

# Struktura analiza bora i rasjeda na jugoistočnom dijelu otoka Paga

---

**Brenko, Tomislav**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2015**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:459447>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-27**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
RUDARSKO–GEOLOŠKO–NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij geologije

STRUKTURNA ANALIZA BORA I RASJEDA NA JUGOISTOČNOM  
DIJELU OTOKA PAGA

Diplomski rad

Tomislav Brenko

G–151

Zagreb, 2015.

**Zahvaljujem se mojem mentoru prof.dr.sc. Bruni Tomljenoviću na predloženoj temi, ukazanom povjerenju, te velikoj pomoći, strpljenju i korisnim savjetima tokom izrade ovog diplomskog rada.**

**Zahvaljujem se također dr.sc. Bojanu Matošu na korisnim savjetima i sugestijama za rad u ArcGIS-u u početnoj fazi izrade diplomskog rada, te prof.dr.sc. Igoru Vlahoviću i doc.dr.sc. Urošu Barudžiji na korisnim savjetima u završnoj fazi izrade diplomskog rada.**

**Veliko hvala mojoj obitelji na pomoći i podršci tijekom cjelokupnog studiranja.**

STRUKTURNA ANALIZA BORA I RASJEDA U JUGOISTOČNOM DIJELU OTOKA PAGA  
TOMISLAV BRENKO

Diplomski rad je izrađen: Sveučilište u Zagrebu  
Rudarsko–geološko–naftni fakultet  
Zavod za geologiju i geološko inženjerstvo  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

U sklopu izrade ovog diplomskog rada prikupljeni su, analizirani i interpretirani novi strukturni podaci o borama i rasjedima na jugoistočnom dijelu otoka Paga u sjevernoj Dalmaciji. Na temelju strukturne analize rasjeda, izdvojene su grupe rasjeda po kriteriju njihove kinematske kompatibilnosti. Za svaku grupu rasjeda određen je režim paleonaprezanja, izračunat orijentacijom glavnih osi paleonaprezanja. Korištene su dvije metode: *P B T axes* (P–T metoda) i *Right dihedron* (NDA) metoda unutar programskog paketa *Win–Tensor*. Izdvojeno je pet grupa rasjeda koje su interpretirane, određen im je režim paleonaprezanja, te su stavljene u vremenski kontekst. Najstariji su interpretirani rasjedi grupe 5 koju čine reversni rasjedi pružanja SZ–JI, nastali u kompresijskom režimu paleonaprezanja krajem eocena i početkom oligocena, što odgovara glavnoj kompresijskoj fazi u Vanjskim Dinaridima. Rasjedi grupe 4 također predstavljaju reversne rasjede, pružanja SI–JZ. Nastali su u kompresijskom polju naprezanja s pružanjem glavne kompresijske osi I–Z, dok se za vrijeme aktivnosti ove grupe rasjeda pretpostavlja oligocen–miocen. Grupu 3 predstavljaju reversni rasjedi pružanja ZJZ–ISI, uz pružanje glavne kompresijske osi u pravcu SSZ–JJI. Vremenska aktivnost ove grupe rasjeda se također pretpostavlja kao oligocen–miocen. Rasjede unutar grupe 2 predstavljaju normalni rasjedi s translacijom krovinskih krila prema sjeveru i sjeveroistoku. Pružanje tenzijske osi je po pravcu S–J, dok se vrijeme nastanka ovih rasjeda pretpostavlja kao miocen–pliocen. Grupu 1 čine rasjedi pružanja S–J, s izraženim lijevim karakterom pomaka, nastali u transpresijskom režimu naprezanja tijekom kraja pliocena i kvartara. Na temelju provedene strukturne analize orijentacije slojevitosti unutar gornjokrednih naslaga opisane su dvije bore. Zaključeno je da su bore obilježene uspravnima osnim plohama (kuta nagiba 87–88°) pružanja SZ–JI. Međukrilni kutevi bora variraju u rasponu od 131–135°, što odgovara blagim borama. Bore su u svojim sjeveroistočnim i jugozapadnim krilima rasjednute brojnim lijevim i desnim rasjedima, koji su zabilježeni i analizirani. Zbog sličnih strukturnih značajki, zaključeno je da su bore nastale unutar istog kompresijskog događaja, povezanog s glavnom kompresijskom fazom u Vanjskim Dinaridima.

Diplomski rad sadrži: 57 stranica, 6 tablica, 48 slika i 24 referenci

Jezik izvornika: Hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko–geološko–naftnog Fakulteta  
Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: Prof. dr. sc. Bruno Tomljenović

Ocjenjivači: Prof. dr. sc. Bruno Tomljenović  
Prof. dr. sc. Igor Vlahović  
Doc. dr. sc. Uroš Barudžija

Datum obrane: 30.09.2015., Rudarsko–geološko–naftni fakultet

STRUCTURAL ANALYSIS OF FOLDS AND FAULTS IN SOUTHEASTERN PART OF THE ISLAND  
OF PAG  
TOMISLAV BRENKO

Thesis completed in: University of Zagreb  
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering  
Institute of Geology and Geological Engineering  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

This diploma thesis included collecting, analyzing and interpretation of new structural data on folds and faults in the southeastern part of the island of Pag, northern Dalmatia. Based on structural analysis of faults, several fault groups were separated based on their kinematic compatibility. For each group of faults paleostress vectors and stress tensors were calculated. Two methods were used with the usage of the computer programme *Win-Tensor*, *P B T axes* (P-T method) and *Right diedron* (NDA) method. A total of five different groups of faults were separated, their paleostress regime analysed and time of their formation was established. The oldest were faults from the group 5, which are represented by reverse faults NW-SE strike, probably formed during the Late Eocene-Early Oligocene, connected with the main compressional phase of the Outer Dinarides. Group 4 faults are represented with reverse faults, with striking NE-SW. They indicate compressional stress field, with main compressional axis E-W directed, and activity in Oligocene-Miocene. Group 3 is represented with reverse faults with WSW-ENE strike, with direction of main compressional axis NNW-SSE. Temporal activity is interpreted as Oligocene-Miocene. Group 2 faults are comprised of normal faults with movement of hanging wall towards N and NE. Main tension axis has N-S strike, while time activity is also presumed as Miocene-Pliocene. Group 1 faults comprise N-S striking faults with distinctive sinistral displacement, indicating transpressional regime presumed to be active during Late Pliocene and Quaternary. Based on structural analysis of the strata in Upper Cretaceous, two folds were described and analysed. Both are characterized by upright axial plane (with inclination of 87-88°) striking NW-SE. Measured values of interlimb angles of these folds range from 131-135°, indicating gentle folds. Folds are faulted by numerous sinistral and dextral faults in both northeastern and southwestern limb. Based on similar structural orientation, both folds were created during the same compressional event, connected with main compressional phase in the Outer Dinarides.

Thesis contains: 57 pages, 6 tables, 48 figures and 24 references

Original in: Croatian

Thesis deposited in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering  
Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: Dr. sc. Bruno Tomljenović, Professor

Reviewers: Professor Bruno Tomljenović, Ph.D.  
Professor Igor Vlahović, Ph.D.  
Assistant Professor Uroš Barudžija, Ph.D.

Date of presentation: 30.09.2015. Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

## Sadržaj

<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2. OPIS PODRUČJA ISTRAŽIVANJA.....</b>	<b>2</b>
2.1. GEOGRAFSKI POLOŽAJ.....	2
2.2. OSVRT NA RANIJA GEOLOŠKA ISTRAŽIVANJA .....	3
2.3. PREGLED GEOLOŠKE GRAĐE ISTRAŽIVANOG PODRUČJA .....	4
2.3.1. Kredne naslage .....	4
2.3.2. Tercijarne (paleogenske) naslage .....	6
2.4. STRUKTURNI ODNOSI U ISTRAŽIVANOM PODRUČJU .....	8
<b>3. TEORIJSKE OSNOVE STRUKTURNE ANALIZE BORA I RASJEDA, TE OSNOVE PRORAČUNA PALEONAPREZANJA.....</b>	<b>9</b>
3.1. BORE.....	9
3.1.1. Klasifikacija bora.....	12
3.2. RASJEDI .....	14
3.2.1. Metode proračuna paleonaprezanja na temelju rasjeda i/ili smičnih pukotina.....	16
3.2.1.1 P B T axes (P–T metoda) .....	16
3.2.1.2 Right diedron (NDA) metoda.....	17
<b>4. REZULTATI ISTRAŽIVANJA.....</b>	<b>19</b>
4.1. STRUKTURNA ANALIZA AEROFOTO I SATELITSKIH SNIMAKA .....	19
4.2. TERENSKA MJERENJA.....	22
4.2.1. Jugoistočni dio istraživnog područja .....	22
4.2.2. Područje dinjiškog zaljeva.....	30
4.2.3. Središnji dio istraživnog područja (naselje Gorice).....	35
4.2.4. Sjeverni dio istraživnog područja .....	40
4.3. IZRAČUN PALEONAPREZANJA NA TEMELJU ZABILJEŽENIH RASJEDA .....	43
4.3.1. Grupa rasjeda 1 .....	43
4.3.2. Grupa rasjeda 2 .....	44
4.3.3. Grupa rasjeda 3 .....	46
4.3.4. Grupa rasjeda 4 .....	48
4.3.5. Grupa rasjeda 5 .....	50
<b>5. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>53</b>
<b>6. LITERATURA .....</b>	<b>56</b>

## Popis slika

Slika 2–1. Geografski položaj istraživnog područja .....	2
Slika 2–2. Satelitski snimak jugoistočnog dijela otoka Paga s granicom istraživnog područja (izvor google.earth.com) .....	3
Slika 2–3. Detalj geološkog stupa s razvojem gornjokrednih naslaga otoka Paga (iz SOKAČ i dr., 1976) .....	5
Slika 2–4. Detalji geološkog stupa s razvojem paleogenskih naslaga otoka Paga (iz SOKAČ i dr., 1976) .....	7
Slika 3–1. Teoretski primjer bore s označenim točkama maksimalne zakrivljenosti i točkama pregiba (TOMLJENović, 2015) .....	9
Slika 3–2. Teoretski izgled antiklinale (lijevo) i sinklinale (desno); brojevi 1–3 označavaju stratigrafski sve mlađe naslage (TOMLJENović, 2015) .....	10
Slika 3–3. Teoretski izgled osne plohe i osi bore (TOMLJENović, 2015), te stereografska projekcija osne plohe i osi bore na jugoistoku otoka Paga (vidi poglavlje 4.) .....	11
Slika 3–4. Primjer konturnog dijagrama s označenim tragom $\pi$ – kruga i proračunatom osi bore (TOMLJENović, 2015) .....	12
Slika 3–5. Dijagram klasifikacije bora po FLEUTY–ju (1964) (TOMLJENović, 2015). (a– uspravna, subhorizontalna bora) .....	13
Slika 3–6. Mohrova kružnica posmičnog naprezanja nadopunjena sa anvelopom sloma za tipični pješčenjak (DAVIS & REYNOLDS, 1996; dopunjeno prema TOMLJENović, 2015) .....	14
Slika 3–7. Teoretski odnos glavnih osi naprezanja na površini Zemlje ( <a href="https://en.wikipedia.org/wiki/Unit_vector">https://en.wikipedia.org/wiki/Unit_vector</a> ) .....	15
Slika 3–8. Andersonova teorija rasjedanja i odnos glavnih osi naprezanja prema različitim vrstama rasjeda (iz TWISS i MOORES, 1992) .....	16
Slika 3–9. Stereografska projekcija proračuna P i T osi s njihovim orijentacijama za izmjereni set rasjeda (vidi poglavlje 4.3.) .....	17
Slika 3–10. Stereografska projekcija Right diedron metode (NDA) za jednu grupu rasjeda na istraživnom području (vidi poglavlje 4.3.) .....	18
Slika 4–1. Prikaz zabilježenih lineamenata u istraživnom dijelu otoka Paga analizom digitalnih ortofoto snimki (DOF) u programu ArcGIS 10.1 .....	19
Slika 4–2. Rozeta dijagram s prikazom azimuta pružanja pretpostavljenih lineamenata/rasjednih ploha utvrđenih analizom aerofoto i satelitskih snimaka na istraživnom području otoka Paga .....	21
Slika 4–3. Detalj s OGK lista Gospić (SOKAČ i dr., 1974) i lista Zadar (MAJCEN i dr., 1970) s označenim lokacijama mjerenih rasjeda 1–12 (gore), te stereografska projekcija zabilježenih rasjeda (dolje) .....	23
Slika 4–4. Subvertikalna ploha Fortičkog rasjeda (rasjed br. 1. u Tablici 4–1) (GPS koordinate N 44° 19' 27,44" E 15° 15' 16,54") .....	25
Slika 4–5. Rasjedna ploha Fortičkog rasjeda sa stepenastim agregatima vlaknastog kalcita koji ukazuju na lijevi pomak po rasjedu (GPS koordinate N 44° 19' 32,35" E 15° 15' 14,60") .....	25
Slika 4–6. Rasjed s nagibom paraklaze prema istoku unutar forameniferskih vapnenaca na usjeku ceste kod rta Fortica (GPS koordinate N 44° 19' 28,07" E 15° 15' 11,86") .....	26
Slika 4–7. Antiklinala unutar gornjokrednih naslaga s parazitskim borama u zoni maksimalne zakrivljenosti (obilježeno crvenom kružnicom) .....	27
Slika 4–8. Orijehtacija slojnih ploha gornjokrednih rudistnih vapnenaca u jezgri antiklinale na jugoistočnom dijelu područja istraživanja otoka Paga (pogled prema jugoistoku) .....	28
Slika 4–9. Konturni dijagram i proračunata orijentacija osi bore smjera i kuta nagiba 130/17 prikazane na slikama 4–7 i 4–8 .....	29
Slika 4–10. Stereografska projekcija kojom je proračunata orijentacija osne plohe bore (crveni trag) sa smjerom i kutom nagiba 35/87 .....	30
Slika 4–11. Detalj s OGK lista Gospić (SOKAČ i dr., 1974) s označenim lokacijama mjerenih podataka (gore), te stereografska projekcija normalnog rasjeda (dolje) .....	31
Slika 4–12. Subvertikalni slojevi u flišu (stratigrafska krovina je prema desno, prema jugozapadu) .....	32
Slika 4–13. Prikaz setova pukotina unutar fliša .....	33
Slika 4–14. Prebačeni slojevi u naslagama eocenskog fliša sa smjerom i kutom nagiba 27/70 (GPS koordinate N 44° 20' 42,86" E 15° 12' 47,46") .....	34
Slika 4–15. Isječak iz OGK lista Gospić s izvučenim profilom .....	34
Slika 4–16. Profil kroz prebačene slojeve unutar flišnih naslaga .....	35
Slika 4–17. Satelitska snimka okolice sela Gorice .....	35
Slika 4–18. Interpretirana satelitska snimka bore unutar turonskih vapnenaca u središnjem dijelu područja istraživanja s izvučenim tragovima slojeva i mjerenih rasjeda .....	36

Slika 4–19. Konturni dijagram strukturnih mjerenja u antiklinali na jugoistočnom dijelu otoka Paga s izračunatom osi ( $\beta$ ) orijentacije 314/5.....	38
Slika 4–20. Stereografska projekcija osne plohe antiklinale orijentacije 34/88.....	38
Slika 4–21. Detalj sa lista OGK Gospić (SOKAČ i dr., 1974) s ucrtanim lokacijama mjerenih rasjeda (gore), te prikaz stereografske projekcije mjerenih rasjeda (dolje).....	39
Slika 4–22. Detalj lista OGK Gospić (SOKAČ i dr., 1974) s ucrtanim lokacijama strukturnih mjerenja (gore), te prikaz stereografske projekcije zabilježenih rasjeda (dolje).....	40
Slika 4–23. Reversan rasjed koji se nalazi između crvenkastih i bijelih forameniferskih vapnenaca s nagibom paraklaze prema jugozapadu, ispresjecan rasjedima koji su zajedno interpretirani kao konjugirani parovi rasjeda (GPS koordinate N 44° 08' 08,59" E 15° 02'.....	42
Slika 4–24. Rasjed unutar eocenskih forameniferskih vapnenaca s nagibom paraklaze prema sjeverozapadu (GPS koordinate N 44° 28' 24,70" E 15° 03' 03,79").....	42
Slika 4–25. Stereogram proračuna orijentacije P–, T– i B–osi naprezanja za rasjede grupe 1.....	43
Slika 4–26. Stereogram proračuna orijentacije P–, T– i B–osi naprezanja te kompresijskih i tenzijskih dieadara za rasjede grupe 1.....	44
Slika 4–27. Stereogram proračuna orijentacije P–, T– i B–osi naprezanja za rasjede grupe 2.....	45
Slika 4–28. Stereogram kompresijskih i tenzijskih dieadara za rasjede grupe 2.....	46
Slika 4–29. Stereogram proračuna orijentacije P–, T– i B–osi naprezanja za rasjede grupe 3.....	47
Slika 4–30. Stereogram kompresijskih i tenzijskih dieadara za rasjede grupe 3.....	48
Slika 4–31. Stereogram orijentacije P–, T– i B–osi naprezanja za rasjede grupe 4.....	49
Slika 4–32. Stereogram kompresijskih i tenzijskih dieadara za rasjede grupe 4.....	50
Slika 4–33. Stereogram proračuna orijentacije P–, T– i B–osi naprezanja za rasjede grupe 5.....	51
Slika 4–34. Stereogram kompresijskih i tenzijskih dieadara za rasjede grupe 5.....	52

## Popis tablica

Tablica 4–1. Tablica s raspodjelom azimuta pružanja lineamenata/rasjeda na istraživanom području utvrđenih analizom aerofoto i satelitskih snimaka na istraživanom području otoka Paga.....	20
Tablica 4–2. Tablica sa strukturnim podacima izmjerenim na rasjedima na jugoistočnom dijelu područja istraživanja.....	24
Tablica 4–3. Tablica s izmjerenim podacima položaja slojevitosti unutar gornjokrednih naslaga na istraživanom području jugoistočnog dijela otoka Paga.....	28
Tablica 4–4. Tablica sa strukturnim mjerenjima u antiklinali u okolici sela Gorice.....	37
Tablica 4–5. Tablica izmjerenih strukturnih podataka o rasjedima na području između Paškog zaljeva i Velebitskog kanala.....	41
Tablica 5–1. Interpretacija relativne starosti za analizirane grupe rasjeda na istraživanom području otoka Paga.....	54



## 1. UVOD

Cilj ovog diplomskog rada bio je prikupljanje, obrada i interpretacija novih podataka na temelju strukturne analize bora i rasjeda u krednim i eocenskim naslagama jugoistočnog dijela otoka Paga. Na temelju podataka o orijentaciji i njihovim kinematskim značajkama načinjen je i proračun glavnih osi naprezanja, odnosno rekonstrukcija režima paleonaprezanja.

Terenskim, strukturnim mjerenjima u II dijelu otoka Paga zabilježeno je 30–ak rasjednih ploha. Prikupljeni podaci su prikazani u tablicama, gdje je uz podatak o orijentaciji rasjedne plohe i vektora pomaka (iskazan orijentacijom strija i karakterom pomaka po rasjedu) prikazan i podatak o stratigrafskoj pripadnosti stijena i geografske koordinate lokacije mjerenja. Analizom prikupljenih podataka, rasjedi s istim i/ili korelativnim kinematskim značajkama uvršteni su u odgovarajuće grupe. Na temelju tako uređenih podataka proračunata je orijentacija glavnih osi paleonaprezanja, te je time definiran režim paleonaprezanja za svaku izdvojenu grupu rasjeda. Na kraju je načinjena interpretacija značenja izdvojenih rasjednih grupa za strukturno–tektonski razvoj i strukturnu građu istraživanog dijela otoka Paga, što je uz tekstualni opis prikazano i na strukturnoj karti i profilima.

## 2. OPIS PODRUČJA ISTRAŽIVANJA

### 2.1. GEOGRAFSKI POLOŽAJ

Prema TERZIĆ (2006) otok Pag pripada Kvarnerskim otocima, iako se geografski nalazi između Kvarnera, Like i Dalmacije (Slika 2–1). Površina otoka iznosi 284,56 km<sup>2</sup>, dužina obale je 302,87 km, a najviši vrh je Sv. Vid (349 m.n.m.). Indeks razvedenosti obale otoka Paga iznosi 5,06 (TERZIĆ, 2006), što ga uz Dugi Otok čini jednim od razvedenijih otoka u Jadranskom moru. Blizina Velebita značajno utječe na brojne prirodne posebnosti i značajke ovog otoka. Izložen je jednoj od najjačih bura na Jadranskom moru, pa su mu sjeverna i sjeveroistočna strana potpuno ogoljele, bez vegetacije. Morfološki gledano, otok Pag je izdužen paralelno s dinaridskim pravcem pružanja SZ–JI, a obilježen je blagim reljefom kojeg čini niz uskih i izrazito izduženih dolina, formiranih u jezgrama sinklinala pretežito građenih od srednjo i gornjoeocenskih lapora i kalkarenita (fliš), te kvartarnih sedimenata. Doline bočno prelaze u gorje također s izrazitim dinaridskim pružanjem, a strukturno predstavljaju antiklinale čije su jezgre izgrađene od gornjokrednih vapnenaca i dolomita.



Slika 2–1. Geografski položaj istraživanog područja

Istraživano područje obuhvaćeno ovim radom nalazi se na jugoistočnom dijelu otoka Paga, između grada Paga i Paškog mosta. Ograničeno je državnom cestom D106 na zapadu, te obalnom linijom na istoku (Slika 2–2).



Slika 2–2. Satelitski snimak jugoistočnog dijela otoka Paga s granicom istraživanog područja (izvor <https://google.earth.com>)

## 2.2. OSVRT NA RANIJA GEOLOŠKA ISTRAŽIVANJA

Prva geološka istraživanja otoka Paga i okolnih područja, s općenitim razvojem stratigrafsko–strukturnih odnosa u Dalmaciji načinio je austrijski geolog HAUER (1868). Prve podatke o neogenskim sedimentima na otoku Pagu objavljuje RADIMSKY (1877), koji je utvrdio da se na području Kolanskog polja ispod pokrova koji čine ilovača, pijesak i šljunak nalaze žučkasti i sivomodri lapori u kojima je uklopljen lignit. O neogenskim naslagama na otoku Pagu piše i SCHUBERT (1906) koji smatra da je otok Pag nastavak sjeverno–dalmatinskog kopna, te da se sastoji od ostataka jedne vrlo protegnute zone tektonskih korita

koja su ispunjena srednjoeocenskim laporima, diluvijalnim pijeskom i kršjem. Schubert i Waagen 1912. izrađuju List Pag u mjerilu 1 : 75.000, te publiciraju pripadajući Tumač (SCHUBERT, WAAGEN, 1912), a dio otoka zahvaćen je i na listovima Carlopago i Jablanac (WAAGEN, 1914). U Tumaču karte se nalaze prvi znanstveni podatci o fosilima Crnike, a naslagama se pripisuje gornjomiocenska starost. Navedeni autori su unutar paleogenskih naslaga napravili podjelu slojeva na liburnijske stepenice, te alveolinske i numulitne vapnence.

U drugoj polovici 20. stoljeća započinju detaljna geološka istraživanja otoka Paga u okviru izrade Osnovne geološke karte (OGK) mjerila 1 : 100.000. Otok Pag se nalazi na listovima Gospić (SOKAČ i dr., 1976), Zadar (MAJCEN i dr., 1970) i Silba (MAMUŽIĆ, SOKAČ, 1973). U pripadajućim Tumačima autori daju detaljniju podjelu i rasprostranjenost naslaga.

Od novijih istraživanja vrijedi spomenuti rad o geomorfološkoj regionalizaciji srednjeg i južnog dijela otoka Paga (LONČAR, 2011) gdje je na temelju geoloških, klimatskih i geomorfoloških obilježja utvrđena 21 kategorija reljefa koji su detaljno proučeni i daljinskim istraživanjem. MARJANAC (2012) spominje mogućnost pleistocenske dinaridske glacijacije na otoku Pagu i okolnom području temeljeno na proučavanju kvartarnih sedimenata u okolici naselja Gorice, te MARJANAC (2014) opisuje eocenske flišne naslage u okolici naselja Vrčići.

## **2.3. PREGLED GEOLOŠKE GRAĐE ISTRAŽIVANOG PODRUČJA**

Područje istraživanja ovog diplomskog rada obuhvaćeno je Osnovnom geološkom kartom, listovima Gospić (SOKAČ i dr., 1976) i Zadar (MAJCEN i dr., 1970), koje su u dijelu koji obuhvaća područje istraživanja ovog rada prikazane na Prilogu 1. Sažeti prikaz geološke građe istraživanog područja opisan u ovom poglavlju temelji se na podacima s ovih listova (SOKAČ i dr., 1976; MAJCEN i dr., 1970) i onim opisanim u njihovim pripadajućim tumačima.

### **2.3.1. Kredne naslage**

Karbonatne, gornjokredne naslage čine najstarije, površinski otkrivene naslage u istraživanom dijelu otoka Paga, a otkrivene su u jezgrama kilometarskih antiklinala (Prilog 1). Na listovima OGK Gospić i Zadar unutar gornjokrednih naslaga izdvojene su slijedeće stratigrafske jedinice (Slika 2–3):

K R E D A	G O R N J O K R E D N I	$K_2^3$	350	Kalculititi i kalkareniti s <i>Radiolites radiosus</i> , <i>Praeradlites anatolicus</i> , <i>Hippurites (Orbignya) toucasianus</i> , <i>H. (O.) socialis</i> , <i>H. (Vaccintes) praesulcatus</i> i dr.
		$K_2^{1,2}$	cca 600	Bioakumulirani vapnenici, biokalkareniti, kalkareniti, calculititi i leće dolomita <i>Pseudolituonella reicheli</i> , <i>Ichthyosarcolites bicarinatus</i> , <i>I. poljaki</i> , <i>Neocarpina gigantea</i> , <i>Hippurites (Orbignya) requieni</i> , <i>Nerinea requieni</i> i dr.
		$K_2^1$	100	Dolomiti i dolomitizirani vapnenici s lećama dolomitiziranih breča

Slika 2–3. Detalj geološkog stupa s razvojem gornjokrednih naslaga otoka Paga (iz SOKAČ i dr., 1976)

### CENOMAN–TURON ( $K_2^{1,2}$ )

Za razliku od prostora Like gdje gornjokredne naslage tvore jezgre sinklinalnih dijelova bora, na otoku Pagu su ove naslage otkrivene u jezgrama krednih antiklinala, od kojih se jedna proteže velikom površinom istraživanog područja, te predstavljaju najstariji otkriveni član krede. Da je stvarno riječ o naslagama cenomansko–turonske starosti upućuju ostaci mikrofosilne zajednice koji su utvrđeni na Pagu: *Aeolisaccus sp.*, *Cuneolina pavonia parva*, *Dicyclina schlumbergeri* i *Nummoloculina heimi*. Starost je potvrđena i brojnim pronalascima makrofosilne zajednice: *Ichthyosarcolites tricarinatus*, *I. bicarinatus*, *I. cf. monocarinatus*, *I. poljaki*, *Neocarpina gigantea*. Za razliku od Velebita na otoku Pagu su i brojne vrste hondrodonta, vrste kao *Hippurites (Orbignya) requieni*, *Nerinea requieni*, *N. schinosensis*. Upravo ta zajednica hondrodonta dokazuje na cenoman–turonsku starost, gdje bi takav razvoj kao na otoku Pagu pripadao nešto višem nivou.

Među slabo uslojenim, svjetlosmeđim i sivim sedimentima cenomansko–turonske starosti prevladavaju vapnenaci s gotovo 100%–nim udjelom  $\text{CaCO}_3$ . Dolomitne stijene javljaju se ponegdje, u formi leća, a odgovaraju zrnastim vapnenačkim dolomitima mozaične strukture. Zastupljena je kompletna asocijacija grebenskog facijesa. Vrlo često se mogu primjetiti lateralne i vertikalne izmjene bioakumuliranih vapnenaca, grebenskih breča, biokalkarenita i kalkarenita. Litološki stup gornjokrednih naslaga i njihove debljine prikazan je na Slici 2–3.

## SENON (K<sub>2</sub><sup>3</sup>)

Senonske naslage predstavljaju najrasprostranjenije naslage na području istraživanja. Zastupljene su najmlađim krednim vapnencima koji se nalaze u krilima velike kredne antiklinale, gdje se kontinuirano nastavljaju na naslage cenoman–turonske, dok se transgresivno na njih nastavljaju naslage eocenskih forameniferskih vapnenaca. Sadrže bogatu zajednicu rudista, karakterističnih za donji senon. Rudistna fauna zastupljena je radiolitima i hipuritima, od kojih su zabilježene slijedeće vrste: *Radiolites cf. trigeri*, *R. radius*, *Praeradiolites anatolicus*, *P. husitanicus*, *Hippurites (Orbignya) canaliculatus*, *H. (O.) matheroni*, *H. (O.) toucasianus*, *H. (O.) turgidus*, *H. (O.) mirostylus*, *Hippurites (Hipuritella) maestrei*, *H. (O.) sublaevis*, *H. (O.) praecessor*, *H. (O.) socialis*, te *Hippurites (Vaccinites) praesulcatus*. Unutar naslaga s faunom radiolita, pitonela i siera prepoznat je jedan uži pojas koji bi odgovarao naslagama donjeg senona (konijak), dok bi preostali dio vapnenaca s hipuritima pripadao santonu, uz mogućnost postojanja donjeg kampana.

Najčešći litološki član su vapnenci, unutar koji se mogu javljati dolomitični vapnenci i dolomiti, najčešće u obliku tanjih uložaka, te manjih leća. Od vapnenaca su najčešći kalcilutiti, a nešto rjeđe se pojavljuju kalkareniti i bioakumulirani vapnenci. Boja vapnenaca je slična kao i u cenoman–turonskoj, od svjetlosivih do smeđih varijeteta. Dobro su uslojeni, a debljina slojeva varira od 40 – 60 cm. Viši dijelovi senonskih vapnenaca mogu biti erodirani, pa u skladu s tim debljina varira između 350 – 400 m (SOKAČ i dr., 1976).

### **2.3.2. Tercijarne (paleogenske) naslage**

Tercijarne naslage razvijene su unutar karbonatnog i klastičnog facijesa. Karbonatni facijes je stariji član, a odgovara donjo i srednjoeocenskim forameniferskim vapnencima, dok mlađi klastični član odgovara naslagama eocenskog fliša (Slika 2–4).

T E R C I J A R	P a l e o g e n		E <sub>01</sub>	?	Vapnenačke breče rjeđe konglomerati i kalkareniti
			E <sub>2,3</sub>	350	Lapori i pješčenjaci u izmjeni, kalkareniti i biokalkareniti s <i>Acarinina rotundimarginata</i> , <i>Hantkenina alabamensis</i> , <i>Truncorotaloides rohri</i> i <i>Globigerina corpulenta</i>
			E <sub>1,2</sub>	250	Kalkareniti i biokalkareniti s <i>Alveolina oblonga</i> , <i>A. canavarii</i> , <i>Nummulites millecaput</i> i dr.

Slika 2–3. Detalji geološkog stupa s razvojem paleogenskih naslaga otoka Paga (SOKAČ i dr., 1976)

### FORAMENIFERSKI VAPNENCI (E<sub>1,2</sub>)

Forameniferski vapnenci su razvijeni u krilima paleogenskih sinklinala, poput Paške sinklinala, gdje leže transgresivno na senonskim vapnencima. Pripadnost donjem i srednjem eocenu potvrđena je brojnim mikrofosilima, gdje prevladavaju foramenifere po kojima je član dobio zajednički naziv. Najznačajnije vrste su: *Lituonella liburnica*, *L. roberti*, *Orbitolites douvillei*, *Alveolina (Glomalveolina) minutula*, *A. oblonga*, *A. collosa*, *A. canavarii*, *Nummulites globulus*, *N. millecaput*, *N. atacius*, te najmlađa *Discocyclina discus*. Zabilježeno je i postojanje nekih makrofosila, gdje je najčešća vrsta *Conoclypeus conoideus*, a prisutni su i slabo očuvani fragmenti ježinaca i oštriga.

Litološki gledano, ovaj član je predstavljen vapnenačkim sedimentom. Riječ je o mikrokristalastom vapnencu s osnovom rekristaliziranog mikrokristalastog kalcita, tipa kalcilutita i kalkarenita, gdje udio CaCO<sub>3</sub> doseže gotovo 100%. Debljina tako opisanih naslaga iznosi oko 250 m.

### LAPORI, PJEŠČENJACI I VAPNENCI (E<sub>2,3</sub>)

U literaturi se pod pojmom lapora, pješčenjaka i vapnenaca srednjeg i gornjeg eocena podrazumijevaju flišne naslage. Riječ je o naslagama koje se kontinuirano nastavljaju na forameniferske vapnence, gdje izgrađuju jezgru paleogenskih sinklinala, poput spomenute Paške sinklinala. Prijelaz je oštar uz povremenu pojavu laporovitih vapnenaca s glaukonitom, koji nisu kontinuirani po pružanju, pa ih vrlo često nalazimo u obliku leća s oštrim bočnim prijelazom u lapore i pješčenjake (SOKAČ i dr., 1976).

S obzirom na fosilni sadržaj i svoje petrografske karakteristike, ove naslage su istovjetne slojevima s rakovicama dokazanim na području Istre i Dalmacije. Unutar flišnih naslaga pronađena je bogata zajednica sitnih vapnenačkih foramenifera, od kojih su

najvažnije vrste: *Globigerapsis kugleri*, *Globigerina boweri*, *Acarinina rotundimarginata*, *Hantkenina alabamensis*, *Truncorotaloides triplensis* i *T. rohri*. Oblici kao *Globigerina corpulenta* i *Globorotalia cocoensis* su karakteristične za gornji eocen, dok vrste kao *Globigerina officinalis* i *Cibicides pseudogerianus* spadaju i pod donji oligocen. Stoga se ovaj cijeli klastični kompleks svrstava u srednji i gornji eocen, s mogućim prijelazom u donji oligocen.

Litološki, ove naslage su predstavljene izmjenom pješčenjaka i lapora, u kojoj lapori prevladavaju. Udio  $\text{CaCO}_3$  kreće se između 45–62%. Osim prevladavajućeg vapnenačkog detritusa, sporadično se javljaju i zrna kvarca, čerta, kvarcita i glinenca. Petrografski, naslage bi odgovarale kvarckalkarenitima, debljine oko 350 m.

## 2.4. STRUKTURNI ODNOSI U ISTRAŽIVANOM PODRUČJU

Prema listovima OGK Gospić i Zadar, otok Pag je uvršten u geotektonsku jedinicu Istra–Dalmacija, odnosno u tektonsku jedinicu Ravni Kotari. Posljednja se odlikuje blago do srednje strmim, uspravnim do malo nagnutim borama dinaridskog pravca pružanja (SZ–JI). U pravilu, naslage u krilima većih, kilometarskih bora također su borana u nizu metarskih, parazitskih bora, također uz pojavu rasjeda. Dio otoka Paga obuhvaćen ovim istraživanjem izgrađuju dvije uspravne i simentrične antiklinale, antiklinala Caska–Grabovac i antiklinala Novalja, u čijim jezgrama su otkrivene gornjokredne naslage. Antiklinala Novalja najmarkantniji je strukturni oblik ove tektonske jedinice. Toj uspravnoj antiklinali s također sekundarno boranim tjemenom os tone prema sjeverozapadu. Ispresijecana je uzdužnim, poprečnim i dijagonalnim rasjedima, dok su joj krila različito ustrmljena. Kredne naslage u jezgri antiklinale Caska–Grabovac tonu pod forameniferske vapnence i flišne naslage paleogena. Antiklinala Caska–Grabovac i antiklinala Novalja odvojene su Paškom sinklinalom čiju jezgru otkrivenu na površini čine naslage paleogena. Unutar jezgri sinklinala, uz spomenute paleogenske naslage, pojavljuju se i kvartarne naslage koje leže transgresivno na starijoj paleogenskoj podlozi.



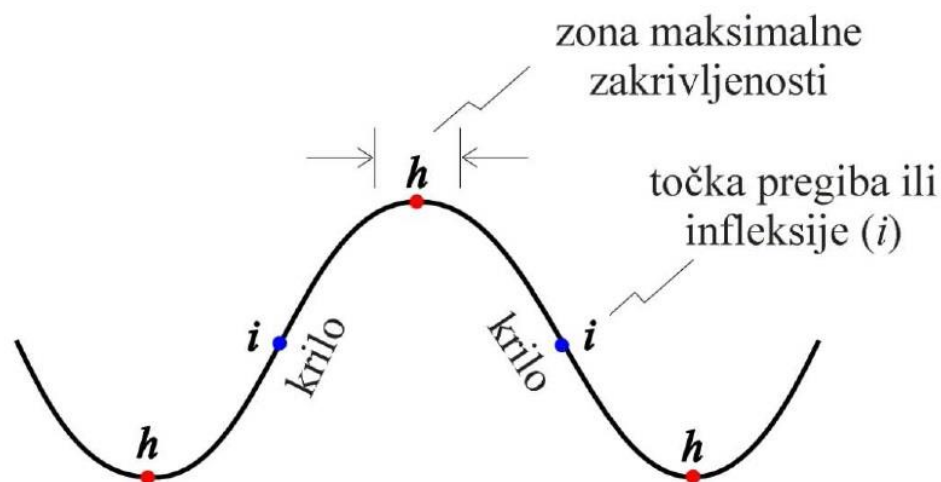
### 3. TEORIJSKE OSNOVE STRUKTURNE ANALIZE BORA I RASJEDA, TE OSNOVE PRORAČUNA PALEONAPREZANJA

#### 3.1. BORE

Bore su deformacijske strukture koje nastaju savijanjem, nabiranjem ili boranjem planarnih strukturnih elemenata u stijenama i/ili stijenskim tijelima (npr. slojnih ploha, ploha folijacije, škriljavosti, klivaža, pločastih magmatskih tijela i sl.) (TOMLJENOVIĆ, 2015).

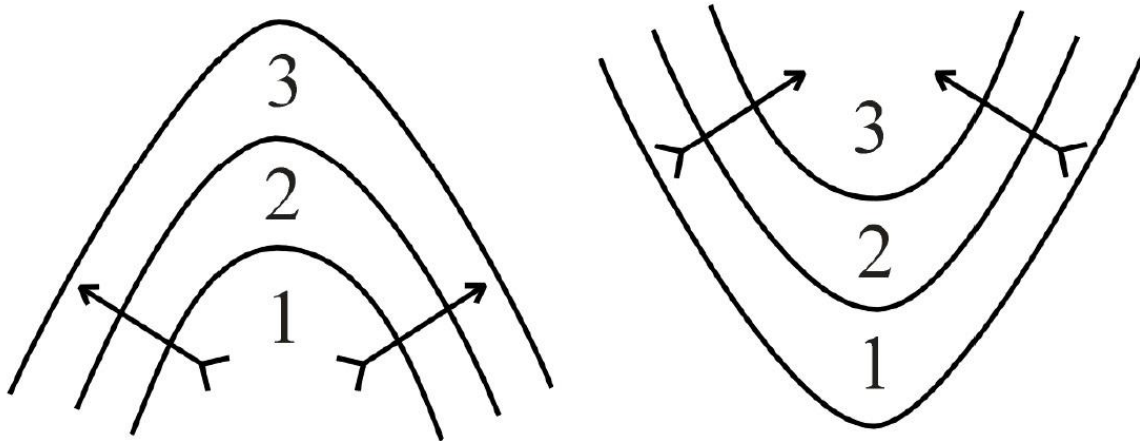
Osnovni geometrijski elementi bore (Slika 3–1) su:

1. Točke (zone) maksimalne zakrivljenosti – zone u kojima je zakrivljene borane plohe najveća ( $h$ )
2. Točke pregiba (infleksije) – točke u krilima bora u kojima je zakrivljenost jednaka nuli ( $i$ )
3. Linija maksimalne zakrivljenosti – niz točaka maksimalne zakrivljenosti na istoj plohi bore
4. Linija pregiba – niz točaka pregiba na istoj plohi bore; dijeli boru u dva dijela s različitim predznakom zakrivljenosti
5. Jezgra bore – središnji dio bore
6. Tjeme bore – točka na boranoj plohi antiforme s najvećom vrijednosti nadmorske visine
7. Dno bore – točka na boranoj plohi sinforme s najnižom vrijednosti nadmorske visine



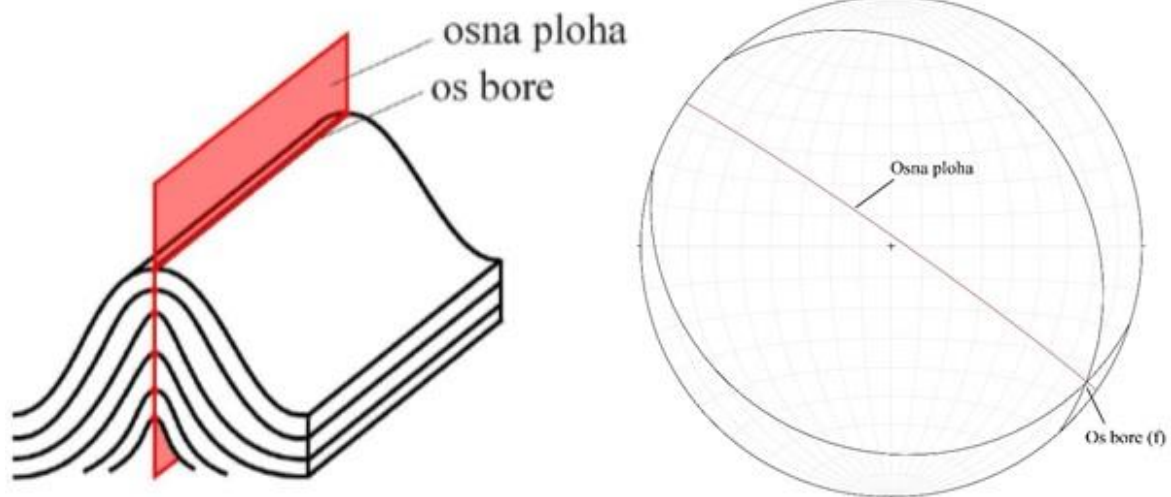
Slika 3–1. Teoretski primjer bore s označenim točkama maksimalne zakrivljenosti i točkama pregiba (preuzeto iz TOMLJENOVIĆ, 2015)

Dva najčešća tipa bora su antiklinale, gdje idući iz jezgre prema krilima bore nalazimo stratigrafski sve mlađe i mlađe stijene, te sinklinala kod koje idući iz krila prema jezgri bore nalazimo na stratigrafski sve mlađe i mlađe stijene (Slika 3–2).



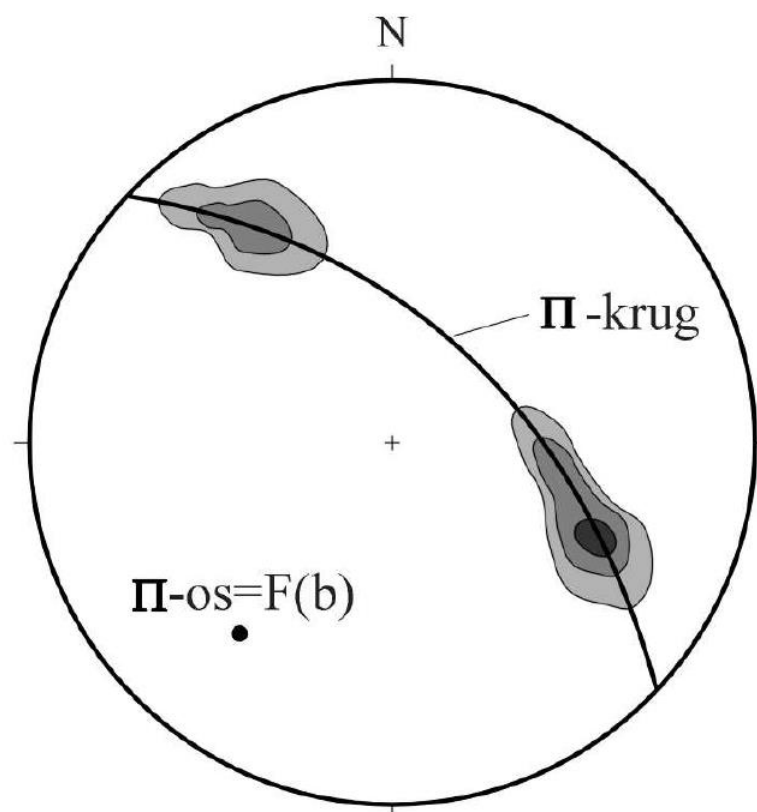
**Slika 3–2. Teoretski izgled antiklinale (lijevo) i sinklinalne (desno); brojevi 1–3 označavaju stratigrafski sve mlađe naslage (TOMLJENOVIC, 2015)**

Orijentacija bore u prostoru određuje se mjerenjem orijentacije osne plohe i osi bore. Osnova ploha bore je zamišljena ploha u kojoj leže sve linije maksimalne zakrivljenosti i koja dijeli boru na dva dijela (Slika 3–3). Trag osne plohe je presječnica osne plohe s bilo kojom drugom ravninom ili plohom. Trag osne plohe iskazuje se u profilu bore kao linija na kojoj leže sve točke maksimalnih zakrivljenosti boranih ploha. Orijentacija osne plohe određuje se njenim pružanjem, smjerom i kutom nagiba. Os bore se najčešće definira kao presječnica osne plohe i svake plohe promatrane bore, te na taj način os bore odgovara svakoj pojedinoj liniji maksimalne zakrivljenosti bore. Orijentacija osi bore određuje se smjerom i kutom nagiba kada je riječ o nagnutim osima, odnosno pružanjem u slučaju horizontalnih osi.



**Slika 3–3. Teoretski izgled osne plohe i osi bore(TOMLJENović, 2015), te stereografska projekcija osne plohe i osi bore na jugoistoku otoka Paga (vidi poglavlje 4.)**

Orijentacija osi bore se posredno može odrediti konstrukcijom  $\beta$  – ili  $\pi$  – dijagrama u stereografskoj projekciji.  $\beta$  – dijagram je grafička metoda proračuna orijentacije osi bore koja se temelji na geometrijskom obilježju tzv. cilindrične bore u kojoj sve plohe sadrže os bore, pa je stoga presječnica bilo kojih dviju ploha bore paralelna s osi bore. Ova presječnica naziva se  $\beta$  – presječnica.  $\pi$  – dijagram je grafička metoda koja se također temelji na geometrijskom obilježju cilindrične bore gdje vrijedi da su sve normale na plohe bore okomite na njenu os. Na taj način će u idealnom slučaju, stereografskom projekcijom normala na plohe bore, sve normale ležati u ravnini koja je upravo okomita na traženu os bore. S obzirom da se metoda  $\pi$  – dijagrama u pravilu koristi kod proračuna osi bora za koje je izmjeren veći broj ploha (najčešće više od 10 ploha), tada se zbog projekcije normala na stereogramu provodi postupak prevođenja točkastog dijagrama u konturni dijagram (Slika 3–4).

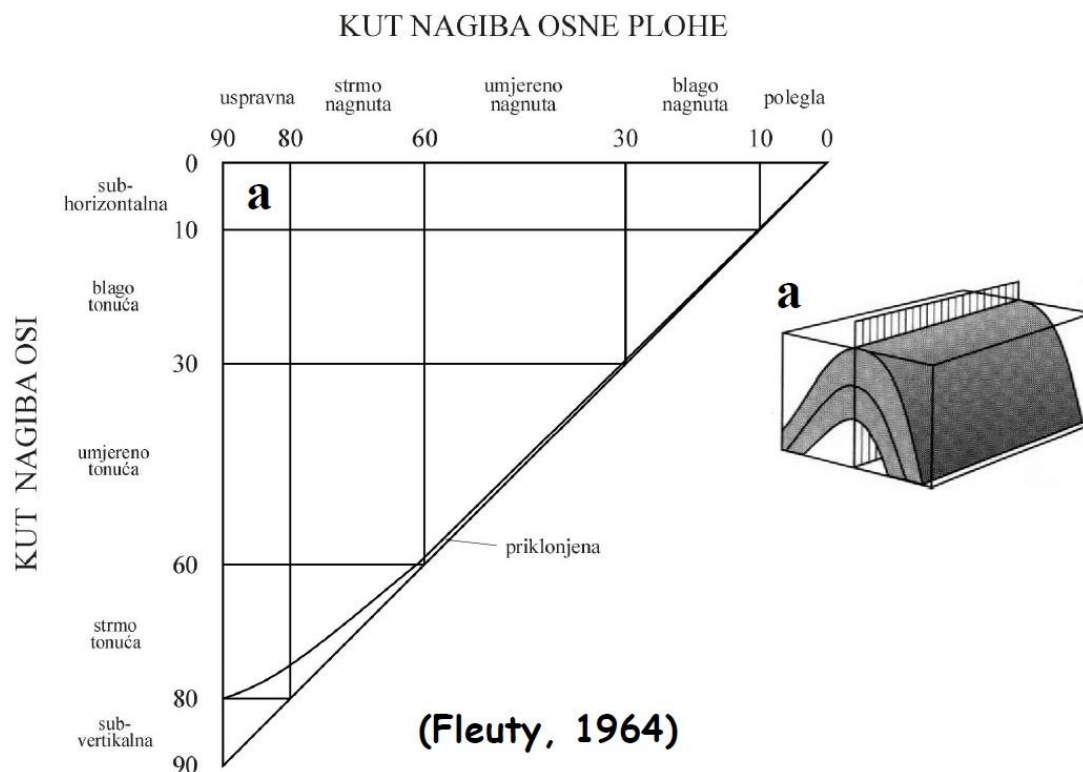


Slika 3-4. Primjer konturnog dijagrama s označenim tragom  $\pi$  – kruga i proračunatom osi bore (TOMLJENović, 2015)

### 3.1.1. Klasifikacija bora

Bore se mogu klasificirati na temelju brojnih geometrijskih parametara koji opisuju njihov oblik i orijentaciju. Najčešća klasifikacija bora je na temelju nagiba osne plohe gdje razlikujemo: uspravne, kose, prebačene, polegle i utonule bore.

FLEUTY (1964) je napravio dijagram klasifikacije bora prema nagibu osne plohe i osi bore (Slika 3-5). Prema nagibu osne plohe podijelio ih je na: uspravne (kut nagiba osne plohe  $80-90^\circ$ ), strmo nagnute ( $60-80^\circ$ ), umjereno nagnute ( $30-60^\circ$ ), blago nagnute ( $10-30^\circ$ ), te polegle ( $0-10^\circ$ ). Prema nagibu osi bore, podijelio ih je na: subhorizontalne (kut nagiba osi bore  $0-10^\circ$ ), blago tonuće ( $10-30^\circ$ ), umjereno tonuće ( $30-60^\circ$ ), strmo tonuće ( $60-80^\circ$ ), te subvertikalne bore ( $80-90^\circ$ ).



**Slika 3–5. Dijagram klasifikacije bora po FLEUTY–ju (1964) (TOMLJENović, 2015)  
(a– uspravna, subhorizontalna bora)**

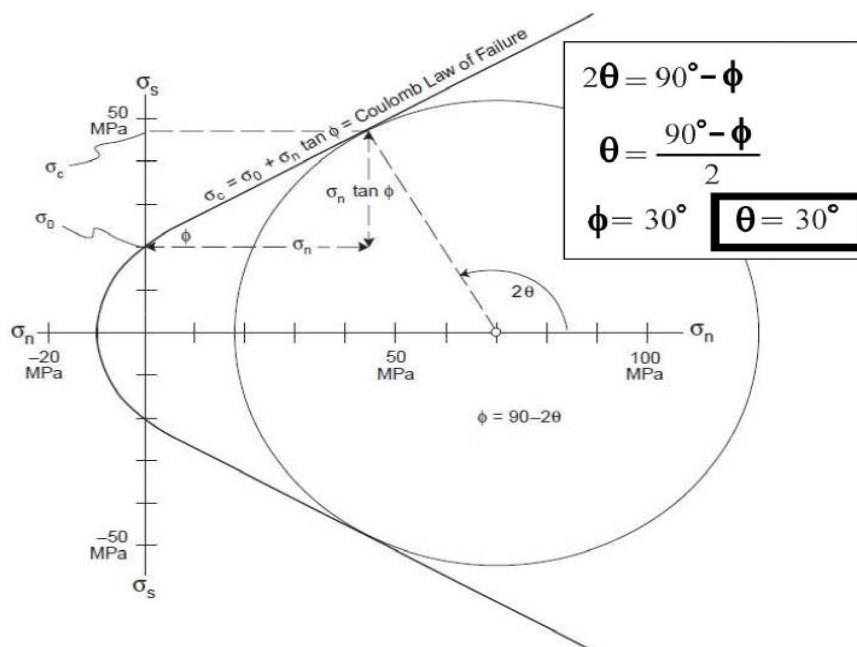
Bore se klasificiraju i prema veličini međukrilnog kuta bore što ga zatvaraju tangente na krila bore projicirane kroz točke pregiba. Prema veličini međukrilnog kuta razlikuju se: blage bore ( $180^\circ < \alpha < 120^\circ$ ), otvorene bore ( $120^\circ < \alpha < 70^\circ$ ), zatvorene bore ( $70^\circ < \alpha < 30^\circ$ ), zbijene ( $30^\circ < \alpha < 0^\circ$ ), izoklinalne ( $\alpha = 0^\circ$ ), te lepezaste bore gdje je međukrilni kut negativnog predznaka.

### 3.2. RASJEDI

Rasjedi su posmične pukotine duž kojih su stijene ili stijenska tijela pomaknuta s jedne u odnosu na drugu stranu pukotine većem od par centimetara. Smjer i veličina pomaka po rasjedu je definirana vektorom pomaka rasjeda. U slučaju da je veličina pomaka manja od 1 cm takve strukture se nazivaju smičnim pukotinama ili mikrorasjedima. Rasjedi nastaju kao posljedica diferencijalnog naprezanja u Zemljinoj kori u trenutku kada posmično naprezanje premaši posmičnu čvrstoću stijene. Proračun orijentacije naprezanja kod rasjeda i smičnih pukotina temelji se na Mohr–Coulomb–ovu zakonu loma koji definira specifične uvjete pod kojima se u uvjetima tlačnog naprezanja formiraju smične pukotine i/ili rasjedi, a koji je izražen jednačinom:

$$\sigma_c = \sigma_0 + \sigma_n \tan \Phi \quad (3.1.)$$

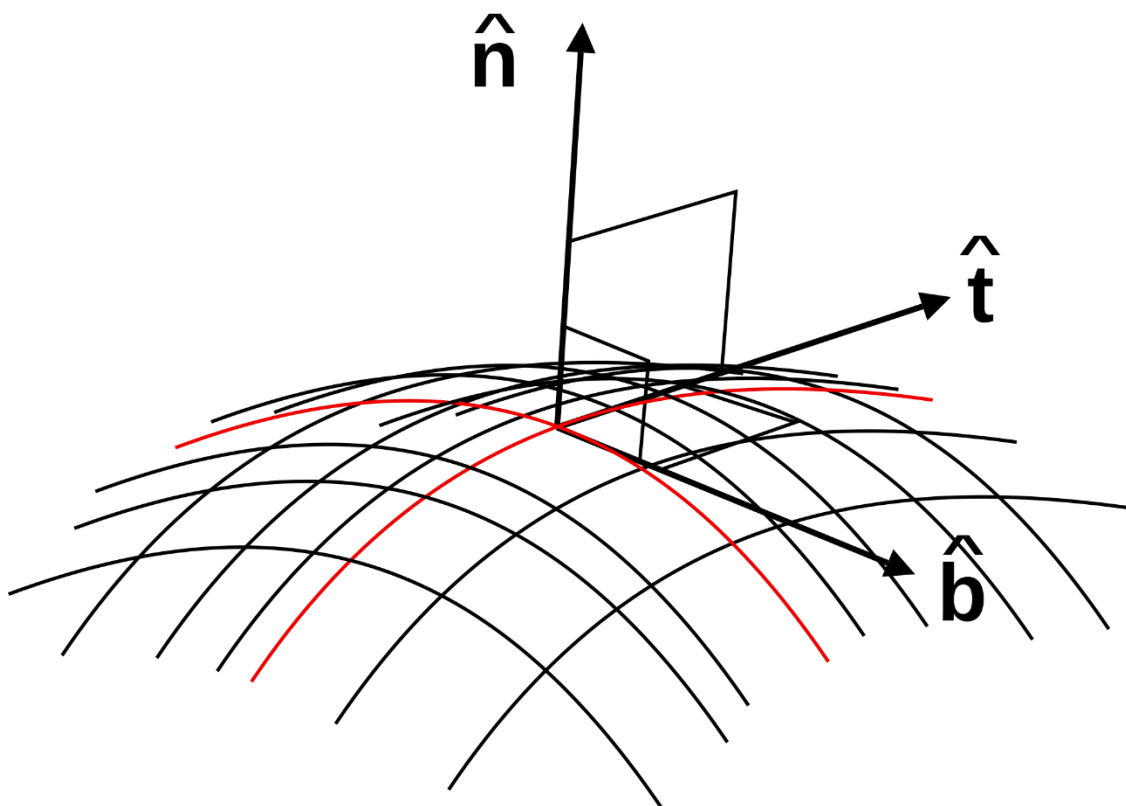
gdje je:  $\sigma_c$  posmična čvrstoća,  $\sigma_0$  kohezivna čvrstoća,  $\sigma_n$  veličina vektora normalnog naprezanja,  $\Phi$  kut unutrašnjeg trenja stijene ( $\tan \Phi$  je koeficijent unutrašnjeg trenja stijene). Fizički parametri ovog zakona koji definiraju uvjete pod kojima dolazi do formiranja smičnih pukotina i/ili rasjeda se uobičajeno prikazuju Mohrovom kružnicom naprezanja, uz koju se prikazuje i anvelopa sloma za određeni tip stijene, a koja omeđuje polje stabilnosti od polja loma (Slika 3–6).



Slika 3–6. Mohrova kružnica posmičnog naprezanja nadopunjena sa anvelopom sloma za tipični pješčenjak (DAVIS & REYNOLDS, 1996; TOMLJENOVIĆ, 2015)

Kut unutrašnjeg trenja za većinu stijena varira između 25–35° (prosječno 30°), iz čega slijedi da će i kut  $\Phi$ , odnosno oštri kut između najveće osi naprezanja  $\sigma_1$  i smične pukotine za većinu homogenih stijena također iznositi 30°.

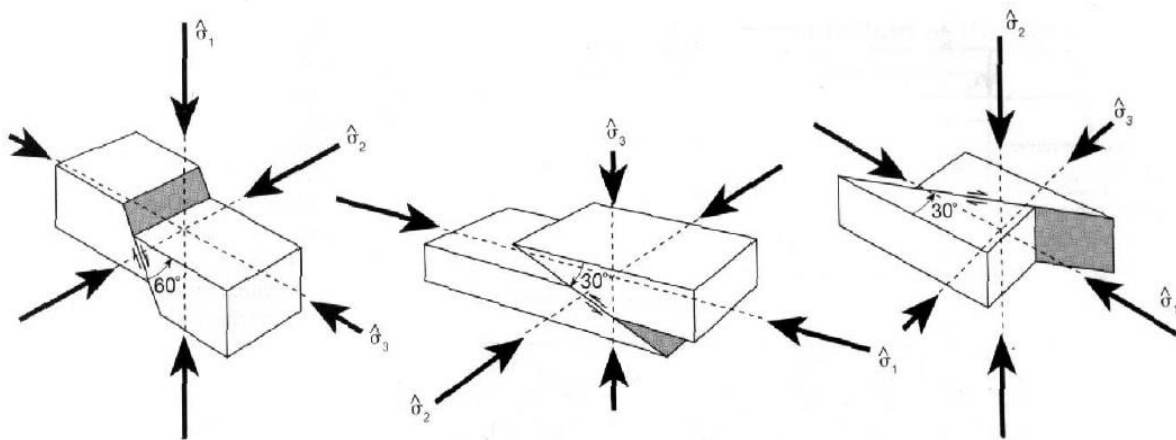
ANDERSON (1905) prepoznaje važnost Mohr–Coulomb–ovog zakona u objašnjenju pojave različitih tipova rasjeda u Zemljinoj kori pa predlaže hipotezu koja se temelji na dvije ključne pretpostavke: 1. pri postanku pukotina i rasjeda u stijenama Zemljine kore vrijedi Mohr–Coulomb–ov zakon loma; 2. na Zemljinoj površini nema komponente posmičnog naprezanja (jedina iznimka, iako zanemariva, je u slučaju jakog vjetrova), pa stoga slijedi da je jedan od triju glavnih vektora naprezanja u Zemljinoj kori okomit na tu površinu, dok su preostala dva glavna vektora s njom paralelna (Slika 3–7).



Slika 3–7. Teoretski odnos glavnih osi naprezanja na površini Zemlje  
([https://en.wikipedia.org/wiki/Unit\\_vector](https://en.wikipedia.org/wiki/Unit_vector))

S obzirom na tri moguća položaja glavnih vektora naprezanja u odnosu na Zemljinu površinu, ANDERSON (1905) predlaže model koji objašnjava orijentaciju i formiranje triju različitih tipova rasjeda u idealnim uvjetima (Slika 3–8). Na taj način proizlazi da je kod normalnih rasjeda glavni vektor, odnosno najdulja os naprezanja  $\sigma_1$  vertikalne orijentacije, tvoreći tako ekstenzijsko polje naprezanja u kojem nastaju rasjedi s prosječnim kutom nagiba od 60°. U slučaju reversnih rasjeda najdulja i srednja os naprezanja  $\sigma_1$  i  $\sigma_2$  su horizontalne orijentacije, tvoreći tako kompresijsko polje naprezanja u kojem nastaju reversni rasjedi s

blažim kutom nagiba od oko 30°. I konačno, u slučaju kada su najdulja i najkraća os naprezanja  $\sigma_1$  i  $\sigma_3$  horizontalne orijentacije nastat će rasjedi s horizontalnim pomakom (lijevi i desni rasjedi), s rasjednim plohama vertikalne orijentacije.



Slika 3–8. Andersonova teorija rasjedanja i odnos glavnih osi naprezanja prema različitim vrstama rasjeda (iz TWISS i MOORES, 1992)

### 3.2.1. Metode proračuna paleonaprezanja na temelju rasjeda i/ili smičnih pukotina

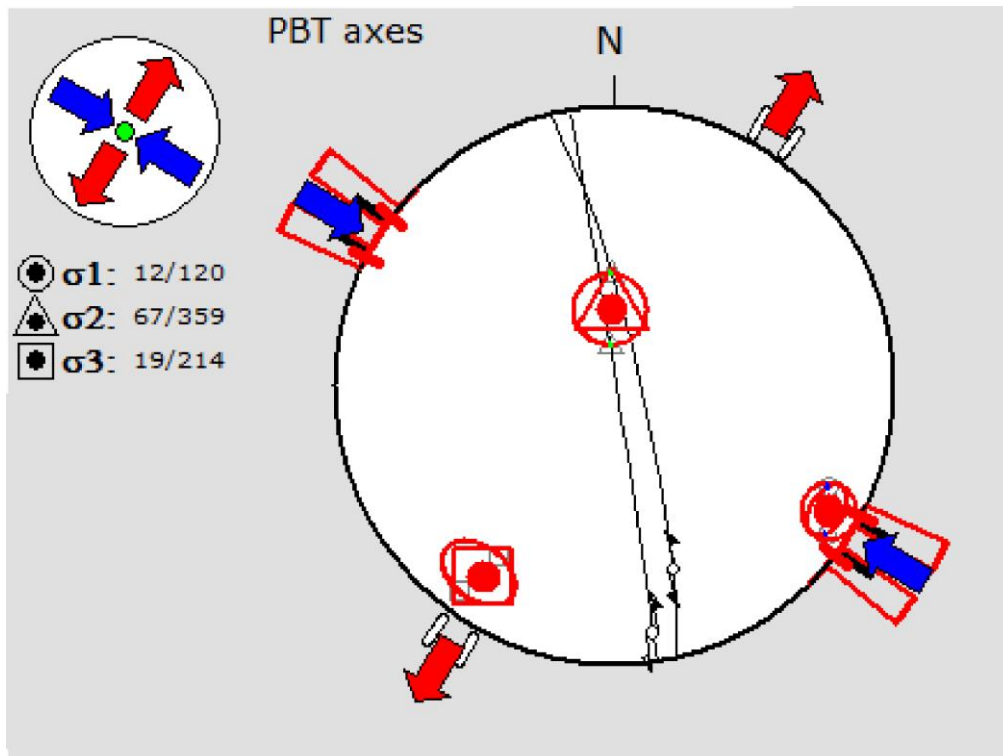
Na temelju brojnih terenskih istraživanja dokazano je da je Andersonova teorija rasjedanja preopćenita, te da je potrebno uvesti nove metode i tehnike za dinamičku analizu rasjeda i proračun paleonaprezanja. U ovom radu korišten je programski paket *Win-Tensor* (DELVAUX, 2010) pomoću kojeg je izračunato paleonaprezanje za pojedine grupe rasjeda na istraživanom području otoka Paga. Unutar programa moguće su dvije vrste analize, P–T metoda (unutar programa nazvana *P B T axes*) te NDA metoda (unutar programa nazvana *Right dihedron method*), te će stoga princip obje metode biti ukratko opisan.

#### 3.2.1.1 P B T axes (P–T metoda)

Ova metoda paleonaprezanja se temelji na starijoj, grafičkoj metodi koju je predložio TURNER (1953), a koristi se za proračun glavnih osi naprezanja; kompresijske P–osi i tenzijske T–osi. Glavna prednost metode je u njejoj jednostavnosti, gdje nije nužno korištenje računalnih programa što omogućava proračun glavnih osi naprezanja odmah na terenu uz pomoć Schmidtove mreže za stereografsko projiciranje. Metodom se računa paleonaprezanje za svaki rasjed unutar pojedine grupe rasjeda na način da se rasjedna ploha i njen vektor pomaka projiciraju unutar stereografske projekcije. Potom se kroz pol normale rasjedne plohe



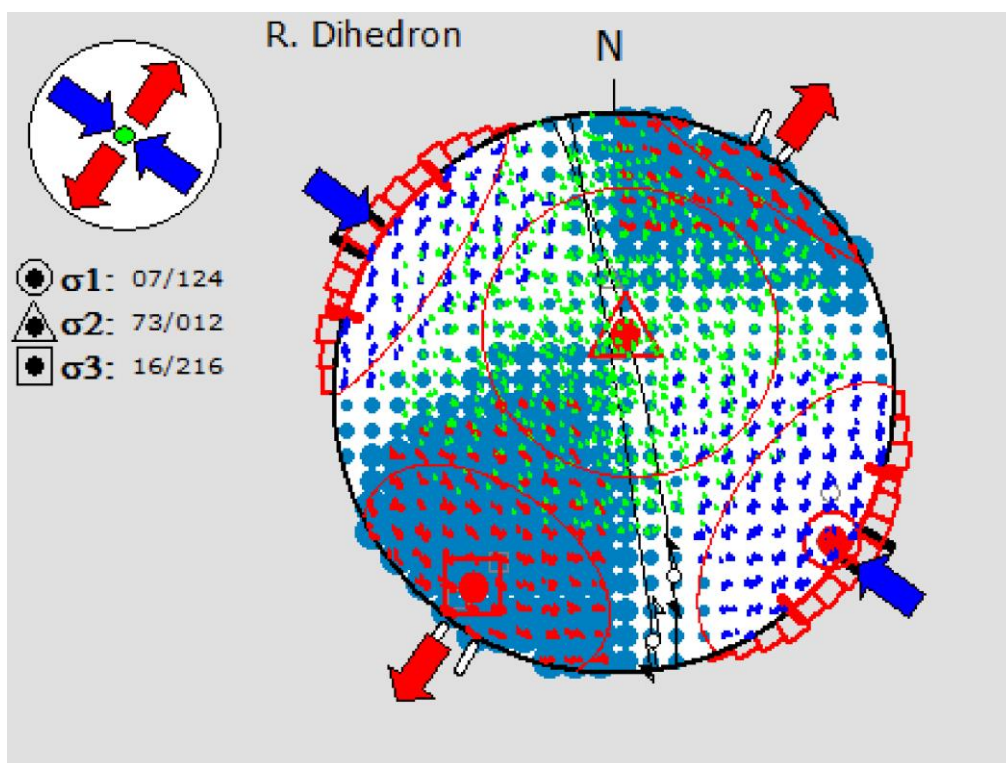
projicira ravnina smicanja, na kojoj leže P i T osi pod kutem  $45^\circ$  u odnosu na pol normale rasjedne plohe. Primjer tako izračunatog paleonapreznja prikazan je na slici 3–9.



Slika 3–9. Stereografska projekcija proračuna P i T osi s njihovim orijentacijama za izmjereni set rasjeda (vidi poglavlje 4.3.)

### 3.2.1.2 Right diedron (NDA) metoda

Ova metoda razvijena je nešto kasnije od P–T metode, a prvi ju je predložio SPANG (1972), dok je detaljno unaprijeđena od strane ANGELIER i GOUGEL (1979) te SPERNER (1990). Slično P–T metodi, i ona pretpostavlja podudarnost između P–osi s najvećom osi napreznja,  $\sigma_1$ , odnosno T–osi s najmanjom osi napreznja,  $\sigma_3$ . Glavna razlika između metoda je što se proračun napreznja temelji na kinematskim pokazateljima svih podataka unutar grupe rasjeda, a ne za svaki rasjed posebno. S obzirom na navedeno, i dobivene vrijednosti će se razlikovati od onih dobivenih P–T metodom. NDA metoda se pokazala pouzdanijom u terenima s ranije postojećim pukotinskim i rasjednim sustavima, gdje se P–os neće podudarati s najvećom osi napreznja nego će se nalaziti unutar tzv. P–kvadranta, jednako kao što će se T–os nalaziti unutar T–kvadranta. Stereografski prikaz ove metode sadržavati će dva kvadranta, ekstenzijski (P) i kompresijski (T), koji su odvojeni s dvije rasjedne plohe koje označavaju konjugirani par rasjeda za analiziranu grupu rasjeda, kao što je vidljivo na slici 3–10.

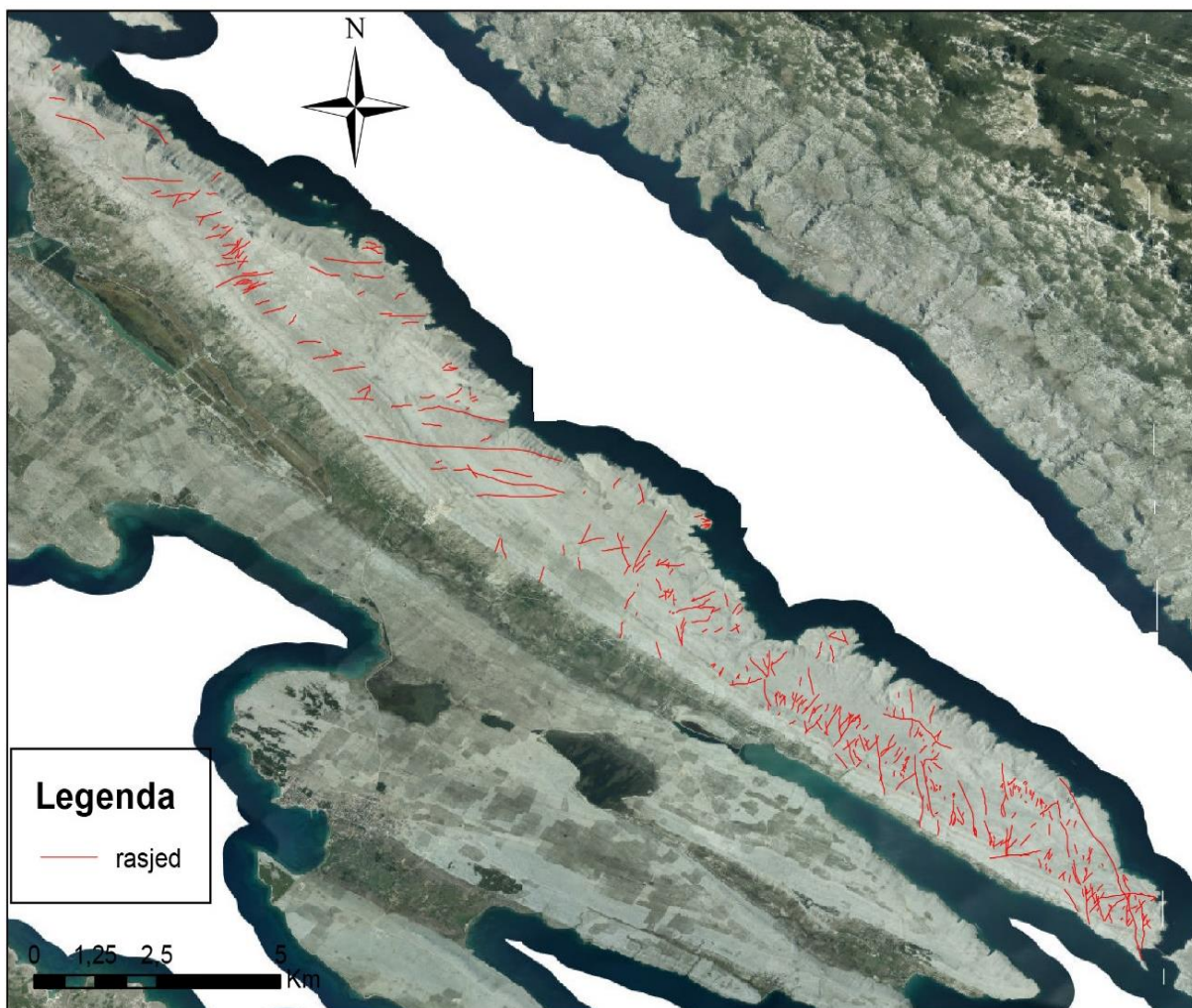


Slika 3–10. Stereografska projekcija Right diedron metode (NDA) za jednu grupu rasjeda na istraživanom području (vidi poglavlje 4.3.)

## 4. REZULTATI ISTRAŽIVANJA

### 4.1. STRUKTURNA ANALIZA AEROFOTO I SATELITSKIH SNIMAKA

Prvi korak u izradi ovog diplomskog rada bio je pregled postojećih aerofoto i satelitskih snimaka otoka Paga. U periodu od veljače do svibnja 2015. godine, satelitske aerofoto snimke sa internetskih stranica Državne geodetske uprave (DGU, [www.geoportal.dgu.hr](http://www.geoportal.dgu.hr)) pregledane su unutar programskog paketa ArcGIS 10.1. Na temelju analize snimaka zabilježeno je postojanje 463 lineamenta, od kojih većina predstavlja rasjede, s obzirom na vidljiv pomak istovjetnih geoloških granica (najčešće istovjetnih tragova slojnih ploha ili granica između naslaga) uzduž njihovih tragova (Slika 4–1).



Slika 4–1. Prikaz zabilježenih lineamenata u istraživanom dijelu otoka Paga analizom digitalnih ortofoto snimki (DOF) u programu ArcGIS 10.1.

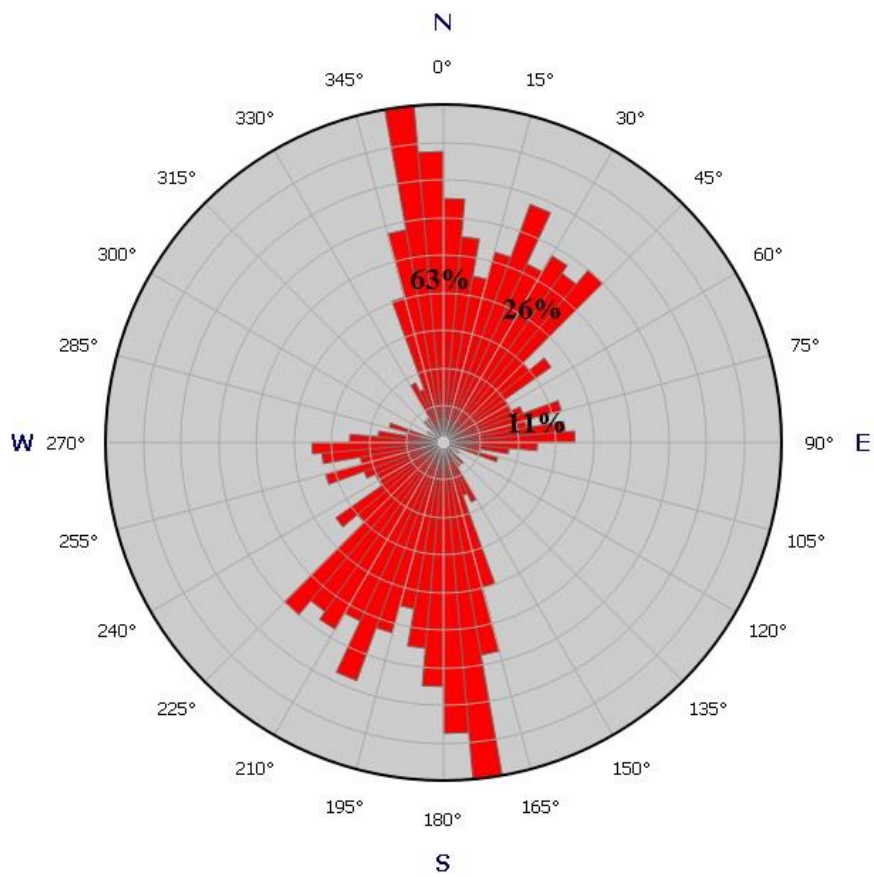
Pomoću ekstenzije *Graphics and Shapes* unutar programskog paketa ArcGIS 10.1. za svaki lineament, odnosno mogući rasjed izračunat je njegov prosječan azimut pružanja. S

obzirom na izmjerene azimute pružanja lineamenti su podijeljeni u razrede po 30° prikazane na rozeta dijagramu (Slika 4–2) i u Tablici 4–1.

**Tablica 4–1. Tablica s raspodjelom azimuta pružanja lineamenata/rasjeda na istraživanom području utvrđenih analizom aerofoto i satelitskih snimaka na istraživanom području otoka Paga**

Središnji azimut (°)	Broj lineamenata / rasjeda	Udio (%)
0 (180)	158	34,1253
30 (210)	134	28,9417
60 (240)	62	13,3909
90 (270)	59	12,743
120 (300)	10	02,1598
150 (330)	40	08,6393
$\Sigma$	<b>463</b>	<b>100 %</b>

Na temelju izmjerenih podataka azimuta pružanja, zabilježeni lineamenti se mogu svrstati u tri skupine (Slika 4–2). Najbrojniju skupinu čine lineameni/rasjedi s pružanjem između 345° i 15°, odnosno približnog pružanja S–J. Takva orijencija lineamenata/rasjeda, čije je pružanje dijagonalno u odnosu na dinaridsko pružanje SZ–JI je i najčešće zabilježena na OGK listu Gospić (SOKAČ i dr., 1976) u dijelu koji prikazuje središnji dio otoka Paga.. Drugu, također brojnu skupinu (134 lineamenta) čine lineamenti/rasjedi s pružanjem SI–JZ, okomito na dinaridsko pružanje. Na OGK listu Gospić (SOKAČ i dr., 1976) u dijelu koji obuhvaća područje istraživanja, takvi rasjedi su vrlo rijetko zabilježeni. Treću skupinu koja je ujedno i najmanje brojna čine lineamenti/rasjedi pružanja I–Z što je dijagonalno na dinaridsko pružanje. Takve strukture su zabilježene i na OGK listu Gospić (SOKAČ i dr., 1974), većinom u zoni kredne antiklinale.



**Slika 4–2. Rozeta dijagram s prikazom azimuta pružanja pretpostavljenih lineamenta/rasjednih ploha utvrđenih analizom aerofoto i satelitskih snimaka na istraživanom području otoka Paga**

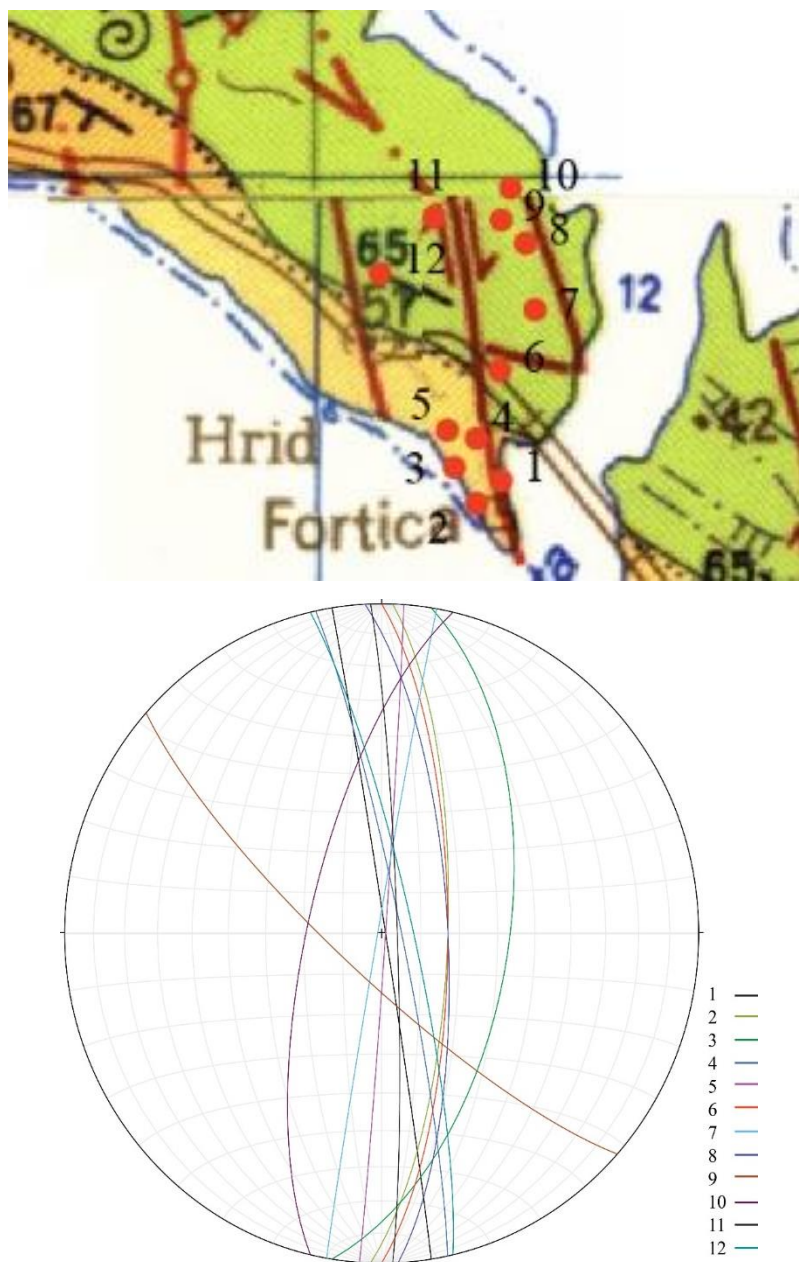
## **4.2. TERENSKA MJERENJA**

Terenskom, strukturnom analizom u istraživanom dijelu otoka Paga zabilježeni su strukturni podaci o geometrijskim i kinematskim značajkama rasjeda, smičnih pukotina i orijentaciji slojeva. S obzirom na velik broj zabilježenih lineamenta/rasjeda na temelju analize aerofoto i satelitskih snimaka, podaci o kinematskim pokazateljima smicanja (strije i vlaknasti kristali kalcita u formi stepeničastih agregata) zabilježeni su razmjerno rijetko, u pravilu zbog izrazite okršenosti u karbonatnim stijenama. Veličina pomaka po analiziranim lineamentima variraju od nekoliko centimetara do preko stotinu metara, pa stoga predstavljaju rasjedne i smične plohe. Sva strukturna mjerenja orijentacije slojeva i rasjeda napravljena su pomoću geološkog kompasa, dok je položaj točaka mjerenja zabilježen pomoću mobitela na prethodno napravljenim i pripremljenim kartama unutar programa Avenza PDFMaps. Mjerenja su izvršena na karbonatnim naslagama otoka Paga tokom lipnja i srpnja 2015. godine. Svi prikupljeni podaci biti će prikazani u narednim potpoglavljima idući od jugoistočnog prema sjeverozapadnom dijelu područja istraživanja uz prikaz njihova prostornog položaja. Strukturni podatci prikazani su na kartama, profilima i u stereografskoj projekciji.

### **4.2.1. Jugoistočni dio istraživanog područja**

Lokacije terenskih strukturnih mjerenja nalaze se na krajnjem jugu otoka Paga, u blizini Paškog mosta i hrđi Fortica (Slika 4–3). Ovdje je izmjerena orijentacija 12 rasjednih ploha (Slika 4–4; Tablica 4–2), među kojima su rasjedi koji presjecaju kontakt između gornjokrednih naslaga i eocenskih forameniferskih vapnenaca (točka br. 1.), te rasjedi koji presjecaju slojeve unutar gornjokrednih naslaga. Na točki br. 1. zabilježen je normalni, desni rasjed s nagibom paraklaze prema istoku i pružanjem SSZ–JJI. On predstavlja najmarkantiju rasjednu strukturu, te se na satelitskoj snimci može pratiti po pružanju u duljini od gotovo 3,5 km. S obzirom da na južnom, površinski otkrivenom dijelu rasjed završava na rtu Fortica, u ovom je radu nazvan Fortičkim rasjedom. Posebnost ovog rasjeda, koji se na aerofoto i satelitskim snimkama prepoznaje kao rasjed s izraženom desnom komponentom pomaka kako je i označen na OGK listu Zadar (MAJCEN i dr. 1970), je u tome što su na njemu zabilježeni stepenasti agregati vlaknastog kalcita koji ukazuju na lijevi pomak po ovom rasjedu (Slika 4–5). Na taj način može se pretpostaviti polifazna aktivnost ovog rasjeda, uz mogućnost da je iz prethodno desnog rasjeda reaktiviran u lijevi rasjed no s manjom veličinom pomaka. Nekoliko paralelnih rasjeda nalazi se stotinjak metara zapadno od Fortičkog rasjeda (točke br.

3–5) unutar forameniferskih vapnenaca (Slika 4–6), kao i dvjestotinjak metara istočno od Fortičkog rasjeda unutar gornjokrednih naslaga (točke br. 6–10).



**Slika 4–3. Detalj s OGK lista Gospić (SOKAČ i dr., 1974) i lista Zadar (MAJCEN i dr., 1970) s označenim lokacijama mjerenih rasjeda 1–12 (gore), te stereografska projekcija zabilježenih rasjeda (dolje)**

**Tablica 4–2. Tablica sa strukturnim podacima izmjerenim na rasjedima na jugoistočnom dijelu područja istraživanja**

Lokacija: jugoistočni dio otoka Paga					
Litologija: kalkareniti, biokalkareniti, kalclutiti			Naslage: Foraminiferski i senonski vapnenci		Starost: gornja kreda – eocen
Točka br.	Smjer nagiba	Kut nagiba	Lineacija strija	Koordinate točaka mjerenja:	
1.	81	89	Ls 10° od J	N 44° 19' 32,14"	E 15° 15' 14,43"
2.	92	73	–	N 44° 19' 26,87"	E 15° 15' 13,10"
3.	99	57	–	N 44° 19' 28,17"	E 15° 15' 11,80"
4.	78	85	–	N 44° 19' 34,23"	E 15° 15' 12,06"
5.	94	89	–	N 44° 19' 35,27"	E 15° 15' 10,30"
6.	90	73	–	N 44° 19' 38,33"	E 15° 15' 18,45"
7.	280	89	–	N 44° 19' 48,33"	E 15° 15' 18,48"
8.	87	73	–	N 44° 19' 52,44"	E 15° 15' 17,56"
9.	222	79	–	N 44° 19' 56,38"	E 15° 15' 16,93"
10.	283	71	–	N 44° 19' 57,60"	E 15° 15' 17,43"
11.	88	86	–	N 44° 19' 58,41"	E 15° 15' 07,97"
12.	77	82	Ls 30° od J	N 44° 19' 50,73"	E 15° 15' 03,30"





**Slika 4-4. Subvertikalna ploha Fortičkog rasjeda (rasjed br. 1. u Tablici 4-1) (GPS koordinate N 44° 19' 27,44'' E 15° 15' 16,54'')**



**Slika 4-5. Rasjedna ploha Fortičkog rasjeda sa stepenastim agregatima vlaknastog kalcita koji ukazuju na lijevi pomak po rasjedu) (GPS koordinate N 44° 19' 32,35'' E 15° 15' 14,60'')**



**Slika 4–6. Rasjed s nagibom paraklaze prema istoku unutar forameniferskih vapnenaca na usjeku ceste kod rta Fortica (GPS koordinate N 44° 19' 28,07'' E 15° 15' 11,86'')**

Analizom satelitskih snimaka jugoistočnog područja otoka Paga, na središnjem dijelu tog područja zabilježena je hektometarska bora čija je lokacija prema podacima na OGK listu Zadar (MAJCEN i dr., 1970) u gornjokrednim naslagama. Tragovi slojeva kalkarenita i biokalkarenita defniraju površinsku projekciju ove bore, za koju se pretpostavljalo da je riječ o antiklinali (Slika 4–7). Promatrano na površinskoj projekciji, vidi se da je os ove antiklinale usmjerena prema JI. Jugozapadno krilo je blago zakrivljeno sa pravcem pružanja SZ–JI. Sjeverno krilo bore je reducirano, vjerovatno uslijed rasjeda koji prolazi kroz njega. U zoni maksimalne zakrivljenosti vidljive su simetrične parazitske bore M-tipa metarskih do dekametarskih dimenzija. Veličina međukrilnog kuta bore iznosi  $135^\circ$ , što odgovara blagim borama (engl. *gentle fold*,  $120^\circ < \alpha < 180^\circ$ ).



**Slika 4–7. Antiklinala unutar gornjokrednih naslaga s parazitskim borama u zoni maksimalne zakrivljenosti (obilježeno crvenom kružnicom)**

Unutar bore napravljena su strukturalna mjerenja, te su izmjerene orijentacije slojnih ploha ove bore (Tablica 4–3; Slika 4–8), čime je ona potvrđena kao antiklinala. Konstruirana je i strukturalna karta toga područja, te je izrađen jedan strukturalni profil poprečan na vrh

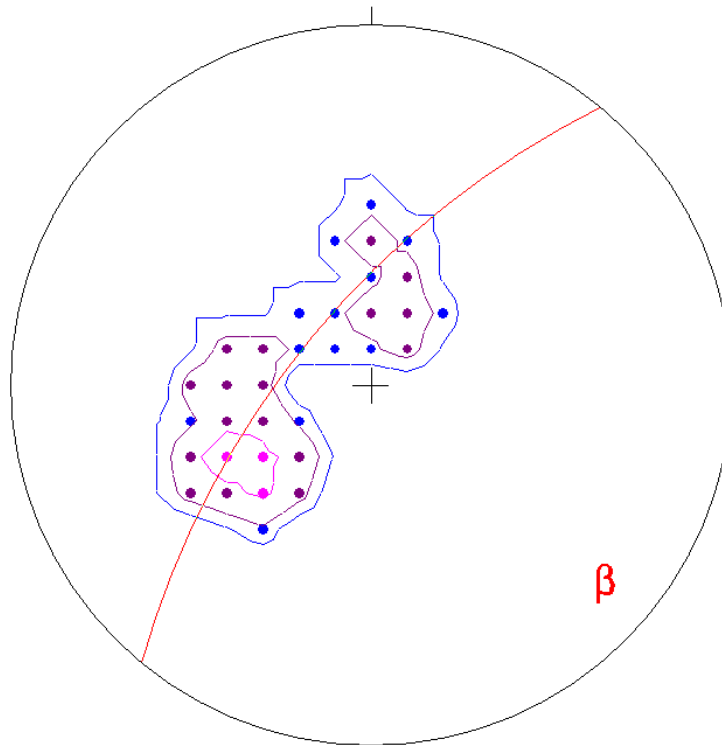
antiklinale (Prilog 2). Projekcijom polova normala ovih ploha proračunat je trag  $\pi$ -kruga i njegova normala čime je proračunata i orijentacija osi ove bore (Slika 4–9) smjera i kuta nagiba 130/17, što odgovara blago tonućim borama (kut nagiba osi 10 – 30°).

**Tablica 4–3. Tablica s izmjerenim podacima položaja slojevitosti unutar gornjokrednih naslaga na istraživanom području jugoistočnog dijela otoka Paga**

Lokacija: jugoistočni dio otoka Paga					
Litologija: kalkareniti, biokalkareniti, kalclutiti			Naslage: senonski vapnenci		Starost: gornja kreda
Točka br.	Smjer nagiba	Kut nagiba	Točka br.	Smjer nagiba	Kut nagiba
1.	198	19	11.	68	47
2.	180	12	12.	54	42
3.	88	32	13.	62	24
4.	106	37	14.	174	42
5.	94	30	15.	192	38
6.	80	39	16.	175	28
7.	50	34	17.	218	20
8.	50	33	18.	129	26
9.	48	24	19.	144	15
10.	62	38			

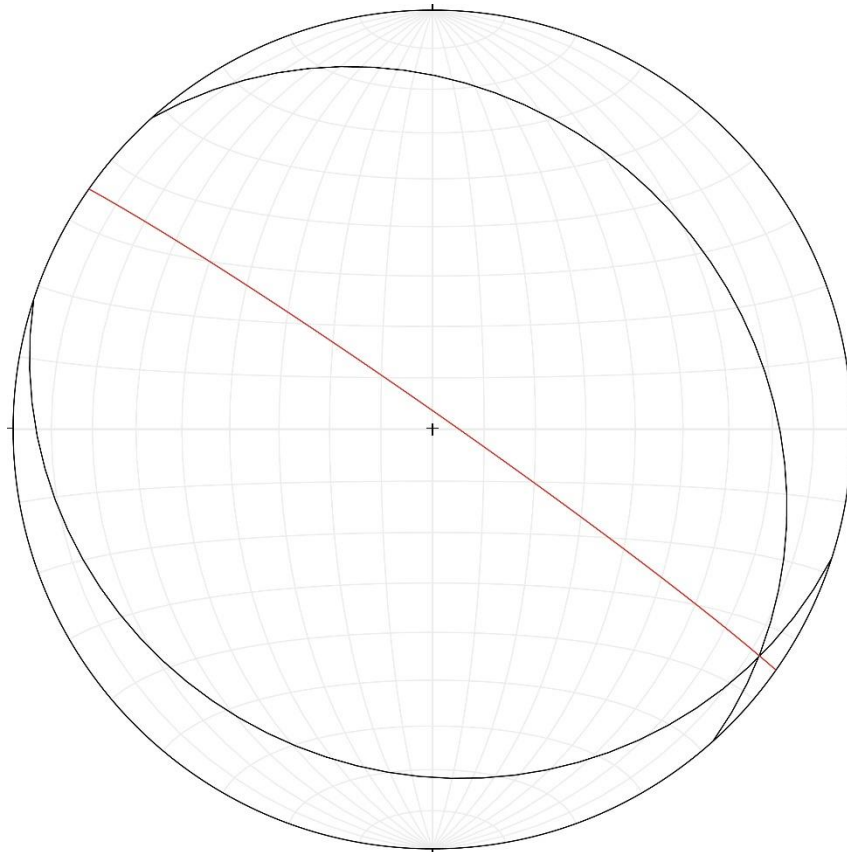


**Slika 4–8. Orijehtacija slojnih ploha gornjokrednih rudistnih vapnenaca u jezgri antiklinale na jugoistočnom dijelu područja istraživanja otoka Paga (pogled prema jugoistoku)**



**Slika 4–9. Konturni dijagram i proračunata orijentacija osi bore smjera i kuta nagiba 130/17 prikazane na slikama 4–7 i 4–8**

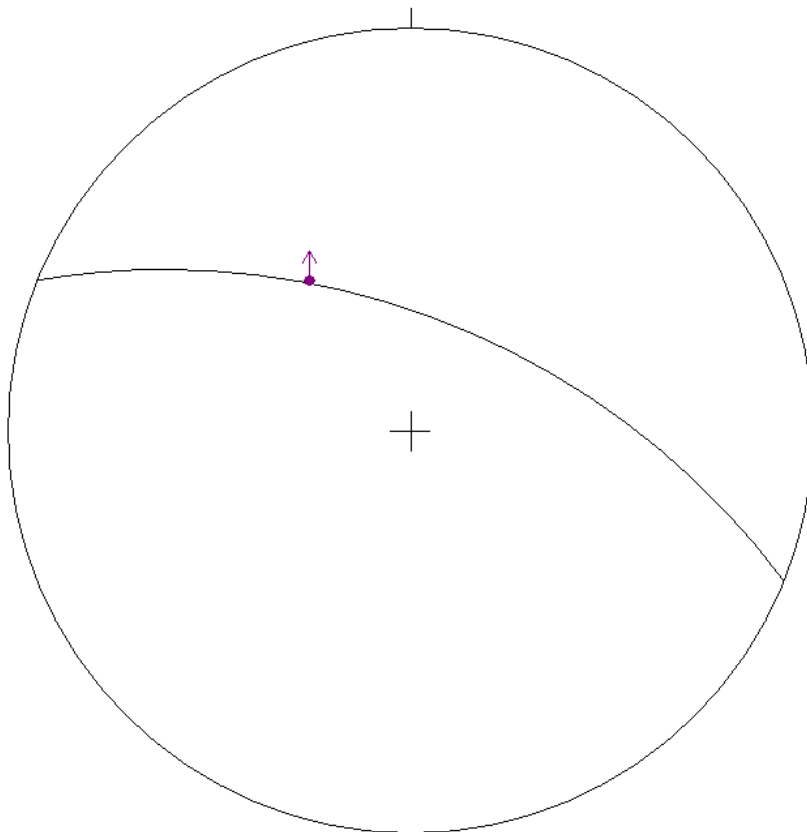
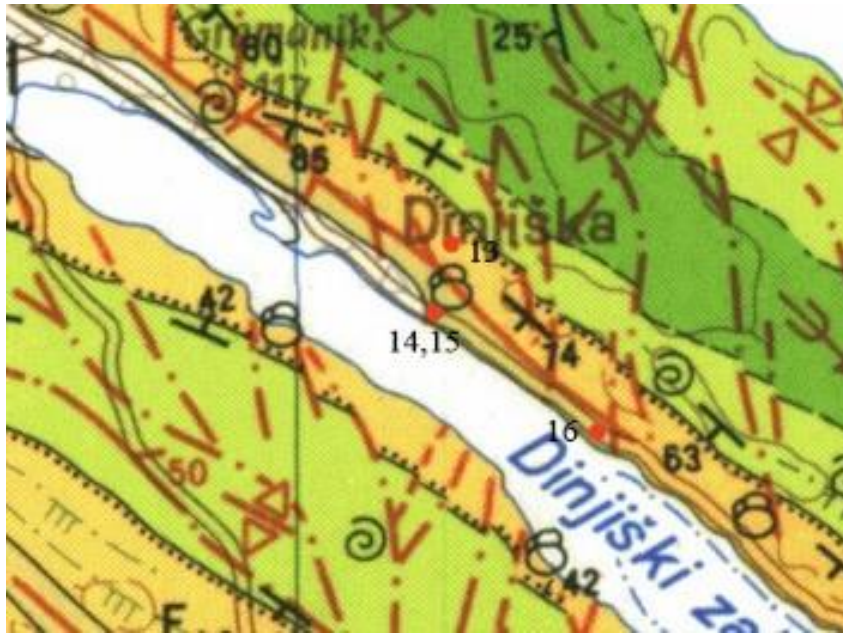
Orijentacija osne plohe ove antiklinale dobivena je stereografskim projiciranjem dvaju reprezentativnih slojeva u krilima bore, pri čemu se pretpostavilo da osna ploha raspolavlja napola tupi kut što ga zatvaraju slojne plohe, a pri tom sadrži i os bore (Slika 4–10). S obzirom na dobivene vrijednosti smjera i kuta nagiba osne plohe (35/87) i proračunatu orijentaciju osi (130/17) ova antiklinala predstavlja uspravnu, blago tonuću boru (kut nagiba osne plohe 80–90°, uz kut nagiba osi 10–30°).



**Slika 4–10. Stereografska projekcija kojom je proračunata orijentacija osne plohe bore (crveni trag) sa smjerom i kutom nagiba 35/87**

#### **4.2.2. Područje dinjiškog zaljeva**

Ovaj dio područja istraživanja nalazi se neposredno uz državnu cestu D106, na potezu između naselja Dinjiška i Miškovići (Slika 4–11). Na ovom području izmjerena je jedna rasjedna ploha s utvrđenim karakterom pomaka u blizini kontakta između forameniferskih vapnenaca i eocenskog fliša. Riječ je o normalnom rasjedu, s nagibom paraklaze prema sjeveroistoku orijentacije 22/47 s lineacijom strija 60° od zapada (Slika 4–11).



Slika 4–11. Detalj s OGK lista Gospić (SOKAČ i dr., 1974) s označenim lokacijama mjerenih podataka (gore), te stereografska projekcija normalnog rasjeda (dolje)

Sjeverozapadno od izmjerene rasjedne plohe, na usjeku ceste izdanjuju subvertikalni slojevi izmjene pješčenjaka i lapora u flišu (točke 14 i 15). Izmjerene su dvije orijentacije slojevitosti. Prvi set slojevitosti je vertikalni, pružanja 114–294, s time da je stratigrafska podina prema SSI, a krovina prema JJZ (Slika 4–12).



**Slika 4–12. Subvertikalni slojevi u flišu (stratigrafska krovina je prema desno, prema jugozapadu)**

Drugi set slojevitosti nagnut je prema jugozapadu u smjeru i s kutom nagiba 194/86, kao što je označeno i na OGK listu Gospić (SOKAČ i dr., 1974). Unutar njega su zapažena i izmjerena dva seta pukotina orijentacije  $Sp_1$  287/76 i  $Sp_2$  282/12 (Slika 4–13). Setovi pukotina pokazuju pravocrtnu, do blago zakrivljenu završetku. Vjerovatno su nastali prije nego li je sloj doveden u subvertikalni položaj.



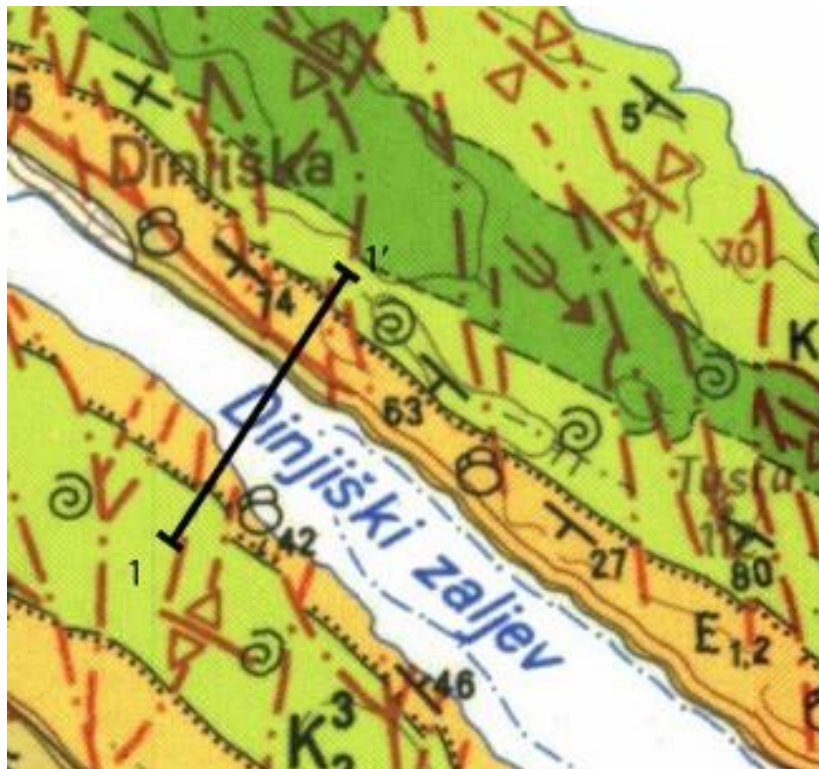


**Slika 4–13. Prikaz setova pukotina unutar fliša**

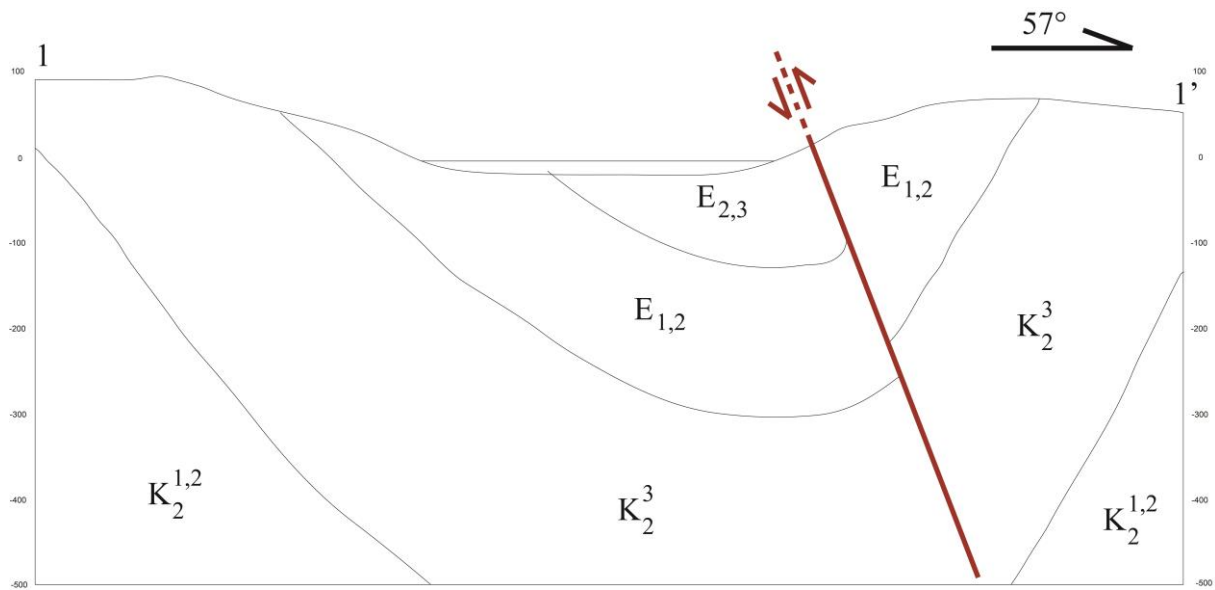
Otpriblike jedan kilometar jugoistočno od prethodno opisanih lokacija zapaženi su prebačeni slojevi u naslagama eocenskog fliša koje čini izmjena pješčenjaka i lapora na izdanku ceste. Ovdje su slojne plohe nagnute prema sjeveroistoku sa smjerom i kutom nagiba 27/70 (Slika 4–14). Prema OGK listu Gospić (SOKAČ i dr., 1974) ove naslage izgrađuju sjeveroistočno krilo Paške sinklinale, u kojoj su slojevi, u najvećem dijelu toga krila, nagnuti prema jugozapadu. Ovakva orijentacija s nagibom slojeva prema sjeveroistoku primjećena je na još nekoliko lokacija duž državne ceste D106, no samo je na ovoj lokaciji bio omogućen pristup s obzirom na prometnicu. Sve to upućuje na zaključak da je SI krilo Paške sinklinale barem u jednom dijelu prebačeno. Uzevši u obzir podatke o položaju slojeva u zaleđu ceste D106 prikazane na OGK lista Gospić (SOKAČ i dr., 1974), i podatke mjerenja položaja slojeva u prebačenom dijelu SI krila Paške sinklinale, načinjena je strukturna skica i profil kojim se nastojalo preciznije definirati geometriju SI krila Paške sinklinale u istraživanom dijelu otoka Paga (Slika 4–15 i 4–16).



Slika 4–14. Prebačeni slojevi u naslagama eocenskog fliša sa smjerom i kutom nagiba 27/70 (GPS koordinate N 44° 20' 42,86" E 15° 12' 47,46")



Slika 4–15. Isječak iz OGK lista Gospić s izvučenim profilom



Slika 4–16. Profil kroz prebačene slojeve unutar flišnih naslaga

#### 4.2.3. Središnji dio istraživnog područja (naselje Gorice)

Ovaj dio područja istraživanja nalazi se sjeveroistočno od naselja Gorice, pa do istočne obale otoka Paga (Slika 4–17).



Slika 4–17. Satelitska snimka okolice sela Gorice

Na satelitskoj snimci istraživanog područja zabilježena je kilometarska bora, ispresjecana brojnim lijevim i desnim rasjedima. Oblik ove bora na površini odražava se boranim tragovima slojeva gornjokrednih naslaga vidljivih na obrađenoj satelitskoj satelitskoj snimci prikazanoj na slici 4–18.



**Slika 4–18. Interpretirana satelitska snimka bore unutar turonskih vapnenaca u središnjem dijelu područja istraživanja s izvučenim tragovima slojeva i mjerenih rasjeda**

Promatrano na obrađenoj površinskoj projekciji vidi se da je os ove antiklinale usmjerena prema sjeverozapadu. Jugozapadno krilo je pravocrtno, pružanja SZ–JI. Na nekoliko mjesta je rasjednuto lijevim i desnim rasjedima. Sjeveroistočno krilo je manje

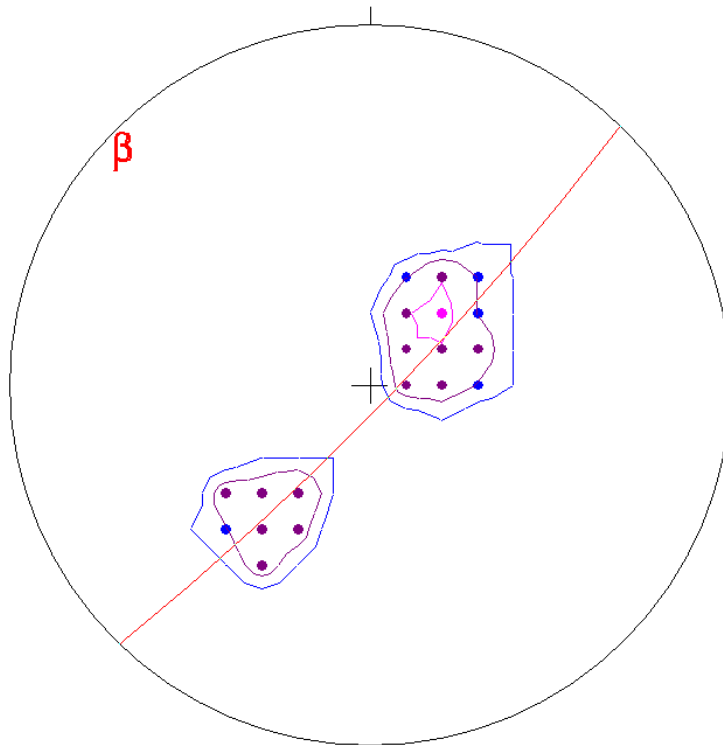
pravocrtno, no nije toliko rasjednuto kao jugozapadno. Velična međukrilnog kuta bore iznosi  $131^\circ$ , što odgovara blagim borama (eng. *gentle fold*,  $120^\circ < \alpha < 180^\circ$ ).

Unutar antiklinale napravljena su strukturna mjerenja, te su izmjerene orijentacije slojnih ploha ove bore (Tablica 4–4). Projekcijom polova normala ovih ploha proračunat je trag  $\pi$ -kruga i njegova normala (Slika 4–19), odnosno proračunata os antiklinale sa smjerom i kutom nagiba 314/5, što odgovara subhorizontalnim borama (kut nagiba osi  $0-10^\circ$ ).

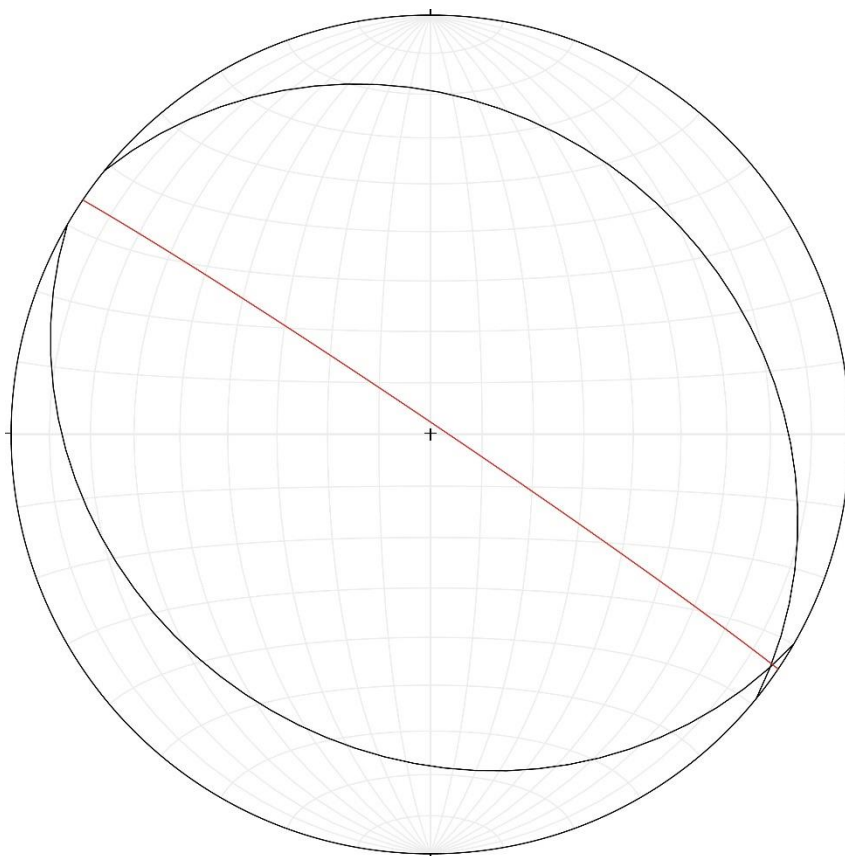
**Tablica 4–4. Tablica sa strukturnim mjerenjima u antiklinali u okolici sela Gorice**

Lokacija: središnji dio otoka Paga					
Litologija: kalkareniti, biokalkareniti, kalclutiti			Starost naslaga: gornja kreda		
Točka br.	Smjer nagiba	Kut nagiba	Točka br.	Smjer nagiba	Kut nagiba
1.	231	15	8.	246	17
2.	210	25	9.	34	38
3.	264	39	10.	40	47
4.	260	18	11.	38	39
5.	227	26	12.	41	35
6.	210	22	13.	29	24
7.	228	37	14.	23	23

Orijentacija osne plohe ove antiklinale dobivena je stereografskim projiciranjem dvaju reprezentativnih slojeva u krilima bore, pri čemu je osna ploha projicirana tragom koji napola dijeli tupi kut između slojnih ploha, a unutar sebe sadrži os antiklinale (Slika 4–20.). S obzirom na dobivene vrijednosti smjera i kuta nagiba osne plohe (34/88) ova antiklinala odgovara uspravnim borama (kut nagiba osne plohe  $80-90^\circ$ ).

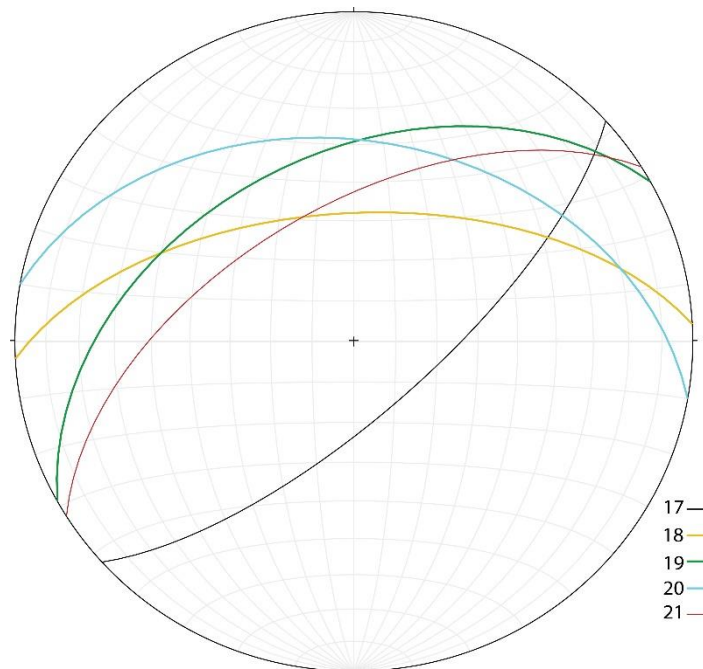
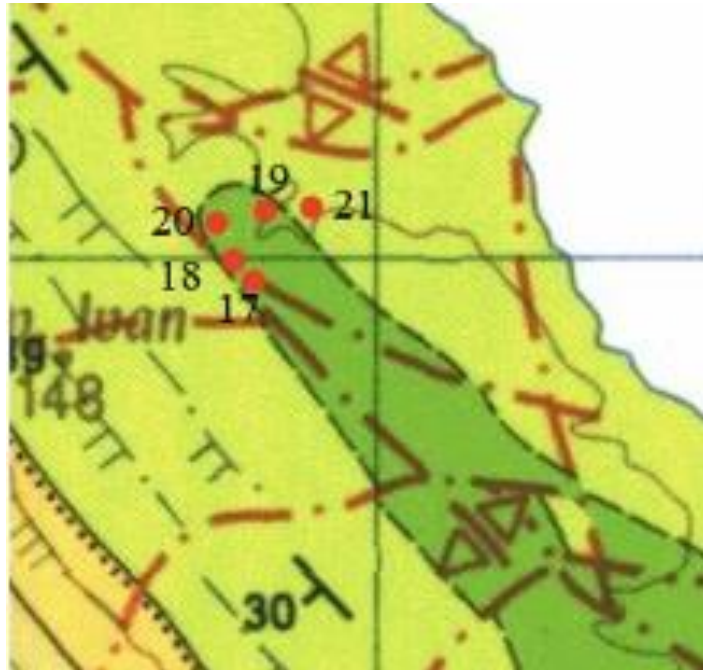


**Slika 4–19. Konturni dijagram strukturalnih mjerenja u antiklinali na jugoistočnom dijelu otoka Paga s izračunatom osi ( $\beta$ ) orijentacije 314/5**



**Slika 4–20. Stereografska projekcija osne plohe antiklinale orijentacije 34/88**

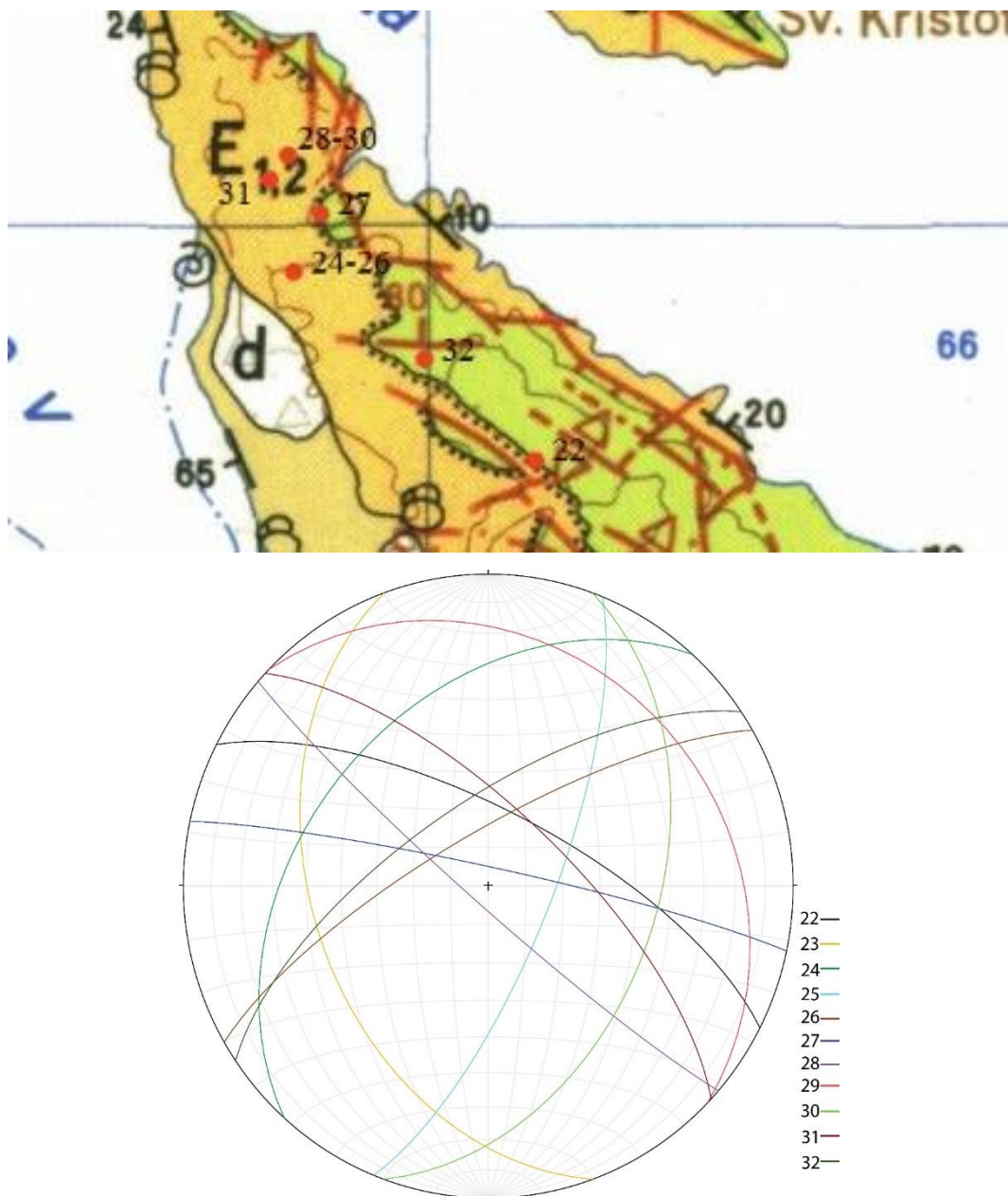
U krilima antiklinale zabilježeno je pet rasjednih ploha, većinom u njenom jugozapadnom krilu (Slika 4–21). Prema pomaku tragova slojeva vidljivom na analiziranom snimku rasjedi većinom pokazuju desni pomak, što je i dokazano uz pomoć strija na rasjednim ploham. Rasjedi su većinom nagnuti prema sjeveru i sjeverozapadu, dok je jedan rasjed nagnut prema jugoistoku.



**Slika 4–21.** Detalj sa lista OGK Gospić (SOKAČ i dr., 1974) s ucrtanim lokacijama mjerenih rasjeda (gore), te prikaz stereografske projekcije mjerenih rasjeda (dolje)

#### 4.2.4. Sjeverni dio istraživnog područja

Područje lokacija mjerenja na sjevernom dijelu istraživnog područja proteže se između Paškog zaljeva i Paških vrata na sjeveru, Velebitskog kanala na istoku, te državne ceste D106 na zapadu. U ovom području izmjereno je 12 rasjednih ploha (Slika 4–22; Tablica 4–5). Najveći broj rasjeda zabilježen je unutar eocenskih forameniferskih vapnenaca, dok su preostali rasjedi zabilježeni uz transgresivan kontakt gornjokrednih i forameniferskih vapnenaca. Ti su rasjedi zabilježeni i na OGK listu Gospić (SOKAČ i dr., 1974).



Slika 4–22. Detalj lista OGK Gospić (SOKAČ i dr., 1974) s ucrtanim lokacijama strukturnih mjerenja (gore), te prikaz stereografske projekcije zabilježenih rasjeda (dolje)



Na točki 22 zabilježen je reversni rasjed na kontaktu između gornjokrednih vapnenaca i eocenskih forameniferskih vapnenaca, sa smjerom i kutom nagiba 27/70. U blizini deluvijalnog nanosa na sjevernom dijelu istraživanog područja zapažen je dekametarski blok forameniferskih vapnenaca prožet s više setova rasjeda. Najmarkantniji rasjed nagnut je prema sjeverozapadu, s izmjerenim smjerom i kutom nagiba 312/40, a ispresjecan je rasjedima manje duljine, s nagibom paraklaza prema jugoistoku (Slika 4–23). Rasjedi zabilježeni na ovoj lokaciji interpretirani su kao konjugirani parovi rasjeda. Na usjeku ceste na krajnjem sjeveru otoka zabilježeno je nekoliko generacija rasjeda, s orijentacijama paraklaza prema sjeverozapadu i istoku–jugoistoku (Slika 4–24), koji su kao i na prethodnoj lokaciji interpretirani kao konjugirani parovi rasjeda.

**Tablica 4–5. Tablica izmjerenih strukturnih podataka o rasjedima na području između Paškog zaljeva i Velebitskog kanala**

Lokacija: jugozapadno od Paških vrata					
Litologija: kalkareniti, biokalkareniti, kalcilutiti			Naslage: Forameniferski i senonski vapnenci		Starost naslaga: gornja kreda – eocen
Točka br.	Smjer nagiba	Kut nagiba	Lineacija strija	Koordinate lokacija mjerenja	
22.	27	70	Ls 37° od SZ	N 44° 27' 43,14"	E 15° 03' 28,62"
23.	250	42	–	N 44° 27' 26,87"	E 15° 03' 13,10"
24.	312	40	Ls 70° od SI	N 44° 28' 08,59"	E 15° 02' 58,08"
25.	112	73	–	N 44° 28' 08,59"	E 15° 02' 58,08"
26.	330	76	–	N 44° 28' 08,59"	E 15° 02' 58,08"
27.	12	85	–	N 44° 28' 11,79"	E 15° 03' 02,90"
28.	221	85	–	N 44° 28' 25,10"	E 15° 03' 03,76"
29.	44	24	–	N 44° 28' 25,10"	E 15° 03' 03,76"
30.	326	68	Ls 76° od SI	N 44° 28' 25,10"	E 15° 03' 03,76"
31.	110	44	Ls 30° od SZ	N 44° 28' 21,41"	E 15° 03' 04,19"
32.	43	70	Ls 81° od SZ	N 44° 27' 50,55"	E 15° 03' 21,26"



**Slika 4–23. Reversan rasjed koji se nalazi između crvenkastih i bijelih forameniferskih vapnenaca s nagibom paraklaze prema jugozapadu, ispresjecan rasjedima koji su zajedno interpretirani kao konjugirani parovi rasjeda (GPS koordinate N 44° 28' 08,59'' E 15° 02' 58,08'')**



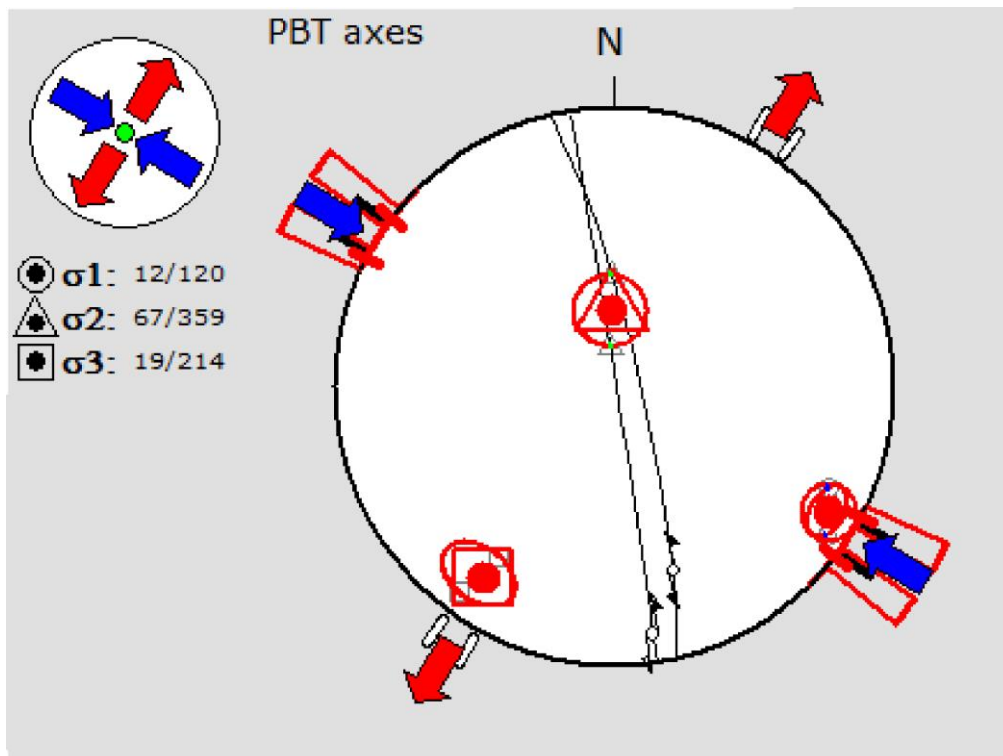
**Slika 4–24. Rasjed unutar eocenskih forameniferskih vapnenaca s nagibom paraklaze prema sjeverozapadu (GPS koordinate N 44° 28' 24,70'' E 15° 03' 03,79'')**

### 4.3. IZRAČUN PALEONAPREZANJA NA TEMELJU ZABILJEŽENIH RASJEDA

Za prikaz orijentacije i kinematskih značajki zabilježenih rasjeda, njihovo grupiranje u odgovarajuće grupe, te proračun glavnih osi paleonaprezanja za svaku pojedinu izdvojenu grupu korišten je računalni program *Win-Tensor* (DELVAUX, 2010). Na temelju kinematske kompatibilnosti zabilježeni rasjedi na kojima je izmjerena orijentacija strija i utvrđen karakter pomaka strija svrstani su u pet grupa rasjeda. U nastavku poglavlja se opisuju prosječne orijentacije i kinematske značajke svake pojedine grupe rasjeda, daje se tablični prikaz ulaznih podataka koji su korišteni za proračun glavnih osi paleonaprezanja i to P–T metodom (TURNER, 1953) za svaki rasjed odgovarajuće grupe, te NDA metodom za određeni set rasjeda, uz proračun prosječnih vrijednosti orijentacije P, T- i B-osi. U primjenjenjenim metodama za proračun paleonaprezanja korištena je vrijednost kuta  $\theta$  od  $30^\circ$ .

#### 4.3.1. Grupa rasjeda 1

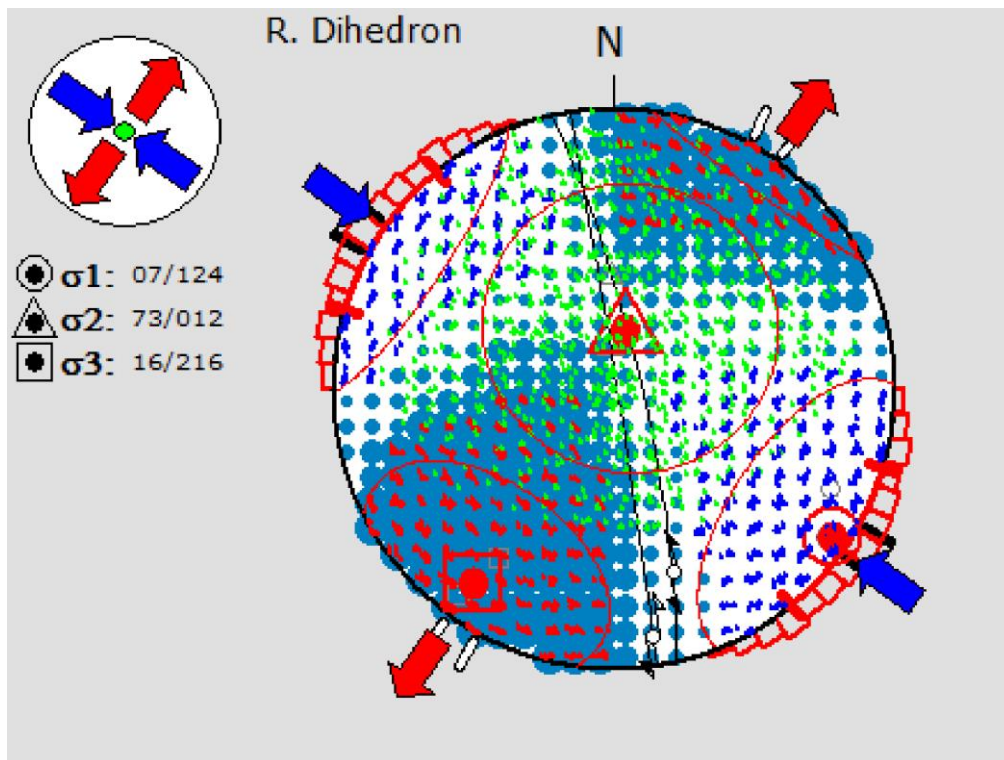
Ovu grupu čine rasjedi pružanja SSZ–JJI s kutom nagiba paraklaze  $82^\circ$  i  $89^\circ$  i lijevom karakterom pomaka kutom, zabilježeni na točkama mjerenja 1 i 12 (Slika 4–25, Prilog 1).



Slika 4–25. Stereogram proračuna orijentacije P-, T- i B-osi naprezanja za rasjede grupe 1

Dobivene vrijednost za glavne osi naprezanja P–T metodom (P–os = 120/12, T–os = 214/19 i B–os = 359/67) ukazuju na transpresijsko polje naprezanja, s pružanjem glavne kompresijske P–osi po pravcu SZ–JI, te tenzijske T–osi po pravcu SI–JZ.

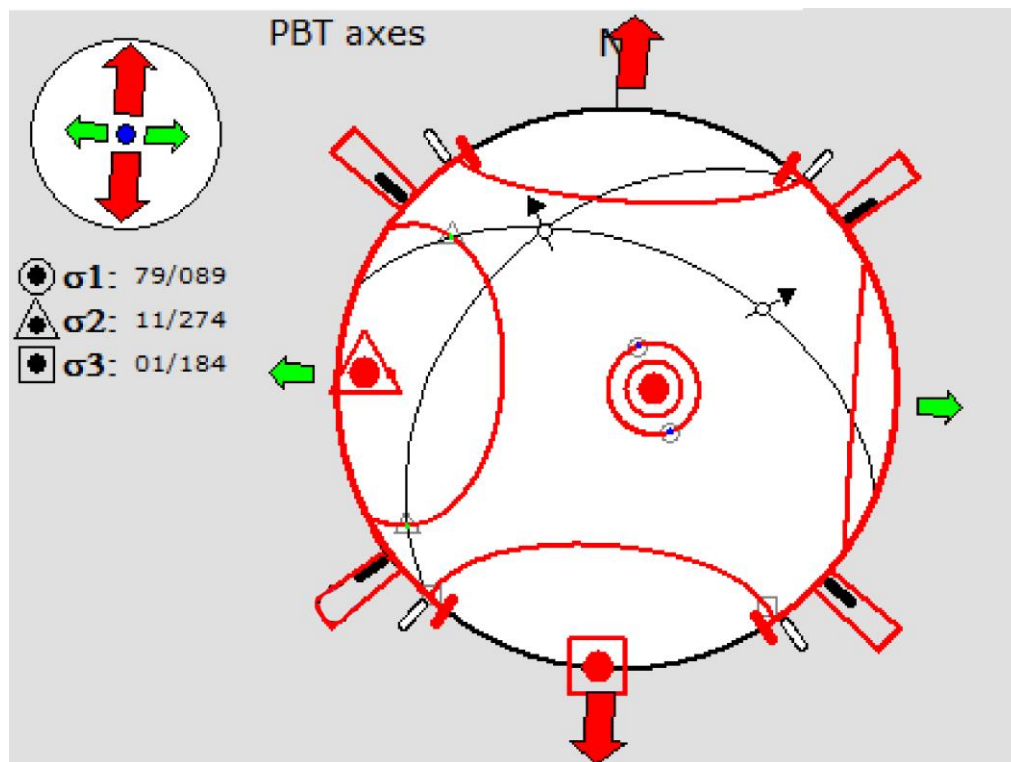
Na transpresijsko polje naprezanja ukazuje i dijagram pravih diedara za ovu grupu rasjeda (Slika 4–26), koji prikazuje dvije strmo položene ravnine pružanja SSZ–JJI i SI–JZ od kojih prva odgovara rasjedima grupe 1. Orijentacije glavnih osi paleonaprezanja proračunatih ovom metodom su: P–os = 124/7, T–os = 216/16 i B–os = 12/73.



Slika 4–26. Stereogram proračuna orijentacije P–, T– i B–osi naprezanja te kompresijskih i tenzijskih diedara za rasjede grupe 1

#### 4.3.2. Grupa rasjeda 2

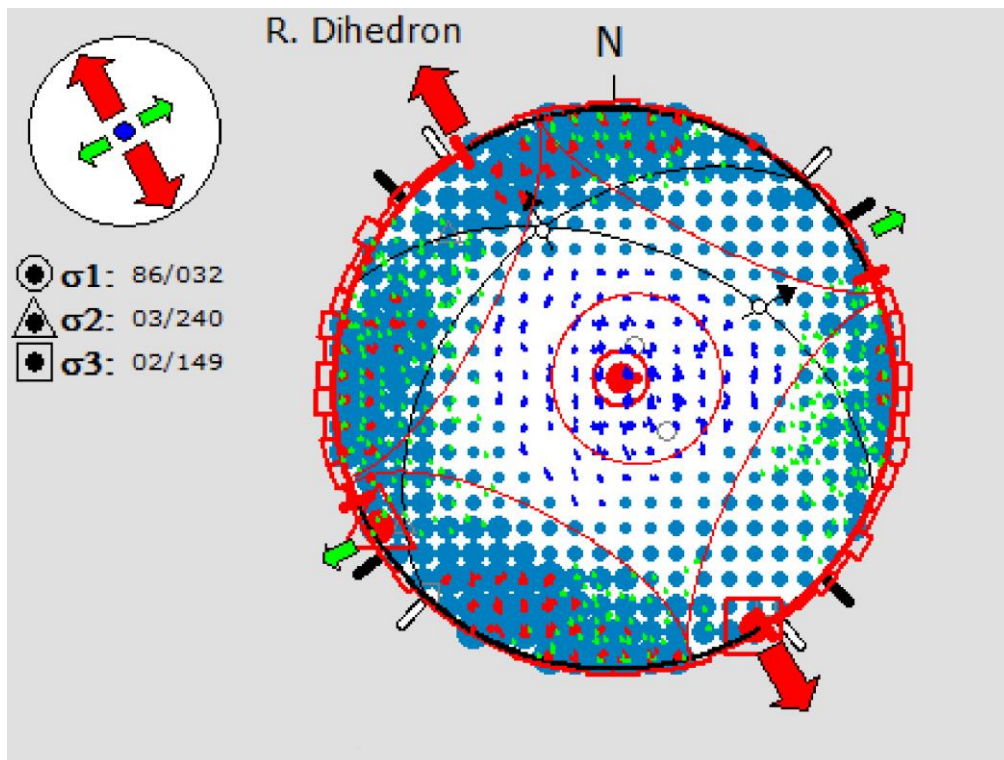
Ovu grupu čine dva rasjeda pružanja SZ–JI i SI–JZ, s normalnim karakterom pomaka krovinskih krila prema sjeveroistoku, odnosno prema sjeverozapadu. Rasjedne plohe su umjereno nagnute pod kutom od 40 i 47°, a zabilježeni su na točkama mjerenja 13 i 20 (Slika 4–27; Prilog 1).



Slika 4–27. Stereogram proračuna orijentacije P–, T– i B–osi naprežanja za rasjede grupe 2

Prosječna orijentacija glavnih osi naprežanja P–T metodom za ovu grupu rasjeda je: P–os = 89/79, T–os = 184/11 i B–os 274/11, te ukazuju na ekstenzijsko polje naprežanja s pružanjem tenzijske T–osi po pravcu S–J.

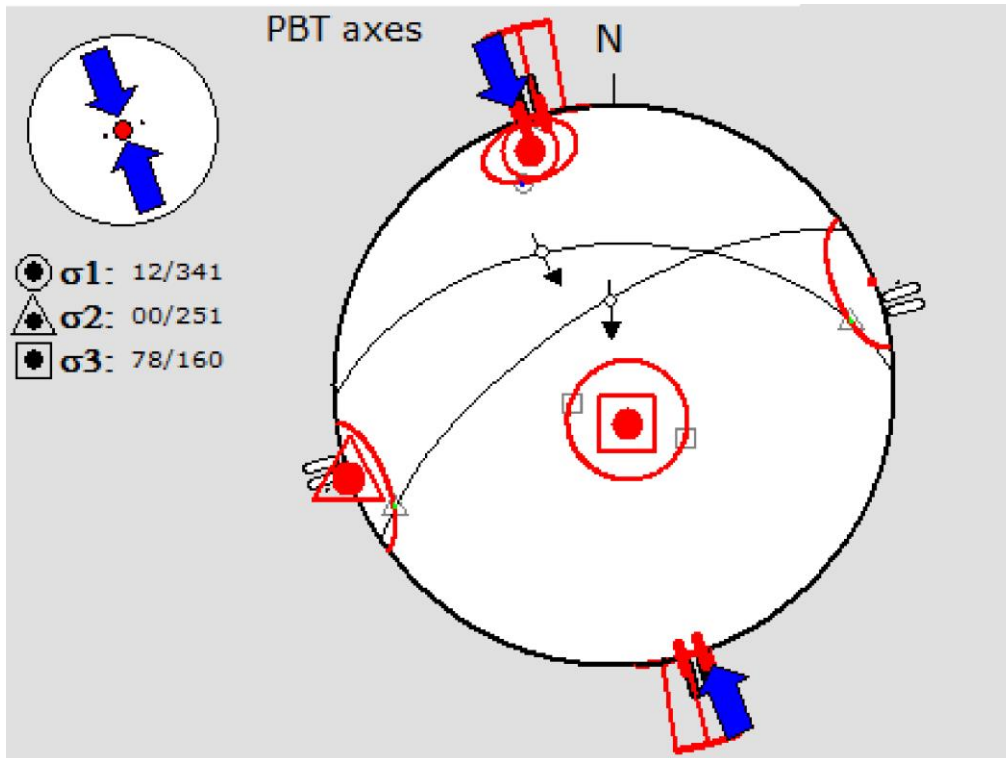
Na ekstenzijsko polje paleonaprežanja ukazuje i dijagram pravih dieadara prikazan na Slici 4–28, s izračunatim glavnim osima paleonaprežanja: P–os = 32/86, T–os 149/2 i B–os = 240/3, i pružanjem tenzijske T–osi po pravcu SZ–JI.



Slika 4–28. Stereogram kompresijskih i tenzijskih dieadara za rasjede grupe 2

### 4.3.3. Grupa rasjeda 3

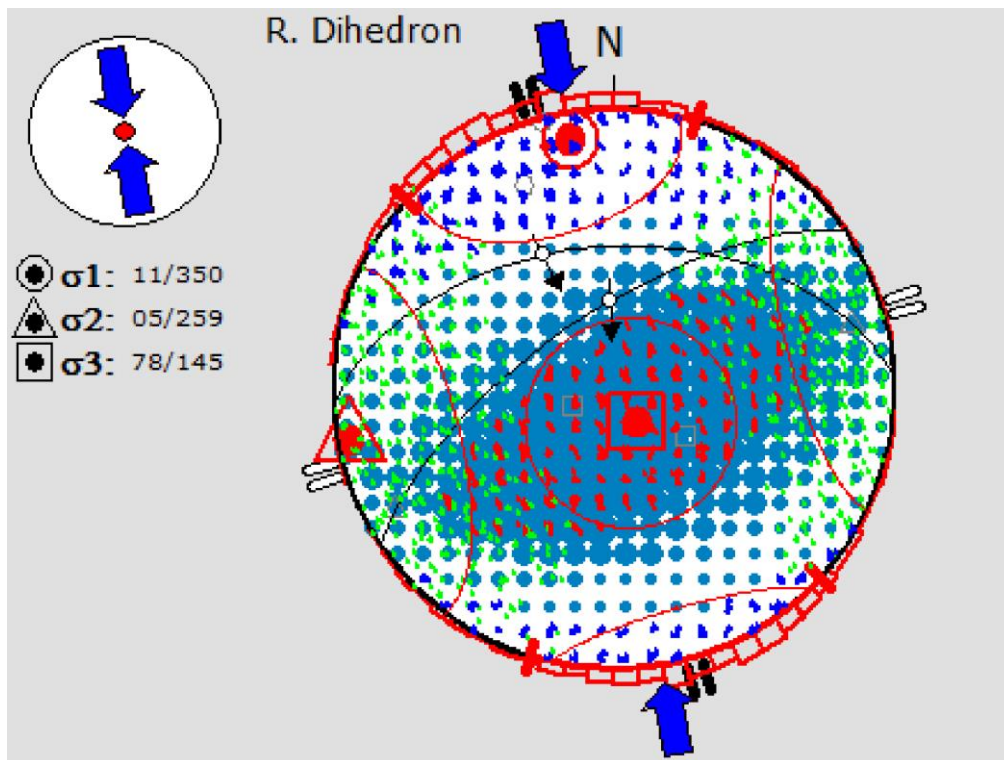
Ovu grupu čine rasjedi s pružanjem ISI–ZJZ i nagibom rasjednih ploha prema sjeveru, te reversnim karakterom pomaka krovinskih krila prema jugu–jugoistoku. Paraklaze rasjeda umjereno su nagnute pod kutom nagiba od 48 i 68°, a zabilježene su na točkama 18 i 27 (Slika 4–29; Prilog 1).



Slika 4–29. Stereogram proračuna orijentacije P-, T- i B-osi naprezanja za rasjede grupe 3

Prosječna orijentacija glavnih osi naprezanja dobivenih P–T metodom iznosi: P–os = 341/12, T–os = 160/78 i B–os = 251/0 (odnosno pružanja 71–251). Proračunate vrijednosti ukazuju na kompresijsko polje naprezanja s orijentacijom glavne kompresijske P–osi pružanja SSZ–JJJ.

Kompresijski režim paleonaprezanja za ovu grupu rasjeda potvrđen je i dijagramom pravih dieadara (Slika 4–30), gdje su izračunate glavne osi paleonaprezanja: P–os = 350/11, T–os = 145/78 i B–os = 259/5. Dijagram prikazuje dvije ravnine pružanja SSI–JJZ, od kojih je jedna strmo nagnuta u smjeru sjever–sjeverozapada, a druga umjereno nagnuta u smjeru jug–jugoistoka.

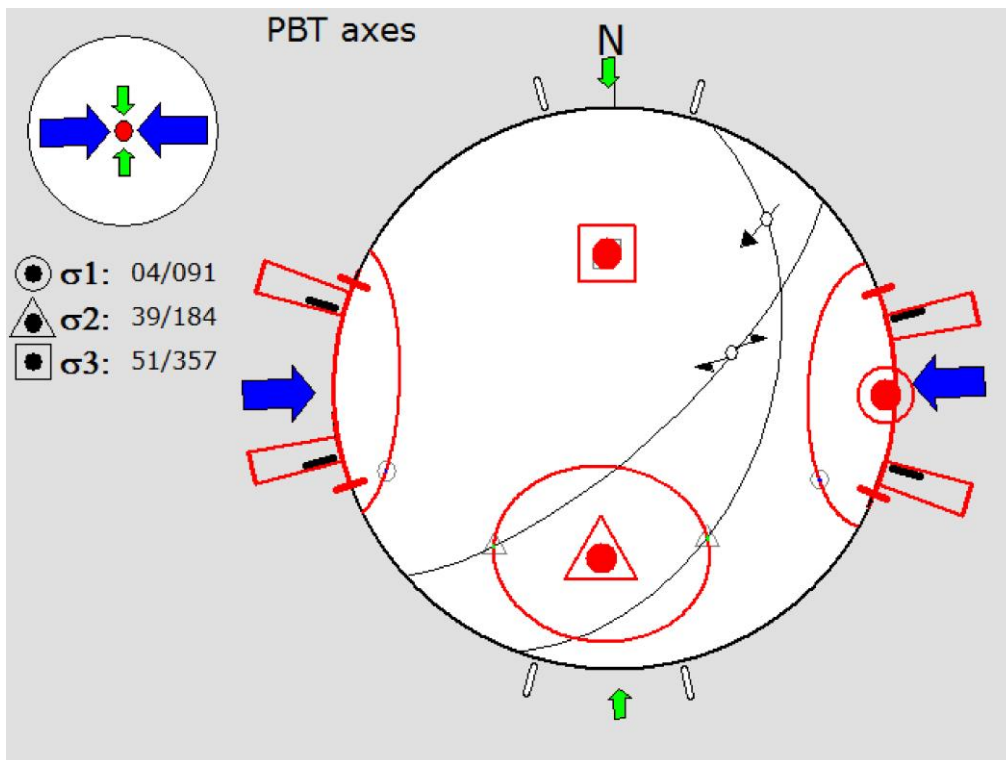


Slika 4–30. Stereogram kompresijskih i tenzijskih dieadara za rasjede grupe 3

#### 4.3.4. Grupa rasjeda 4

Ovu grupu čine rasjedi s prosječnim pravcem pružanja SI–JZ i nagibom rasjednih ploha prema jugoistoku, te reversnim i desnim karakterom pomaka s translacijom krovinskih krila prema jugozapadu. Paraklaze rasjeda umjereno su do strmo nagnute pod kutom od 44 i 72°, a zabilježene su na točkama mjerenja 14 i 28 (Slika 4–31; Prilog 1).

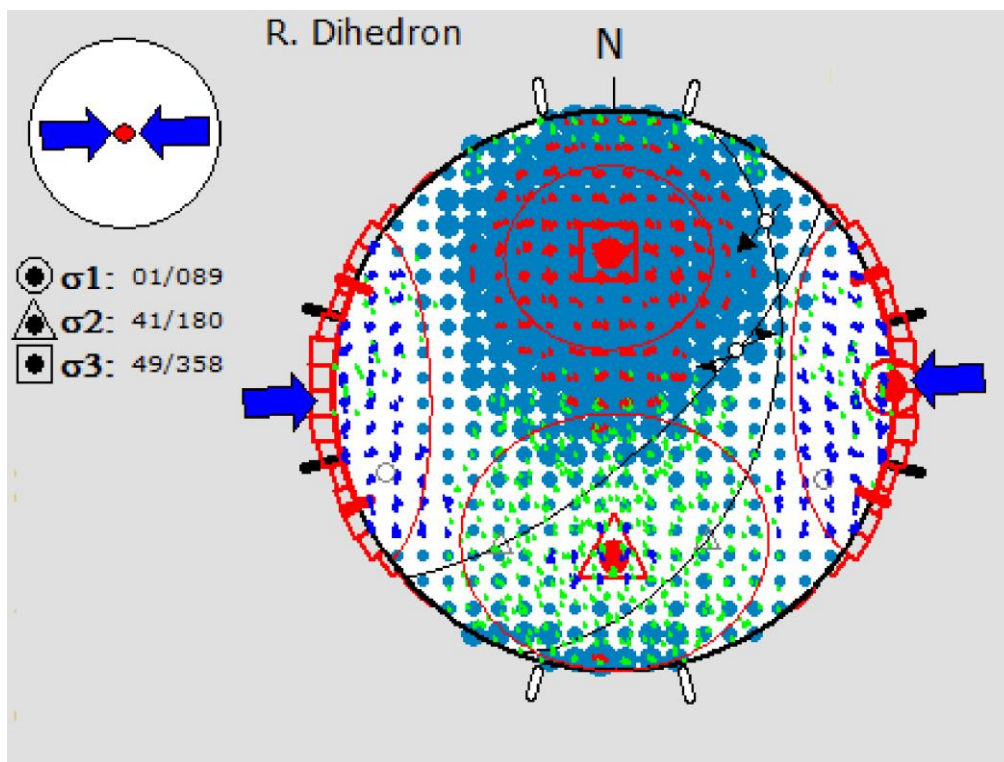




Slika 4–31. Stereogram orijentacije P–, T– i B–osi naprezanja za rasjede grupe 4

Prosječna orijentacija glavnih osi naprezanja dobivenih P–T metodom iznosi: P–os = 91/4, T–os = 357/51 i B–os 184/39. Proračunate vrijednosti ukazuju na transpresijsko polje naprezanja s orijentacijom glave kompresijske P–osi pružanja I–Z.

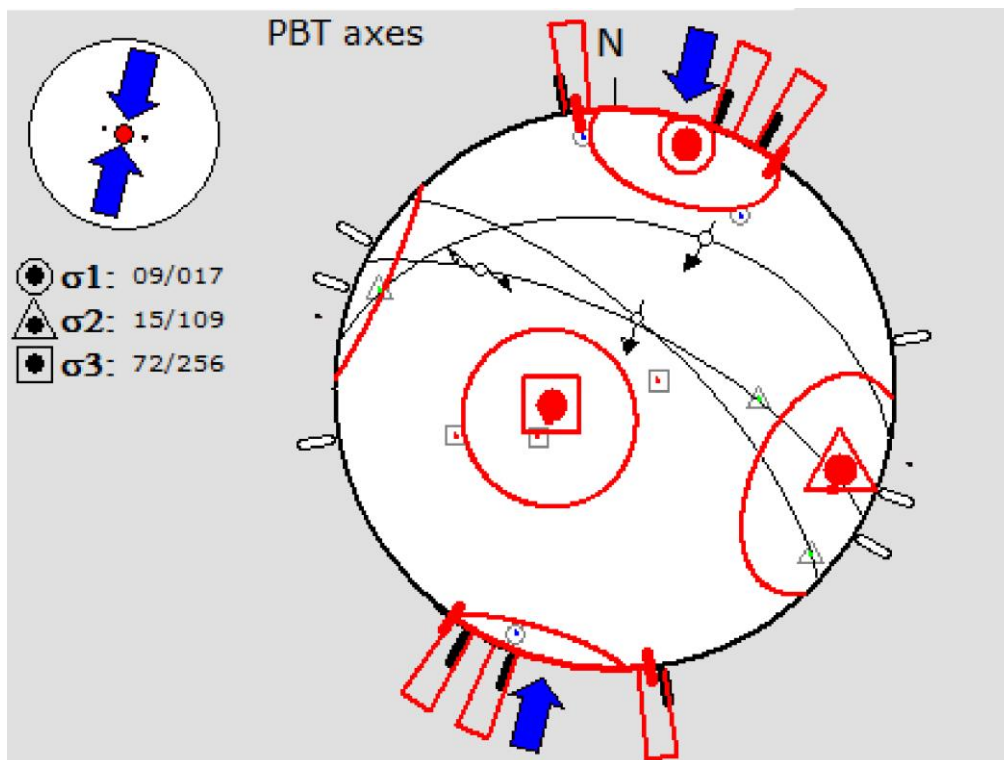
Na transpresijsko polje paleonaprezanja ukazuje i dijagram pravih dieadara (Slika 4–32) s proračunatom orijentacijom glavnih osi paleonaprezanja: P–os = 89/1, T–os = 358/49 i B–os = 180/41. Dijagram ukazuje na dvije nodalne ravnine pružanja S–J sa smjerom nagiba prema istoku i zapadu, pri čemu ravnina nagnuta prema istoku odgovara rasjedima ove izdvojene grupe.



Slika 4–32. Stereogram kompresijskih i tenzijskih dieadara za rasjede grupe 4

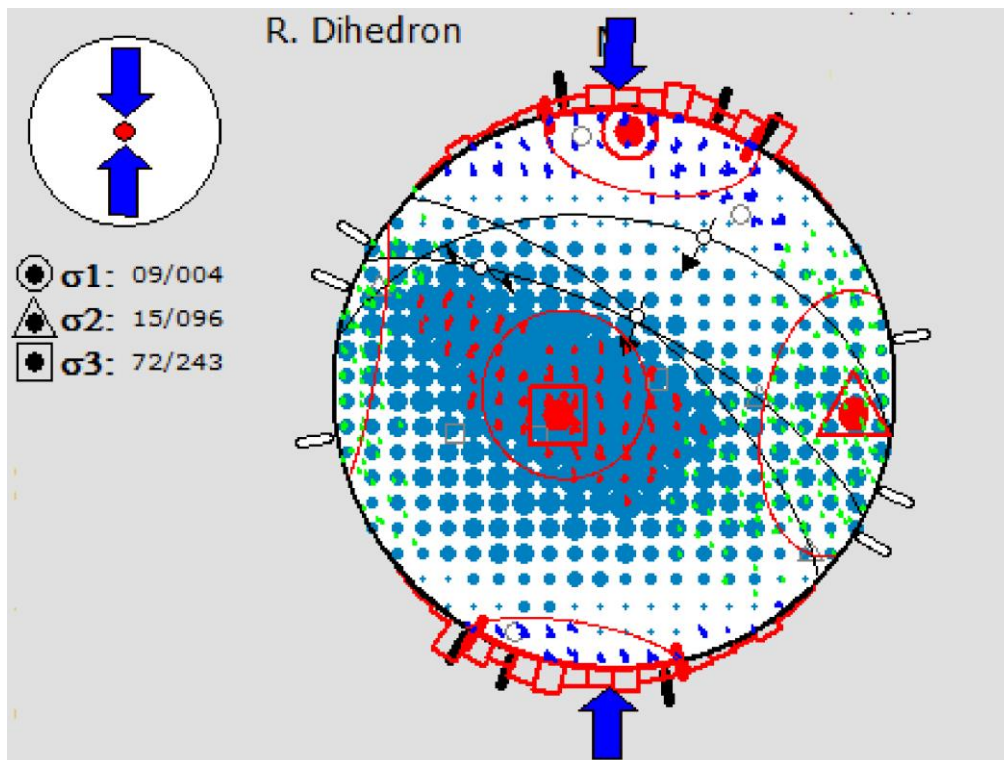
#### 4.3.5. Grupa rasjeda 5

Ovu grupu čine rasjedi s pružanjem SZ–JI i nagibom prema sjeveroistoku, te reversnim karakterom i pomakom krovinskih krila prema jugozapadu. Paraklaze rasjeda umjereno su do strmo nagnute s kutom nagiba između 39–70°, a zabilježene su na točkama mjerenja 17, 19 i 29 (Slika 4–33; Prilog 1). Prosječna orijentacija glavnih osi naprezanja proračunatih P–T metodom je: P–os = 17/9, T–os = 256/72 i B–os 109/15, te ukazuju na kompresijsko polje naprezanja s pružanjem glavne kompresijske P–osi po pravcu SSI–JJZ.



Slika 4–33. Stereogram proračuna orijentacije P-, T- i B-osi naprežanja za rasjede grupe 5

Na kompresijski režim naprežanja ukazuje i dijagram pravih diedara prikazan na slici 4–34, kojim su izračunate glavne osi paleonaprežanja za ovu grupu rasjeda: P-os = 4/9, T-os = 243/72 i B-os = 96/15. Dijagram pravih dieadara ukazuje na dvije ravnine pružanja ISI–ZJZ.



Slika 4–34. Stereogram kompresijskih i tenzijskih dieadara za rasjede grupe 5

## 5. ZAKLJUČAK

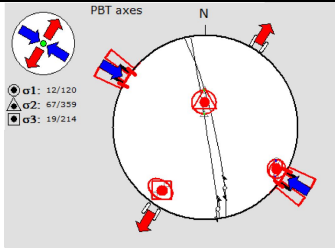
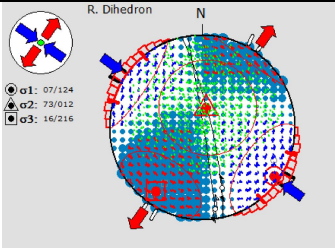
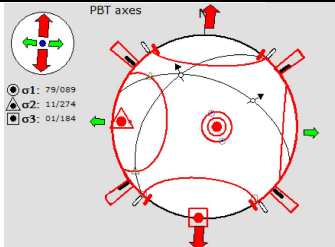
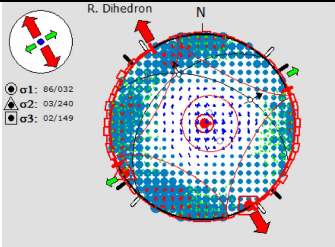
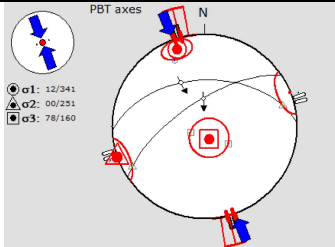
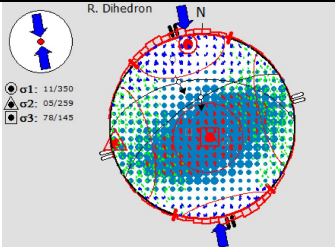
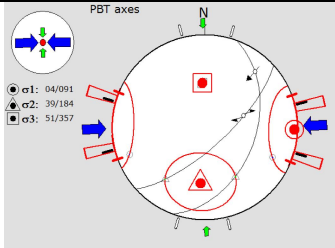
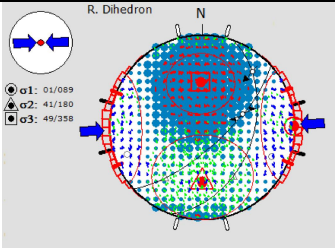
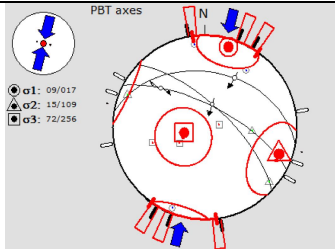
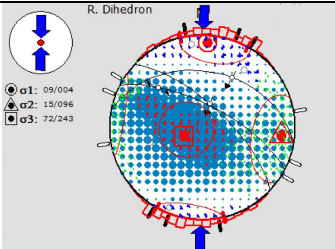
Interpretacija relativne starosti među izdvojenim grupama rasjeda temelji se na podacima o relativnoj starosti rasjeda koji su prikazani na OGK listovima Gospić (SOKAČ i dr., 1976), Silba i Molat (MAMUŽIĆ i dr., 1970), te Zadar (MAJCEN i dr., 1970). Interpretacija je potkrijepljena i podacima o kinematskim značajkama rasjeda i režimu paleonaprezanja analiziranim u stijenama otoka Paga i u u okolnom području koji su objavljeni u literaturi (primjerice PRELOGOVIĆ i dr., 1995; JAMIČIĆ i dr., 1995; KRHEN, 2008).

Rasjedi grupe 5 interpretirani su kao najstarija generacija rasjeda. Ovu grupu čine rasjedi dinaridskog pružanja SZ–JI i reversnog karaktera pomaka. Rasjedi su nagnuti prema istoku i sjeveroistoku, s translacijom krovinskog krila prema jugozapadu, što odgovara najčešćem tipu rasjeda u Vanjskim Dinaridima. U svom diplomskom radu kojim je proveo analizu rasjeda i smičnih pukotina na području otoka Paga KRHEN (2008) je također zabilježio ovaj tip rasjeda, s time da je, čak i u većem broju, zabilježio reversne rasjede ali s nagibom paraklaza prema jugozapadu i translacijom krovine prema sjeveroistoku za koje se pretpostavlja da predstavljaju *backthrust*–tip rasjeda. Najviše takvih rasjeda je zabilježeno na sjevernom dijelu istraživnog područja, u blizini Paškog zaljeva. Postanak i aktivnost ovih rasjeda pretpostavlja se tijekom glavne kompresijske deformacijske faze u Vanjskim Dinaridima krajem eocena–početkom oligocena (Tablica 5–1).

Rasjedi grupe 4 čine mlađu generaciju rasjeda u odnosu na rasjede grupe 5. Riječ je o reversnim rasjedima umjereno do strmo nagnutih ploha pružanja SI–JZ, s translacijom krovinskog krila prema zapadu i jugozapadu. Ovaj tip rasjednih ploha nije zabilježen nigdje na OGK listovima Gospić (SOKAČ i dr., 1974) i Zadar (MAJCEN i dr., 1970) te se stoga čini da nemaju naročit značaj u strukturnoj građi otoka Paga promatrano u mjerilu OGK 1:100.000. Moguće je da predstavljaju promjenu iz prethodno kompresijskog u transpresijski režim naprezanja koji je moguće posljedica lokalne razdiobe naprezanja ograničene na manje strukturne blokove.

U rasjede grupe 3 spadaju reversni rasjedi s pružanjem ISI–ZJZ, što je okomito na dinaridsko pružanje. Nagib rasjednih ploha je prema sjeveru–sjeverozapadu, dok je translacija krovinske plohe prema jugu. Pretpostavlja se da i ova grupa rasjeda, slično kao grupa 4, odraz lokalne promjene i preraspodjele naprezanja lokalnog karaktera, moguće reaktivacijom i pomakom po ranije formiranim pukotinskim sustavima u stijenama, te stoga ne predstavlja novu fazu u regionalnom režimu paleonaprezanja.

Tablica 5–1. Interpretacija relativne starosti za analizirane grupe rasjeda na istraživanom području otoka Paga

Vrijeme rasjedanja	Grupe rasjeda	Režim paleonaprezanja
Kraj pliocena – kvartar	Rasjedi grupe 1	Transpresija
		
Miocen – pliocen?	Rasjedi grupe 2	Ekstenzija
		
Oligocen – miocen?	Rasjedi grupe 3	Lokalna kompresija
		
Oligocen – miocen?	Rasjedi grupe 4	Lokalna kompresija
		
Kraj eocena – početak oligocena	Rasjedi grupe 5	Kompresija
		

Grupu 2 čine rasjedi s normalnim karakterom pomaka i translacijom krovinskih krila prema sjeveru i sjeveroistoku. Ukazuju na ekstenzijski režim napreznja s pružanjem tenzijske T–osi po pravcu S–J, što je gotovo okomito na dominantno pružanje glavnih kompresijskih struktura (bora i rasjeda) u Vanjskim Dinaridima nastalim sredinom–krajem eocena i početkom oligocena. Na OGK listovima Gospić (SOKAČ i dr., 1974) i Zadar (MAJCEN i dr., 1970) ovaj tip rasjeda nije zabilježen, pa se može zaključiti da niti ovi rasjedi nisu od osobitog značaja za geološku građu otoka Paga gledano u mjerilu OGK 1:100.000.

Grupu 1 čine rasjedi pružanja SSZ–JJI s lijevim karakterom pomaka. Na OGK listovima Gospić (SOKAČ i dr., 1974) i Zadar (MAJCEN i dr., 1970) zabilježeni su gotovo na cijelom istraživanom području. Kinematski pokazatelji pomaka na jednom od ovih rasjeda indiciraju lijevi pomak, no prema analizi aerofoto i satelitskih snimaka jasno se vidi da je i u ovom slučaju riječ o rasjedu po kojem je ostvaren vrlo izražen desni pomak, kao što je i prikazano na listovima OGK (SOKAČ i dr., 1974; MAJCEN i dr., 1970). S tim u vezi potrebno je istaći da je KRHEN (2008) u svojoj analizi rasjeda i smičnih pukotina na otoku Pagu zabilježio grupu rasjeda koju čine dva rasjedna seta: jedan pružanja SSZ–JJI s desnim karakterom pomaka, i drugi pružanja SSI–JJZ s lijevim karakterom pomaka. Za ovu grupu rasjeda autor je pretpostavio i vrijeme njihove aktivnosti tijekom pliocena i kvartara, i to na temelju korelacije sa rasjedima zabilježenim na otoku Krku koje su opisali JAMIČIĆ i dr. (1995). S obzirom na navedeno, pretpostavlja se da je Fortički rasjed pružanja SZ–JI, koji je s obzirom na pomak repernih slojeva vidljiv na aerofoto i satelitskim snimakama s izrazito desnom komponentom pomaka, naknadno (lokalno ?) reaktiviran u rasjed s lijevim pomakom tokom najmlađeg transpresijskog polja napreznja u pliocenu i kvartaru, ali pri tom uz manji pomak u odnosu na desni koji mu je prethodio.

Analizom bora unutar gornjokrednih naslaga na istraživanom području otoka Paga može se zaključiti da obje analizirane bore obilježavaju strmo nagnute osne plohe pružanja SZ–JI. Os antiklinale Grbavac položena je pod kutom od 5° čime odgovara subhorizontalno položenim borama, te izrazito blago tone u smjeru sjeverozapada. Antiklinala na jugoistoku otoka Paga tone prema jugoistoku pod kutom od 17° što odgovara blago tonućim borama. S obzirom na njihovu podudarnu orijentaciju s kilometarskim borama zabilježenim u području Vanjskih Dinarida, obje analizirane antiklinale nastale su u istovjetnom kompresijskom režimu paleonapreznja, aktivnom za vrijeme glavne deformacijske/tektonske faze u Vanjskim Dinaridima sredinom i krajem eocena i početkom oligocena.

## 6. LITERATURA

ANDERSON, E. M. (1905): The dynamics of faulting. *Trans. Edinburgh Geol. Soc.*, 8 (3), 387–402 str.

DELVAUX, D. (2010): Win-Tensor v. 5.8.1., Interactive program for paleostress reconstruction by Damien Delvaux: <http://www.damiendelvaux.be/Tensor/WinTensor/win-tensor.html>.

FLEUTY, M. J. (1964): The description of folds. *Proceedings of the Geologists Association*, 75, 461–492 str.

JAMIČIĆ, D., PRELOGOVIĆ, E., TOMLJENOVIĆ, B. (1995): Folding and deformation style in overthrust structures on Krk Island (Croatia). U: Rossmanith, H.P. (ur.) *Mechanics of Jointed and Faulted Rock*, Balkema, Rotterdam–Brokfield, 359362.

KRHEN, H. (2008): Strukturna analiza rasjeda i smičnih pukotina i proračun paleonaprezanja na području otoka Paga. *Diplomski rad*, Zagreb, 57 str.

LONČAR, N. (2009): Geomorfološka regionalizacija srednjeg i južnog dijela otoka Paga, *Geoadria* 14: 5–25. str.

MAJCEN, Ž. & KOROLIJA, B. (1970): Osnovna geološka karta, list Zadar (L 33139) 1:100 000. Izradio: Institut za geološka istraživanja Zagreb (1967), Sav. geol. zavod, Beograd.

MAJCEN, Ž., KOROLIJA, B., SOKAČ, B., NIKLER, L. (1973): Tumač osnovne geološke karte M 1:100 000, za list Zadar (L 33–139), Izradio: Institut za geološka istraživanja Zagreb (1967), Sav. geol. zavod, Beograd, 44 str.

MARJANAC, LJ. (2012): Pleistocene glacial and periglacial sediments of Kvarner, Northern Dalmatia and Southern Velebit Mt. – Evidence of dinaridic glaciation (Doctoral thesis), University of Zagreb, 278 str.

MARJANAC, T. (2014): The Pag Island Geology with Special Reference to Eocene, Eastern Adriatic Eocene clastic successions: Islands of Rab and Pag: 52–62. str.

RADIMSKY, O. (1877): Das Lingnitvorkommen auf der Insel Pago., *Verh. geol. R.A.* 1–18, Wien.

RADIMSKY, O. (1877): Ueber den geologischen bau der Insel Pago., *Verh. geol. R.A.* 1–18, Wien.

SCHUBERT, R. (1909): Geologija Dalmacije.–"Matica Dalmatinska", Zadar.

SOKAČ, B., ŠČAVNIČAR, B., VELIĆ, I. (1976): Tumač osnovne geološke karte M 1:100 000, za list Gospić (L 33–127), Izradio: Institut za geološka istraživanja Zagreb (1967), Sav. geol. zavod, Beograd, 64 str.



SOKAČ, B., NIKLER, L., VELIĆ, I., MAMUŽIĆ, P. (1974): Osnovna geološka karta, list Gospić (L 33–127) 1:100 000. Izradio: Institut za geološka istraživanja Zagreb (1967), Sav. geol. zavod, Beograd.

SPANG, J. H. (1972): Numerical method for dynamic analysis of calcite twin lamellae., *Geol. Soc. Am. Bull.*, 83: 467–472; Boulder.

SPERNER, B. (1990): Analyse der Deckenkiematik mit Hilfe von Spröddaten an einem Beispiel aus den Nördlichen Kalkalpen (nieder-österreichische Kalkvoralpen).– 128 s., Unveröff. Diplomaarbeit, Univ. Tübingen.

TERZIĆ, J. (2006): Hidrogeologija Jadranskih krških otoka.–Doktorska disertacija, Rudarsko–geološko–naftni fakultet, 220 str.

TOMLJENOVIĆ, B. (2015): Predavanja iz Strukturne geologije; Bore i Rasjedi.

TURNER, F.J., 1953. Nature and dynamic interpretation of deformation lamellae in calcite of three marbles. *American Journal of Science*, 251: 276–298.

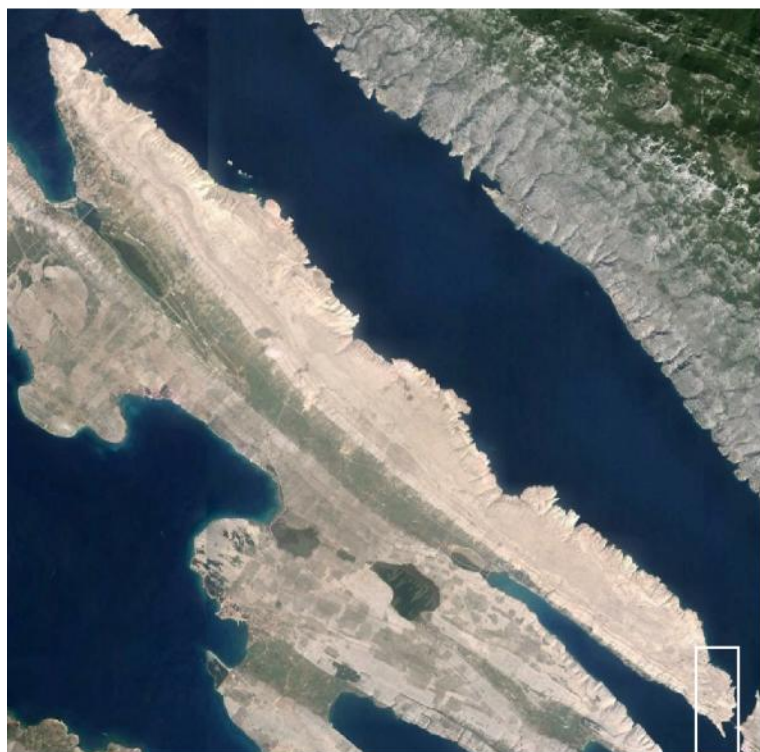
TWISS, R. J. & MOORES, E. M. (1992): *Structural Geology*.–W.H. Freeman & Co., New York, 532 str.

von HAUER, F.R., (1867–1871): Geologischen übersichtskarte österreichisch–ungar–ischen Monarchie. K.–k. geologischen Reichsanstalt (Scale 1:576.000). Wien.

von HAUER, F.R., (1868): Geologischen Uebersichtskarte der österreichischen Monarchie. *Jahrbuch der k.–k. geologischen Reichsanstalt* 17 (1), Wien.


WAAGEN, L. (1909): Geologische Spezialkarte Österreichische–Ungarischen Monarchie Carlopago und Jablanac 1:75 000.–*Geol. R.A.* Wien.

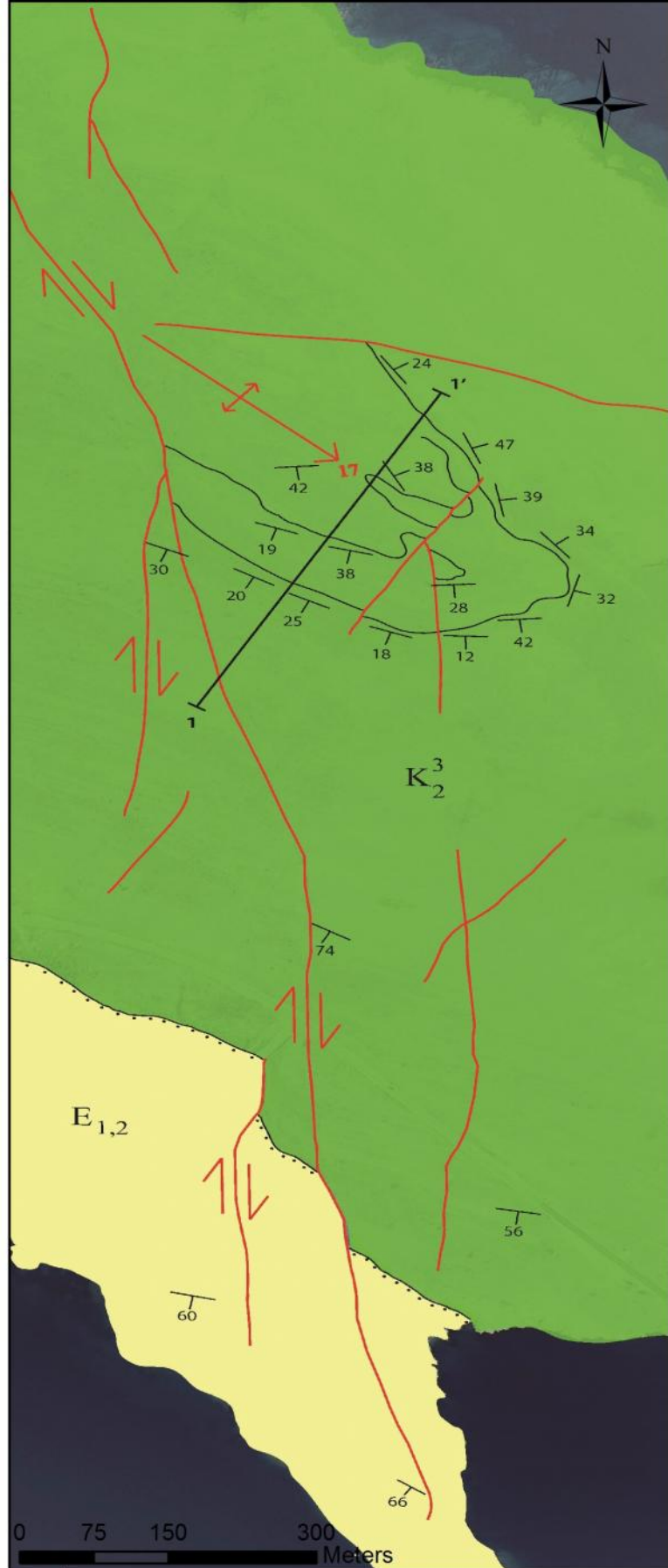
## Prilog 2. Strukturna karta s profilom kroz parazitsku boru



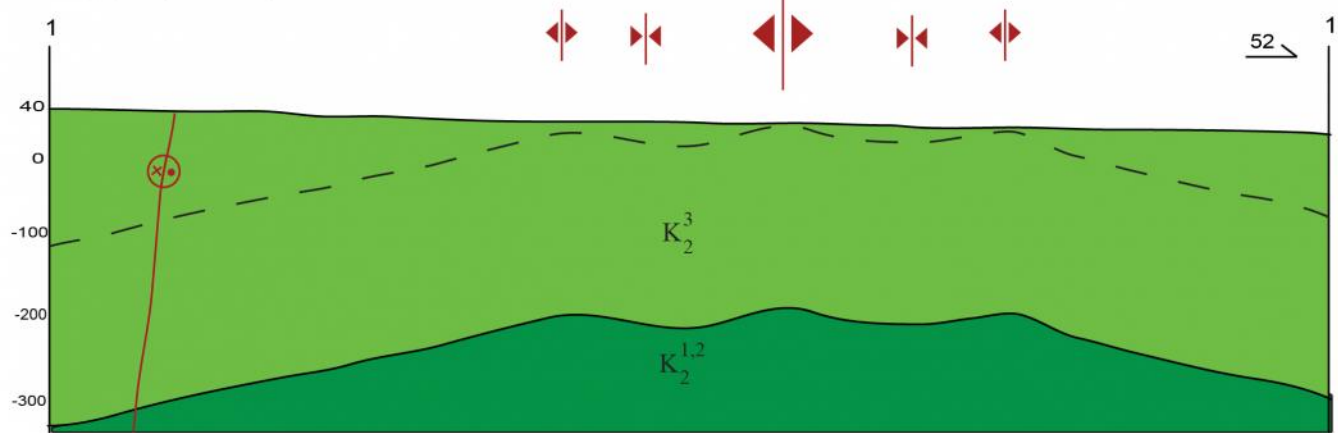
Isječak satelitske snimke s lokacijom strukturne karte prikazane desno (bijeli pravokutnik)

### Legenda:

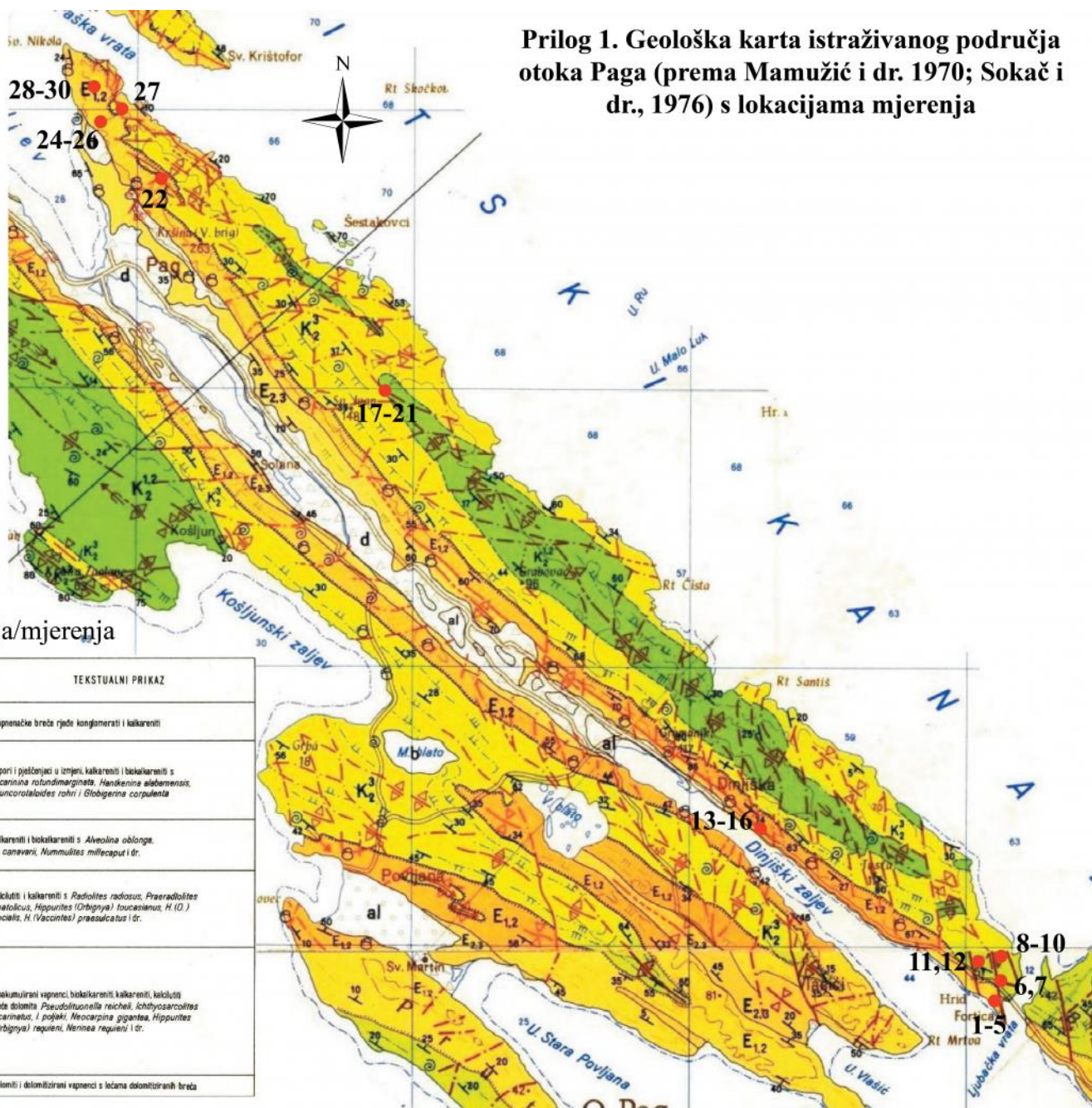
-  Os antiklinale na karti
-  Os antiklinale
-  Os sinklinale
-  Desni rasjed
-  Transgresivna granica



Profil 1 - 1' kroz vrh antiklinale (povećano mjerilo zbog preglednosti)



Prilog 1. Geološka karta istraživanog područja otoka Paga (prema Mamužić i dr. 1970; Sokač i dr., 1976) s lokacijama mjerenja



Legenda:  
● točke opažanja/mjerenja

STAROST	GRAFIČKI PRIKAZ	Debljine u m	TEKSTUALNI PRIKAZ
T E R C I J A R P A L E O G E N	E <sub>01</sub>	?	Vapnenačke breče rjode konglomerati i kalkareniti
	E <sub>2.3</sub>	350	Lapori i peščnjaci u izmjeni, kalkareniti i bakalkareniti s <i>Acaninina rotundimarginata</i> , <i>Hankenia alebemensis</i> , <i>Truncorotaloides rohri</i> i <i>Globogemma corpulenta</i>
	E <sub>1.2</sub>	250	Kalkareniti i bakalkareniti s <i>Aveolina oblonga</i> , <i>A. canevani</i> , <i>Nummulites millecaput</i> i dr.
K R E D A G O L E M	K <sub>2</sub> <sup>1</sup>	350	Kalkuliti i kalkareniti s <i>Radolites radicosus</i> , <i>Preradolites anaticus</i> , <i>Hippurites (Orbigyia) toucasianus</i> , <i>H. (O.) socialis</i> , <i>H. (Vacinctes) praesulcatus</i> i dr.
	K <sub>2</sub> <sup>1.2</sup>	cca 600	Biokumulirani vapnenci, bakalkareniti, kalkareniti, kalkuliti i lete dolomiti <i>Pseudolituonella reicheli</i> , <i>Ichthyosarcolites bicarinatus</i> , <i>I. pojarki</i> , <i>Neocarpina gigantea</i> , <i>Hippurites (Orbigyia) requieni</i> , <i>Nereis requieni</i> i dr.
	K <sub>1</sub> <sup>1</sup>	100	Dolomiti i dolomitizirani vapnenci s lećana dolomitiziranih breča

