

Die Anwendung Der β -Diagramme bei Überfalteten Strukturen

Domagoj JAMIČIĆ

Schlüsselwörter: Strukturgeologie, β -Schnittpunkte

Ključne riječi: Strukturna geologija, β -presjecišta

Zusammenfassung

In der Arbeit wird theoretisch die Rechtfertigung der Anwendung der β -Diagramme bei den mehrfach gefalteten Strukturen erörtert. Am Beispiel der mesozoischen Struktur Kik-Petrov vrh (Papuk, Kroatien) wurde festgestellt, daß die β -Schnittpunkte die Maxima formen deren Pole sich mit der Orientation der laramischen und der jungalpidischen Orogenese decken.

Sažetak

U radu se teorijski razmatra opravdanost upotrebe β - dijagrama kod višekratno boranih struktura. Na primjeru mezozojske strukture Kik-Petrov vrh (Papuk) ustanovljeno je da β - presjecišta obrazuju maksimume čiji se polovi poklapaju s orijentacijom bora laramijske faze alpinske orogeneze i borama nastalim tijekom tercijara.

1. EINLEITUNG

Den Ausdruck "β-Achse" hat in die tektonische Gefügeanalyse der Faltungsgebiete B. SANDER eingeführt, der Autor der Nomenklatur des tektonischen Gefüges (1948, S.132-133) und unter diesem Begriff versteht er den Zentrum der Gravitation der individuellen Schnittpunkte der S-Flächen. In den Arbeiten, die nach der oben genannten erschienen sind, haben sich einzelne Autoren kritisch über die Anwendung der β -Diagramme geäußert und sowohl die Meinung vertreten als auch geraten, daß man in den Fällen der makroskopischen Analyse der Faltungsflächen und statistischer Auslegung der Faltungsachsen den Großkreis zeichnen und die Bestimmung seines Π -Pols durch die Normale auf den Π -Kreis (SANDER, 1948, S. 139; "II-Kreis", "II-Pol") vornehmen soll.

TURNER & WEISS (1963, S. 154-158) heben hauptsächlich die Schwierigkeiten hervor, die bei der Zeichnung und Abgrenzung einer größeren Zahl von Daten (von ein paar hundert bis ein paar tausend) auftreten und entscheiden sich deswegen bei den zylindrisch gefalteten Flächen für die Bestimmung des Π -Kreises und seiner Normale als Achse der Faltung.

RAMSEY (1967, S. 551) ist auch dieser Meinung und fügt hinzu, daß die Anwendung der β -Diagramme wegen der Erscheinung zufälliger β -Schnittpunkte unnötig ist. Er entscheidet sich für die korrekte Analyse kleinerer homogenen Areale durch die Darstellung auf den Π -Diagrammen.

WHITTEN (1966, S. 52) vertritt ebenfalls bei der Analyse der zylindrisch gefalteten Strukturen die Anwendung der Bestimmung des Π -Kreises, wobei er der Meinung ist, daß sich die angesammelten Fehler,

die bei der Messung der S-Flächen entstehen könnten, sicherer beheben lassen.

Während der tektonischen Gefügeuntersuchung der slawonischen Gebirge, insbesondere des Gefüges der mesozoischen Ablagerungen des zentralen und nordwestlichen Teiles von Papuk, wurde neben der üblichen Methode der Gefügeanalyse auch die Methode der Bearbeitung der gesammelten Daten durch die Ausarbeitung der β -Diagramme angewendet. Diese Methode zeigte sich als sehr nützlich, weil man Ergebnisse bekam, die man durch Anfertigung der klassischen Diagramme nicht bekommen könnte. Um die Anfertigung und die Analyse solcher Diagramme zu erleichtern, wurde ein Computerprogramm entwickelt und benutzt (JAMIČIĆ & JAMIČIĆ, 1988). Die Handbearbeitung einer größeren Zahl von Meßdaten im Falle der Anfertigung der β -Diagramme ist nämlich unübersichtlich, ermüdend und kostet viel Zeit, weil man z.B. für die Bearbeitung von 100 gemessenen Elementen der S-Flächen (in diesem Falle der Schichtung) auf gesonderten Oleaten 4.950 Schnittpunkte ($n*(n-1)/2$) ausrechnen und danach diese Daten in die Oleate eintragen und ein Konturdiagramm ausarbeiten muß.

2. THEORETISCHE BETRACHTUNGEN

Bei den ideal zylindrischen Falten, die während der Faltung in einer Deformationsphase entstanden sind, fallen die β -Schnittpunkte der S-Flächen in einen Punkt (Abb. 1). Aber, falls die Änderung der Orientation des globalen Stresses auftritt, es sei denn in gleicher (IF) oder in zeitlich getrennter Phase (IIF), wird es zur Rotation aller primär S-Flächen um die neue Achse kommen, zusammen mit den dazugehörigen Linearelementen (sowohl den realen als auch den konstruktiven) (Abb. 2). Der Betrag der Rotation und die Größe

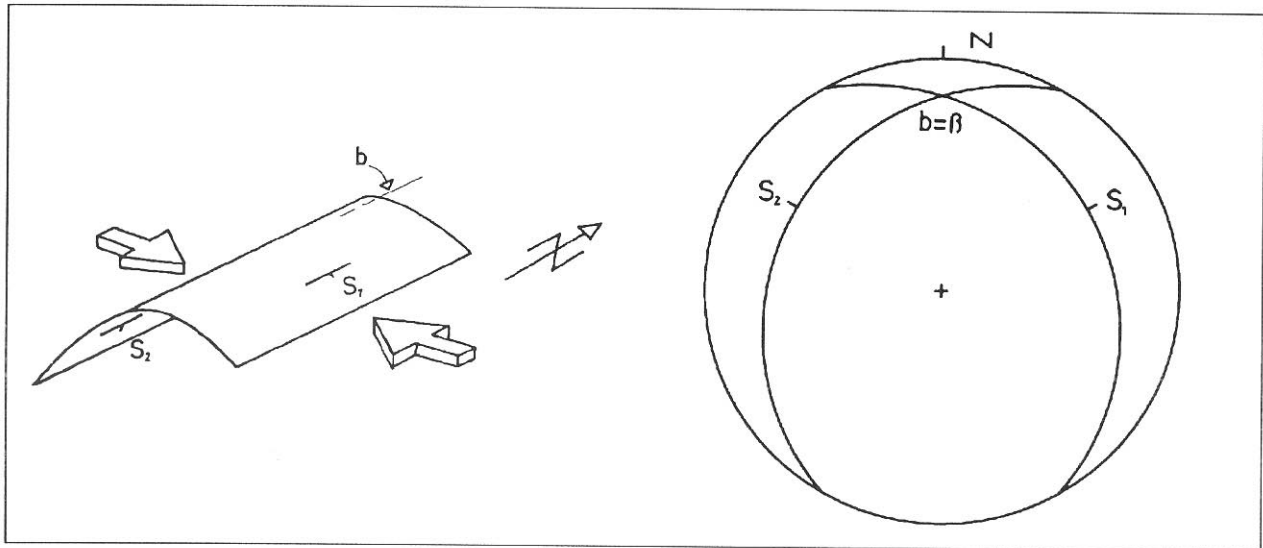


Abb. 1. Die Bestimmung der b-Achse als die Linie der Flächenschnittpunkte.

des Winkels zwischen der Orientation der ursprünglichen und der neuen Lage der Faltungssachse steht hauptsächlich in einer direkten Verbindung mit der Größe der Änderung der Orientation des globalen Stresses und mit der Zeitspanne seiner Dauer. Die Überfaltung existierender Linear- und Planargefügeelemente in der jüngeren Phase (IIF) wird deutlicher in den Scheitelteilen der neugebildeten Falten ausgeprägt und die β -Schnittpunkte in diesen Teilen der Strukturformen, im Idealfall, werden auf alle Quadranten der unteren Halbkugel zerstreut. Jede Abweichung vom Idealfall würde zur deutlichen Ansammlung der β -Schnittpunkte in einem der Quadranten führen.

Wesentliche Tatsache, die auf die Art der Erscheinung und der Gruppierung der β -Schnittpunkte auf der unteren Halbkugel einwirken kann, ist der Charakter und die Intensität der Faltung in der einzelnen Phase. Insofern der Index und die Intensität der Faltung in der älteren Phase stärker ausgeprägt ist als in

der jüngeren Phase, werden die Elemente der jüngeren Phase durch die Elemente, die während der früheren Deformationsprozesse entstanden sind. Deswegen ist unter anderem notwendig, jede Zerstreung der Daten in den Gefügediagrammen genau zu studieren und kritisch zu deuten. Hier ist es notwendig zu betonen, daß die Schnittpunkte nicht immer die regionale Faltungssachse B definieren, was besonders in den Fällen einer stärkeren Strukturüberprägung ausgeprägt ist, die in der gleichen oder in der jüngeren Deformationsphase auftreten kann.

Die Migration und die Formierung der neuen β -Schnittpunkte während der getrennten Deformationen kann sich bei der unveränderlichen Orientation des tangentialen Globalstresses unter der Rotation um die Achse, die parallel, senkrecht oder unter dem Winkel zur Achsenfläche der betrachteten Strukturform steht, abwickeln. Um welchen Fall der Migration es sich handelt, muß man während der Untersuchung des konk-

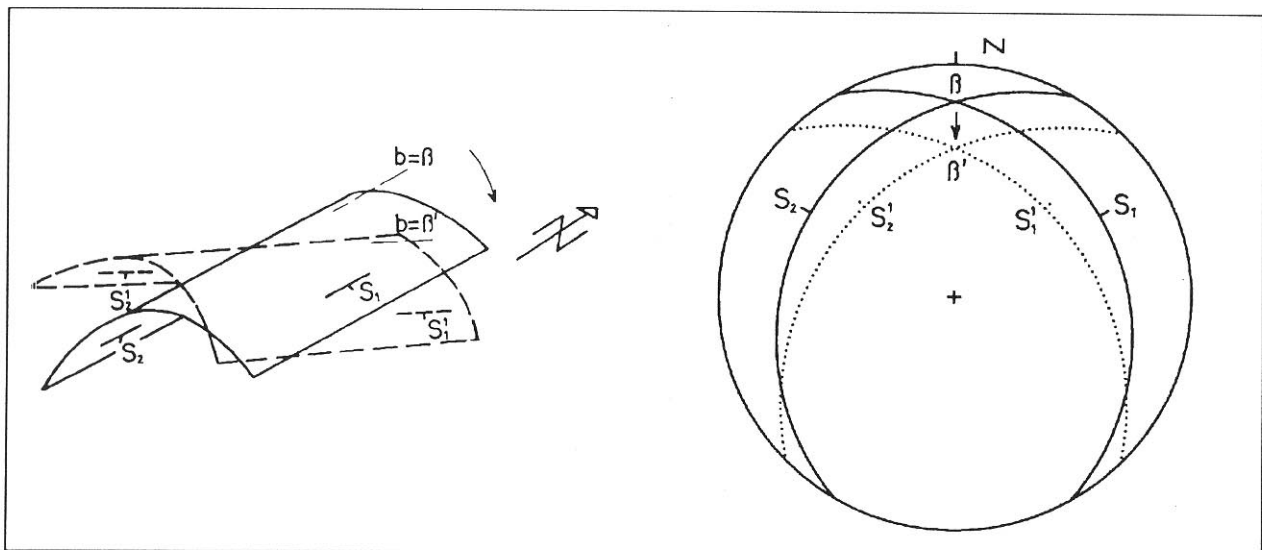


Abb. 2. Die Rotation der Faltenstrukturelemente und der b-Schnittpunkte durch die Neigung um die horizontale Achse.

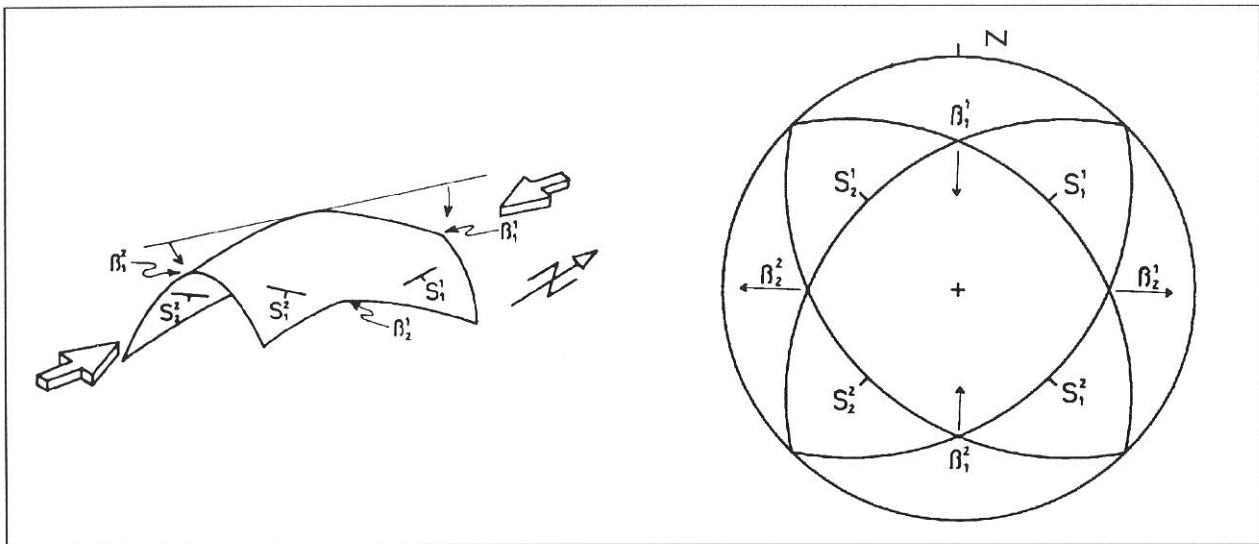


Abb. 3. Die Entstehung der neuen b-Schnittpunkte durch die Biegung und durch die Rotation der Struktur um die horizontale Achse.

reten Problems durch eingehende Analyse der Segmente der betrachteten Struktur feststellen, gerade weil während der späteren Deformationen eine zylindrische Struktur im Gesamtplan in eine nicht zylindrische Form übergehen kann. Durch die genaue Analyse der β -Diagramme ist es möglich, mehr Wissen über den Charakter der anwesenden Deformationsprozesse zu bekommen, aber es ist wiederum wegen der Komplexität der Analyse der erhaltenen β -Schnittpunkte vor irgendeiner Schlußfolgerung notwendig, die jüngste Achse auf den Oleaten in die horizontale Lage zu bringen und die anderen Daten um den gleichen Betrag zu rotieren und erst dann erst zum analytischen Teil zu übergehen.

Während der Analyse der Diagramme konnte die Anwesenheit folgender drei Fälle festgestellt werden. Die Migration der β -Schnittpunkte (1) auf den Groß- und Kleinkreisen, wesentliche Ansammlung (2) in

einem der Quadranten und vollkommene Zerstreung (3) über alle Quadrante.

Die Verzerrung der β -Schnittpunkte auf dem Großkreis kann die Anwesenheit eines neuen Stress andeuten, dessen Orientation parallel zur Achsenfläche der älteren Form ist. In diesem Fall der Biegung der Struktur um die neue Achse (β_2), nähern sich die alte Schnittpunkte (β_1) nähern sich gegenseitig einander und tendieren zum Zentrum des Diagramms, während die neu formierten Schnittpunkte (β_2) auch entlang des Großkreises, sowohl an die Peripherie des Diagramms als auch zu der Lage der neuen Faltenachse (β_2) migrieren, wie das auf der Abb. 3 dargestellt ist. Falls es sich durch die Analyse der Diagramme herausstellt, daß die β -Schnittpunkte zum Zentrum der Diagramme migrieren und daß die β_1 auf dem Großkreis rotieren, gleichzeitig sich näherend, dann ist der Fall anwesend, der auf Abb. 4 dargestellt ist.

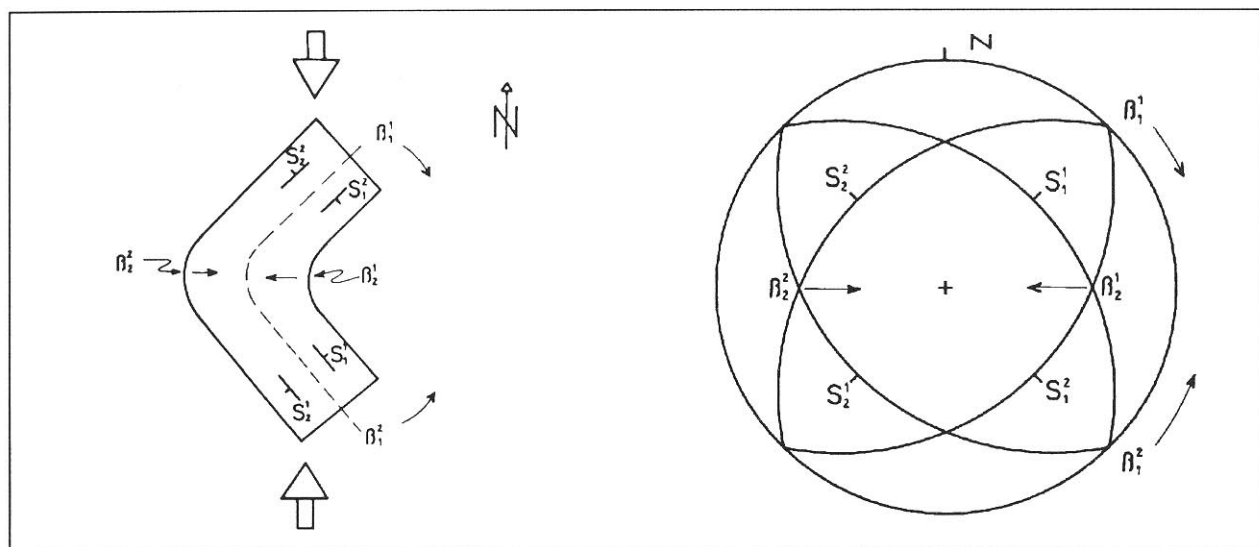


Abb. 4. Die Entstehung und die Migration der neuen b-Schnittpunkte durch die Rotation der Faltenstrukturelemente um die vertikale Achse.

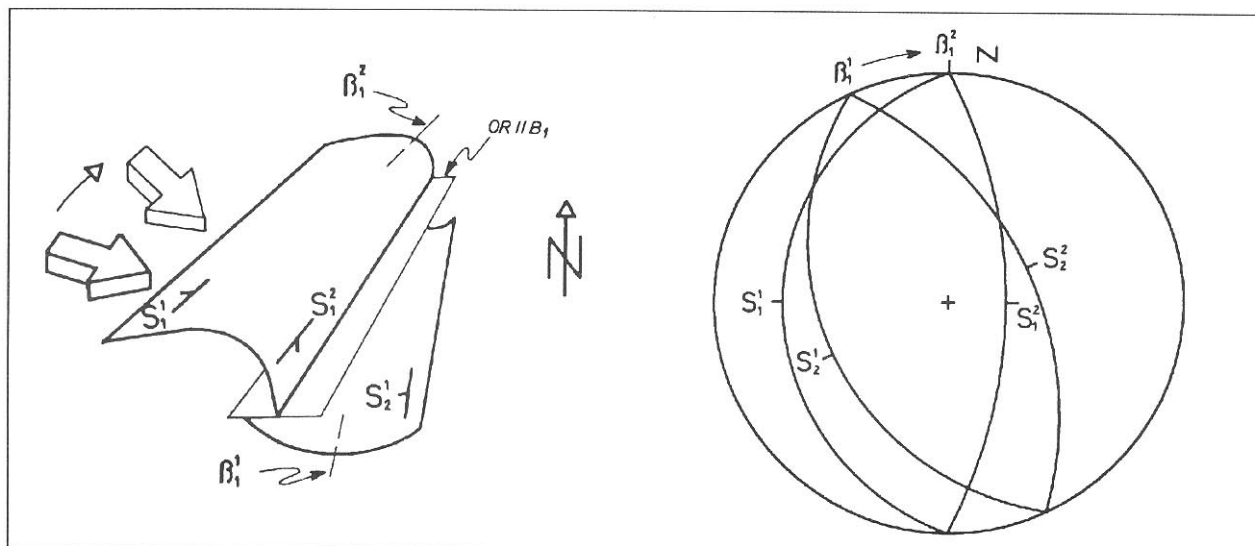


Abb. 5. Die Rotation der b-Schnittpunkte bedingt durch die Migration der Stressorientierung in der Horizontalebene.

Hier kann man über das Entfernen der β_2 -Schnittpunkte von der neuen Faltungsachse sprechen, die nicht regional ist, obwohl sie sich mit ihr decken könnte, sondern lokal, d.h. nur an diese Strukturform gebunden. Die Migration der β_1 -Schnittpunkte wickelt sich in der Ebene ab, die senkrecht auf die Ebene steht, in der die neu entstandene β_2 -Schnittpunkte ihre Lage einnehmen.

In dem Fall, wenn die Migration der β -Schnittpunktendaten auf den Kleinkreisen klar ist, ist es möglich auf die Fortsetzung der Tätigkeit des Globalstress im gleichen Deformationszyklus zu schließen unter der kontinuierlichen Änderung seiner Orientierung (Abb. 5), oder aber auf die Biegung der Struktur infolge der Blattverschiebung in der gleichen oder in der jüngeren Phase (Abb. 6). Im ersten Fall wickelt sich die Rotation der alt- und neugeformierten β -Schnittpunkte um die Achse ab, die sowohl senkrecht auf Globalstress als auch auf B_1 steht. Die älteren β -Schnittpunkte sind

schwächer geneigt als die neuentstehenden. Im zweiten Fall (Abb. 6) treten die gleichen Daten wie oben auf, aber unter der Erscheinung der Submaxima, die sich in der Ebene senkrecht auf B_1 befinden und die Tendenz der Migration in dieser Ebene zeigen. Die Migration kann sich zur Peripherie des Diagramms (die Gestalt der neuen Antiformen) oder zum Zentrum des Diagramms (Entstehung der neuen Synformen) abwickeln. Andere Submaxima, die unausweichlich die Biegung der Struktur begleiten, rotieren auf den Kleinkreisen um die senkrechte Achse zu B_1 . Dieses Beispiel der Auseinanderziehung der Struktur infolge einer Blattverschiebung und die Entstehung der begleitenden Faltungsformen kann auch aus den Strukturdiagrammen, die durch die Partialanalyse der Teile der Struktur gemacht worden sind, bestimmt werden.

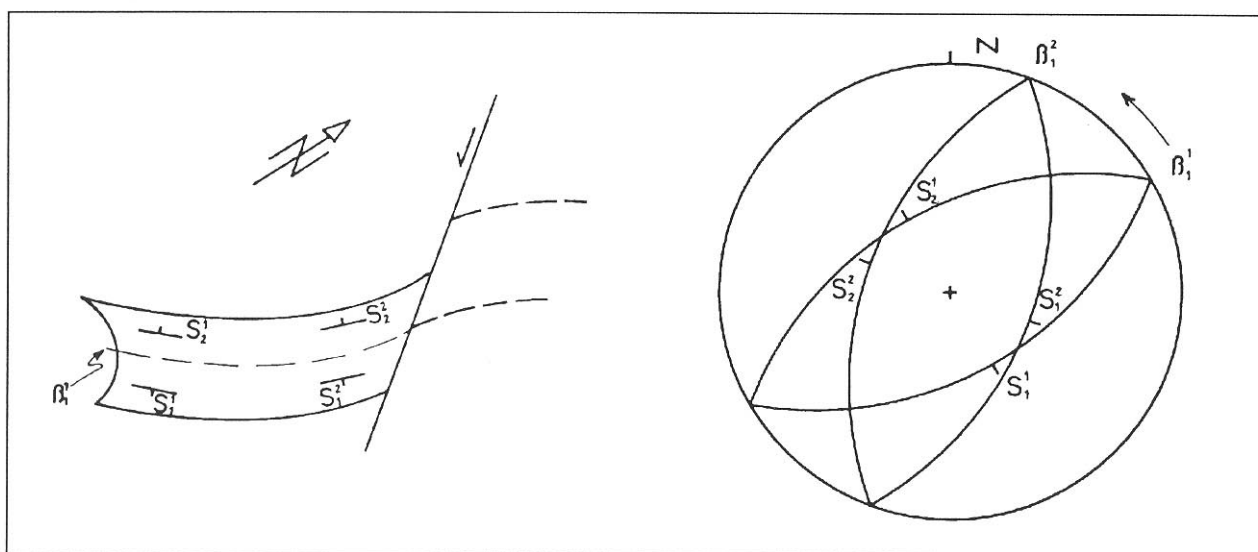


Abb. 6. Die Rotation der b-Schnittpunkte bedingt durch die Biegung infolge der Blattverschiebung.

3. EIN BEISPIEL DER ANWENDUNG DER β -DIAGRAMME

Obwohl in der bekannten Literatur skeptische und auch entgegengesetzte Meinungen über die Zweckmäßigkeit der Anwendung der β -Diagramme existieren, wurde doch mit ihrer Ausarbeitung während der Gefügeuntersuchungen im Gebiet der slawonischen Gebirge begonnen. Die Bearbeitung und Analyse der β -Diagramme wurde zuerst für die Strukturen erstellt, die die schwächsten Deformationen erlitten haben. Die anwesenden tektonischen Prozesse konnten daher definiert und gegenseitig klar abgetrennt werden.

Eine solche Form ist die mesozoische Struktur Kik-Petrov vrh, die sich im westlichen, nordwestlichen Teil des Papuk (JAMIČIĆ, 1988, S. 111) befindet. Erstreckung dieser Struktur kann man auf einer Länge von cca. fünfzehn Kilometer verfolgen. Sie wurde durch die laramische Bewegung geschaffen und zum Teil während der jungalpidischen Orogenese umgeformt und ist aus den permotriadischen und mesozoischen Sedimenten aufgebaut. Im Grunde, die Struktur stellt eine überkippte Synklinale dar, mit dem Streichen der B-Achse in Richtung Nord-Süd und einer östlichen Vergenz. Der östliche Faltenschenkel ist in der normalen Stellung und in mehrere Meter- und Dekameterfalten verfaltet, während bei dem westlichen Faltenschenkel aufgrund der Beziehung der Schieferung und Schichtung eine überkippte Lage festgestellt wurde. Der antikinale Teil der Struktur ist wegen der Erosion nicht erhalten. Die Struktur ist im nördlichen Teil zusammengedrückt und tektonisch entlang ein paar parallel gelegten Aufschiebungen reduziert, die cca. Nord-Süd streichen und subparallel der Achsenfläche verlaufen. Nach Süden weitet sich die Synklinale allmählich auf, was durch geringere Anwesenheit der obengenannten Aufschiebungen und der Gravitationsstörungen bedingt ist, die aber auf ihre Verengung im Nordteil wesentlichen Einfluß ausgeübt haben. Solche Form der Ausbreitung der Struktur Kik-Petrov vrh zeigt den Wechsel der Vektororientierung des globalen Stresses sowie seine rechte Rotation während der Deformationsprozesse zur Zeit der laramischen Orogenese auf. Durch die tektonischen Bewegungen während der jungalpidischen Orogenese hat die Struktur Kik-Petrov vrh weitere Deformationen unter dem Einfluß der Zerbrechung entlang der Blattverschiebungen Richtung Nordost-Südwest erlitten, wobei es gleichzeitig zur Verbiegung der S-Flächen (Schichtung) um die horizontale Achse mit der ungefähren Streichrichtung Ost-West und zur der Bildung neuer Aufschiebungen mit der gleicher Streichrichtung kam.

Mit der Analyse gemessener Daten der Schichtung des Nordteiles dieser Struktur wurde das Gebiet vom Bach Toplica bis zu ihrer nördlichen Aufschiebung auf die Tertiärablagerungen erfaßt (JAMIČIĆ, 1988) und man bekam das Diagramm auf Abb. 7(a), das die Pole

der Schichtungsflächen darstellt. Die Interpretation dieses Diagramms ist durch relativ starke Zerstreung der Daten und durch die Verzerrung deren Maxima und Submaxima auf fast alle vier Quadranten der unteren Halbkugel erschwert. Aber, falls man durch die erhaltene Maxima eine Π -Ebene ziehen würde, dann gäbe uns ihr Pol (Π -Pol) der ungefähren Orientation $330^\circ/20^\circ$ eine falsche Angabe über die Lage der Regionalachse B_4 , gerade deswegen, weil für dieses Gebiet, durch die Analyse der geologischen Karte durch die statistische Analyse des Streichens der b-Achsen und der Schieferung der Achsenfläche, dann durch die Analyse der Schnitte der Schieferung mit den Schichtungsflächen festgestellt wurde, daß die Regionalachse B_4 die Stellung zwischen $350^\circ/15^\circ$ und $10^\circ/5^\circ$ (JAMIČIĆ, 1988; Abb. 29 und 32), also mit dem Streichen cca. Nord-Süd mit der Nordinklination im Betrag von cca. zehn Grad einnimmt. Das Diagramm könnte als 2S-Diagramm interpretiert werden durch Ziehen der Ebene durch vereinigte Maxima auf den Grenzen des ersten und des zweiten sowie des dritten und des vierten Quadranten, was die Regionalachse B_4 einigermaßen ihrer echten Lage annähern könnte. Dies kann mit einem höheren Grad an Unsicherheit getan werden und zwar nur dann, wenn diese Achse bekannt ist.

Ähnliche Dilemmas treten auch bei der Benutzung und Interpretation des Diagramms auf Abb. 7(b) auf, in dem die gleichen Daten durch den Pol der Einfallsrichtung dargestellt sind. Hier tritt nämlich ein ausgeprägtes Maximum auf im Grenzgebiet des dritten und des vierten Quadranten auf, was die Migration der s-Flächen in Richtung Ost-West zeigt, die wahrscheinlich durch die Biegung der Struktur um die Achse mit dem Streichen Nord-Süd in der laramischen Orogenese bedingt ist. Die jüngste Faltungsachse mit dem Ost-West Streichen kann nicht in diesem Diagramm festgestellt werden, obwohl sie sicherlich in der Ebene mit der Lage $270^\circ/30^\circ$ enthalten ist, und die durch dieses Maximum und durch dazugehörige Submaxima durchgezogen werden kann.

Für den Nordteil der Struktur Kik-Petrov vrh wurde auch ein β -Diagramm gemacht. Auf Abb. 7(c) wurde eine Computerdarstellung des Punktdiagrammes der β -Schnittpunkte gegeben, das durch gegenseitiges Schneiden der S-Flächen (Schichtung) der 103 Daten erstellt wurde. Auf Abb. 7(d) wurde ein Konturdiagramm der β -Schnittpunkte dargestellt. Um die Maxima zum Ausdruck zu bringen, wurden sechs Dichteklassen ausgewählt. Die ausgeprägten Maximapaare der gleichen Dichteklasse auf der Diagrammperipherie ermöglichen deren Verbindung und Zeichnung zweier vertikalen Ebenen über das Diagrammzentrum. Die schwache Verzerrung der Maxima auf diesen Ebenen weist auf eine sehr schwache Biegung der β -Schnittpunkte um die Achse der ungefähren Richtung Ost-West.

Indem die bearbeitenden Daten dem relativ homogenen Block angehören, was die Voraussetzung für die

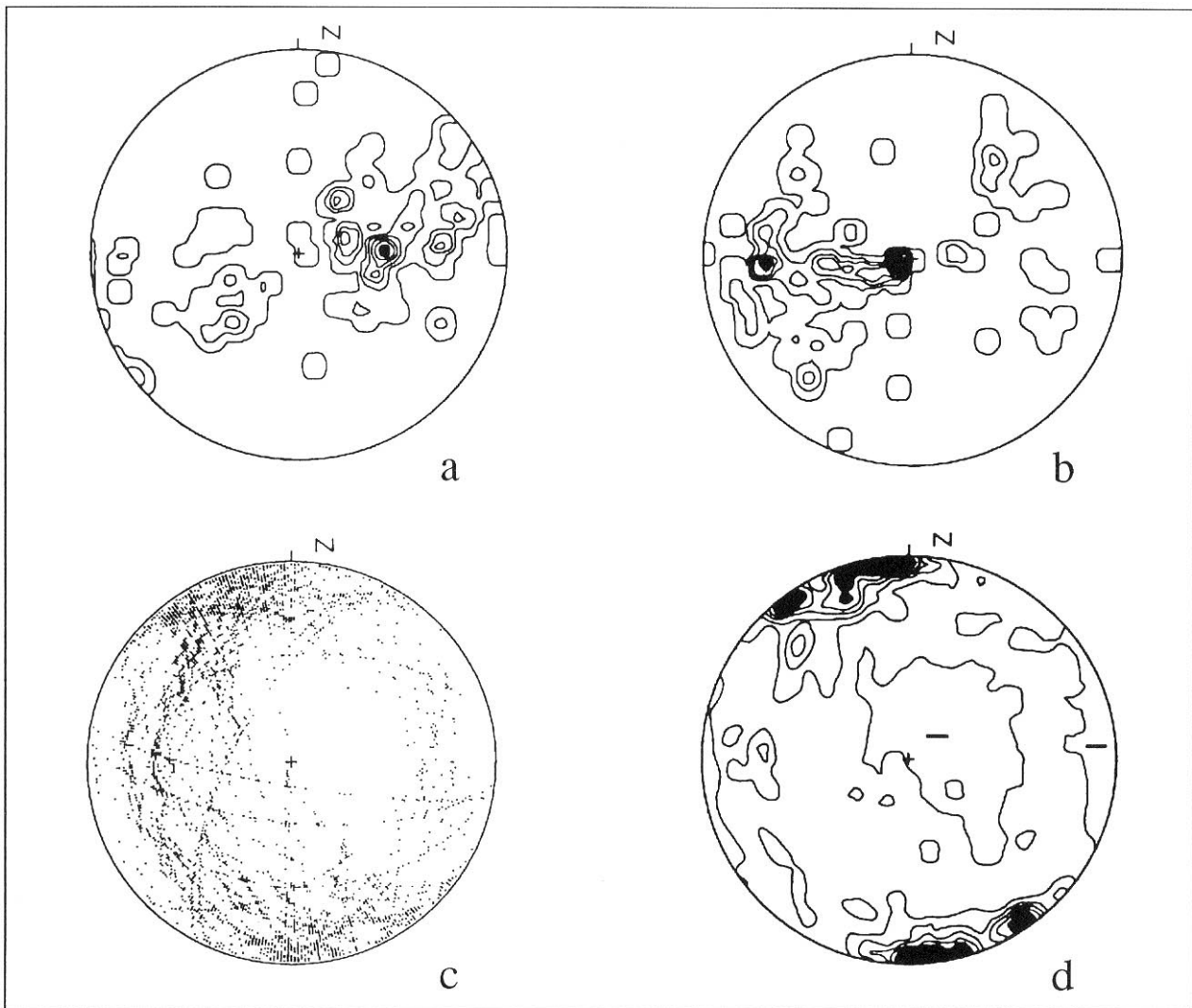


Abb. 7. Das Diagramm der 103 Schichtungsflächen der Struktur Kik-Petrov vrh. (a) Konturdiagramm der Schichtungsflächenpole: Dichteklassen: 0.9, 1.4, 2.9, 4.3, 5.8 und >7.2%. (b) Konturdiagramm Schichtungsflächen: Dichteklassen: 0.9, 1.6, 3.1, 4.6 und >7.2 %. (c) 5253 Schichtungsschnittpunkte (β Diagramm). (d) Kontur β Diagramm: Dichteklassen: 0.7, 1.4, 2.0, 2.7, 3.4 und >4.2%.

korrekte Datenbearbeitung ist, ist zu erwarten, daß während der Anfertigung des β -Diagrammes ein paar Maxima mit einer Reihe an unausweichlichen, aber weniger bedeutungsvollen Submaxima, vorkommen. Diese Submaxima können entweder als zufällig infolge der Meßfehler, oder als Folge der nachträglicher kleinerer Deformationsprozesse, die zur Verschwommenheit der Daten führen gedeutet werden. Aber auf dem dargestellten Diagramm sind zwei Paare, diametral verschiedene Maxima mit der gleicher Bedeutung, klar bemerkbar, mit der Tendenz der Rotation der β -Schnittpunkte auf dem Kleinkreis um die vertikale Achse für den Betrag, der zwischen 30 und 45 Grad variiert. Aus dem Vergleich vom Abb. 5 und aus den vorgetragenen Tatsachen, die an die Abbildung gebunden sind, kann man schließen, daß die Struktur Kik-Petrov vrh gerade diese Form hat, d.h., daß es während deren Entstehung in einer Phase der laramischen Orogenese zu der Aufschiebung entlang der Faltenflächenschieferung und zu der rechten Rotation des hängenden Teiles der Struktur gekommen ist, was

durch die rechte Rotation des Globalstresses bedingt ist. Aus dem vorgetragenen kommt hervor, daß wir im Nordgebiet der Struktur Kik-Petrov vrh zwei Faltungsachsen haben, die während der laramischen Orogenese entstanden sind. Eine, mit dem heutigen Streichen $324^\circ - 144^\circ/8^\circ$ und die zweite, im Uhrzeigersinn rotierte für cca. 30° und der Lage $354^\circ - 174^\circ/8^\circ$. Die rechte Rotation des Globalstresses während der laramischen Orogenese ist auch in der genannten Reihe der Aufschiebungen ausgeprägt, die aber in dem Südteil des Gebietes um die Bäche Strazeman und Pakra nicht ausgebildet sind (JAMIČIĆ, 1988).

Dritte Ebene, die zwei Hauptmaxima ($354^\circ/8^\circ$ und $174^\circ/8^\circ$) mit ein paar Submaxima im dritten und vierten Quadranten sowie mit dem Submaximum im Grenzgebiet dieser Quadranten verbindet, hat die Lage $266^\circ/26^\circ$, was ungefähr dem Azimut des Streichens der Regionalachse B_5 der slawonischen Gebirge entspricht, die während der jungalpidischen Orogenese entstanden ist (JAMIČIĆ, 1988). Schwache, aber bemerkbare Auslängung des zentralen Maximums, durch welches

diese Ebene durchgeht, zeigt die Migration der Daten zur Diagrammperipherie, was sich mit den vorgetragenen Tatsachen und mit der Abb. 3 vergleichen läßt. Nach dem aufgeführten kann man feststellen, daß die Migration der β -Schnittpunkte zur Diagrammperipherie anwesend ist, die infolge der Erscheinung des neuen Globalstresses entstanden ist, dessen Orientation parallel zur Achsenfläche der älteren Struktur ist. Mit der Fortsetzung der Stresstätigkeit, β -Schnittpunkte würden sich allmählich der Regionalachse B_5 annähern. Der Mangel an Daten der gleichen Dichteklassen im zweiten Faltenschenkel dieser Iaramischen Struktur, die man aber aufgrund der Abb. 5 erwarten müßte, ist durch die Tatsache bedingt, daß die Daten der überkippten Synklinale zum größten Teil in die Daten mit der ungefähren Ostvergenz miteinbezogen sind.

4. DISKUSSION UND SCHLUBFOLGERUNGEN

Die dargestellten Ergebnisse der Anwendung der β -Schnittpunkte bei der mehrphasig deformierten Strukturformen ermöglichen neben den anderen Methoden der Statistik auch ihre Anwendung während der gefügekundlichen Bearbeitung und der Interpretation eines Gebietes. Es ist jedoch notwendig, einen bestimmten Grad an Vorsichtigkeit während der Analyse dieser Diagramme aus mehreren Gründen zu bewahren.

Als erstes; β -Achse bestimmt nicht automatisch die Regionalachse B, und man kann sie in diesem Sinne nicht benutzen, sondern man muß zu der Lage dieser Achse mit der Anwendung der strukturgeologischen Analyse kommen. Weiter, mit der Benutzung einer größeren Zahl an realen Elementen bei der Ausarbeitung der β -Diagramme wird die Möglichkeit der Erscheinung eines oder mehrerer Submaxima geschaffen, was Zufall bedeuten kann, wie das RAMSEY (1967) betont. Deshalb sollte man auf jeden Fall auch andere Methoden bei der Festlegung der Form der untersuchten Struktur benutzen. Die Zerstreuung der Daten auf den β -Diagrammen bedingt, unter anderem auch nicht entsprechende Bestimmung der homogenen Blocks, die man, bestmöglich bestimmt und abgrenzt durch die Analyse der geologischen Karte.

Für die Ausarbeitung dieser Diagramme ist allerdings am günstigsten die S-Flächen der Schichtung oder der Foliation zu benutzen, aber statistisch lassen sich auch die gegenseitige Schieferungsschnitte aus der Zone der b-Achse analysieren, deren Zugehörigkeit zu dieser Zone man vorher klar festlegen muß. Es können auch z.B. die Schnittpunkte der Schieferungsflächen der Achsenfläche benutzt werden, die dieser Zone angehören. Im Falle der Migration der Regionalachse B versetzen sich auch ihre Schnittpunkte, und man kann aufgrund der Form deren Migration, ähnlich wie im Falle der β -Schnittpunkte der Schichtungsflächen, auf den Wechsel der Orientation und/oder Orientation des globalen Stresses schließen.

Aus der vorherigen Darstellung der Analyse der β -Diagramme geht klar hervor, daß man verschiedene Strukturelemente nicht vermischen und zueinander in setzen darf, obwohl sie dem gleichen kinematischen Akt angehören.

5. LITERATUR

- JAMIČIĆ, D. (1988): Strukturni sklop slavonskih planina (sjeverni Psunj, Papuk, Krndija).- Disertacija. Sveučilište u Zagrebu, 152 p., Zagreb.
- JAMIČIĆ, D. & JAMIČIĆ, V. (1988): Primjeri upotrebe kompjutera u strukturalnoj geologiji.- Prvi jugoslavenski simpozijum o primeni matematičkih metoda i računara u rudarstvu i geologiji, 33-39, Beograd.
- RAMSEY, J. G. (1967): Folding and fracturing of rocks.- McGraw-Hill Book Company, New York, 567 p.
- SANDER, B. (1948): Einführung in die Gefügekunde der Geologische Körper.- II Teil, Springer-Verlag, Wien, 399 p.
- TURNER, F. J. & WEISS, L. E. (1963): Structural Analysis of Metamorphic Tectonites.- McGraw-Hill Book Company, New York, 545 p.
- WHITTEN, T. E. H. (1966): Structural Geology of Folding Rocks.- Rand McNally & Company, Chicago, 677 p.

Primjena β - dijagrama kod preboranih struktura

D. Jamičić

Uvod

Termin β - os u strukturu analizu boranih područja, uveo je B. SANDER, autor nomenklature tektonskog sklopa (1948, str. 132 - 133), i pod tim je pojmom označio centar gravitacije individualnih presjecišta S-površina. U radovima koji se javljaju poslije citiranog, pojedini autori se kritički osvrću na uporabu β - dijagrama, te zastupaju mišljenje i preporučuju, u slučajevima makroskopske analize boranih površina i statističkog definiranja osi boranja, iscrtavanje velikog kruga, te određivanje njegovog Π -pola kao normale na Π -krug (SANDER, 1948, str. 139, "Π-Kreis", "Π-Pol").

TURNER & WEISS (1963, str. 154-158) uglavnom naglašavaju poteškoće koje se javljaju kod iscrtavanja i okonturivanja velikog broja podataka (od nekoliko stotina do nekoliko tisuća), te se zbog toga odlučuju, kod cilindrično boranih površina, za definiranje Π -kruga i određivanje njegove normale, kao osi boranja.

Ovom mišljenju priklanja se i RAMSEY (1967, str. 551), te dodaje da je primjena β - dijagrama nepotrebna zbog pojavljivanja slučajnih β - presjecišta. On se odlučuje za korektnu analizu manjih homogenih površina putem prikazivanja na Π - dijagramima.

WHITTEN (1966, str. 52) također zastupa, pri analizi cilindrično boranih struktura, primjenu određivanja Π -kruga, te je mišljenja da se time sigurnije eliminiraju akumulirane pogreške koje mogu nastati prilikom mjerenja elemenata S-površina.

Tijekom istraživanja tektonskog sklopa područja slavonskih planina, naročito sklopa mezozojskih tvorevina središnjeg i sjeverozapadnog dijela Papuka, uz standardne metode strukturne analize, primijenjena je i metoda obrade prikupljenih podataka putem izrade β - dijagrama. Ova metoda se pokazala izuzetno korisnom, jer su dobiveni rezultati koji se nisu, ili bi se teško mogli dobiti izradom klasičnih strukturnih dijagrama. Kako bi se olakšala izrada i analiza takvih dijagrama učinjen je i korišten program za elektronično računalo (JAMIČIĆ & JAMIČIĆ, 1988). Naime, ručna obrada većeg broja mjerenih podataka, u slučaju izrade β -dijagrama, je nepregledna, zamorna te oduzima dosta vremena, zbog toga što je npr. za obradu 100 mjerenih elemenata S-površina (u ovom slučaju slojevitosti) potrebno na zasebnim oleatama izračunati 4950 presjecišta $[n*(n-1)/2]$, zatim te podatke unijeti na zasebnu oleatu i izraditi konturni dijagram.

Teorijska razmatranja

Kod idealno cilindričnih bora, nastalih tijekom boranja u jednoj deformacijskoj fazi, β -presjecišta S-ploha (Sl. 1.) grupiraju se u jednoj točki. Međutim, ukoliko nastupi promjena orijentacije globalnog stresa, bilo u istoj (I F) ili u vremenski odvojenoj fazi (II F), doći će do rotacije oko

nove osi svih primarnih S-ploha zajedno s pripadajućim linearnim (kako realnim tako i konstruiranim) elementima sklopa (Sl. 2). Iznos rotacije i veličina kuta između orijentacije prvobitnog i novonastalog položaja osi boranja uglavnom je u izravnoj vezi s veličinom promjene orijentacije globalnog stresa i vremenom njegova trajanja. Preboravanje postojećih elemenata sklopa, u mlađoj fazi (Fy), bit će jasnije izraženo u apikalnim (tjemenim) dijelovima novostvorenih bora, te će β -presjecišta u ovim dijelovima struktura, u idealnom slučaju, biti rasplinuta po svim kvadrantima donje polukugle. Svako odstupanje od idealnog slučaja dovest će do znatnijeg okupljanja β -presjecišta u nekom od kvadranta.

Bitna činjenica koja može utjecati na način pojavljivanja i grupiranje β -presjecišta na donjoj polukugli je karakter i intenzitet boranja u pojedinoj fazi. Ukoliko je indeks i intenzitet boranja u starijoj deformacijskoj fazi jače izražen nego u mlađoj elementi mlade faze bit će zamaskirani elementima nastalim tijekom prethodnih deformacijskih procesa. Zbog toga je, između ostalog, potrebno podrobno proučiti i kritički objasniti svako rasipanje podataka na strukturnim dijagramima. Ovdje je potrebno naglasiti da β -presjecišta ne definiraju uvijek i regionalnu os boranja B što je osobito izraženo u slučajevima većeg strukturnog preoblikovanja koja mogu nastupiti u istoj ili nekoj mlađoj deformacijskoj fazi.

Migracija i formiranje novih β -presjecišta tijekom mladih deformacija može se, uz nepromijenjenu orijentaciju tangencijalnog globalnog stresa, odvijati uz rotaciju oko osi koja je paralelna, okomita ili je pod kutom na osnu ravninu proučavane strukture. Koji je slučaj prisutan treba ustanoviti tijekom istraživanja konkretnog problema podrobnom analizom segmenata proučavane strukture, upravo zbog toga što kasnijim deformacijama neka cilindrična struktura u ukupnom planu može prijeći u necilindrični oblik. Pažljivom analizom β -dijagrama moguće je dobiti više spoznaja o karakteru prisutnih deformacijskih procesa, a zbog kompleksnosti analize dobivenih podataka β -presjecišta svakako je potrebno, prije bilo kakvog zaključivanja, na oleatama dovesti najmlađu os u horizontalan položaj, te rotirati za isti iznos ostale podatke i tek tada pristupiti analitičkom dijelu.

Tijekom analize dijagrama može se ustanoviti prisutnost nekog od slijedeća tri slučaja: migracija β -presjecišta (1) po velikim ili malim krugovima, bitnije okupljanje (2) u nekom od kvadranta i potpuno rasipanje (3) po svim kvadrantima.

Razvlačenje β -presjecišta po velikom krugu može upućivati na prisutnost novog stresa čija je orijentacija paralelna osnoj ravnini starijeg oblika. U ovom slučaju svijanja strukture oko nove osi (B_2) stara presjecišta (β_1) međusobno se približavaju i teže prema centru dijagrama. Novonastala presjecišta (β_2) migriraju, također po velikom

krugu, prema periferiji dijagrama i prema položaju nove osi boranja (B_2), kako je prikazano na sl. 3. Ukoliko se analizom dijagrama ustanovi da β_2 -presjecišta migriraju prema centru dijagrama, a β_1 rotiraju po velikom krugu međusobno se približavajući, tada se radi o slučaju prikazanom na sl. 4. Ovdje se može govoriti o udaljavanju β_2 -presjecišta od nove osi boranja, koja nije regionalna, iako se s njom može i poklapati, nego lokalna, tj. vezana je samo za tu strukturu. Migracija β_1 -presjecišta odvija se u ravnini okomitoj na ravninu u kojoj zauzimaju položaje novostvorena β_2 -presjecišta.

U slučaju kada je jasna migracija podataka β -presjecišta po malim krugovima tada je moguće zaključiti o nastavku djelovanja globalnog stresa u istom deformacijskom ciklusu uz kontinuiranu promjenu njegove orijentacije (sl. 5.), ili pak o svijanju strukture uslijed transkurentnog razmicanja u istoj ili mladoj fazi (sl. 6). U prvom slučaju rotacija starih i novonastalih β -presjecišta odvija se oko osi koja je okomita na globalni stres i na B_1 . Starija β -presjecišta su blaže položena za razliku od novonastajućih. U drugom primjeru (sl. 6), gdje je shematski prikazana struktura Bijele stijene - Kričke na zapadnim obroncima Psunja, javljaju se podaci istovjetni gornjima, međutim, uz pojavu jednog submaksimuma koji se nalazi u ravnini okomitoj na B_1 i pokazuju tendenciju migriranja u toj ravnini. Migracija se može odvijati prema periferiji dijagrama (oblikovanje novih antiklinala) ili prema centru dijagrama (stvaranje novih sinklinala). Ostali submaksimumi koji neizbježno prate svijanje strukture rotiraju po malim krugovima oko osi okomite na B_1 . Ovaj primjer razmicanja strukture uslijed transkurentnog rasjedanja i nastajanje novih boranih oblika moguće je ustanoviti i iz strukturnih dijagrama načinjenih parcijalnom analizom dijelova strukture.

Primjer uporabe β -dijagrama

Iako su u poznatoj literaturi postojala skeptična, pa i različita mišljenja o svrsishodnosti korištenja β -dijagrama, ipak se tijekom analiza struktura u području slavonskih planina pristupilo njihovoj izradi. Obrada i analiza β -dijagrama prvenstveno je načinjena za one strukture koje su pretrpjele najmanje deformacije, te su se zbog toga prisutni tektonski procesi mogli definirati i međusobno jasno odvojiti.

Jedna od takvih je mezozojska struktura Kik-Petrov vrh koja se nalazi u zapadno-sjeverozapadnom dijelu Papuka (JAMIČIĆ, 1988., str.111). Njezino protezanje može se pratiti na dužini od oko petnaestak kilometara. Stvorena je laramijskim pokretima i djelomice preoblikovana tektonskim događajima tijekom tercijara, a izgrađena je od permotrijaskih i mezozojskih sedimenata. U osnovi, struktura predstavlja prevrnutu sinklinalu s pružanjem osi B u pravcu sjever-jug i istočnom vergencijom. Istočno krilo je normalno položeno te borano u više bora metarskih i dekametarskih dimenzija. Zapadno je prevrnutu, kako je utvrđeno na temelju odnosa klivaža osne ravnine i slojevitosti. Antiklinalni dio strukture nije, zbog erozije, očuvan. Struktura je u sjevernom dijelu stisnuta i tektonski reducirana uz nekoliko reverznih rasjeda približnog pružanja sjever-jug i gotovo paralelnih s njezinom osnom ravninom.

Prema jugu sinklinala se postupno širi, što je uvjetovano manjom prisutnošću spomenutih reverznih i gravitacijskih rasjeda, a koji su bitno utjecali na njezino suženje u sjevernom dijelu. Ovakav oblik rasprostiranja strukture Kik-Petrov vrh ukazuje na promjenu orijentacije vektora globalnog stresa i njegovu desnu rotaciju tijekom deformacijskih procesa u vrijeme laramijske faze alpske orogeneze. Tektonskim pokretima za vrijeme tercijara struktura Kik-Petrov vrh je pretrpjela daljnje deformacije pod utjecajem razlamanja uzduž transkurentnih rasjeda pravca sjeveroistok-jugozapad kada dolazi do svijanja S-ploha (slojevitost) oko horizontalne osi približnog pružanja istok-zapad i stvaranja novih reverznih rasjeda istog pružanja.

Analizom mjerenih podataka slojevitosti sjevernog dijela ove strukture obuhvaćeno je područje od potoka Toplice do njezina sjevernog reverznog kontakta s tercijarnim naslagama (JAMIČIĆ, 1988), a dobiveni je dijagram prikazan na sl. 7a. On predstavlja polove ravnina slojevitosti. Interpretacija ovog dijagrama otežana je relativno velikim rasipanjem podataka, razvlačenjem njihovih maksimuma i submaksimuma u skoro sva četiri kvadranta donje polukugle. Međutim, ukoliko bi se kroz maksimume ipak pokušala provući Π -ravnina tada njezin pol (Π -pol) približne orijentacije $330^\circ/20^\circ$ daje pogrešni podatak o položaju regionalne osi B_4 , zbog toga što je za ovo područje na osnovi analize geološke karte, zatim statističkom analizom pružanja b-osi i klivaža osne ravnine, te analizom presjeka ovog klivaža sa slojnim plohama ustanovljeno da regionalna os B_4 zauzima položaj između $350^\circ/15^\circ$ i $10^\circ/5^\circ$ (JAMIČIĆ, 1988; sl. 29 i 32). Približnog je pružanja sjever-jug sa sjevernom inklinacijom u iznosu od oko desetak stupnjeva. Dijagram bi se mogao interpretirati i kao 2S-dijagram provlačenjem ravnine kroz ujedinjene maksimume na granicama prvog i drugog, te trećeg i četvrtog kvadranta, što bi unekoliko približilo regionalnu os B_4 njezinu pravom položaju, no to se može učiniti s velikom dozom nesigurnosti i tek samo tada kada je poznata ova os.

Slične dileme javljaju se i kod korištenja i interpretacije dijagrama sa sl. 7b, na kojemu su prikazani isti podaci polom pravca nagiba. Naime, ovdje se javlja jedan izražen maksimum u graničnom dijelu trećeg i četvrtog kvadranta što ukazuje na migraciju s-ploha slojevitosti u pravcu istok-zapad, koja je vjerojatno uvjetovana svijanjem strukture oko osi pružanja sjever-jug tijekom laramijske faze. Najmlada os boranja pružanja istok-zapad iz ovog dijagrama ne može se ustanoviti, iako je ona sigurno sadržana u ravnini položaja $270^\circ-30^\circ$, a koju je moguće provući kroz taj maksimum i pripadajuće submaksimume.

Za sjeverni dio strukture Kik-Petrov vrh učinjen je i β -dijagram. Na sl. 7c dan je kompjutorski prikaz točkastog dijagrama β -presjecišta dobiven međusobnim presijecanjem S-ploha (slojevitosti) 103 podatka. Na sl. 7d prikazan je konturni dijagram β -presjecišta. Da bi maksimumi došli do izražaja odabrano je šest klasa gustoće. Izraženi parovi maksimuma iste klase gustoće na periferiji dijagrama omogućuju njihovo povezivanje i iscrtavanje dvije vertikalne ravnine preko centra dijagrama. Slabo razvlačenje maksimuma po tim ravninama upućuje na vrlo blago svijanje β -presjecišta oko osi približnog pravca pružanja istok-zapad.

Kako obrađeni podaci pripadaju relativno homogenom bloku, što je preduvjet za korektnu obradu podataka, bilo bi za očekivati, prilikom izrade β -dijagrama, pojavu jednog para maksimuma s nizom neizbježnih, ali manje značajnih submaksimuma. Ovi submaksimumi se mogu tumačiti ili slučajnim javljanjem uslijed pogrešaka u mjerenju ili zbog naknadnih manjih deformacijskih procesa koji dovode do raspršenosti podataka. Međutim, na prikazanom dijagramu jasno su uočljiva dva para dijagonalno suprotnih maksimuma iste težine s tendencijom rotacije β -presjecišta po malom krugu oko vertikalne osi za iznos koji se kreće između 30° i 45° . Usporedbom sa sl. 5 i činjenicama koje su iznesene i vezane uz tu sliku može se zaključiti da struktura Kik-Petrov vrh ima upravo taj oblik. Tijekom njezina nastajanja u jednoj fazi laramijskih pokreta došlo je do reverznog rasjedanja po klivažu osne ravnine i desne rotacije krovinskog dijela strukture, što je uvjetovano desnom rotacijom globalnog stresa. Iz ovog proizlazi da u sjevernom području strukture Kik-Petrov vrh postoje dvije osi boranja nastale tijekom laramijske faze. Jedna je sadašnjeg pružanja $324^\circ-144^\circ/8^\circ$, a druga je zarotirana u smjeru kazaljke na satu za oko 30° i položaja je $354^\circ-174^\circ/8^\circ$. Desna rotacija globalnog stresa tijekom laramijske faze izražena je i u spomenutom nizu reverznih rasjeda kojih nema u njezinom južnom dijelu u predjelu područja potoka Stražeman i Pakra (JAMIČIĆ, 1988).

Treća ravnina, koja povezuje dva glavna maksimuma ($354^\circ/8^\circ$ i $174^\circ/8^\circ$) s nekoliko submaksimuma u trećem i četvrtom kvadrantu i submaksimumom u graničnom dijelu ovih kvadranta, ima položaj $266^\circ/26^\circ$ što približno odgovara azimutu pružanja regionalnoj osi B_5 slavonskih planina nastaloj tijekom tercijara (mladoalpska orogeneza) (JAMIČIĆ, 1988). Slabo, ali uočljivo izduženje centralnog maksimuma kroz koji prolazi ova ravnina pokazuje migraciju podataka prema periferiji dijagrama, što se može usporediti s iznesenim činjenicama uz sl. 3. Iz ovog se može zaključiti da je prisutna migracija β -presjecišta prema periferiji dijagrama nastala uslijed pojave novog globalnog stresa čija je orijentacija paralelna osnoj ravnini starije strukture. Nastavkom djelovanja stresa β -presjecišta bi se postupno približila regionalnoj osi B_5 . Nedostajanje podataka istih klasa gustoće u drugom krilu ove laramijske strukture (trebalo bi ih očekivati ako se pogleda sl. 5) uvjetovano je činjenicom da su podaci prevrnute sinklinale najvećim dijelom uključeni u podatke s približno istočnom vergencijom.

Zaključak (kritički osvrt na primijenjenu metodu)

Prikazani rezultati korištenja β -dijagrama kod polifazno deformiranih struktura omogućuju, uz ostale metode statistike i njihovu primjenu tijekom strukturo-loške obrade i interpretacije nekog područja. Ipak, potrebno je naglasiti i određeni stupanj opreznosti tijekom analize ovih dijagrama iz nekoliko razloga. Prvo, β -os ne određuje automatski i regionalnu B-os, te se ona u tom smislu ne može koristiti, već se do njezina položaja mora doći primjenom kompletne strukturogeološke analize. Zatim, korištenjem većeg broja realnih elemenata pri izradi β -dijagrama, stvara se mogućnost pojavljivanja jednog ili više submaksimuma, što može značiti i slučajnost, kako to naglašava RAMSEY (1967), te zbog toga svakako treba koristiti i druge metode pri definiranju oblika istraživane strukture. Naposljetku, rasipanje podataka na β -dijagramima uvjetuje uz ostalo i neadekvatno određivanje homogenih blokova koje je potrebno, što je moguće korektnije, odrediti i ograničiti terenskim radovima i analizom s geološke karte.

Za izradu dijagrama svakako je najpovoljnije koristiti S-plohe slojevitosti ili folijacije. Međutim, statistički se mogu analizirati i međusobni presjeci klivaža iz zone osi b, čiju je pripadnost toj zoni prethodno potrebno i jasno definirati. Mogu se npr. koristiti presjecišta ploha klivaža osne ravnine koji pripada toj zoni. U slučaju migracije regionalne osi B premještanju se i njezina presjecišta te se na temelju oblika njihove migracije, slično kao u slučaju β -presjecišta ploha slojevitosti, može zaključiti o promjeni orijentacije i/ili orijentaciji samog globalnog stresa.

Iz prethodnog prikaza analize β -dijagrama jasno proizlazi da se ne smiju međusobno miješati i stavljati u odnose različiti strukturni elementi makar pripadali istom kinematičkom činu.

Na temelju iskustva autora stečenog tijekom korištenja ove metode, izradom β -dijagrama (naročito slojevitosti) može se dobiti opći uvid u karakter deformacijskih procesa. Iako prema dostupnim literaturnim podacima ova metoda nije u većoj mjeri korištena, zbog razloga koji su u uvodu navedeni, ipak se ona preporučuje u slučajevima višefazno oblikovanih struktura, naročito kod oblika koji nisu pretrpjeli deformacijske procese većeg intenziteta.

Manuscript received June 06, 1992.

Revised manuscript accepted July 02, 1993.