamy z

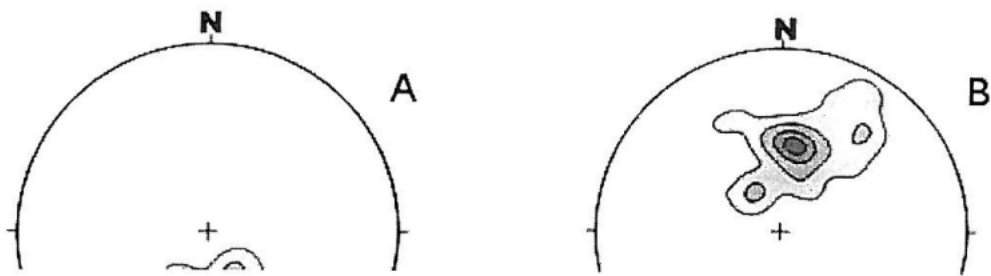
niego w ten sposób, że podkładamy go pod kalkę z diagramem punktowym, liczymy ilość punktów w każdym z kółek, zaznaczamy na nieruchomo umocowanej wierzchniej kalce środek kółka i wpisujemy liczbę punktów. Zauważmy, że znaczną część punktów liczymy kilkakrotnie w sąsiednich kółkach. Zwróćmy również uwagę na fakt, że na obrzeżach siatki mamy półki kółek=0,5%, które pełne koło, czyli 1%, stanowią w parze z położonym na przeciwległym krańcu siatki. W związku z tym licząc punkty położone w tych kółkach musimy najpierw w jednej połowce policzyć te, które leżą na kole wielkim siatki oraz wewnątrz półkola, a następnie dodać do tego te, które znajdują się w przeciwległym półkolu (ale tylko z jego środka, bo te położone na kole wielkim czyli należące do prostych poziomych, których obrazem są dwa punkty zostały już policzone w pierwszej połowce). Liczbę policzonych w ten sposób punktów wpisujemy w obu odpowiadających sobie - położonych po przeciwnych stronach siatki - półkolach. Po uzyskaniu w ten sposób punktowego diagramu gęstościowego, zwyczajowo następnym posunięciem jest przeliczenie uzyskanych wartości na procenty i na tej podstawie wykreślenie izarytm częstości, których wartości dobieramy tak, aby stanowiły liczby całkowite, aby nie było ich więcej niż 6 i aby odstęp między wartościami rosły. Zauważmy, że ponieważ symetrycznie na przeciwległych krańcach siatki mieliśmy taką samą liczbę pomiarów i wynikającą z niej taką samą liczbę procent, to i kreślone przez nas izoliny powinny na brzegach siatki symetrycznie trafiać w siebie.



Uzyskany przez nas diagram konturowy pozwala na w pierwszej kolejności na określenie położenia maksimum, czyli najczęstszych położenia płaszczyzn lub prostych (zależnie od przedmiotu opracowania). Oddzielne zagadnienie stanowi, czy położenie maksimum powinniśmy koniecznie ustalać na podstawie wartości procentowych: kreśląc izoliny na podstawie gęstości doszlibyśmy do tych samych wniosków. Osobistym zdaniem autorki to tylko przywiązanie do tradycji każe nam przeliczać te wartości na procenty, bo prawdę powiedziawszy operacja ta nie chroni diagramów przed wpływem liczby pomiarów na wartości maksimum (często dla bardzo licznych zbiorów wynosi ono niecały procent, natomiast dla zbiorów liczących poniżej 100 pomiarów kilkadziesiąt procent). Zwykle też przytaczamy najczęstsze położenia płaszczyzn czy prostych bez powoływania się na liczbę procent, która na nie wskazuje. Wydaje się, że tylko w szczególnych warunkach (przy bardzo podobnych zbiorach) ma sens przeliczanie na procenty celem porównywania np. zwartości zbiorów. Póki co, to poszanowanie dla tradycji oraz

oprogramowanie komputerowe każe sporządzać nam diagramy częstotliwości, a nie liczebności.

Umowną sprawą jest też półkula, na którą robimy odwzorowanie. W ostatnich latach wszystkie opracowania (łącznie z programami komputerowymi) sporządzane są dla dolnej półkuli (tej, na której robiliśmy wszystkie operacje na siatce), natomiast w starszych pracach znajdziemy diagramy wykonane dla górnej półkuli. Zwykle informacja o tym, czy diagram został wykonany na górną czy dolną półkulę sygnalizowana jest symbolicznie w postaci niewielkiego półokręgu, w który wpisana jest liczba pomiarów (zwróconego do góry lub w dół). Interpretując diagram w odwzorowaniu na górną półkulę pamiętajmy, że jest on w symetrii środkowej względem dolnej półkuli. Stosunek obrazów na obu półkulach przedstawia rysunek.



Diagramy konturowe w odwzorowaniu na dolną (a) i górną (b) półkulę

INTERPRETACJA DIAGRAMÓW KONTUROWYCH

O ile w sporządzaniu diagramu konturowego może wyręczyć nas komputer, to w jego interpretacji jesteśmy zdani na własne siły. Zasady interpretacji najłatwiej będzie omówić na przykładach.

Diagramy położenia warstw

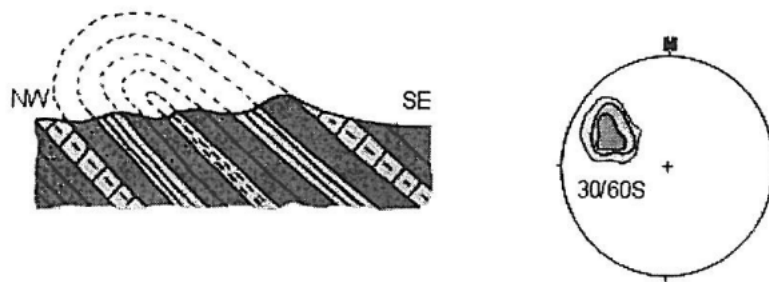


Diagram położenia warstw w fałdzie izoklinalnym

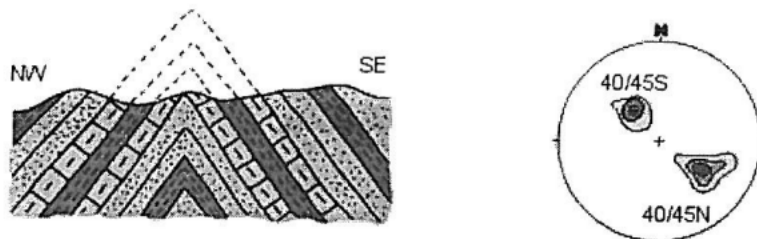


Diagram położenia warstw w fałdzie stojącym o ostrym przegubie. Możemy określić położenia warstw w skrzydłach fałdu, jego kąt zbieżności i płaszczyznę

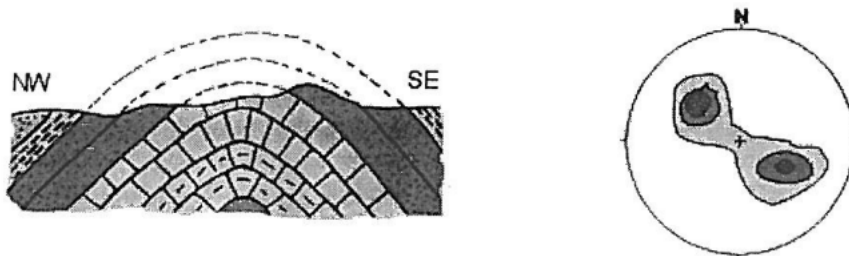


Diagram położenia warstw w fałdzie stojącym o zaokrąglonym przegubie

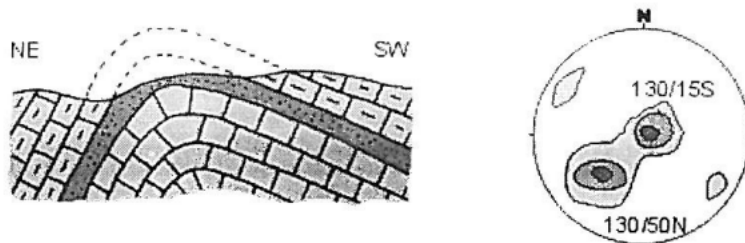


Diagram położenia warstw w fałdzie pochylonym. Widoczne przyuskokowe zaburzenia warstw

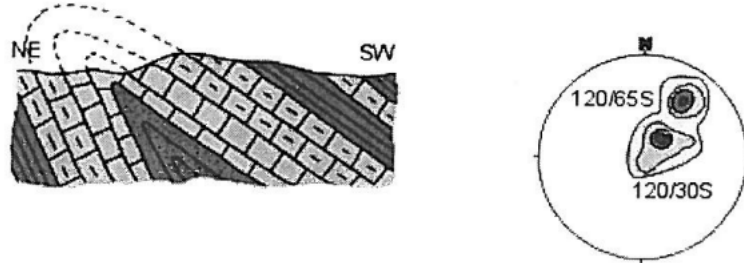


Diagram położenia warstw w fałdzie obalonym

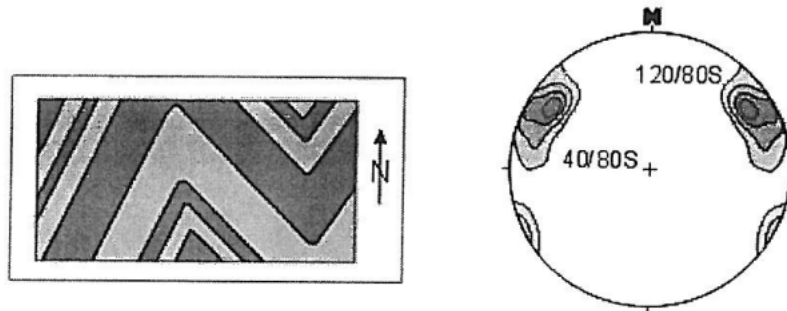


Diagram położenia warstw dla fałdu o pionowej osi

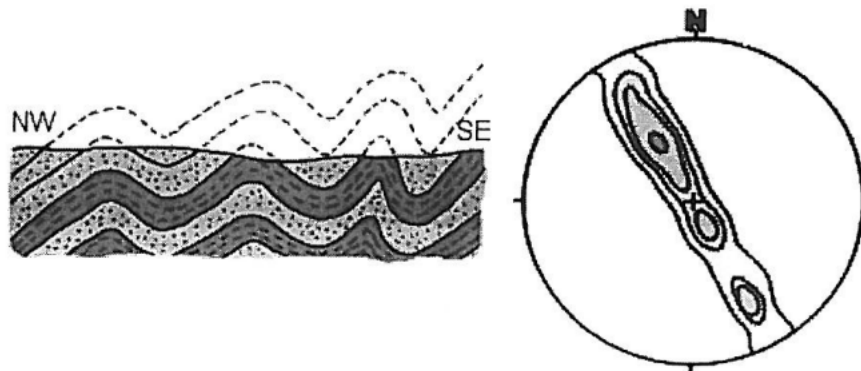


Diagram położenia warstw z obszaru fałdowego o poziomych osiach fałdów

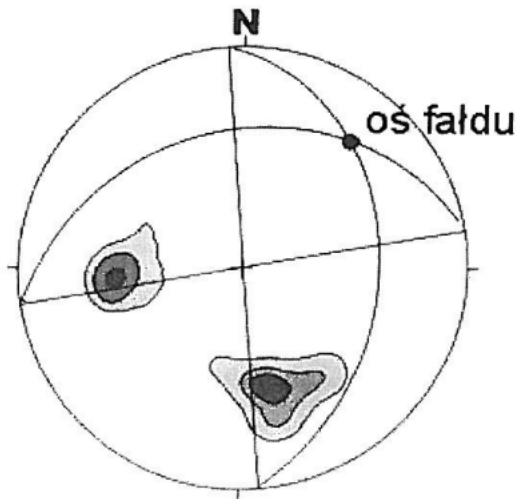


Diagram położenia warstw dla fałdu o ostrym przegubie i nachylonej osi, której położenie możemy wyznaczyć wykreślając płaszczyzny skrzydeł

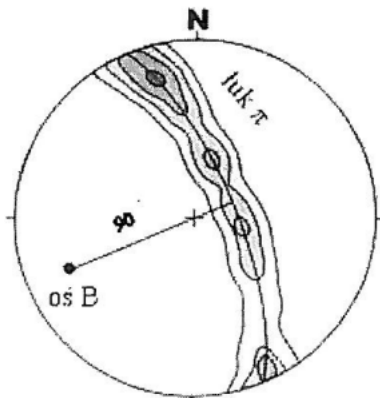
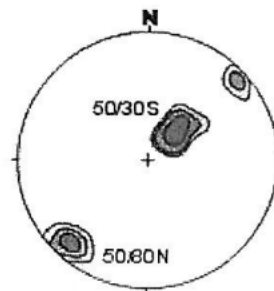
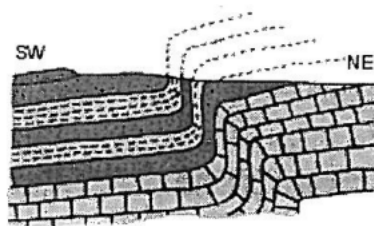


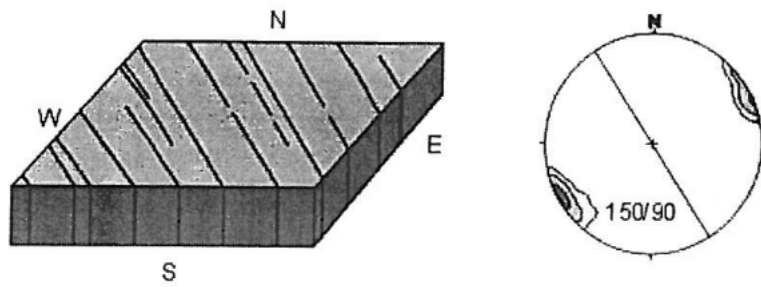
Diagram położenia warstw z obszaru fałdowego o wychylonych osiach fałdów. Na podstawie łuku π (przechodzącego przez maksima) możemy zrekonstruować oś B jako prostą prostopadłą do łuku (teoretyczne położenia osi fałdów)

płaszczyzna przechodząca przez maksima

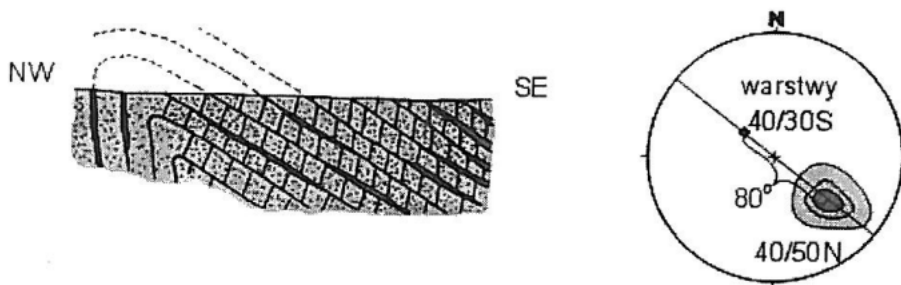


Fleksura

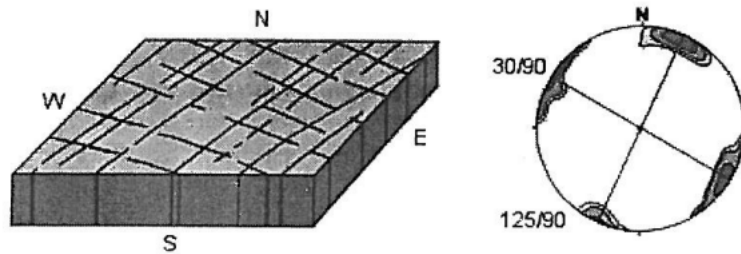
Diagramy położenia spękań



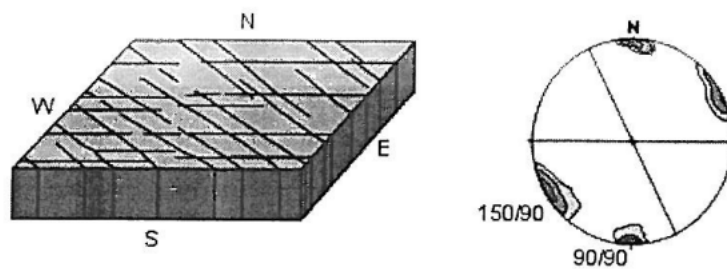
Jeden zespół spękań o pionowych upadach



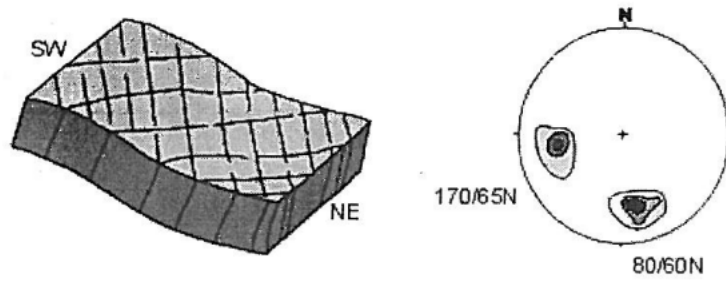
Kliważ rozwinięty w grzbietowym skrzydle fałdu. Możemy określić kąt między powierzchniami kliważu i warstwy



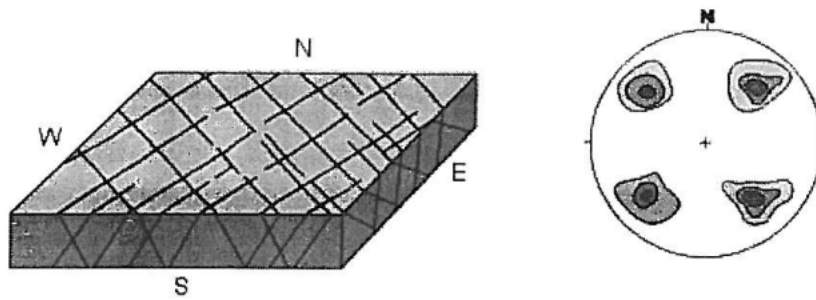
Dwa zespoły spękań o pionowych upadach, tworzące system ortogonalny



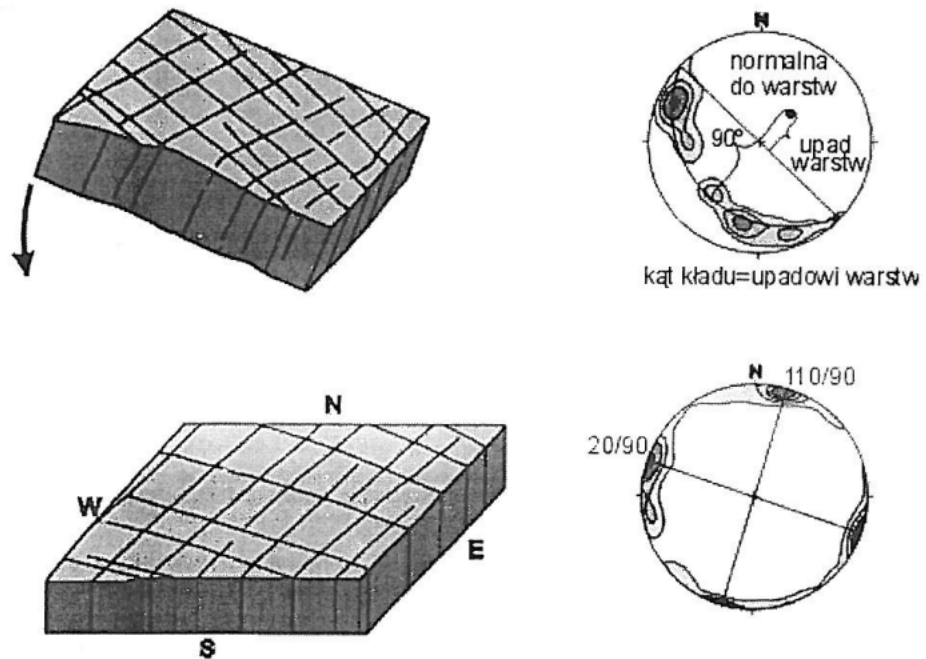
Dwa zespoły spękań o pionowych upadach, tworzące system diagonalny



Dwa zespoły spękań ortogonalnych o nachylonych powierzchniach



Cztery zespoły spękań, na które składają się dwa systemy spękań komplementarnych



Dwa zespoły spękań katetalnych, które po rotacji warstw do położenia poziomego tworzą system ortogonalny

Diagramy położenia uskoków

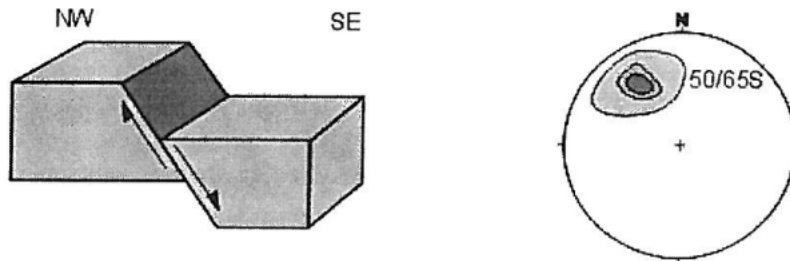


Diagram dla uskoków normalnych

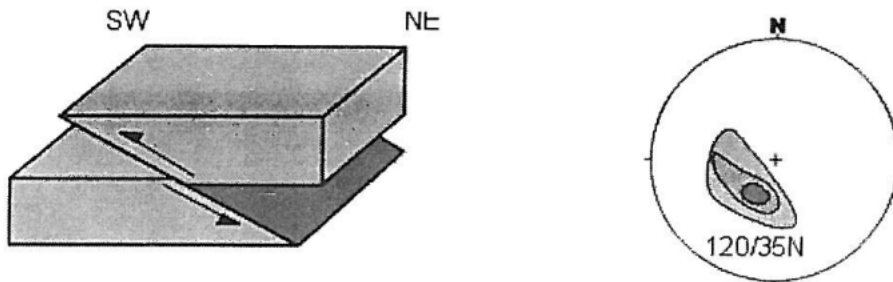


Diagram dla uskoków odwróconych

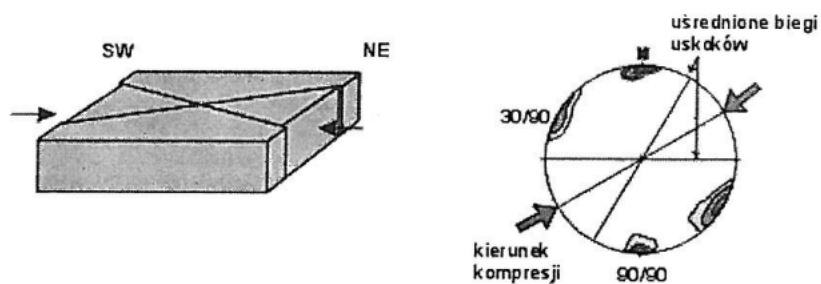


Diagram dla komplementarnych uskoków przesuwczych. Dwusieczna kąta ostrego pozwala określić położenie osi naprężenia największego

OPRACOWANIE STRUKTUR ŚLIZGOWYCH

Pomiary orientacji rys ślizgowych na powierzchniach luster tektonicznych wymagają specjalnej obróbki graficznej, ale też dają bardzo duże możliwości interpretacji, np. pozwalają na rekonstrukcję pola naprężeń. Zanim się im bliżej przyjrzymy powiedzmy sobie jak należy zbierać dane w terenie, aby dały nam

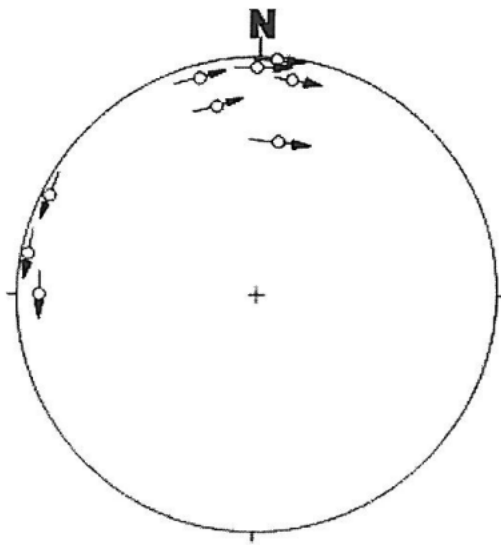
poprawne wyniki.

Od strony technicznej powinniśmy pomierzyć położenie lustra tektonicznego, < orientację rys ślizgowych w sposób omówiony w rozdziale dotyczącym położenia prostej na płaszczyźnie (jeżeli płaszczyzna jest połoga to mierzymy bieg prostej, jeżeli stroma to jej kąt spadku), oraz rodzaj zadziorów (z wyorania, z oderwania, czy z wcięcia), a na ich podstawie postaramy się określić zwrot ruchu. Zwykle podajemy zwrot ruchu górnego skrzydła, zapisując tę informację w notatkach strzałką skierowaną do góry lub w dół.

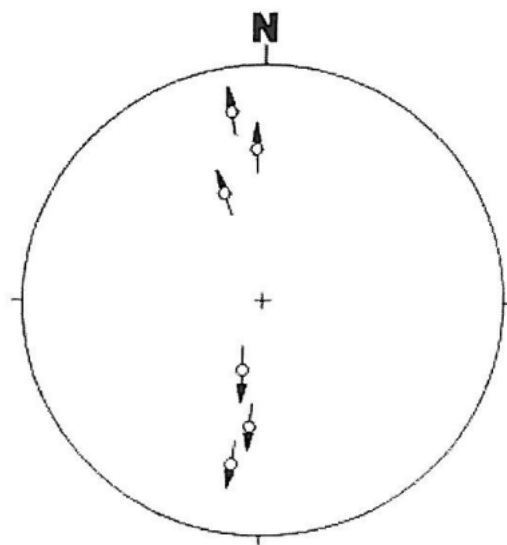
Zbierając dane terenowe powinniśmy zadbać o to, aby pomiary należały do jednowiekowej populacji i musimy sami sobie wypracować i umieć sprecyzować kryteria ich rozdzielania, adekwatne do danego terenu. Ważną rzeczą jest oddzielenie uskoków głównych od uskoków opierających, na których rysy będą wskazywały na lokalne pole naprężeń, pochodne względem ruchu wzdłuż uskoku nadrzędnego. Pamiętajmy również, że do analizy geometrycznej przedstawionej poniżej nadają się wyłącznie uskoki typu kruchego. Tektoglify na uskokach podatnych - mimo, iż zwykle występują bardzo licznie to są przeważnie różnie zorientowane i pozaginane. Również sama powierzchnia uskoku podatnego nie przypomina płaszczyzny i zwykle jest niemierzalna, a nie możemy po prostu zmierzyć położenia jej fragmentu i dowolnie wybranej rysy.

Często nasze problemy dotyczące uskoków będą polegały na oddzieleniu uskoków pierwotnych od wtórnych i próbie wyłonienia par uskoków komplementarnych. Do analizy par uskoków komplementarnych możemy zastosować proste metody na siatce, polegające na znalezieniu dwusiecznej kąta ostrego, która wyznacza nam zarazem położenie osi naprężenia największego. W większości przypadków będziemy mieli do czynienia z uskokami wtórnymi, tzn., że powierzchnie zniszczenia powstały wcześniej, niż miało miejsce przemieszczenie. Inaczej mówiąc uskoki są zwykle starsze od rys, które pochodzą z najmłodszego etapu tektonicznego i uzyskane w wyniku ich analizy rezultaty będą dotyczyły właśnie tego etapu. Pamiętajmy też, że nie ma prostej zależności między polem naprężeń a kierunkiem przemieszczenia: orientacja rysy ślizgowej na powierzchni lustra tektonicznego zależy nie tylko od położenia osi naprężeń, ale i od proporcji między nimi, wyrażonej współczynnikiem $R = (\sigma_2 - \sigma_3) : (\sigma_1 - \sigma_3)$. Zależność między kierunkami poślizgu a orientacją uskoków wtórnych opisuje równanie Botta (1959).

W graficzny sposób zbiór położzeń luster tektonicznych wraz z rysami możemy przedstawić na **diagramie Hoepfnera**. Za pomocą siatki nanosimy bieguny płaszczyzn uskokowych, na których osadzamy krótkie odcinki wskazujące na kierunek (bieg rysy odmierzone kątomierzem w stosunku do kierunku północy), lub strzałki uwzględniające również zwrot ruchu górnego skrzydła. Na uskokach przesuwczych kierunek rysy będzie się pokrywał z biegiem powierzchni uskokowej a strzałki będą wskazywały na ruch względny obu skrzydeł (rysunek).



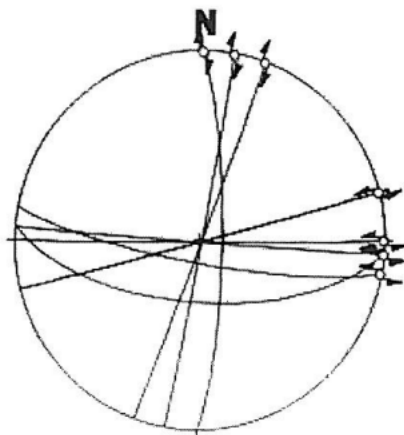
dla uskoków przesuwczych



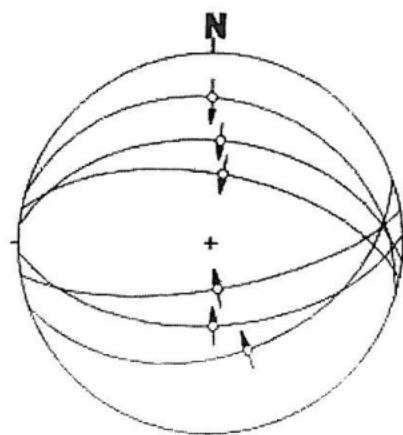
dla uskoków zrzutowych

Diagramy Hoepfnera

Drugą metodą graficzną uwzględniającą orientację lustra tektonicznego oraz kierunek i zwrot ruchu jest **diagram Angeliera**. Nanosimy łuk płaszczyzny uskokuwej a na nim punkt przebicia rysy ślizgowej, jej kierunek i zwrot ruchu górnego skrzydła. Dla uskoków przesuwczych stosujemy tę samą symbolikę, co na diagramie Hoepfnera. Oba diagram najwygodniej jest sporządzać posługując się jednym z programów komputerowych, np. TectonicsFP. Pamiętajmy, że programy te przyjmują wyłącznie "amerykańską" wersję zapisu położenia płaszczyzny (tj. jej linii upadu), o czym powinniśmy pomyśleć zbierając dane w terenie, lub skorzystać z programu przeliczającego jeden zapis na drugi.



dla uskoków przesuwczych



dla uskoków zrzutowych

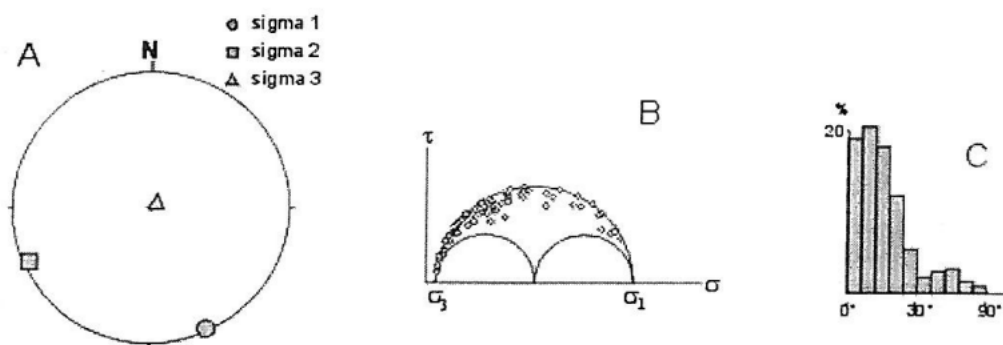
Diagramy Angeliera

Do analizy większych populacji uskoków wtórnych dawniej była używana **metoda Arthauda** (Arthaud 1970, Jaroszewski 1981). Dziś została całkiem zarzucona z uwagi na swoje ograniczenia dotyczące proporcji między naprężeniami (dwa

spośród naprężeń muszą być sobie równe Aleksandrowski 1987).

Do wyciągania daleko idących wniosków odnośnie naprężeń służy szereg procedur obliczeniowych i graficznych (ręcznych i komputerowych). Do współczesnych metod komputerowych stosowanych np. w programie TectonicsFP, należą:

Metoda inwersyjna oblicza średni tensor naprężeń według procedury Angelier & Goguel (1979), rozwiniętej przez Sperner et al. (1993). Nie wykorzystuje informacji o zwrocie ruchu na powierzchni uskoku, jedynie sygnalizuje niezgodność między zwrotem określonym przez program i stwierdzonym w terenie (Sperner 1996). Daje dobre rezultaty tylko dla różnorodnie zorientowanych uskoków i rys. Pozwala na określenie zależności naprężeń normalnych i ścinających na kole Mohra, liczonej dla każdego uskoku według metody graficznej Wallace (1951), a jednocześnie na określenie parametru $R = (\sigma_2 - \sigma_3) : (\sigma_1 - \sigma_3)$ wyrażającego względny stosunek naprężeń (przy założeniu, że $\sigma_1 = 1$), że położonego na styku dwóch kół Mohra. Pozwala również na określenie kąta pomiędzy pomierzonym kierunkiem maksymalnego ścinania a pomierzoną rysą dla każdego uskoku oddzielnie. Wyniki są przedstawiane na histogramach fluktuacji i nie powinny przekraczać dla kąta β wartości 30°, co mogłoby wskazywać na niejednorodność zbioru (np. różnowiekowe populacje uskoków).



Metoda inwersyjna: a) rekonstrukcja osi naprężeń, b) diagram Mohra, c) histogram fluktuacji dla kąta β

Analiza numeryczno-dynamiczna została opracowana z przeznaczeniem dla lamelek bliźniaczych w kalcycie (Spang 1972). Zakłada, że wielkość naprężeń ścinających na każdym uskoku wynosi 1, koreluje λ_1 z σ_1 a λ_2 z σ_3 określa tensor naprężeń dla każdego uskoku z rysą oddzielnie. Następnie sumuje wszystkie tensory naprężeń i dzieli je przez liczbę pomiarów, co daje średni tensor naprężeń. Wykreśla diagram Mohra i zakłada, że współczynnik $R = (\lambda_2 - \lambda_3) : (\lambda_1 - \lambda_3)$ i że $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 0$. Pozwala również określić dla każdego uskoku kąt pomiędzy wyliczonym wektorem naprężeń a pomierzoną rysą, a wyniki przedstawia na histogramach fluktuacji. Program ten, mimo iż kąt ścinania ma najczęściej średnią wartość 30° (Jaeger & Cook 1979), to pozwala przyjąć dowolną wielkość z przedziału $10^\circ < \beta < 85^\circ$. Przedstawia również na wykresie optymalną wartość kąta ścinania. Forma graficzna opracowania jest podobna do uzyskanego metodą inwersyjną.

Metoda P-B-T opracowana również dla lamelek bliźniaczych w kalcycie (Turner 1953), konstruuje dla każdej płaszczyzny ścinania oś P (kompresji) i T (ekstensji), obie leżące w płaszczyźnie zawierającej rysę ślizgową i normalną do płaszczyzny lustra. Oś P tworzy kąt 45° z płaszczyzną lustra, oś T jest do niej prostopadła, a oś

B jest normalną do obu. Upraszczając na podstawie rysy na powierzchni lustra tektonicznego dobudowywana jest płaszczyzna i rysa komplementarna przy założeniu, że kąt między płaszczyznami luster wynosi 90° i że obie rysy położone są w płaszczyźnie prostopadłej do luster. Na podstawie rekonstrukcji przeprowadzonej dla każdego uskoku oddzielnie określa najczęstsze położenia osi P, B, i T (interpretowanych odpowiednio jako, wykreślając dla każdej z nich stożek ufności (przez co osie σ_1 , σ_2 i σ_3 nie muszą być prostopadłe do siebie). podobnie jak metoda numeryczno-dynamiczna, podaje policzony przez program optymalny kąt ścinania.

Podstawy teoretyczne metody B-B-T i sektorów prostokątnych

Rekonstrukcja osi naprężeń metodą P-B-T

Metoda sektorów prostokątnych opracowana przez Angelier & Mechler (1977), Angelier (1979) a literaturze polskiej spopularyzowana przez Aleksandrowskiego (1987) wyznacza dla każdego uskoku oddzielnie sektor kompresji zawarty między powierzchnią uskoku a prostopadłą do niej i do rys ślizgowych płaszczyzną pomocniczą (teoretyczną płaszczyzną "komplementarną" przy założeniu, że $\theta = 45^\circ$). Punktem zliczeniowym w sektorze kompresji przypisywana jest wartość 1, a w sektorze ekstensji 0. Po zsumowaniu wartości liczbowych na siatce wykreślany jest diagram konturowy pozwalający określić najbardziej prawdopodobne położenie osi naprężenia głównego. Wyniki mogą też być prezentowane jako "piłka plażowa". Metoda ta nie pozwala na określenie wartości współczynnika R wskazującego na stosunki między wartościami naprężeń.

[POPZEDNIA] [SPIS TREŚCI] [DO GÓRY]

Informacje o uzupełnieniach oraz sprostowania i uwagi proszę kierować do webmastera

Data ostatniej zmiany: 12.10.2001

Polskie znaki kodowane są zgodnie z normą ISO-8859-2