

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

Prirodoslovno-matematički fakultet

Geološki odsjek

Mario Poletto

**Primjena analognog modeliranja u
proučavanju procesa tektonike i geološkom
kartiranju**

Zagreb, 2016

Ovaj rad izrađen je u Geološko-paleontološkom zavodu Geološkog odsjeka Prirodoslovno-matematičkog fakulteta pod vodstvom izv. prof. dr. sc. Tihomira Marjanca i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade Sveučilišta u Zagrebu u akademskoj godini 2015/2016.

Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Opći i specifični ciljevi rada.....	2
3. Metoda i materijal	3
3.1 Analogno modeliranje u geologiji	3
3.2 Konstrukcija aparature.....	5
3.3 Modifikacija aparature.....	7
3.4 Korišteni materijali	10
4. Postavljanje i provedba pokusa	11
4.1 Postavljanje prvog pokusa kompresijske tektonike (PK1)	12
4.2 Postavljanje drugog pokusa kompresijske tektonike (PK2)	13
4.3 Postavljanje pokusa kompresije na rasjednoj rampi (PKRR).....	14
4.4 Postavljanje pokusa ekstenzije (PET).....	15
5. Rezultati	16
5.1 Prvi pokus kompresijske tektonike (PK1)	18
5.2 Drugi pokus kompresijske tektonike (PK2)	22
5.3 Pokus kompresije na rasjednoj rampi (PKRR).....	27
5.4 Pokus ekstenzijske tektonike (PET)	30
6. Rasprava	36
6.1 Prvi pokus kompresijske tektonike (PK1)	36
6.2 Drugi pokus kompresijske tektonike (PK2)	40
6.3 Pokus kompresije na rasjednoj rampi (PKRR).....	47
6.4 Pokus Ekstenzijske tektonike (PET).....	54
7. Zaključci.....	60
8. Literatura	64
9. Zahvale	67
10. Sažetak	68
11. Summary	69

1. Uvod

Proteklih desetljeća geolozi su često koristiti analogne modele kako bi simulirali ponašanje zemljine kore tijekom djelovanja deformacijskih sila. Analogno modeliranje geoloških struktura, u ovom radu rasjeda, daje vrijedan uvid u geometriju i kinematiku njihovog stvaranja, a točna rekonstrukcija stvarnih geoloških struktura može pružiti ispravna shvaćanja o njihovom nastanku. Također, upotrebom analognih modela moguće je u laboratoriju promatrati geološke procese kojima je potrebna dugo vremena kako bi se razvili.

Ovakvi eksperimenti razlikuju se prvenstveno po materijalu korištenom za modeliranje (glina, gips, pijesak, itd.) te po stanju materijala (mokar, suh). Model u kojem se koristi suhi pijesak dobro predstavlja ponašanje prvih 10 km zemljine kore pod stresom [1], no treba uzeti u obzir da su rezultati više kvalitativni nego kvantitativni zbog različitosti svojstava modela i stvarnih struktura. Svojstva su slijedeća: značajan učinak razmjera između veličine laboratorijskih modela i stvarnih struktura na terenu, varijacije u konstituciji materijala, promjenjivi porni tlak i temperaturna polja, ne-jedinstvenost tumačenja kinematičke povijesti i slično [1].

Eksperiment se sastoji od dvije faze: (1) postavljanje eksperimenta, što uključuje sijanje pijeska različitih boja u slojeve, te (2) izvođenje eksperimenta primjenom sile na pijesak. Suština samog pokusa je imati jasno razlučive slojeve u materijalu, te nakon i tokom primjene sile bilježiti uočene promijene.

U ovom radu napravljena su četiri pokusa (dva kompresijske tektonike, jedan ekstenzijske i jedan kombinirani) te su opisane nastale strukture i njihov razvoj kroz pokus. Pri različitom postavljanju pokusa stvarat će se različite strukture.

2. Opći i specifični ciljevi rada

Svrha ovog rada bila je upoznati se s aparaturom i metodama analognog modeliranja, a s ciljem proučavanja geometrije i kinematike struktura koje nastaju tijekom pokusa kako bi se dobio jasniji uvid u nastanak stvarnih struktura na terenu.

U ovom radu napravljena su četiri pokusa (tri pokusa kompresijske tektonike i jedan ekstenzijske tektonike) te su opisane nastale strukture i njihov razvoj kroz pokus. Opća hipoteza je da će se pri različitom postavljanju pokusa stvarati različite strukture. Kod pokusa kompresijske tektonike prvenstveno se htjelo uvidjeti kakav utjecaj na strukture ima različitost granulacije postavljenog materijala te kakve će strukture nastajati pri pokusu kompresije na stabilnu rasjednu rampu. Kod pokusa ekstenzijske tektonike cilj je bio ispitati kakve će strukture nastajati kada je ekstenzijsko polje duž cijelog postavljenog materijala, a ne samo u njegovom centru.

Na posljetku, svim nastalim strukturama u svim pokusima pokušat će se pronaći odgovarajuće strukture u stvarnom svijetu.

Ovaj rad nastavak je prijašnjih istraživanja iz 2015. i 2014. godine.

3. Metoda i materijal

3.1 Analogno modeliranje u geologiji

Prvi dokumentirani eksperiment analognog modeliranja izveo je Sir James Hall (1812) i predstavio ga Royal Society-u Edinburgh-a. Prvi publicirani rad vezan za modeliranje geoloških struktura nastalih tokom kompresije objavljuju Cadell (1890) i Willis (1893), koji rade aparaturu za čisto smicanje kako bi proučavali bore i rasjede (slika 1). Njihovi eksperimenti prije više od stoljeća ilustrirali su moć analognog modeliranja u razumijevanju geoloških struktura. 1937 godine M. King Hubert, američki geolog, postavlja glavne principe analognog modeliranja u geologiji definirajući tri tipa sličnosti između modela i stvarnog svijeta: geometrijsku, kinematičku i dinamičku. Kako bi bili geometrijski slični, dužine u modelu i prirodnom primjeru moraju biti proporcionalne i kutovi jednaki. Kako bi bili kinematički slični, moraju biti geometrijski slični, a vrijeme potrebno za razvoj događaja mora biti proporcionalno. Dinamička sličnost zahtjeva da razne sile koje djeluju na točku u modelu budu proporcionalne onima u odgovarajućoj točki u prirodi [2].



Slika 1: Cadell (1888) demonstrira svoju aparaturu za čisto smicanje, u kojoj je deformirao slojeve gline kako bi proučavao kompresijske strukture [2].

Withjack i suradnici (1995) u modelima od gline proučavaju efekte oblika rasjeda i njihove distribucije u krovinskom krilu glavnog normalnog rasjeda. Njihove eksperimentalne studije pokazuju kako oblik glavnog rasjeda utječe na stil sekundarnog rasjedanja i boranja [3].

Storti i McClay (1995) u analognim modelima ispituju utjecaj sintektonske sedimentacije na rast Coulombovih rasjednih klinova. Njihovi rezultati pokazuju kako povećanje sintektonske sedimentacije dramatično utječe na oblik Coulombovih rasjednih klinova, smanjuje broj rasjednih ljuski, unutarnje skraćivanje i kritično suženje klinova [4].

Crook i suradnici [1] koriste analogne i kompjuterske modele kako bi točno rekonstruirali današnje geološke strukture, od njihove sedimentacije i deformacijske povijesti do današnjeg stanja, i time došli do dodatnih spoznaja o utjecaju njihove povijesti na današnje geomehaničko i hidrogeološko stanje potencijalnih rezervoarskih formacija.

Blašković i Aljinović [5] koriste ilustrativan uzorak s mikrotektonskim elementima iz krovinskog krila reversno-navlačne strukture Ćićarije kako bi prikazali njegovu podudarnost s rasporedom i nastankom makrotektonskim elementima u širem području, što je također primjer analogne interpretacije deformacijskih struktura.

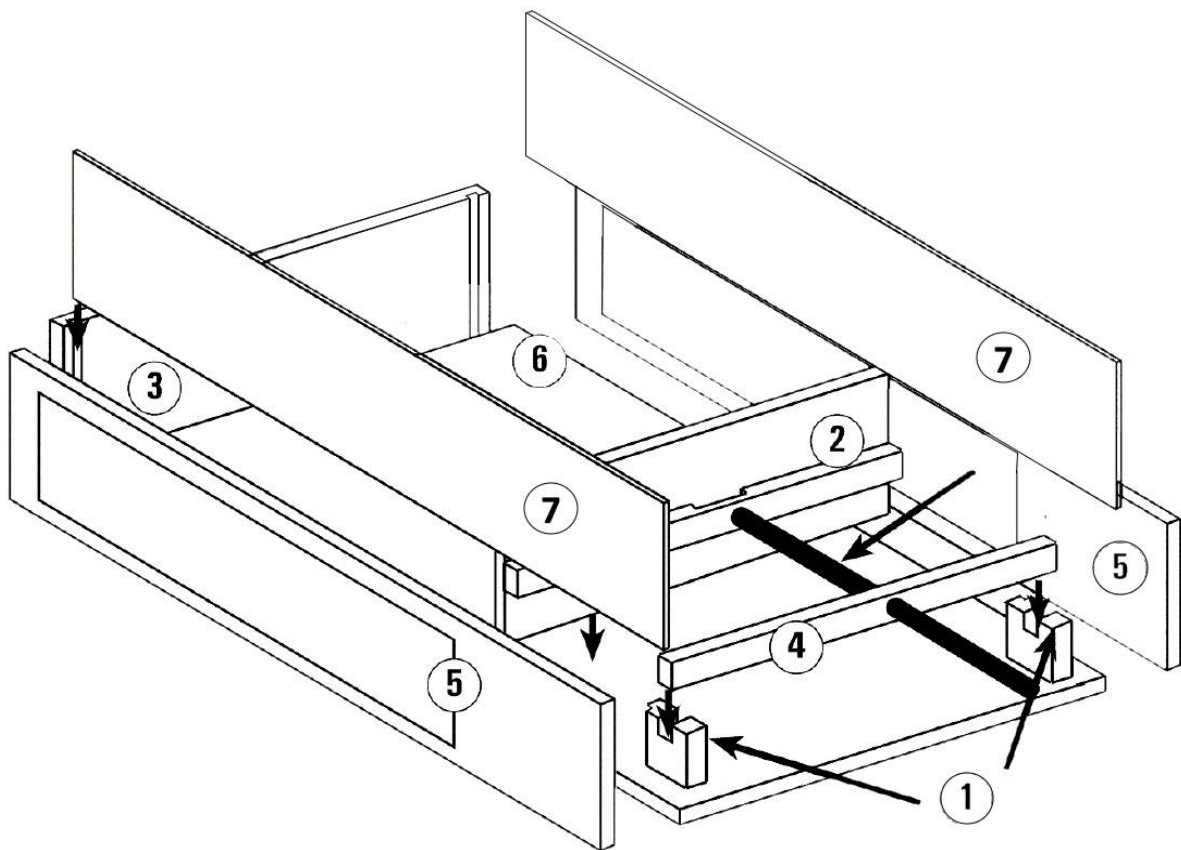
McClay i White [6] koriste aparaturu za analogno modeliranje kako bi istražili mehanizam paralelnog i kosog riftovanja te detaljno opisali kakve strukture nastaju pod kojim režimom ekstenzije.

Fossen i suradnici [7] analiziraju tri različita gipsana analogna modela koja pokazuju kako se ekstenzijske strukture veoma slične onima u prirodno deformiranim stijenama mogu reproducirati u laboratoriju na sličnoj skali.

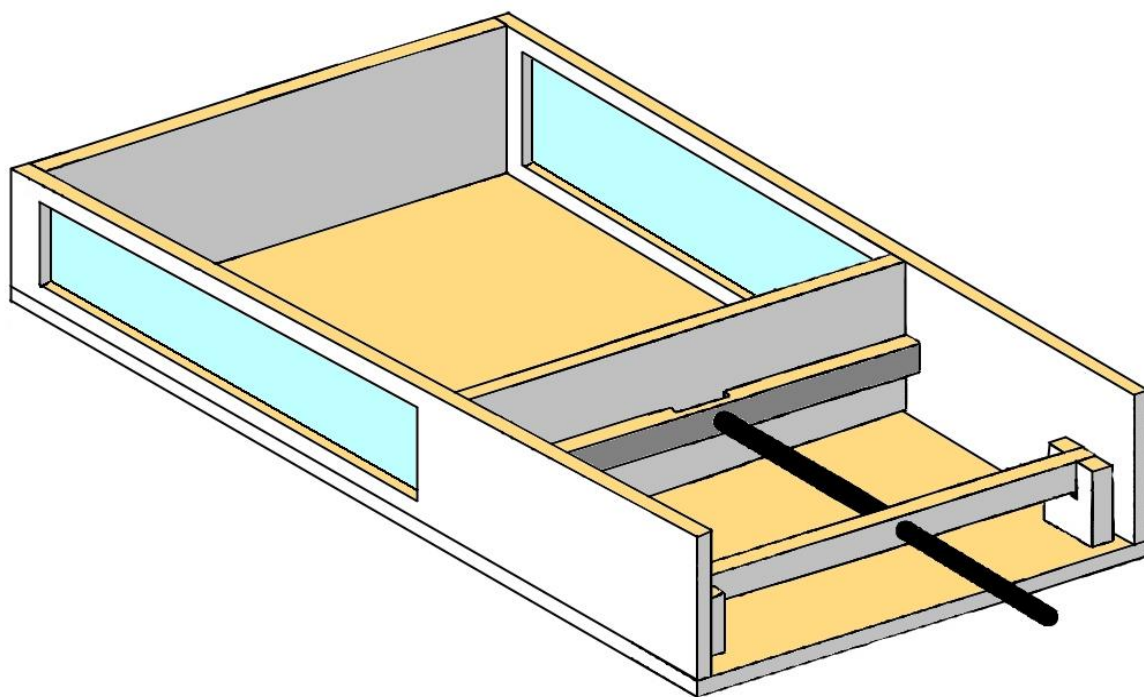
3.2 Konstrukcija aparature

Korištena aparatura, uz manje prilagodbe, izrađena je prema nacrtima koje su dizajnirali Mario del Castello i John Sweeney, a dostupni su na web stranici www.rocktraumacenter.wikispaces.com [8], a izradili su je Borna Lužar-Oberiter i Željko Kastüller 2013 godine.

Dijelovi aparature, prikazani na slici 2, su slijedeći: (1) nosači potporne grede navoja, (2) pomični zid, (3) fiksni zid, (4) potporna greda navoja, (5) bočne stranice aparature s prozorom, (6) bazna ploča, (7) bočne stranice od pleksiglasa.



Slika 2: Konstrukcijski nacrt aparature. Dijelovi: (1) nosači potporne grede navoja, (2) pomični zid, (3) fiksni zid, (4) potporna greda navoja, (5) bočne stranice aparature s prozorom, (6) bazna ploča, (7) bočne stranice od pleksiglasa (preuzeto s [1]).



Slika 3: Sastavljena aparatura u nemodificiranoj verziji.

Dimenzije nemodificirane aparature iznose: dužina: 90 cm, širina: 49.6 cm, visina: 30 cm. Svi osim pokretnih dijelova spojeni su, pod pravim kutovima, vijcima kako bi se dobio čvrst i siguran spoj. Aparatura je dizajnirana tako da se sila, preko navoja i pomičnog zida, prenosi na pijesak položen u raznobojnim slojevima u prostor između pomičnog i fiksnog zida. Aparatura se pokreće ručno okretanjem ručice montirane na navoj. Navoj je preko potporne grede, u kojoj se nalazi vijak, spojen na pomični zid slobodnim spojem kako bi se omogućilo okretanje, te namješten u vodoravan položaj s baznom pločom. Potporna greda montirana je na nosače iste, učvršćene na bočne stranice aparature u kojima je izrezan prozor te montiran pleksiglas kako bi se omogućilo promatranje struktura nastalih u aparaturi tokom eksperimenta.

Pleksiglas je u aparaturi potrošni dio, te će ga nakon nekog vremena biti potrebno zamijeniti zbog smanjene providnosti kojoj su uzrok ogrebotine nastale mehaničkim djelovanjem zrnaca pijeska usred njihova pomicanja tokom izvođenja eksperimenata. Pomični dijelovi aparature trebaju biti podmazani kako bi im se omogućilo što lakše gibanje

3.3 Modifikacija aparature

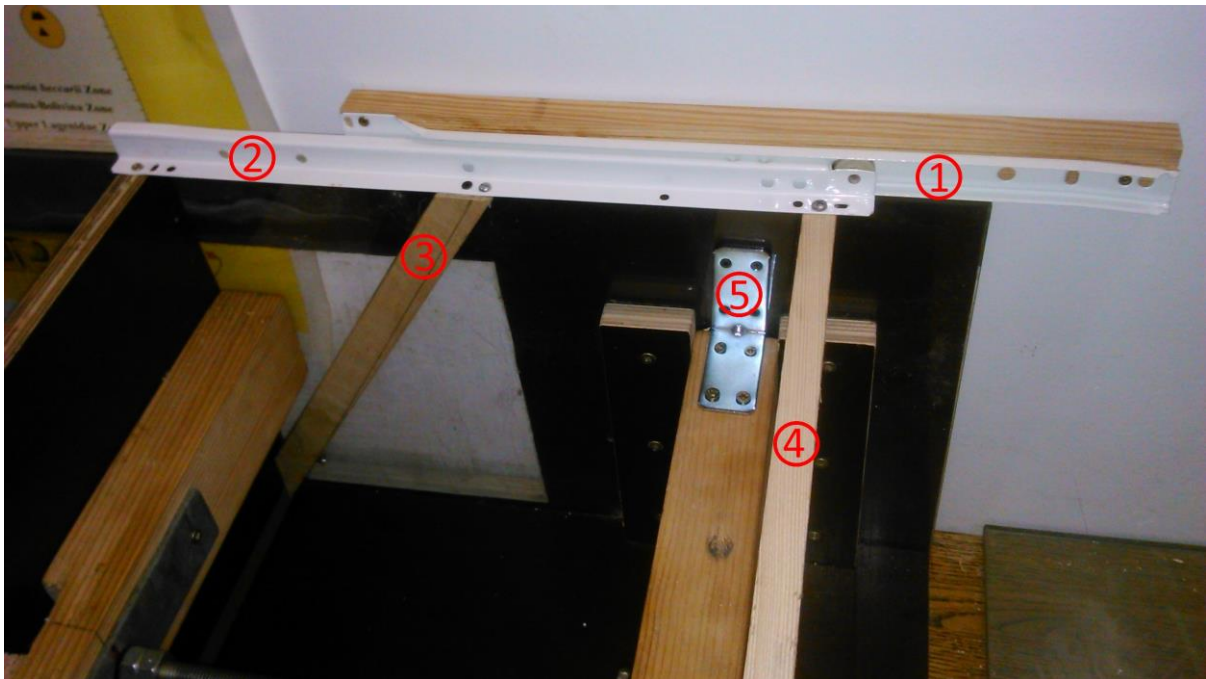
U dizajnu izvorne aparature uočeni su nedostaci koji su otežavali izvođenje eksperimenta te interpretaciju dobivenih rezultata, o čemu je dosta pisano na webu [9]. Te nedostatke bilo je potrebno ukloniti kako bi se eksperimenti izveli što jednostavnije, te kako bi se dobiveni rezultati mogli precizno interpretirati.

Glavni nedostatak izvorne aparature bio je nagnjanje pomičnog zida tokom provođenja eksperimenta što je dovelo do asimetrije raspodjele sile na pijesak i većeg trenja pomičnog zida sa baznom pločom i stranicama aparature (slika 4).



Slika 4: Jedan od pokusa iz 2015. Uočljivo je nagnjanje pomičnog zida kao nedostatak izvornog dizajna aparature.

Povećano trenje uzrokovalo je vibraciju cijele aparature što je onemogućavalo jasno snimanje tijekom provođenja eksperimenta. Ovaj nedostatak otklonjen je ugradnjom sustava vodilica, koji se sastoji od fiksne i pomične vodilice, na stranice aparature i gornji dio pomičnog zida čime se postiglo pravocrtno kretanje pomičnog zida bez trenja s baznom pločom. Radi dodatne stabilnosti pomičnih vodilica i sprečavanja njihovog motanja pod pritiskom, između njih i pomičnog zida ugrađeni su kutni oslonci koji rasterećuju pomične vodilice i silu prenose na pomični zid. Također, između dvije pomične vodilice ugrađena je traverza koja sprečava iskakanje pomičnih vodilica iz onih fiksni i osigurava njihovo pravocrtno gibanje (slika 5).



Slika 5: Modifikacije aparature: (1) fiksna vodilica, (2) pomična vodilica, (3) kutni oslonac, (4) traverza, (5) dodatni spoj potporne grede navoja sa stranicom aparature.

Daljnji nedostatak aparature bio je nedovoljno čvrst spoj potporne grede navoja sa stranicama aparature što je dovodilo do klimanja stranica, a samim time i do neželjenih vibracija tokom provođenja eksperimenta. Kako bi se riješio ovaj problem ugrađen je željezni kutnik koji je učvrstio spoj potporne grede navoja i stranica aparature i otklonio klimanje stranica.

Problem istjecanja pijeska iza stranica pomičnog zida smanjen je zadebljanjem njegovih stranica ubacivanjem sloja tanke meke spužve, no nije u potpunosti uklonjen.

Za provedbu pokusa ekstenzije i kompresije na rasjednoj rampi bilo je potrebno dodatno modificirati aparaturu kako bi se postigli željeni učinci. Aparatura je dodatno modificirana izradom setova limova koji su omogućili oponašanje procesa koji su se htjeli opisati. Za izradu je korišten željezni lim debljine 1,2 mm.

Za pokus kompresije na rasjednoj rampi izrađen je set limova od dva dijela. Prvi dio je lim koji se pričvršćuje na pomični zid, a njegova je funkcija prijenos cjelokupnog materijala na rasjednu rampu, odnosno njime se htjelo postići učinak kompresije na samoj rasjednoj rampi (1 na Slici 6). Bez ovog dijela učinak kompresije bio bi odmah uz pomični zid. Drugi dio seta je lim savinut u oblik rasjedne rampe te je njegova uloga bila oponašanje iste, a pričvršćen je za nepomični zid aparature (2 na Slici 6). Limovi su postavljeni tako da prvi lim zalazi pod drugi. Za pokus ekstenzije izrađen je set limova od dva gotovo jednaka dijela, od kojih se jedan pričvršćivao na pomični zid (B na Slici 6), drugi lim na onaj fiksni (A na Slici 6), a postavljeni su tako da prvi lim zalazi pod drugi. Postavljanje seta limova omogućio je učinak ekstenzije u centralnom dijelu materijala. Da bi se postigao učinak ekstenzije na duž cijelog postavljenog materijala na pomični i fiksni zid, a iznad seta limova, postavljena je tanka guma (C na Slici 6).



Slika 6: Izrađeni setovi limova i izgled aparature pred postavljanje pokusa ekstenzije (lijevo) i pokusa kompresije na rasjednoj rampi (desno). Desno: (1) lim pričvršćen na pomični zid, (2) lim pričvršćen na fiksni zid. Lijevo: (A) lim pričvršćen na fiksni zid, (B) lim pričvršćen na pomični zid, (C) guma.

3.4 Korišteni materijali

Korištene su dvije vrste pijeska različite granulacije. U prvom pokusu kompresijske tektonike (u daljnjem tekstu PK1) za simulaciju stijena korišten je kvarcni pijesak isključivo iste granulacije. U pokusu kompresije na rasjednoj rampi (u daljnjem tekstu PKRR), te u pokusu ekstenzijske tektonike (u daljnjem tekstu PET) za simulaciju stijena korišten je kvarcni pijesak različitih granulacija. Prvi od dva pijeska (u daljnjem tekstu pijesak 1), kupljen u trgovini građevinskog materijala, izvorno smeđe-sive boje, obojan je u plavo i zeleno građevinskim pigmentom za akrilne boje za unutarnje uređenje uz posredstvo vode, te osušen u peći. Drugi pijesak (u daljnjem tekstu pijesak 2) donesen je iz pjeskokopa te je prirodno crvene i žute boje.

Radna pretpostavka bila je da će se pri različitom postavljanju eksperimenta kroz njegov tijek stvarati različite strukture. Sukladno tome, u drugom pokusu kompresijske tektonike (u daljnjem tekstu PK2) za simulaciju stijena korištena su oba pijeska te brašno kako bi se u sustav uvela promjena granulometrije te ispitao njen utjecaj na ishod pokusa.

Granulometrija materijala korištenog u svim eksperimentima vidljiva je u tablici 1.

Tablica 1: Granulacija materijala korištenog u pokusima

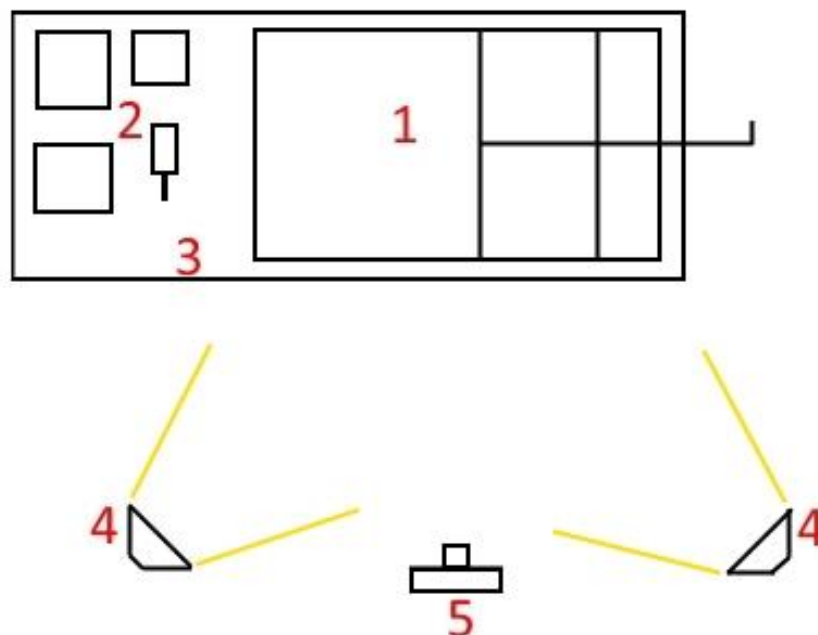
Promjer zrna	Materijal		
	Pijesak 1: smeđe-sivi, plavi, zeleni [%]	Pjesak 2: crveni, žuti [%]	Brašno [%]
0,466	91,355	3	-
0,263	4,542	23	-
0,122	3,663	68	59,606
0,063	0,44	4,5	32,573
< 0,063	-	1,5	7,821

4. Postavljanje i provedba pokusa

Postavljanje eksperimenta prvi je korak u njegovom izvođenju, a isto tako je i najutjecajni na krajnji ishod eksperimenta. Pri izvođenju eksperimenata korišten je prosijani kvarcni pijesak s dvije različite granulacije, a u PK2 i brašno kako bi su sustav uvela asimetrija granulacije i pokušalo simulirati različite vrste stijena u zemljinoj litosferi.

Aparatura je postavljena na stol i fiksirana kako bi se izbjegle vibracije tokom provođena eksperimenata, a samim time i osigurala bolja kvaliteta snimke eksperimenta. Tijekom postavljanja eksperimenata pijesak i brašno sijani su ručno te ravnani pomagalima kako bi se dobili što ravniji slojevi. Nastojalo se da slojevi budu što tanji i raznolikiji kako bi nastale strukture bile bolje uočljive.

Eksperimenti su snimani fotoaparatom fiksno postavljenim pred aparaturom tako da snima prozor na bočnoj stranici aparature. Aparatura je dodatno osvijetljena s dva reflektora kako bi se osigurala kvalitetnija snimka, a reflektori su postavljeni tako da nema odsjaja od prozora aparature. Tlocrt postava aparature vidljiv je na slici 7.

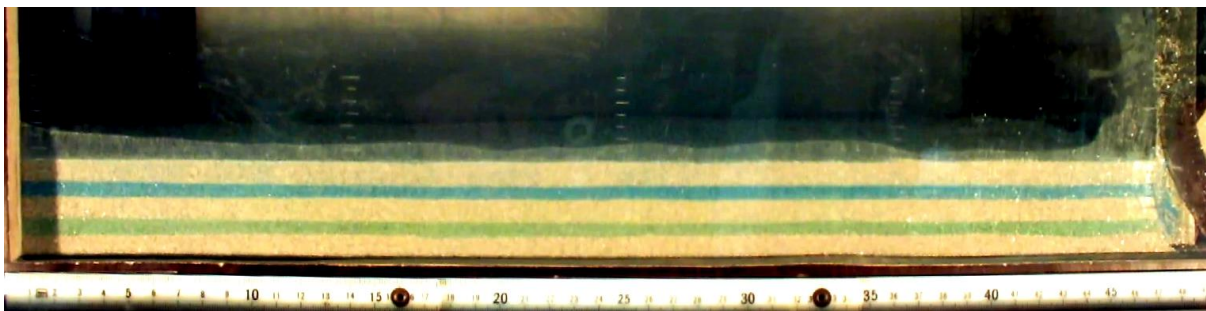


Slika 7: Tlocrt postava aparature za provođenje eksperimenata. (1) aparaturna, (2) materijal, (3) stol na kojem je postavljena aparaturna, (4) reflektori, (5) fotoaparat.

4.1 Postavljanje prvog pokusa kompresijske tektonike (PK1)

Pri postavljanju PK1 korišten je isključivo pijesak jednake granulacije, i to smeđe-sive, zelene i plave boje. Postavljeno je ukupno pet slojeva, i to idući od najnižeg prema najvišem: sloj smeđe-sivog pijeska, sloj zelenog pijeska, sloj smeđe-sivog pijeska, sloj plavog pijeska te sloj smeđe-sivog pijeska. Slojevi smeđe-sivog pijeska su prosječne debljine 10 mm, dok su slojevi zelenog i plavog pijeska prosječne debljine 5 mm.

Ukupna visina postavljenog materijala iznosila je prosječno 40 mm, dok je njegova dužina iznosila 480 mm. Provedba pokusa traje dvije minute.



Slika 8: Postava prvog pokusa kompresijske tektonike (PK1)

4.2 Postavljanje drugog pokusa kompresijske tektonike (PK2)

Pri postavljanju PK2 korištene su dvije vrste pijeska različite granulacije te brašno kako bi se ispitaio utjecaj različite granulometrije slojeva na tijek i ishod pokusa. Postavljeno je ukupno šest slojeva. Prvi sloj je sloj pijeska 2, žute boje i prosječne debljine 10 mm. Drugi sloj je sloj pijeska 1, plave boje i prosječne debljine 5 mm. Treći je sloj brašna, prosječne debljine 10 mm koji se proteže cijelom dužinom i širinom postavljenog materijala. Četvrti je sloj pijeska 2, crvene boje i prosječne debljine 5 mm. Nakon njega slijedi sloj pijeska 2 žute boje i prosječne debljine 5 mm. Najviši je sloj pijeska 1, zelene boje i prosječne debljine 10 mm.

Ukupna visina postavljenog materijala prosječno iznosi 45 mm, dok je njegova dužina 480 mm. Nastojalo se da postavljeni slojevi budu što ravniji, no, priroda brašna je tu namjeru znatno otežala. Provedba pokusa traje dvije i pol minute.



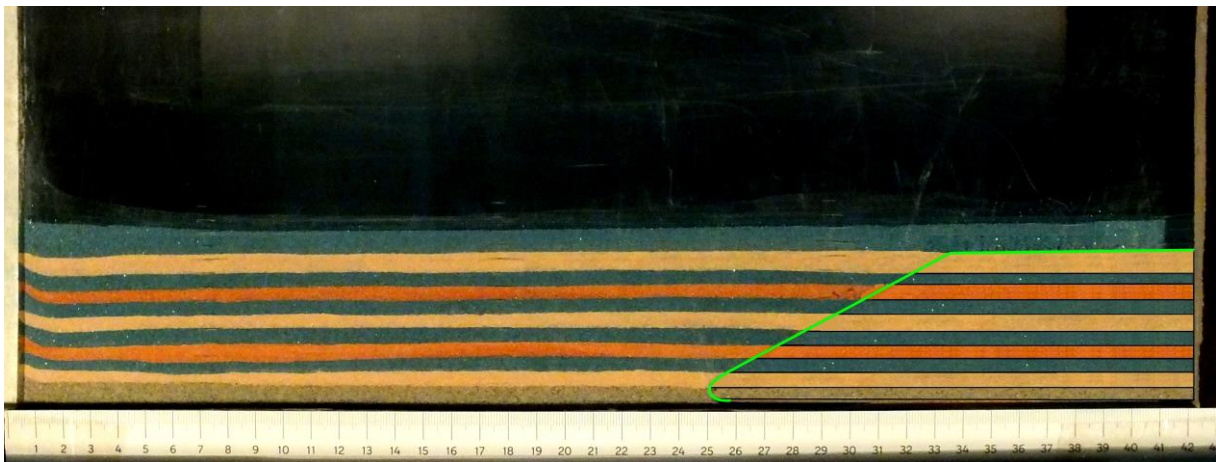
Slika 9: Postava drugog pokusa kompresijske tektonike (PK2)

4.3 Postavljanje pokusa kompresije na rasjednoj rampi (PKRR)

Pri postavljanju PKRR korišteni su pijesci različite granulacije, pijesak 1 i pijesak 2. Smeđe-sivi, donji sloj i plavi slojevi pripadaju pijesku 1, a žuti i crveni slojevi pripadaju pijesku 2. Slojevi su postavljeni tako da se granulacija izmjenjuje, dakle na pijesak 1 postavljen je pijesak 2 na kojeg je postavljen pijesak 1 i tako dalje. Postavljeno je ukupno 11 slojeva. Slojevi su prosječno 5 mm debljine dok su zadnji i predzadnji nešto deblji, prosječno 8 mm.

Ukupna visina postavljenog materijala iznosi prosječno 62 mm, a njegova dužina 420 mm (slika 10). Provedba pokusa traje dvije minute.

Zelena linija na slici 10 dodana je računalno i ocrta rasjednu rampu. Smjer nagiba rasjedne rampe je zapad, s kutom nagiba 30° . Slojevi ispod, odnosno desno od rasjedne rampe također su računalno dodani i pretpostavka je da se u njima ne događa nikakva deformacija. Izgled rasjedne rampe bez postavljenog materijala vidljiv je na slici 6, desno.

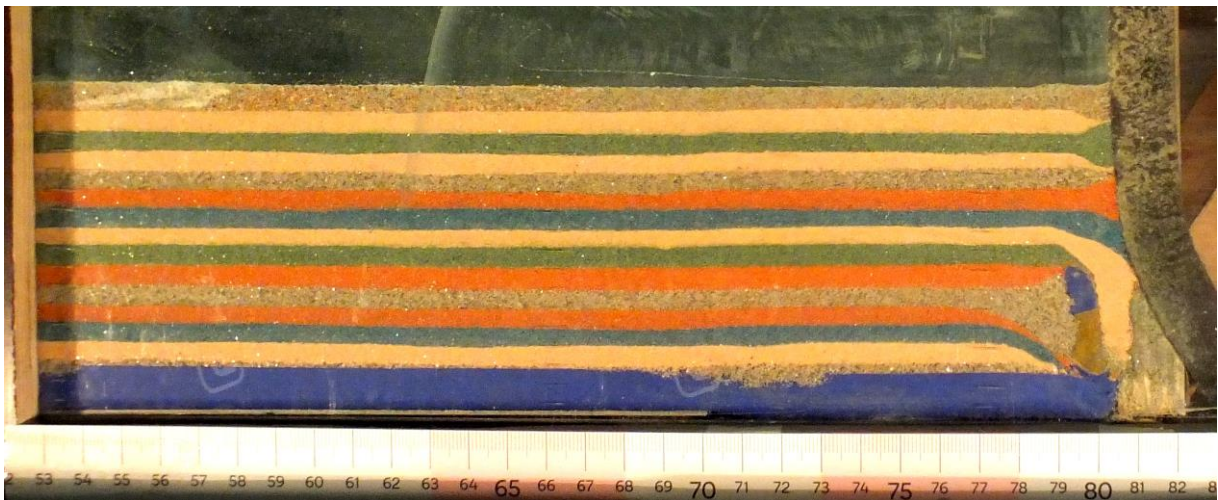


Slika 10: Postava pokusa kompresije na rasjednoj rampi

4.4 Postavljanje pokusa ekstenzije (PET)

Pri postavljanju PET korišteni su pijesci različite granulacije, pijesak 1 i pijesak 2. Kao i kod PKRR, slojevi su postavljeni tako da se granulacija izmjenjuje, dakle na pijesak 1 postavljen je pijesak 2 na kojeg je postavljen pijesak 1 i tako dalje. Postavljeno je ukupno 15 slojeva, prosječne debljine 5 mm. Prvi postavljeni sloj nešto je deblji i pokriven je slojem gume, koja je presavijena na taj način da ekstenzijom nikako ne može doći do njenog povlačenja ka centru aparature i prestanka obnašanja njene zadaće. Taj sloj ne ulazi u interpretaciju, kao ni prvih 30 mm materijala od pomičnog zida čiji su slojevi postavljeni nepravilno zbog otežanog sijanja pijeska preko spoja gume sa pomičnim zidom.

Ukupna visina postavljenog materijala iznosi prosječno 83 mm, a njegova dužina 227 mm (slika 11). Provedba pokusa traje tri minute.

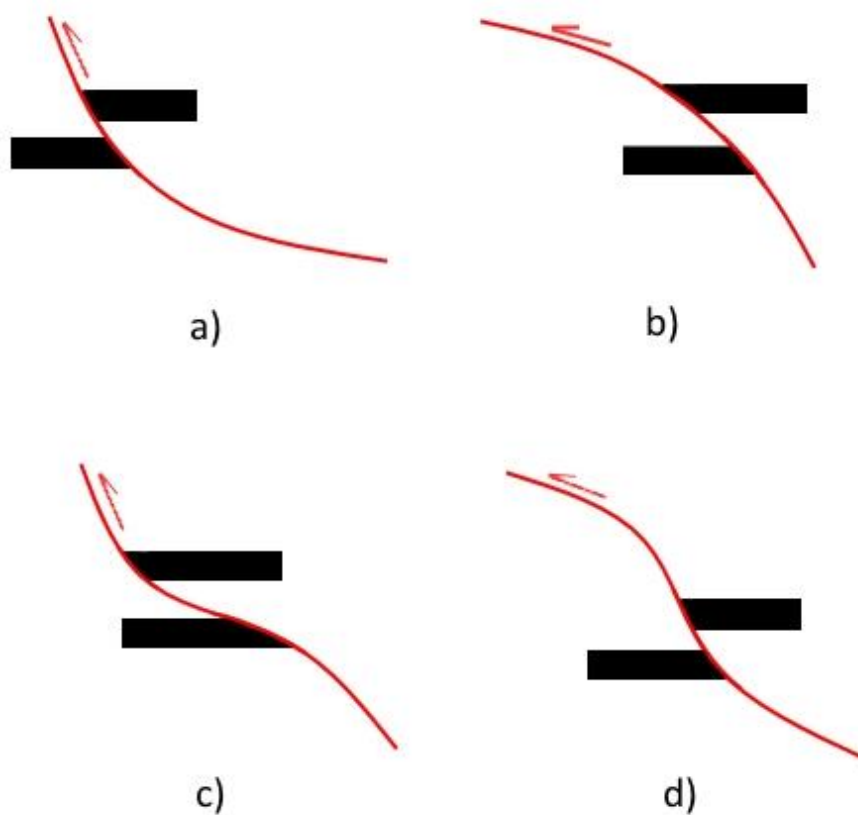


Slika 11: Postava pokusa ekstenzijske tektonike

5. Rezultati

U ovom poglavlju prikazane su interpretirane slike izvedenih pokusa te su dani kinematički opisi nastalih struktura. Rasjedi su numerirani po redoslijedu nastanka. U slučaju kompresijskih pokusa slike su snimane svakih 50 mm kompresije tijekom pokusa, a u slučaju ekstenzijskog pokusa slike su snimane svakih 50 mm ekstenzije. Svaki eksperiment prikazan je u sukcesiji na jednoj stranici kako bi razvoj nastanka struktura bio što pregledniji. Uz slike su dani podaci o postotku kompresije ili ekstenzije.

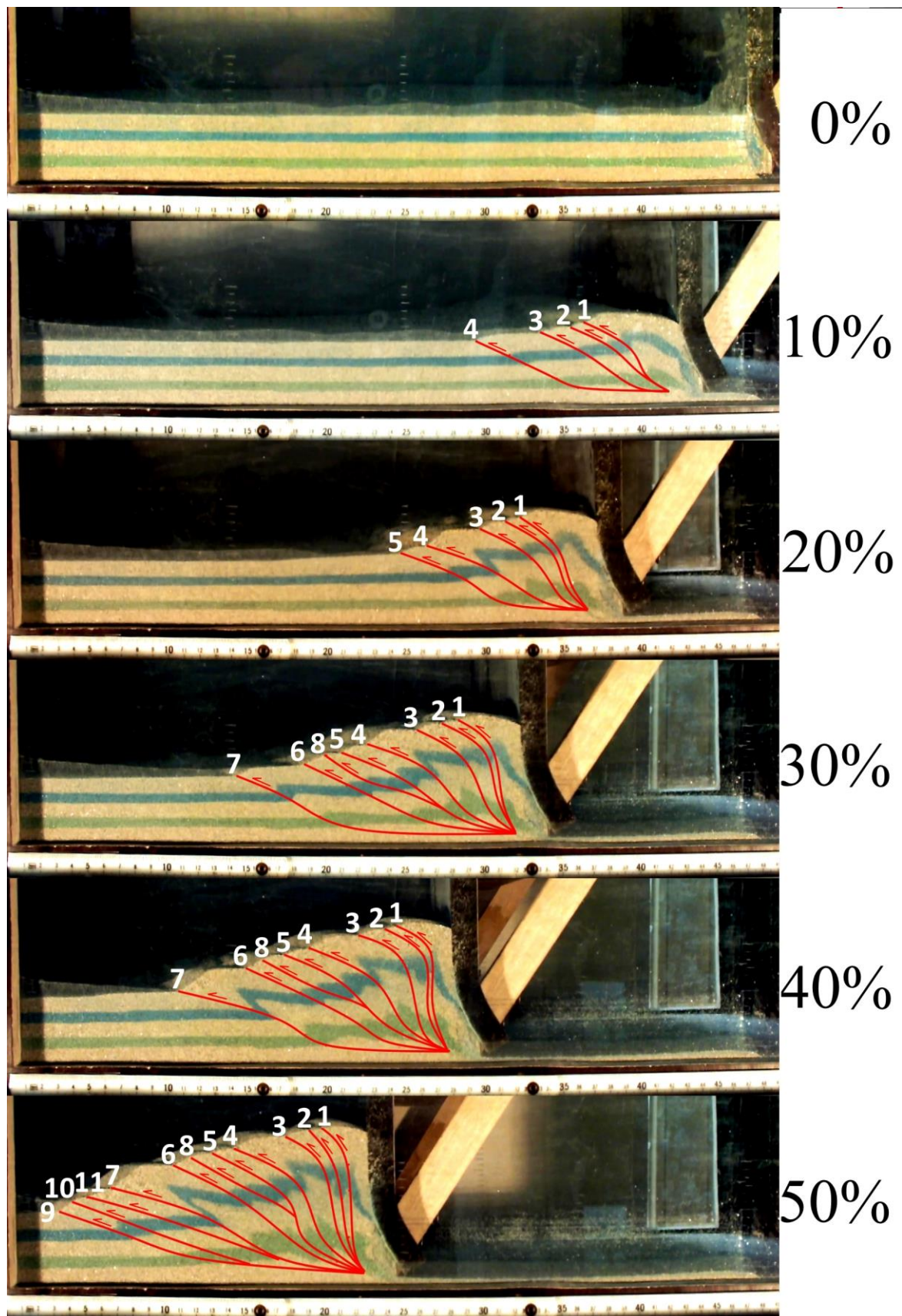
Slike faza pokusa snimane su iz videa u programu BS Player FREE na računalu, a obrada slika i iscrtavanje rasjeda rađeno je u programu paint.net. Interpretacija slika, tj. kutova i dužina rasjeda rađena je također računalno u programu paint.net. Slike su računalno obrađene kako bi nastale strukture bile što uočljivije pojačavanjem kontrasta i saturacije za 30%.



Slika 12: Skice različitih geometrija rasjeda. a) Listrički rasjed; b) Antilistrički rasjed; c) Ramp-flat-ramp rasjed; d) Flat-ramp-flat rasjed

U tablicama su dani detaljni podaci o nastalim rasjedima. Nekim rasjedima mjereno je kut na više mjesta kako bi se isti što točnije definirali. Sukladno tome, gornji kut predstavlja onaj kut rasjeda koji bi mjerili na površini terena, srednji kut mjereno je u sredini dužine rasjeda ili u karakterističnom sloju, a donji kut mjereno je pri samom korijenu rasjeda. Prosječni kut je onaj koji je program odredio iscrtanoj liniji koja predstavlja rasjed. Kutovi su mjereni na više mjesta kako bi se rasjedi što točnije geometrijski opisali. Prema tome, listrički rasjed je onaj čiji se kut nagiba smanjuje idući od površine prema njegovom korijenu, dok je antilistrički rasjed onaj rasjed kojem se kut nagiba povećava idući od površine prema njegovom korijenu [10]. Ramp-flat-ramp je onaj rasjed čiji je kut nagiba veći pri površini, zatim se smanjuje i ponovno povećava pred krojenom rasjeda [10]. Flat-ramp-flat je tip geometrije rasjeda kod kojeg je kut nagiba pri površini manji, zatim se povećava te ponovno smanjuje pri korijenu. Na slici 12 prikazane su skice rasjeda navedenih geometrija. U tablicama su također dani smjerovi nagiba rasjeda, pri čemu lijeva strana slike predstavlja zapad, a desna istok. Pretpostavlja se da aktivnost rasjeda odražava promjena njegove dužine.

5.1 Prvi pokus kompresijske tektonike (PK1)



Slika 13: Set interpretiranih slika pri različitim kompresijama iz PK1

U prvom pokusu kompresijske tektonike nastaje ukupno 11 rasjeda. Rasjedi nastaju u setovima po prosječno tri rasjeda, a svi nastali rasjedi imaju zajednički korijen. Rasjedi 1, 2 i 3 nastaju blisko jedan drugome i pod sličnim kutom nastanka. Geometrijski, ovi rasjedi su pri nastanku listrički, no njihova geometrija se mijenja vrlo brzo u flat-ramp-flat. Rasjedi 4, 5 i 6 nastaju distalnije od prvog seta rasjeda, također pod sličnim kutom nastanka. Rasjedi u ovom setu su pri nastanku listrički, a njihova se geometrija u daljnjem tijeku pokusa mijenja u flat-ramp-flat. Rasjed 8 nastaje između rasjeda 5 i 6, na otprilike polovici njihove međusobne udaljenosti, pod nešto većim kutom nastanka, te se spaja sa rasjedom 5 pri njegovoj polovici. Geometrija ovog rasjeda pri nastanku je ramp-flat-ramp i ne mijenja se kroz tijek pokusa. Rasjedi 7 i 9 nastaju kao listrički pod sličnim kutom nastanka, te distalnije od prethodnog seta rasjeda. Geometrija rasjeda 7 prelazi tokom daljnje kompresije u flat-ramp-flat, dok se geometrija rasjeda 9 ne mijenja do kraja pokusa. Rasjed 10 nastaje istočno od rasjeda 9, s kojim se spaja, kao listrički. Rasjed 11 spaja se sa rasjedom 7 od kojeg nastaje zapadno kao antilistrički. Kutovi nastanka rasjeda 10 i 11 veći su od kutova nastanka s rasjeda s kojima se spajaju. U zadnjoj fazi kompresije, kutovi nagiba rasjeda 7, 9, 10 i 11 su u gornjem dijelu vrlo bliski, te se navedeni rasjedi međusobno nalaze na približno jednakim udaljenostima.

Svi nastali rasjedi imaju smjer nagiba prema istoku, a njihov se kut nagiba kroz tijek pokusa povećava. Kutovi nastanka rasjeda se smanjuju kod povećanja postotka kompresije. Gledajući na relativnu dužinu rasjeda, svi nastali rasjedi, osim rasjeda 8, mogu se nazvati glavnima. Rasjed 8 u tom bi slučaju bio sintetički. Detaljni opisi nastalih struktura dani su u tablicama 2, 3, 4, 5 i 6. Srednji kutovi nagiba u ovom pokusu mjereni su središnjem sloju (trećem sloju od dna). Visina postavljenog materijala nakon provedbe pokusa iznosi 87 mm, odnosno 218% početne visine.

Tablica 2: Dužine, kutevi, geometrija i smjer nagiba rasjeda pri kompresiji od 10%

PK1	KOMPRESIJA: 10%						
Rasjed br.	Dužina [mm]	Kut [°]				Smjer nagiba	Geometrija rasjeda
		Prosječni	Gornji	Strednji	Donji		
1	68,82	38,09	23,59	52,85	28,61	I	Flat-ramp-flat
2	71,76	32,06	22,52	43,03	28,61	I	Flat-ramp-flat
3	88,00	23,83	23,20	35,54	10,44	I	Flat-ramp-flat
4	124,12	14,07	23,78	23,70	1,26	I	Listrički

Tablica 3: Dužine, kutevi, geometrija i smjer nagiba rasjeda pri kompresiji od 20%

PK1	KOMPRESIJA: 20%						
Rasjed br.	Dužina [mm]	Kut [°]				Smjer nagiba	Geometrija rasjeda
		Prosječni	Gornji	Strednji	Donji		
1	70,82	52,72	33,02	73,01	53,81	I	Flat-ramp-flat
2	74,82	45,99	27,65	68,88	44,14	I	Flat-ramp-flat
3	84,12	35,93	24,50	52,88	23,26	I	Flat-ramp-flat
4	106,94	21,08	17,53	32,01	9,06	I	Flat-ramp-flat
5	122,00	16,34	19,93	34,62	2,86	I	Flat-ramp-flat

Tablica 4: Dužine, kutevi, geometrija i smjer nagiba rasjeda pri kompresiji od 30%

PK1	KOMPRESIJA: 30%						
Rasjed br.	Dužina [mm]	Kut [°]				Smjer nagiba	Geometrija rasjeda
		Prosječni	Gornji	Strednji	Donji		
1	79,29	62,19	29,36	81,87	66,64	I	Flat-ramp-flat
2	82,94	55,28	26,57	77,99	59,47	I	Flat-ramp-flat
3	89,29	45,23	26,16	64,86	36,43	I	Flat-ramp-flat
4	107,29	30,34	19,12	49,24	19,59	I	Flat-ramp-flat
5	118,47	24,22	19,86	67,12	13,86	I	Flat-ramp-flat
6	137,41	17,57	24,86	25,02	6,12	I	Listrički
7	178,24	11,33	21,80	30,96	1,01	I	Listrički
8	81,29	23,81	34,38	15,59	22,01	I	Ramp-flat-ramp

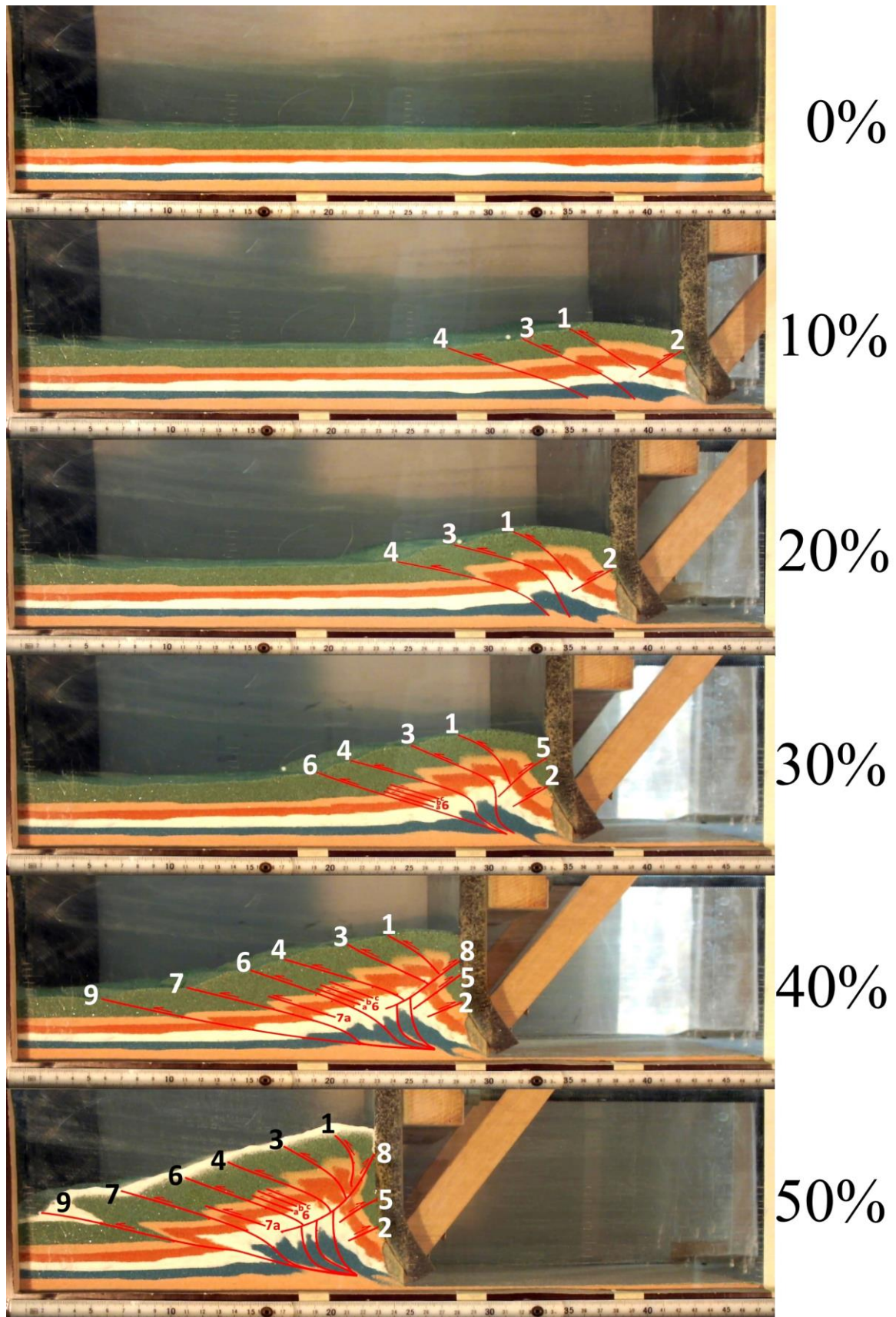
Tablica 5: Dužine, kutevi, geometrija i smjer nagiba rasjeda pri kompresiji od 40%

PK1	KOMPRESIJA: 40%						
Rasjed br.	Dužina [mm]	Kut [°]				Smjer nagiba	Geometrija rasjeda
		Prosječni	Gornji	Strednji	Donji		
1	88,55	67,16	25,91	90,00	67,99	I	Flat-ramp-flat
2	90,36	61,98	27,05	90,00	61,56	I	Flat-ramp-flat
3	98,92	50,91	19,09	78,16	30,96	I	Flat-ramp-flat
4	111,45	35,58	21,63	56,69	24,62	I	Flat-ramp-flat
5	120,84	29,56	21,97	45,83	17,40	I	Flat-ramp-flat
6	138,92	21,59	24,49	29,15	5,91	I	Listrički
7	176,51	12,19	13,47	34,44	1,13	I	Ramp-flat-ramp
8	72,29	23,85	27,35	20,77	22,48	I	Ramp-flat-ramp

Tablica 6: Dužine, kutevi, geometrija i smjer nagiba rasjeda pri kompresiji od 50%

PK1	KOMPRESIJA: 50%						
Rasjed br.	Dužina [mm]	Kut [°]				Smjer nagiba	Geometrija rasjeda
		Prosječni	Gornji	Strednji	Donji		
1	92,05	72,65	37,75	90,00	71,57	I	Flat-ramp-flat
2	92,05	67,75	47,20	81,42	62,35	I	Flat-ramp-flat
3	98,92	58,12	26,18	79,56	45,83	I	Flat-ramp-flat
4	114,70	41,77	22,34	69,59	32,91	I	Flat-ramp-flat
5	123,61	36,53	24,35	75,68	23,89	I	Flat-ramp-flat
6	136,87	27,93	24,15	37,87	18,95	I	Flat-ramp-flat
7	168,31	17,56	14,80	30,80	7,55	I	Flat-ramp-flat
8	74,82	28,01	28,95	25,71	33,69	I	Ramp-flat-ramp
9	195,66	17,83	18,43	19,86	4,70	I	Listrički
11	117,47	18,28	18,80	18,15	16,11	I	Listrički
12	126,27	17,13	13,65	18,43	18,95	I	Antilistrički

5.2 Drugi pokus kompresijske tektonike (PK2)



Slika 14: Set interpretiranih slika pri različitim kompresijama iz PK2

U drugom pokusu kompresijske tektonike nastaje ukupno 13 rasjeda. Glavni rasjedi nastaju odvojeno na otprilike jednakim međusobnim udaljenostima. Rasjed 1 nastaje pod kutom od 36° kao ravan rasjed, a njegova se geometrija već prije 20% kompresije mijenja u antilistričku. Rasjed 2 nastaje suprotno od rasjeda 1 pod sličnim kutom nastanka i njegova ravna geometrija se ne mijenja kroz čitav tok pokusa. Rasjed 3 nastaje pod nešto manjim kutom nastanka nego rasjed 1, jednakog smjera nagiba. On nastaje kao antilistrički no njegova se geometrija mijenja u flat-ramp-flat između 20% i 30% kompresije i takva ostaje do kraja provedbe pokusa. Geometrijska evolucija rasjeda 4 jednaka je rasjedu 3, kao i smjer nagiba, no on nastaje pod već znatno manjim kutom od 23° . Rasjed 5 nastaje pod kutom od 43° , dakle nešto većim nego rasjed 2, sa smjerom nagiba ka zapadu. Njegova je geometrija od nastanka do kraja pokusa ravna. Nije jasno presijeca li rasjed 1 ili se on na njemu zaustavlja, no sasvim je sigurno da se rasjed 5 zaustavlja na rasjedu 3. Rasjed 6 pripada skupini rasjeda koji imaju smjer nagiba prema istoku. Nastaje pod kutom bliskom rasjedu 4, no od njega se razlikuje po početnoj geometriji koja iz ravne prelazi u flat-ramp-flat ubrzo nakon nastanka rasjeda. Između rasjeda 6 i 4 nastaje set od 3 slijepa ravna rasjeda, označenih kao 6a, 6b i 6c koja nastaju gotovo istovremeno sa smjerom nagiba prema istoku. Njihova je geometrija pri nastanku ravna i takva ostaje do kraja pokusa. Nastaju pod skoro jednakim kutom nastanka, koji je blizak kutu nagiba rasjeda 6. Rasjed 7 nastaje kao antilistrički, pod manjim kutom nastanka u odnosu na mlađe rasjede sa smjerom nagiba ka istoku, a njegova se geometrija vrlo brzo nakon nastanka mijenja u flat-ramp-flat. Slijepi rasjed 7a nastaje između rasjeda 7 i 6, pod kutom gotovo jednakim nastanku rasjeda 6. Njegova je geometrija ravna i ne mijenja se do kraja pokusa. Paraklaza rasjeda 8 ima smjer nagiba prema zapadu, nastaje pod gotovo jednakim kutom kao i rasjed 5 i sječe rasjede 3, 4 i 6. Nastaje kao listrički i takav ostaje do kraja pokusa. Rasjed 9 jedini je od istočno usmjeravanih rasjeda koji nastaje kao listrički, te je i njegov kut nastanka najmanji. Daljnjim tijekom pokusa geometrija rasjeda 9 prijelazi u flat-ramp-flat.

Nakon 20% kompresije razvija se dekolmanski horizont iz kojeg rastu rasjedi 3, 4, 6, 7 i 9. Kutovi nagiba rasjeda osciliraju tokom tijeka kompresije, no načelno se kut rasjeda povećava s postotkom kompresije. Nakon 40% kompresije na površinu materijala dodan je tanki sloj brašna kako bi se naglasila aktivnost najmlađeg rasjeda. Pri kompresiji od 40% razvijeni su svi rasjedi. U toj situaciji, s obzirom na relativnu dužinu, rasjede 3, 4, 6, 7 i 9 moglo bi se nazvati glavnim rasjedima, rasjede 1, 6a, 6b, 6c i 7a sintetičkim, a rasjede 2, 5 i 8 antitetičkim. Za glavne rasjede su odabrani oni čija dužina premašuje 100 mm, no ova je podjela relativna i ilustrativna. Svi glavni rasjedi nastaju na međusobno relativno jednakim udaljenostima. Geometrija sintetičkih i antitetičkih rasjeda se ne mijenja za razliku od glavnih rasjeda. Detaljni opisi nastalih struktura dani su u tablicama 7, 8, 9, 10 i 11. Srednji kutovi nagiba u ovom pokusu mjereni su sredinama dužina rasjeda. Visina postavljenog materijala nakon provedbe pokusa iznosi 100 mm, odnosno 222% početne visine.

Tablica 7: Dužine, kutevi, geometrija i smjer nagiba rasjeda PK2 pri kompresiji od 10%

PK2	KOMPRESIJA 10 %						
Rasjed br.	Dužina [mm]	Kut [°]				Smjer nagiba	Geometrija rasjeda
		Prosječni	Gornji	Srednji	Donji		
1	50,3	35,95	-	-	-	I	Ravan
2	32,4	36,3	-	-	-	Z	Ravan
3	82,7	32,48	27,92	36,03	42,9	I	Antilistrički
4	93,3	23	21	26,57	28	I	Antilistrički

Tablica 8: Dužine, kutevi, geometrija i smjer nagiba rasjeda PK2 pri kompresiji od 20%

PK2	KOMPRESIJA 20 %						
Rasjed br.	Dužina [mm]	Kut [°]				Smjer nagiba	Geometrija rasjeda
		Prosječni	Gornji	Srednji	Donji		
1	51,4	43,42	31,3	45	54,74	I	Antilistrički
2	30,1	33,41	-	-	-	Z	Ravan
3	95,1	37,09	17,3	38,93	66,34	I	Antilistrički
4	102,7	23,32	14,94	31,7	45,58	I	Antilistrički

Tablica 9: Dužine, kutevi, geometrija i smjer nagiba rasjeda PK2 pri kompresiji od 30%

PK2	KOMPRESIJA 30 %						
Rasjed br.	Dužina [mm]	Kut [°]				Smjer nagiba	Geometrija rasjeda
		Prosječni	Gornji	Srednji	Donji		
1	49,6	47,73	29,74	50,83	66,32	I	Antilistrički
2	26	33,69	-	-	-	Z	Ravan
3	98,4	40,01	26,4	89	40	I	Flat-ramp-flat
4	114,1	28,84	18	64	35	I	Flat-ramp-flat
5	41,1	42,97	-	-	-	Z	Ravan
6	125,4	20,82	-	-	-	I	Ravan
6a	32,9	19,2	-	-	-	I	Ravan
6b	31,9	19,29	-	-	-	I	Ravan
6c	32	19,05	-	-	-	I	Ravan

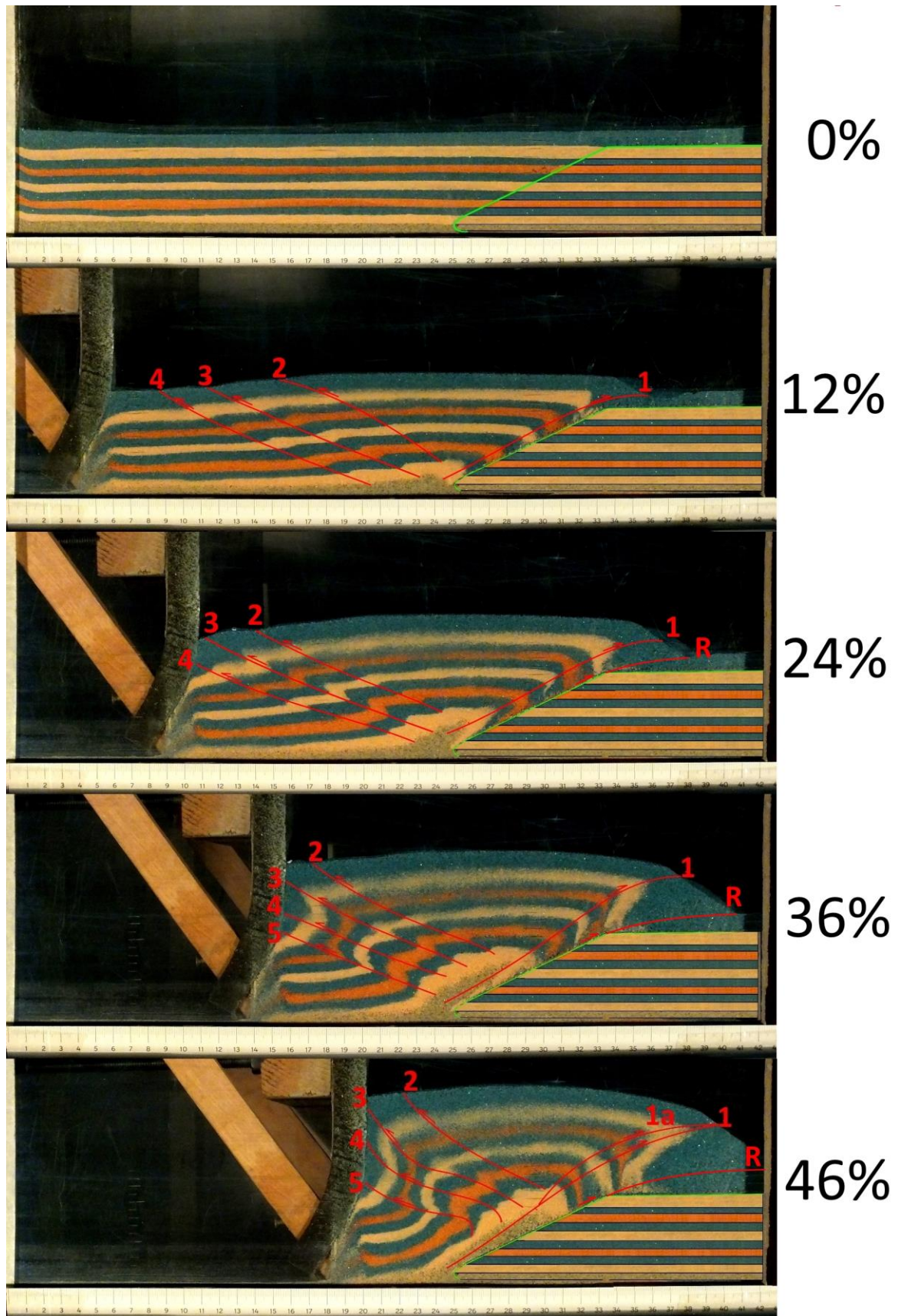
Tablica 10: Dužine, kutevi, geometrija i smjer nagiba rasjeda PK2 pri kompresiji od 40%

PK2	KOMPRESIJA 40 %							
	Rasjed br.	Dužina [mm]	Kut [°]				Smjer nagiba	Geometrija rasjeda
			Prosječni	Gornji	Srednji	Donji		
1	43	42,47	34,59	38,99	54,25	I	Antilistrički	
2	24,3	26,85	-	-	-	Z	Ravan	
3	101,7	48	31,1	88	42	I	Flat-ramp-flat	
4	126,7	35,91	19,75	88,09	27,55	I	Flat-ramp-flat	
5	38,7	41,37	-	-	-	Z	Ravan	
6	130,8	27,33	23,22	43	10	I	Flat-ramp-flat	
6a	29,6	24,09	-	-	-	I	Ravan	
6b	29,8	23,81	-	-	-	I	Ravan	
6c	29,6	24,49	-	-	-	I	Ravan	
7	162	16,77	17	40	4,25	I	Flat-ramp-flat	
7a	44,4	20,72	-	-	-	I	Ravan	
8	59,2	42,25	-	-	-	Z	Listrički	
9	208,9	10,47	15,88	10,27	4,25	I	Listrički	

Tablica 11: Dužine, kutevi, geometrija i smjer nagiba rasjeda PK2 pri kompresiji od 40 %

PK2	KOMPRESIJA 50 %							
	Rasjed br.	Dužina [mm]	Kut [°]				Smjer nagiba	Geometrija rasjeda
			Prosječni	Gornji	Srednji	Donji		
1	39,4	73,24	47	86	96,91	I	Antilistrički	
2	21,1	27,22	-	-	-	Z	Ravan	
3	103,8	43,18	33	89	51	I	Flat-ramp-flat	
4	122,9	29,07	23	90	30	I	Flat-ramp-flat	
5	28,3	34,58	-	-	-	Z	Ravan	
6	135,5	24,51	22	84	20	I	Flat-ramp-flat	
6a	27,5	22,83	-	-	-	I	Ravan	
6b	26,6	23,43	-	-	-	I	Ravan	
6c	27	24	-	-	-	I	Ravan	
7	159,7	21,83	18,56	42	12	I	Flat-ramp-flat	
7a	39,8	20,38	-	-	-	I	Ravan	
8	82,2	42,99	62	42	17	Z	Listrički	
9	198,5	13	8,39	10,68	7,4	I	Flat-ramp-flat	

5.3 Pokus kompresije na rasjednoj rampi (PKRR)



Slika 15: Set interpretiranih slika pri različitim kompresijama iz PKRR

U pokusu kompresijske tektonike na rasjednoj rampi nastaje ukupno 6 rasjeda. Većina rasjeda nastaje zasebno, bez zajedničkih korijena ili dekolmanskog horizonta. Rasjed 1 nastaje pod kutom od 30 stupnjeva kao antilistrički sa smjerom nagiba prema zapadu. Njegova geometrija, kao ni kut nagiba, se kroz tijek pokusa ne mijenjaju značajno. Rasjed 2 nastaje suprotno od rasjeda 1, pod njemu bliskim kutom, kao listrički. Njegova se geometrija ne mijenja kroz tijek pokusa. Njegov prosječni kut nagiba kroz tijek pokusa varira. Rasjed 3 nastaje kao listrički, sa smjerom nagiba ka istoku, i takav ostaje sve do zadnje faze kompresije kada prelazi u ramp-flat-ramp. Njegov prosječni kut nagiba je relativno stalan do posljednje faze kompresije kada se povećava. Kut nastanka rasjeda 4 vrlo je blizak kutu nastanka rasjedu 3, a jednakog su i smjera nagiba. Kut nagiba rasjeda 4 također se povećava u zadnjoj fazi kompresije. Rasjed 4 geometrijski je vrlo promjenjiv: iz listričkog prelazi u ramp-flat-ramp, te zatim postaje ravan, da bi se na posljetku vratio u ramp-flat-ramp geometriju. Rasjed broj 5 nastaje kao ravan, pod manjim kutom nastanka nego drugi istočno orijentirani rasjedi. Njegova geometrija prelazi u ramp-flat-ramp. U zadnjoj fazi kompresije nastaje rasjed 1a, račvanjem iz rasjeda jedan na otprilike 35% njegove dužine, te se spaja natrag sa rasjedom 1 pri njegovom vrhu. Geometrijom je rasjed 1a antilistrički, a njegov je prosječni i gornji kut nagiba manji su od prosječnog i gornjeg kuta nagiba rasjeda 1. Sa R je označen pretpostavljeni pomak po rasjednoj rampi.

Gornji kutovi nagiba svih istočno orijentiranih rasjeda se povećavaju kroz tijek pokusa. Nagle i skokovite promjene nagiba rasjeda 4 kroz sve faze kompresije pripisane su njegovom položaju u odnosu na pomični zid. Također, geometrija rasjeda 3 i 5 u zadnjoj fazi kompresije odraz je blizine pomičnom zidu.

Rasjed 1 je najaktivniji kroz tijek pokusa, ako se zanemari pomak po rasjednoj rampi, pa će ga se iz tog razloga nazvati glavnim. U tom slučaju, svi rasjedi sa istočnom orijentacijom, čija dužina kroz tijek pokusa varira sa tendencijom smanjenja, su antitetički. Rasjed 1a je po istom pravilu sintetički. Nije poznato završavaju li istočno orijentirani rasjedi na rasjedu 1 ili

neposredno prije njega, no sasvim je sigurno da rasjed 1 svojim pomakom obuhvaća te rasjede, što je također jedan od razloga zašto je on nazvan glavnim rasjedom. Detaljni opisi nastalih struktura dani su u tablicama 12, 13, 14 i 15. Visina postavljenog materijala nakon provedbe pokusa iznosi 120 mm, odnosno 194% početne visine.

Tablica 12: Dužine, kutevi, geometrija i smjer nagiba rasjeda PKRR pri kompresiji od 12%

PKRR	KOMPRESIJA 12 %						
Rasjed br.	Dužina [mm]	Kut [°]				Smjer nagiba	Geometrija rasjeda
		Prosječni	Gornji	Srednji	Donji		
1	127,23	30	15	15,06	30	Z	Antilistrički
2	104,10	30	20	31,34	35	I	Antilistrički
3	128,15	26,48	-	-	-	I	Blago listrički
4	131,37	26,49	-	-	-	I	Blago listrički

Tablica 13: Dužine, kutevi, geometrija i smjer nagiba rasjeda PKRR pri kompresiji od 24%

PKRR	KOMPRESIJA 24 %						
Rasjed br.	Dužina [mm]	Kut [°]				Smjer nagiba	Geometrija rasjeda
		Prosječni	Gornji	Srednji	Donji		
1	133,30	25,33	13	13,45	29	Z	Antilistrički
2	114,32	25,81	29,19	25,24	25,78	I	Listrički
3	136,52	25,08	28,07	21,16	18,97	I	Listrički
4	129,56	21,58	27,26	15,95	20,41	I	Ramp-flat-ramp

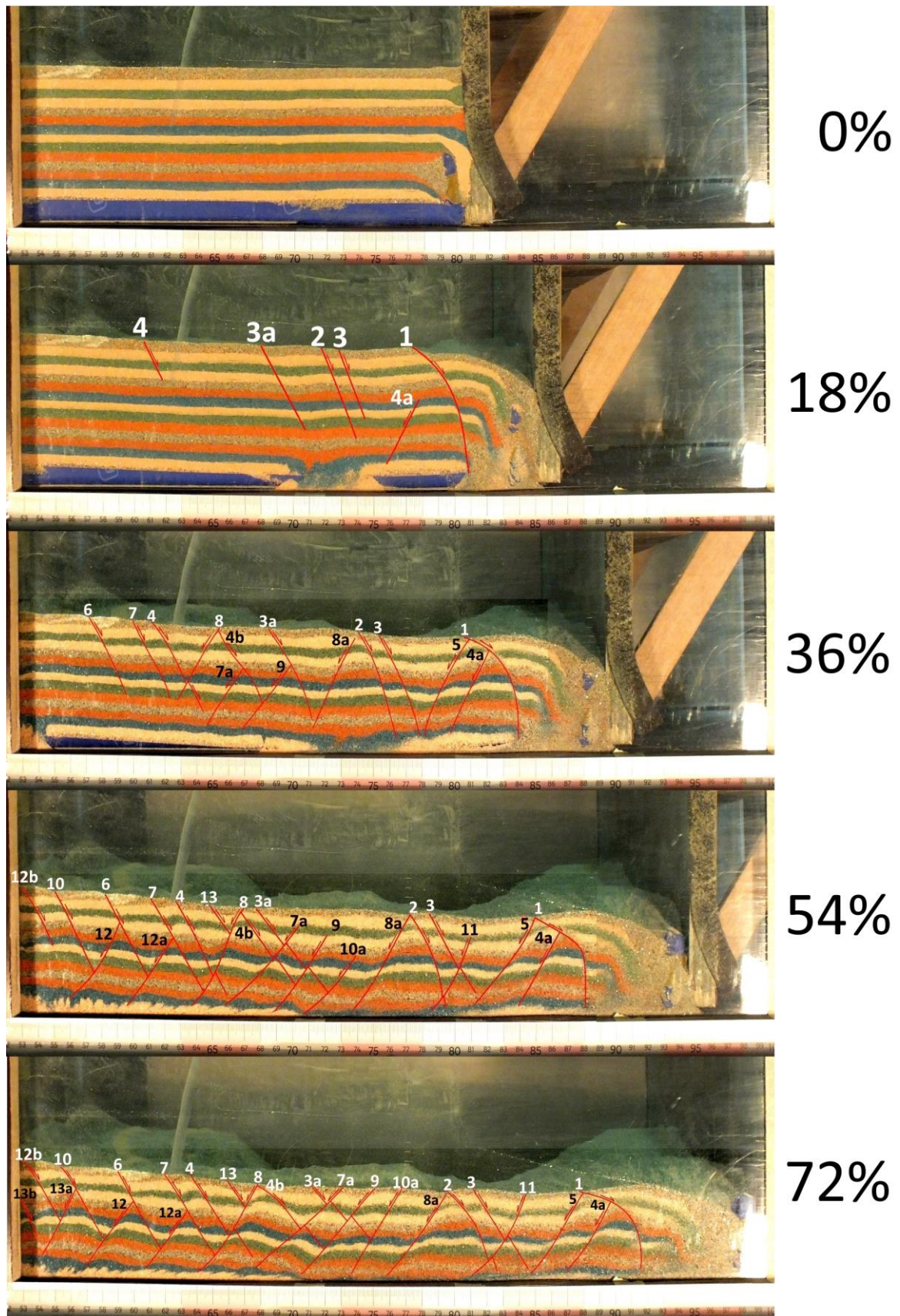
Tablica 14: Dužine, kutevi, geometrija i smjer nagiba rasjeda PKRR pri kompresiji od 36%

PKRR	KOMPRESIJA 36 %						
Rasjed br.	Dužina [mm]	Kut [°]				Smjer nagiba	Geometrija rasjeda
		Prosječni	Gornji	Srednji	Donji		
1	152,97	30	14,32	14,17	34	Z	Antilistrički
2	114,69	28,53	38,88	26,57	21,37	I	Listrički
3	112,97	28,31	34,29	26,85	22,95	I	Listrički
4	97,25	24,71	-	-	-	I	Ravan
5	93,19	23,97	-	-	-	I	Ravan

Tablica 15: Dužine, kutevi, geometrija i smjer nagiba rasjeda PKRR pri kompresiji od 46%

PKRR	KOMPRESIJA 46 %						
Rasjed br.	Dužina [mm]	Kut [°]				Smjer nagiba	Geometrija rasjeda
		Prosječni	Gornji	Srednji	Donji		
1	174,73	30,27	15,51	15,55	36,51	Z	Antilistrički
1a	115,09	26,18	7	25	48	Z	Antilistrički
2	98,50	36,72	49,13	34,74	28,66	I	Listrički
3	107,51	35,03	52,08	16	27,07	I	Ramp-flat-ramp
4	93,11	33,55	53,2	19,3	37,82	I	Ramp-flat-ramp
5	72,23	28,62	30	10	81,79	I	Ramp-flat-ramp

5.4 Pokus ekstenzijske tektonike (PET)



Slika 16: Set interpretiranih slika pri različnim ekstenzijama iz PET

U pokusu ekstenzijske tektonike nastaju ukupno 23 rasjeda. Svi rasjedi nastaju zasebno, bez stvaranja dekolmanskog horizonta. Rasjedi u ovom pokusu nastaju u nizovima u vrlo kratkom vremenu, pa je za neke bilo vrlo teško odrediti točan redosljed nastanka. Takvim rasjedima pridodani su isti brojevi i različita slova. Isti brojevi označavaju gotovo istovremeni nastanak, dok slova označavaju pretpostavljenu sukcesiju nastanka. Rasjed broj 1 nastaje kao izrazito antilistrički i takav ostaje do kraja pokusa. No, njegov nastanak pripisuje se neravnomjernoj ekstenziji gume u početku ekstenzije pa ga se ne uzima u obzir. Rasjed 2 smatra se početkom efektivne ravnomjerne ekstenzije. On je ravne geometrije, no odmah u slijedećoj fazi ekstenzije prelazi u antilistrički. Smjer nagiba mu je istok, kao i smjer nagiba rasjeda 3 koji nastaje pod jednakim kutom. Njegova je geometrija pri nastanku također ravna, a potom prelazi u antilistričku te blago antilistričku. Rasjed 3a nastaje pod nešto manjim kutom nego rasjed 3, sa smjerom nagiba istok. Njegova je geometrija pri nastanku ravna, zatim pri ekstenziji između 18% i 36% prelazi u antilistričku, da bi pri ekstenziji od 54% ponovno prešla u ravnu i takva ostala do kraja pokusa. Rasjed 4 nastaje pod bliskim kutom nastanka rasjeda 3, sa istim smjerom nagiba. Njegova geometrija iz početne ravne prelazi u antilistričku, te se pred kraj pokusa vraća u ravnu. Rasjed 4a prvi je od zapadno orijentiranih rasjeda. Nastaje suprotno rasjedu 3 pod sličnim kutom. Geometrija ovog rasjeda mijenja se kroz sve faze ekstenzije. Rasjed 4b nastaje do rasjeda 3a, pod sličnim kutom nastanka i jednake orijentacije. Njegova je geometrija u početku vjerojatno ravna, da bi djelovanjem rasjeda 7a prešla u ramp-flat-ramp, zatim u ravnu, pa pred kraj pokusa u antilistričku. Rasjed 5 nastaje pod sličnim kutom i jednake orijentacije kao rasjed 4a. Geometrija rasjeda 5 pri nastanku je antilistrička, a zatim nakon 36% ekstenzije prelazi u listričku te takva ostaje do kraja pokusa. Rasjedi 6 i 7 nastaju pod bliskim kutom kao rasjed 4, jednake orijentacije. Oba su pri nastanku ravne geometrije i ne mijenjaju geometriju tokom provedbe pokusa. Rasjedi 7a, 9 i 10a nastaju na gotovo jednakim međusobnim udaljenostima i jednake, zapadne orijentacije, te svojim djelovanjem sijeku

rasjede 3a i 4b. Kut nastanka rasjeda 7a je najveći, a kutovi nastanka rasjeda 9 i 10a su jednaki i nekoliko stupnjeva manji. Sva tri rasjeda nastaju kao ravni, zatim se mijenjaju u listričke, da bi na kraju pokusa bili ponovo ravni. Rasjed 8 nastaje vrlo brzo iza rasjeda 7, jednake orijentacije i vrlo bliskog kuta nastanka. Do površine dolazi prije rasjeda 7a jer presijeca samo jedan rasjed. Njegova je geometrija u nastanku antilistrička, potom se mijenja u flat-ramp-flat, te pred kraj pokusa u listričku. Rasjed 8a je zapadne orijentacije i sa rasjedom 2 čini vrlo oštar klin prema gore. Po geometriji je antilistrički pri nastanku, a kasnije prelazi u listrički. Rasjedi 10 nastaje jednako orijentiran i pod vrlo sličnim kutom kao rasjed 6. Geometrijski su također jednaki. Udaljenost rasjeda 10 od rasjeda 6 gotovo je jednaka udaljenosti rasjeda 6 od rasjeda 7. Rasjed 11 nastaje kao listrički i tu geometriju zadržava do kraja pokusa. Nastaje zapadno od rasjeda 5 pod nešto većim kutom, no u zadnjoj fazi se njihovi kutovi nagiba izjednačavaju. Rasjedi 12 i 12a nastaju pod bliskim kutom, sa nagibom prema zapadu. Rasjed 12 nastaje kao listrički, a zatim se mijenja u ravni, dok je rasjed 12a ravan tokom cijelog pokusa. Rasjed 13a nastaje na približno jednakoj udaljenosti od rasjeda 12 kao rasjed 12 od rasjeda 12a, no pod nešto većim kutom. Rasjed 12b nastaje paralelno rasjedu 10, pod nešto manjim kutom i antilistrički. Ispod njega nastaje rasjed 13b, sličnog kuta no različite, ravne geometrije. Rasjed 13 nastaje pod sličnim kutom kakav ima rasjed 4 u tom trenutku. Istočnog je smjera nagiba i ravne geometrije.

Zapadno orijentirani rasjedi su u nekom trenutku ravni, listrički ili antilistrički, dok niti jedan istočno orijentirani rasjed u ni jednom trenutku nije listrički. Zapadno orijentirani rasjedi rastu od dna materijala prema površini, a istočno orijentirani rastu od površine prema dnu materijala. Također je zanimljivo primijetiti kako neki zapadno orijentirani rasjedi, poput 7a, 9 i 11 sijeku okolne suprotno orijentirane rasjede, dok se drugi, poput rasjeda 12 ili 12a zaustavljaju na suprotno orijentiranim rasjedima.

Niti jedan rasjed se ne ističe dužinom ili aktivnošću, pa podjela na glavne, sintetičke i antitetičke nije napravljena. Promjene geometrija rasjeda u ovom su pokusu sasvim je sigurno rezultat djelovanja okolnih rasjeda. Prosječni kutovi nagiba velike većine rasjeda variraju od 50 do 60° stupnjeva i ne mijenjaju se tokom ekstenzije za iznos značajniji od 10 do 12°, no zapadno orijentirani rasjedi imaju generalnu tendenciju smanjenja kuta nagiba, dok su nagibi istočno orijentirani rasjeda relativno nepromijenjeni tokom napredovanje ekstenzije. Detaljni opisi nastalih struktura dani su u tablicama 16, 17, 18 i 19. Visina postavljenog materijala, u najnižoj točki, nakon provedbe pokusa iznosi 45 mm, odnosno 54% početne visine.

Tablica 16: Dužine, kutevi, geometrija i smjer nagiba rasjeda PET pri ekstenziji od 18%

PET	Ekstenzija 18%							
	Rasjed br.	Dužina [mm]	Kut [°]				Smjer nagiba	Geometrija rasjeda
			Gornji	Srednji	Donji	Prosječni		
1	75,20	29,70	65,75	80,72	61,83	I	Antilistrički	
2	50,28	-	-	-	65,47	I	Ravan	
3	37,92	-	-	-	65,52	I	Ravan	
3a	50,04	-	-	-	57,72	I	Ravan	
4	22,48	-	-	-	59,92	I	Ravan	
4a	37,68	-	-	-	58,95	Z	Ravan	

Tablica 17: Dužine, kutevi, geometrija i smjer nagiba rasjeda PET pri ekstenziji od 36%

PET	Ekstenzija 36%							
	Rasjed br.	Dužina [mm]	Kut [°]				Smjer nagiba	Geometrija rasjeda
			gornji	srednji	donji	Prosječni		
1	69,15	23,26	55,74	85,83	55,74	I	Antilistrički	
2	60,41	53,13	68,20	70,56	67,20	I	Antilistrički	
3	58,25	57,53	62,70	73,86	65,00	I	Antilistrički	
3a	54,96	51,58	59,53	74,93	60,85	I	Antilistrički	
4	55,41	48,53	59,42	62,85	57,64	I	Antilistrički	
4a	49,39	59,53	63,43	65,56	61,71	Z	Antilistrički	
4b	46,75	59,86	47,91	69,08	55,15	I	Ramp-flat-ramp	
5	57,80	51,07	59,74	73,50	62,10	Z	Antilistrički	
6	46,79	-	-	-	61,01	I	Ravan	
7	46,67	-	-	-	61,13	I	Ravan	
7a	36,91	-	-	-	53,81	Z	Ravan	
8	45,61	50,83	55,49	57,99	55,89	Z	Antilistrički	
8a	53,37	55,84	61,39	65,56	61,52	Z	Antilistrički	
9	45,16	-	-	-	48,58	Z	Ravan	

Tablica 18: Dužine, kutevi, geometrija i smjer nagiba rasjeda PET pri ekstenziji od 54%

PET	Ekstenzija 54%						
	Rasjed br.	Dužina [mm]	Kut [°]				Smjer nagiba
gornji			srednji	donji	Prosječni		
1	61,36	25,44	44,44	88,58	55,92	I	Antilistrički
2	53,36	50,91	63,43	81,63	65,09	I	Antilistrički
3	48,56	61,19	65,77	67,17	58,01	I	Antilistrički
3a	60,00	-	-	-	47,79	I	Ravan
4	57,68	55,01	60,57	64,23	55,58	I	Antilistrički
4a	44,44	-	-	-	56,19	Z	Ravan
4b	48,32	-	-	-	50,22	I	Ravan
5	55,44	62,45	47,15	45,00	54,99	Z	Listrički
6	48,48	-	-	-	58,33	I	Ravan
7	56,04	-	-	-	55,81	I	Ravan
7a	59,44	48,22	42,22	32,12	41,87	Z	Listrički
8	58,52	46,40	66,04	42,21	57,39	Z	Flat-ramp-flat
8a	57,80	55,38	57,03	45,00	54,49	Z	Listrički
9	49,32	54,61	51,52	42,77	50,51	Z	Listrički
10	46,24	-	-	-	60,14	I	Ravan
10a	43,20	53,35	43,46	29,20	48,01	Z	Listrički
11	44,08	67,25	60,07	40,60	57,11	Z	Listrički
12	48,40	65,14	53,88	34,99	51,85	Z	Listrički
12a	43,48	-	-	-	51,14	Z	Ravan
12b	35,44	47,20	57,53	64,03	57,42	I	Antilistrički
13	18,72	-	-	-	49,61	I	Ravan

Tablica 19: Dužine, kutevi, geometrija i smjer nagiba rasjeda PET pri ekstenziji od 72%

PET	Ekstenzija 72%							
	Rasjed br.	Dužina [mm]	Kut [°]				Smjer nagiba	Geometrija rasjeda
			gornji	srednji	donji	Prosječni		
1	51,72	14,60	45,00	82,13	48,01	I	Antilistrički	
2	41,92	37,48	56,31	68,84	54,42	I	Antilistrički	
3	52,36	57,26	59,74	62,35	53,45	I	Antilistrički	
3a	43,96	-	-	-	44,64	I	Ravan	
4	55,84	-	-	-	52,38	I	Ravan	
4a	43,76	60,46	52,59	42,61	52,43	Z	Listrički	
4b	49,40	23,63	45,00	47,60	42,54	I	Antilistrički	
5	51,04	52,25	55,84	42,71	52,19	Z	Listrički	
6	46,76	-	-	-	56,20	I	Ravan	
7	50,12	-	-	-	53,00	I	Ravan	
7a	65,76	-	-	-	37,47	Z	Ravan	
8	44,00	55,01	54,87	33,69	53,13	Z	Listrički	
8a	54,60	53,47	48,58	42,09	48,87	Z	Listrički	
9	61,20	-	-	-	44,15	Z	Ravan	
10	44,68	-	-	-	54,66	I	Ravan	
10a	52,12	-	-	-	54,49	Z	Ravan	
11	52,16	66,04	56,31	31,87	51,39	Z	Listrički	
12	43,24	-	-	-	48,69	Z	Ravan	
12a	37,76	-	-	-	49,20	Z	Ravan	
12b	36,96	48,37	54,64	55,41	53,88	I	Antilistrički	
13	16,64	-	-	-	49,87	I	Ravan	
13a	38,52	-	-	-	58,63	Z	Ravan	
13b	20,88	-	-	-	60,83	I	Ravan	

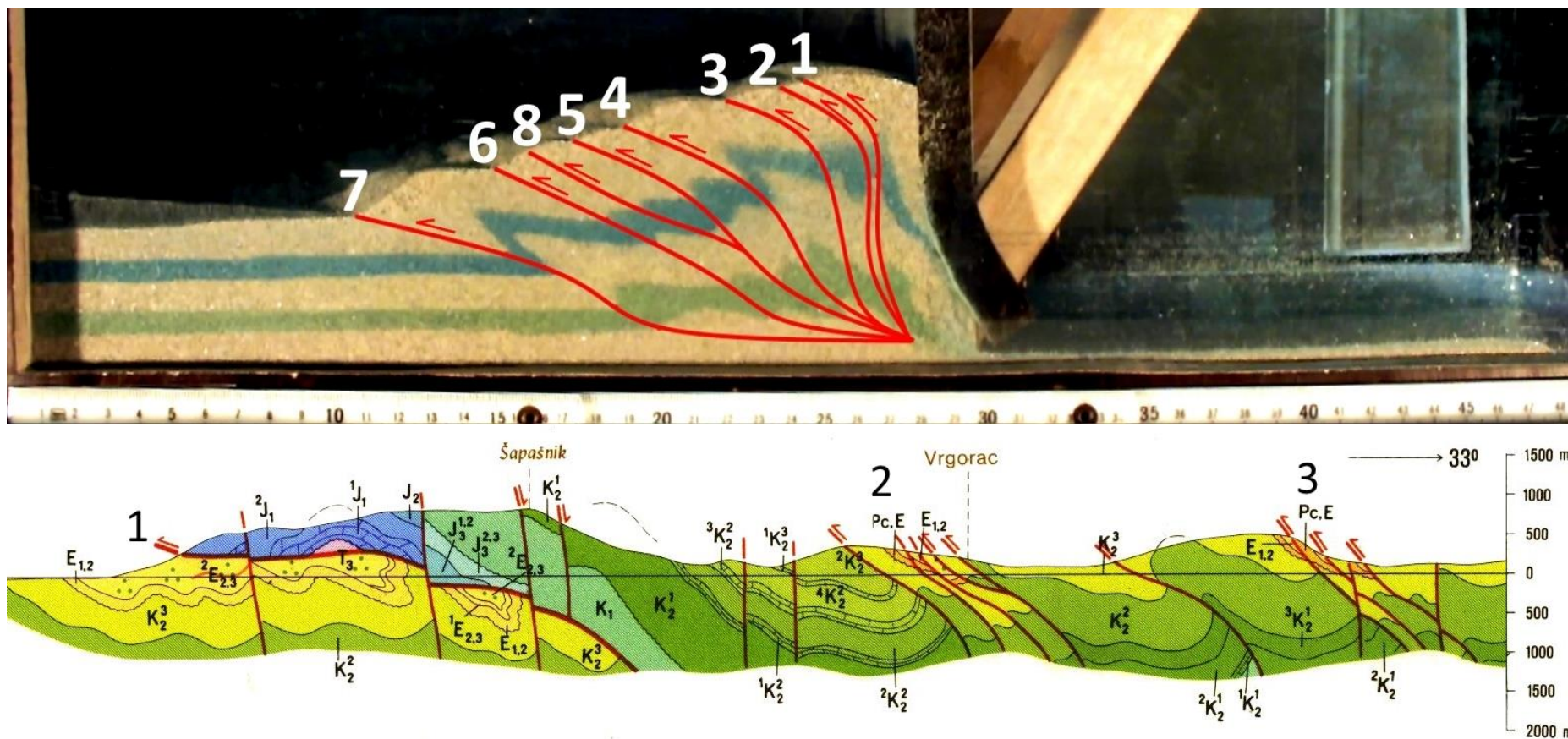
6. Rasprava

Prije svega, treba uzeti u obzir pogrešivost metode kojom su određivani kutovi i dužine u eksperimentima, ponajprije zbog nelinearnosti rasjeda, no smatra se kako je pogreška unutar nekoliko stupnjeva. Također, u pokusima nije uziman u obzir mogući utjecaj omjera dužine i visine postavljenog materijala na ishod pokusa, kao ni utjecaj nepomičnog zida na oblik struktura. Mogući utjecaj vremena u kojem je pokus proveden također nije uziman u obzir.

6.1 Prvi pokus kompresijske tektonike (PK1)

U prvom pokusu kompresijske tektonike nastaje niz reversnih rasjeda koji imaju korijen u zajedničkom dekolmanskome horizontu pri dnu materijala. Treba naglasiti kako pijesak svojim fizičkim svojstvima predstavlja približno prvih 10 km zemljine kore [1]. U tom bi slučaju, u ovom pokusu, 10 milimetara materijala odgovaralo 2,5 km zemljine kore. No, ova se činjenica uzima sa zadržkom. Kut nagiba rasjeda se povećava tijekom kompresije s obzirom na početni kut nastanka rasjeda. Pa tako su s istočne strane postavljenog materijala u zadnjim fazama kompresije reverzni rasjedi vrlo visokog kuta nagiba. Primjerice, rasjed 1 nastaje pod prosječnim kutom od 38° , a njegov krajnji prosječni kut nagiba na kraju kompresije iznosi 72° . Kut nastanka mlađih rasjeda manji je od kuta nastanka prva tri rasjeda i njihov se kut nagiba ne ustrmljuje toliko drastično, izuzev rasjeda 4.

Promatrajući list Ploče Osnovne geološke karte SFRJ [11], uočava se upečatljiva sličnost strukturama dobivenim u PK1, prvenstveno u fazi kompresije od 40% (slika 17). Dio profila A-B, od obalne linije do Šipovače sadrži glavni, najaktivniji rasjed, najmanjeg kuta nagiba, koji bi odgovarao rasjedu 7 u pokusu. Također sadrži dva seta rasjeda, međusobno odvojena relativno neporemećenim prostorom. Set rasjeda na profilu označen sa 2, neodoljivo podsjeća na set rasjeda 6, 8, 5, 4 u pokusu, kao i set rasjeda 3 sa setom rasjeda 1, 2, 3.

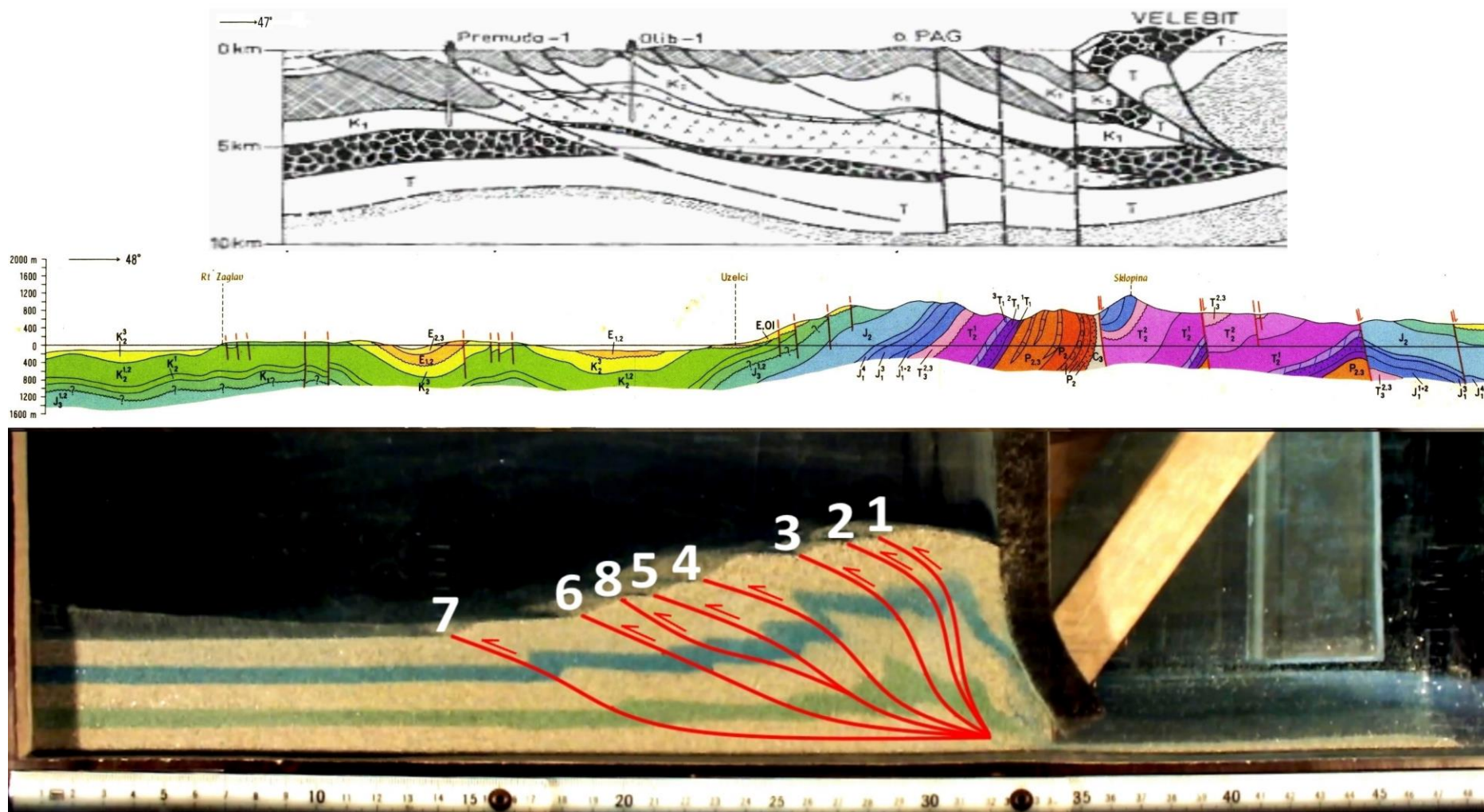


Slika 17: Usporedba geološkog profila A-B od obalne linije do Šipovače sa lista Ploče Osnovne geološke karte SFRJ [11] (dolje) i PK1 pri 40% kompresije (gore). Rasjed na profilu, obilježen sa 1 odgovara rasjedu 7 u pokusu. Set rasjeda na profilu označen sa 2 odgovara setu rasjeda 6, 8, 5 i 4 u pokusu. Set rasjeda na profilu označen sa 3 odgovara setu rasjeda 3, 2 i 1 u pokusu.

Idući u smjeru 33° , kut nagiba rasjeda na profilu se povećava, što odgovara situaciji u pokusu. Rasjedi na profilu su antilistrički, no treba uzeti u obzir kako je geološki profil interpretiran do dubine od 1500 m, za razliku od pokusa koji modelira tektoniku u znatno većoj debljini kore. Rasjedi dobiveni u pokusu, kada bi se promatrao samo njihov gornji dio također bi bili antilistrički.

Nastale strukture u PK1 mogu se usporediti s još jednim profilom, i to onim iz Miljuš, (1971) [12] (slika 18). Slika PK1 pri kompresiji od 30% dosta nalikuje profilu Premuda – Olib – Pag – Velebit. Ovaj profil nacrtan je do veće dubine zemljine kore i na njemu se rasjedi spajaju u dekolmanskom horizontu, baš kao i u pokusu. Kut nagiba rasjeda na profilu također se smanjuje idući prema zoni glavne kolizije, a rasjedi su razvijeni u setovima. Set rasjeda 3, 2 i 1 u pokusu odgovarao bi setu rasjeda što presijecaju Velebit i otok Pag. U Miljuševom profilu oni su označeni kao reversni, kakvi su i u pokusu. Pokus se od Miljuševa profila razlikuje u geometriji rasjeda tako što su rasjedi u pokusu većinom antilistrički, a na profilu listrički.

No, usporedimo li Miljušev profil, pokus PK1 i dio profila C-D na Osnovnoj geološkoj karti SFRJ, List Gospić [13], koji prolazi blisko Miljuševom profilu, vidjet ćemo kako na profilu OGK nije ucrtan niti jedan reversni rasjed. Rasjedi ucrtanog strmog nagiba koji presijecaju Velebit ovdje su okarakterizirani kao normalni, s normalnim pomakom, a fotogeološki interpretirani rasjedi koji presijecaju otok Pag i jugozapadne padine Velebita ucrtani su sa strmim nagibom i nejasnim pomakom. Glavna deformacija vezana za kompresiju Dinarskog prostora dogodila se tokom paleogena ili miocena kada su formirane kompleksne tektonske strukture regije. Današnja geomorfologija Dinarida rezultat je izravnog smicanja (transpresijskog i transtenzijskog) duž zone strmih rasjeda s generalnim pružanjem SZ-JI. Ova zona vjerojatno označava duboko ukorijenjeni lineament koji je nastao tokom trijasa. Taj lineament utjecao je na pred-orogenetsku sedimentaciju i bio reaktiviran tokom orogenetske kompresije [14]. Transport duž ove zone aktivan je i tokom današnje tektonike izmicanja [15].

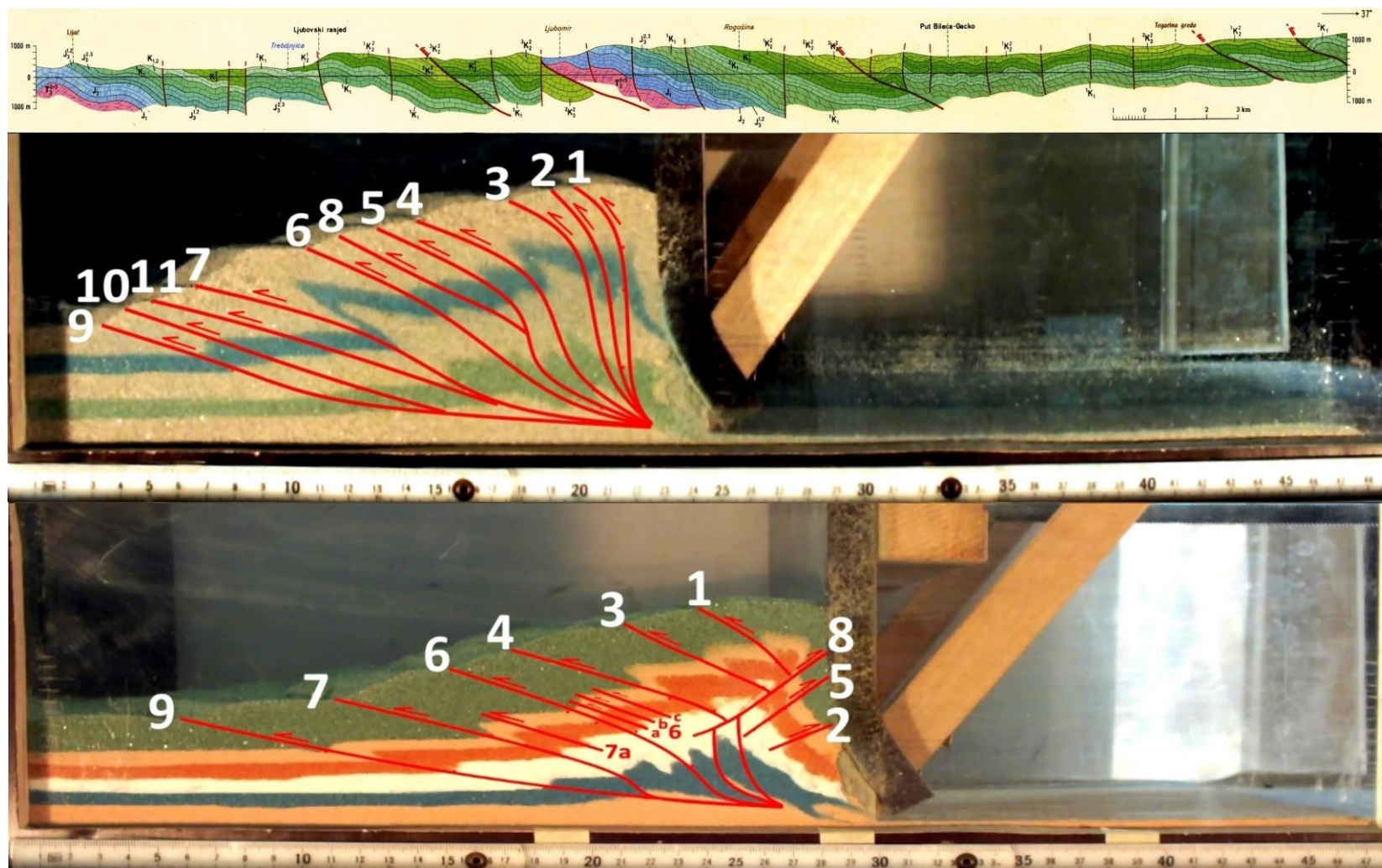


Slika 18: Usporedba Miljuševog profil Premuda – Pag – Velebit [12] (gore) i dijela profila C-D sa Lista Gospić, Osnovne geološke karte SFRJ [13] (sredina) sa PK1 pri kompresiji od 30% (sredina). Pokus odgovara Miljuševu profilu postojanju dekolmanskog horizonta, smanjenju kuta nagiba rasjeda idući prema zoni glavne kolizije, pojavljivanje rasjeda u setovima i karakteru rasjeda. Različnost pokusa i profila OGK je u nedostatku reversnih rasjeda u profilu.

Stoga, postoje dvije mogućnosti: (1) da su strmi rasjedi duž Velebita reversni rasjedi ukošeni napredovanjem tektonike, i (2) da su strmi rasjedi duž Velebita normalni rasjedi naslijeđeni iz trijaskе faze tektonskog razvoja i da su u reaktivirani u orogenetskoj fazi tektonskom inverzijom s reversnim pomakom. Mogućnost reaktivacije ovih rasjeda sa strike-slip pomakom u posljednjoj neotektonskoj fazi ovog prostora također nije isključena. U prijašnjim istraživanjima provedenim na istoj aparaturi, rađeni su pokusi kompresije materijala koji je prije toga bio u ekstenzijskom režimu. Tada se zaključilo kako pri početku kompresije prvo dolazi do reaktivacije i tektonske inverzije normalnih rasjeda, koji poprimaju reverzni karakter ostajući pri tome strmi, a tek u kasnijem napredovanju kompresije dolazi do nastanka novih reverznih rasjeda. Mogućnost da kompresija na prostoru Velebita nije došla u tu fazu gdje na reaktiviranim normalnim rasjedima reverzni pomak nadmašuje prijašnji normalni i gdje još nije došlo reverznog rasjedanja, možda i postoji, no čini se vrlo malo vjerojatnom. Dakle, nepostojanje reversnih rasjeda na dijelu profila C-D sa Lista Gospić Osnovne geološke karte SFRJ, vrlo je dvojbeno i teško moguće.

6.2 Drugi pokus kompresijske tektonike (PK2)

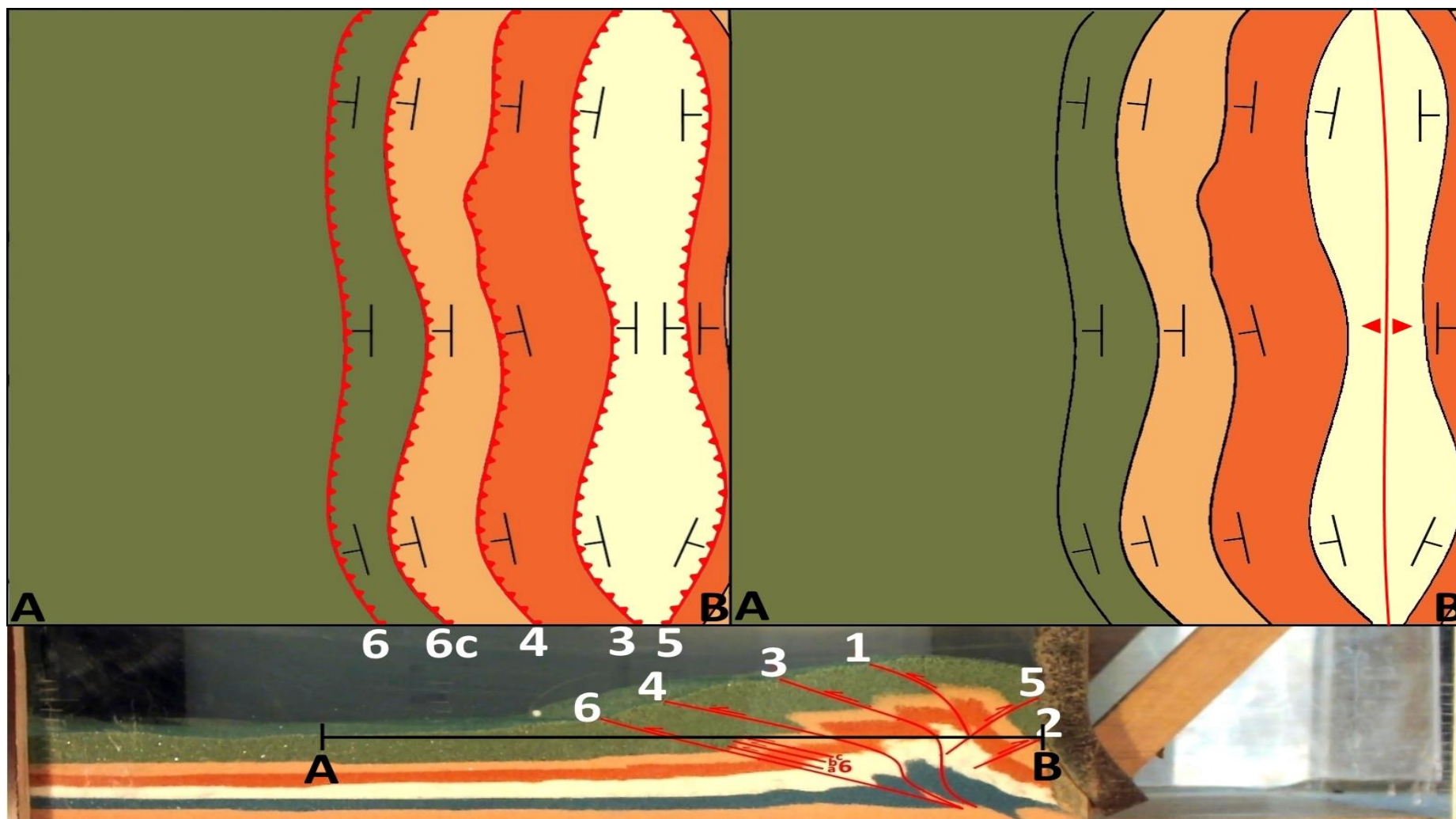
U drugom pokusu kompresijske tektonike, osim pijeska različite granulometrije, korišteno je i brašno kako bi se ispitao utjecaj anizotropije materijala na nastale strukture. Treba naglasiti kako, za razliku od pijeska čija je Mohr-Coulombova envelope sloma poznata i uzima se da pijesak predstavlja prvih 10 km zemljine kore [1], mehanička svojstva brašna, a samim time i njegovo točno ponašanje pod utjecajem stresa nisu poznati. U PK2 (slika 19) nastaje šest međusobno jednako odvojenih reverznih rasjeda i, za razliku od PK1, tri reverzna rasjeda suprotnog nagiba. Ova tri rasjeda mogla bi se nazvati back-thrust rasjedima, premda kinematika njihovog nastanka ne odgovara kinematici nastanka back-thrust rasjeda koji su više vezani za kompresiju na rasjednoj rampi.



Slika 19: Usporedba nastalih struktura u PK1 (sredina) sa strukturama nastalim u PK2 (dolje) te s geološkim profilom A-B sa Osnovne geološke karte SFRJ, List Trebinje [16] (gore). Osnovna razlika između PK1 i PK2 je u postojanju suprotno (sa smjerom nagiba zapad) orijentiranih rasjeda, nastajanje rasjeda zasebno u PK2 (za razliku od PK1 gdje nastaju u setovima) i nastanak slijepih sintetičkih rasjeda u PK2 koji ne nastaju u PK1. Nastale strukture u PK2 u određenoj mjeri odgovaraju profilu sa Osnovne geološke karte, List Trebinje. Na profilu kao i u pokusu reverzni rasjedi su zasebni i odvojeni i stijene su različitih kinematičkih svojstava, no slijepi sintetički rasjedi na profilu nisu označeni.

Dekolmanski horizont iz kojeg rastu rasjedi izuzev onih najstarijih razvija se tek nakon 20% kompresije. Kutovi nagiba svih nastalih rasjeda načelno se povećavaju tokom napredovanja kompresije. Daljnja razlika od prethodnog pokusa je što u PK2 rasjedi ne nastaju u setovima, već odvojeno, na jednakim udaljenostima. Također u PK1 ne nastaju kratki slijepi sintetički reverzni rasjedi. No, osnovna razlika između PK1 i PK2 je u reverznim, zapadno orijentiranim antitetičkim rasjedima koji u PK2 stvaraju pseudoantiklinalu, te bi se takva struktura, da se na nju naiđe na terenu, mogla krivo interpretirati kao antiklinala bore bez ucrtavanja rasjeda. Na slici 20 prikazano je kako bi izgledala pojednostavljena geološka karta kada bi materijal pri kompresiji od 30% bio ravnomjerno erodiran do razine označene na profilu. Lijevo na slici 20 je karta s ucrtanim rasjedima, a desno karta bez ucrtanih rasjeda, tj. na desnoj slici su rasjedi ucrtani kao geološke granice, te je vidljiva mogućnost pogreške pri kartiranju ako se nagibi slojeva i njihov međusobni prostorni položaj (bijeli sloj je najstariji, a zeleni najmlađi) krivo protumači.

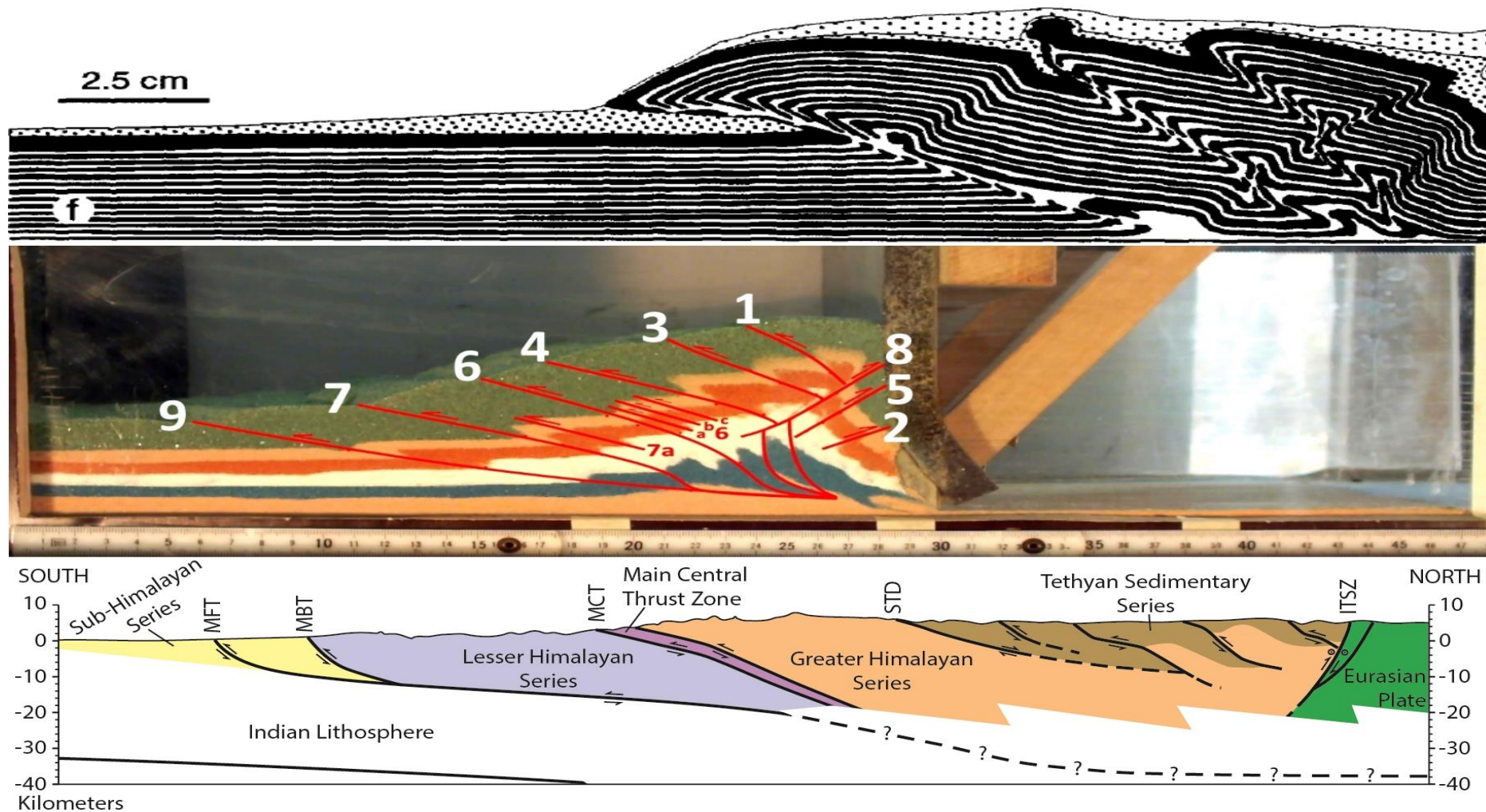
Drugi pokus kompresijske tektonike možda bi se mogao usporediti s profilom A-B sa Lista Trebinje Osnovne geološke karte SFRJ [16] (slika 19). Na ovom profilu, baš kao i u pokusu, reversni rasjedi su samostalni i odvojeni. Također, pri dnu profila su trijaski dolomiti, čija su kinematička svojstva zasigurno drugačija od mlađih, jurskih i krednih, vapnenaca koji na njima leže, a to također može biti sličnost s različitom granulometrijom materijala postavljenog u pokusu. Geometrije rasjeda se, s obzirom na različitost debljine kore koja je ucrtana na profilu i one koju predstavlja pokus, također relativno slažu. Antitetičkih reverznih rasjeda na profilu nema, no koristeći rezultate PK2 njih bi se možda moglo ucrtati na mjesta fotogeološki interpretiranih i neutvrđenih rasjeda koji odgovaraju pomakom, uz korekciju kuta nagiba. Strukture nastale u PK2 odgovaraju strukturama koje nastaju u pokusima koje izvode F. Storti i suradnici (1997) [17]. Oni također u pokusima kompresije koriste materijale različite



Slika 20: Pojednostavljena geološka karta materijala erodiranog do oznake na profilu. Na lijevoj slici je vidljiva ispravno interpretirana karta s ucrtanim rasjedima. Na desnoj slici je vidljiva moguća kriva interpretacija na temelju položaja slojeva i njihovog rasporeda (bijeli sloj je najstariji, a zeleni najmlađi) gdje su rasjedi ucrtani kao geološke granice a struktura opisana kao antiklinala bore.

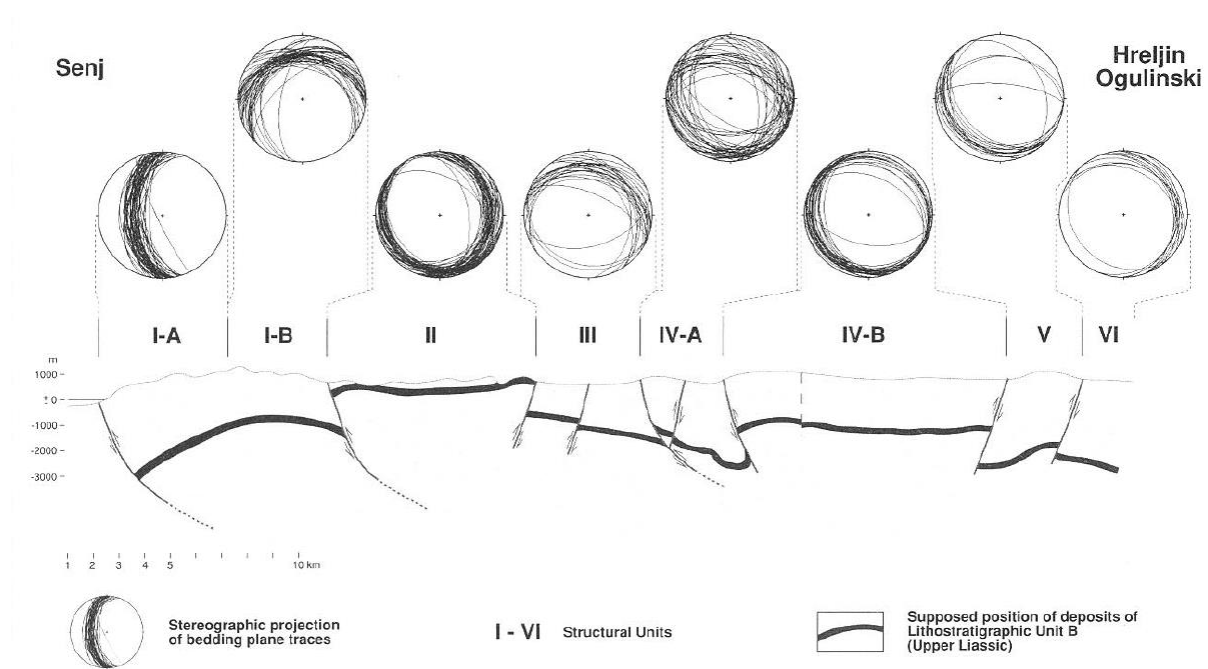
granulacije, točnije kvarcni pijesak veličine zrna 190 μm i vermikulitne tinjce veličine zrna 300 μm . Na njihovu strukturu jako podsjeća struktura u pokusu PK1 (Slika 21). I u njihovim pokusima nastaju zasebni reverzni rasjedi i reverzni antitetički rasjedi, no oni svoje pokuse u određenoj fazi kompresije opisuju kao boranje vezano uz navlačno rasjedanje. Tokom evolucije antiklinale vezane uz navlačno rasjedanje kinematika se mijenja iz skraćanja paralelnog slojevima, u dekolmansko boranje, zatim u navlačno boranje i konačno u boranje na rasjednoj rampi [17]. Kinematika u PK1 u najvećoj je mjeri navlačno rasjedanje, a pseudoboranje je samo posljedica rasjedanja, no, postoje sličnosti s navedenim modelom.

Možda najveću sličnost rezultat PK2 ima s pojednostavljenim profilom područja Himalaje (slika 21, dolje), preuzetim iz eseja Mid-crustal processes in Himalaya, objavljenog na webu [18]. Moglo bi se reći kako PK2 pri 30% kompresije odgovara tetiskoj sedimentnoj seriji (Tethyan Sedimentary Series) na profilu, tj. prostoru od STD do ITSZ. Dubina profila otprilike odgovara debljini kore koju bi pokus trebao predstavljati. Na profilu Himalaje rasjed označen sa STD (South Tibetan detachment) odgovarao bi rasjedu 9 u PK2. Kut nagiba rasjeda na profilu povećava se u smjeru glavne kolizije baš kao i u PK2. Također, na profilu su u koliziji sudjelovale Tethyan Sedimentary Series, koju čine sedimentne stijene, i Greater Himalayan Series koja je građena od slijeda metamorfnih i magmatskih stijena, dakle dvije mase različitog odgovora na stres, baš kao i anizotropni (nehomogeni) materijal postavljen u PK2. ITSZ (Indus-Tsangpo suture zone) na profilu označava granicu između stijena Euroazijske ploče na sjeveru i Indijske ploče na jugu [18]. Dakle, na profilu Himalaje suturu između dvije tektonske jedinice koje su sudjelovale u koliziji predstavlja par reverznih antitetičkih rasjeda. Tako bi u PK2 reverzni antitetički rasjedi 8 i 5 mogli predstavljati suturu između postavljenog materijala koji predstavlja jednu tektonsku jedinicu i pomičnog zida koji predstavlja drugu tektonsku jedinicu.



Slika 21: Usporedba strukture koju su proizveli Storti i suradnici (gore) [17] s PK2 pri 30% kompresije (sredina), te pojednostavljeni profil Himalaje (dolje) [18]. Sličnost PK2 sa pokusom koji provode Storti i suradnici je vrlo uočljiva. Par reverznih antitetičkih rasjeda je na profilu označen kao sutura dvije tektonske jedinice koje su sudjelovale u koliziji, a antitetički rasjedi 8 i 5 koji nastaju u PK2 mogli bi predstavljati suturu između postavljenog materijala kao jedne tektonske jedinice i pomičnog zida koji predstavlja drugu tektonsku jedinicu.

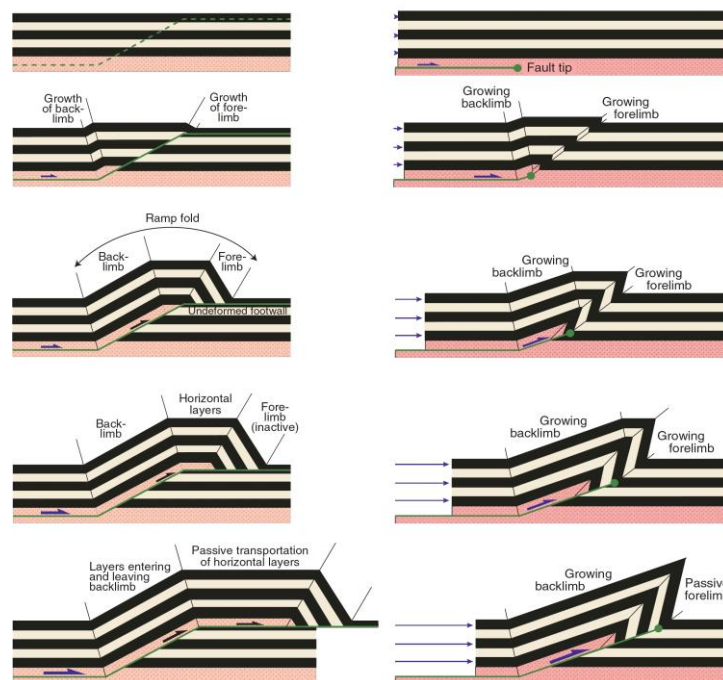
Sličnost s terenom u Hrvatskoj rezultat drugog pokusa kompresijske tektonike pokazuje s profilom Senj-Ogulin [19] (slika 22). Na ovom pojednostavljenom profilu postoje antitetički reverzni rasjedi (back-thrust rasjedi) koji su nakon tercijarne kompresije, čiji je maksimum bio izdizanje Dinarida, zajedno s glavnim reverznim rasjedima bili reaktivirani u neotektonskoj, transpresijskoj fazi tektonike [19]. Dakle, ovi back-thrust rasjedi nisu rezultat neotektonike već su nastali u kompresijskoj fazi, u prilog čemu ide i njihovo pružanje koje je uglavnom paralelno pružanju glavnih reverznih rasjeda. Na profilu su glavni reversni rasjedi odvojeni i samostalni, a prate ih antitetički reversni rasjedi. Ovakvoj situaciji na profilu do neke mjere odgovaraju strukture nastale u drugom pokusu kompresijske tektonike.



Slika 22: Shematski geološki profil Senj-Ogulin s kojim rezultat PK2 pokazuje sličnosti [19].

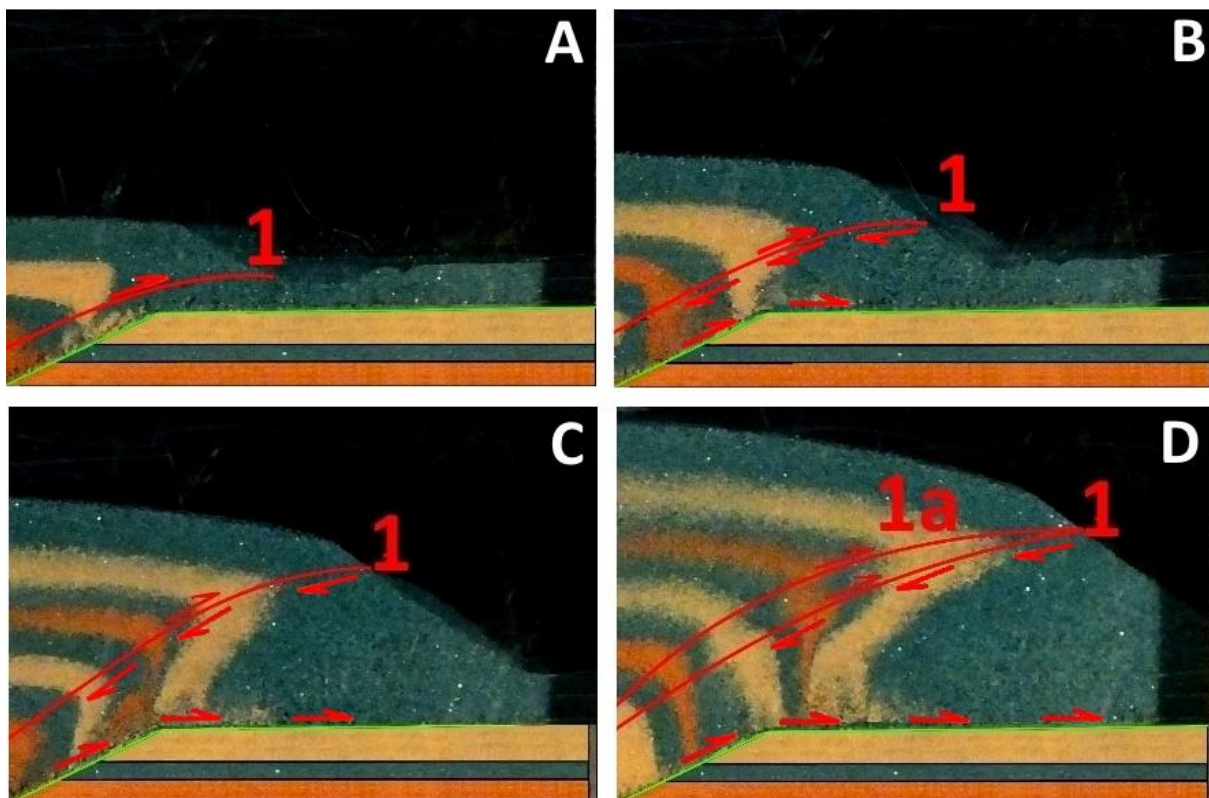
6.3 Pokus kompresije na rasjednoj rampi (PKRR)

U pokusu kompresije na rasjednoj rampi rasjedi nastaju zasebno, bez zajedničkog korijena ili dekolmanskog horizonta, izuzev rasjeda 1a koji pak nastaje račvanjem iz rasjeda 1. Rasjed 1 je zbog svoje aktivnosti nazvan glavnim rasjedom, no ujedno je, kroz većinu pokusa, i jedini rasjed sa nagibom prema zapadu pa kao takav snosi većinu navlačnog pomaka na rasjednu rampu. Pretpostavljalo se da će pri kompresiji na rasjednu rampu nastati klasične strukture rasjednog boranja (eng. fault-bending). Ove strukture nisu postignute, premda su materijal i rasjedna rampa postavljeni kako bi dosljedno odgovarali početnim fazama rasjednog boranja u općepoznatim primjerima (slika 23, lijevo). U pokusu nastaju back-thrust rasjedi, karakteristični za rasjedanje na rasjednoj rampi i rasjedno boranje. Struktura koja nastaje u pokusu najviše odgovara modelu rasjednog boranja (eng. fault-propagation folding) (slika 23, desno). Pokus odgovara modelu rasjednog boranja (eng. fault-propagation folding) ponajviše



Slika 23: Modeli nastajanja rasjednih bora [10]. Lijevo: model nastanka rasjednih bora (fault-bending), rezultat pokusa odgovara ovom modelu jedino po nastanku back-thrust rasjeda. Desno: model nastanka rasjednih bora (fault-propagation folding) kojemu pokus odgovara po nastanku back-thrust rasjeda i položaju i izgledu slojeva.

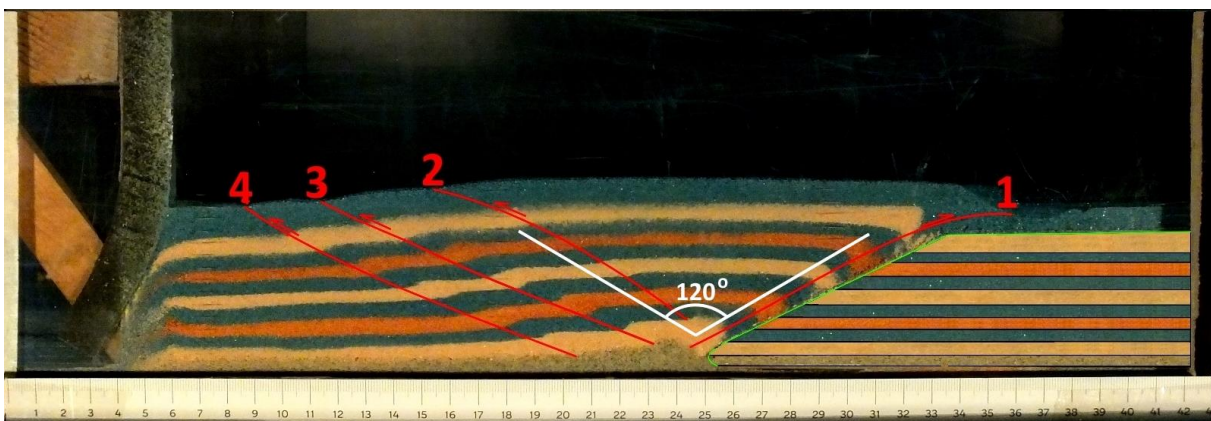
zbog nagiba slojeva ispod rasjeda 1 koji dolaze u gotovo prebačeni položaj. Također se pokus podudara s modelom u nastanku rasjeda paralelnom rasjednoj rampi, kao i u račvanju glavnog rasjeda. Zadebljanje slojeva ispod antiklinale, tj. ispod glavnog navlačnog rasjeda karakteristično je za rasjedno boranje (fault-propagation folding) [20], a upravo se to događa s najgornjim plavim slojem. U pokusu je zadebljanje najmlađeg sloja uzrokovano sekundarnom kompresijom ispod glavnog rasjeda koje je posljedica suprotnog djelovanja dvaju rasjeda u blizini. Duž rasjedne rampe također postoji pomak, a taj je pomak suprotan podinskom krilu rasjeda 1. Kada uzmemo u obzir da je podinsko krilo rasjeda 1 ujedno i krovinsko krilo rasjedne rampe, mehanizam sekundarne kompresije je jasno vidljiv, a čak bi ga se moglo nazvati transpresijom. Na slici 24 prikazano je zadebljanje najmlađeg sloja u sukcesiji po fazama kompresije. Točan mehanizam zadebljanja iz pokusa nije vidljiv zbog jednolične bore sloja. Uzrokuje li zadebljanje sekundarno rasjedanje ili sekundarno boranje u najmlađem sloju trebat će se zaključiti u budućim istraživanjima. Također nije moguće odrediti točan položaj rasjeda



Slika 24: Zadebljanje najmlađeg plavog sloja transpresijskim djelovanjem rasjeda 1 i rasjedne rampe pri kompresijama: (A) 12%, (B) 24%, (C) 36%, (D) 46%.

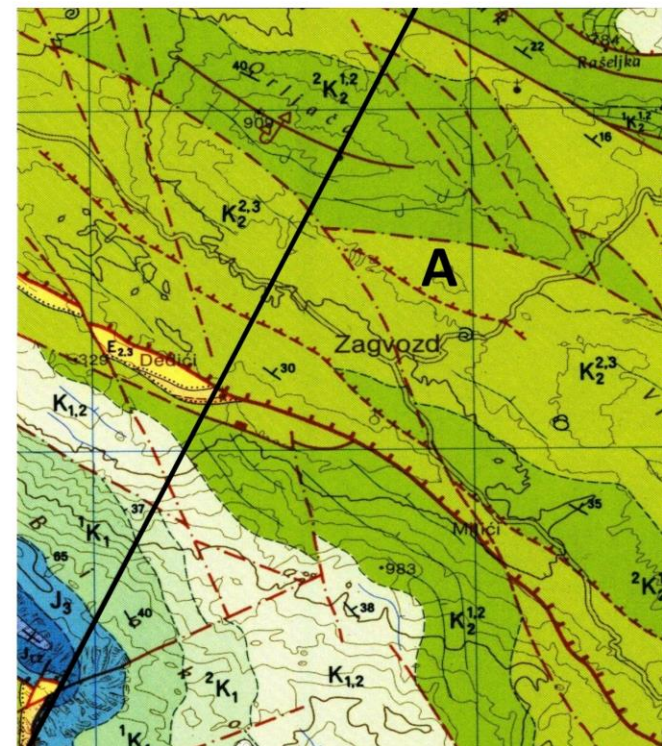
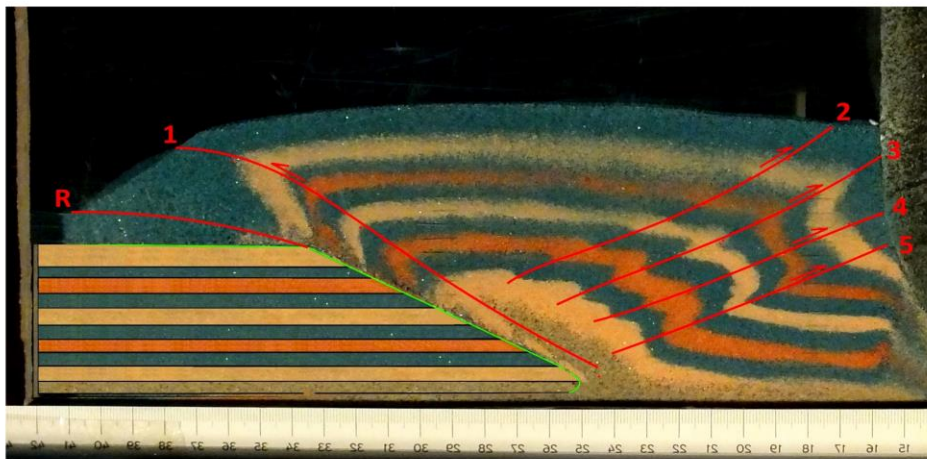
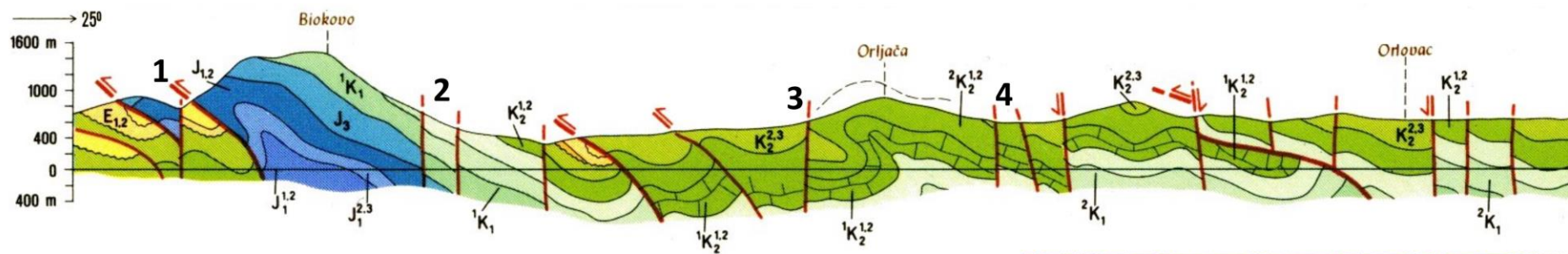
R koji nastaje na rasjednoj rampi zbog jednolične boje najmlađeg sloja. Rasjed 1 na stvarnom terenu bio bi vrlo teško uočljiv zato što je i u pokusu točno mjesto njegovog izdanjivanja na površinu bilo teško pronaći, te bi se nastala struktura mogla interpretirati kao prebačena bora, što u konačnici i ne bi bilo apsolutno pogrešno. Također postoji mogućnost pogreške pri interpretaciji i nepostojanja rasjeda 1, te nastajanja samo antiklinale, no ta se mogućnost čini malo vjerojatnom zbog postojanja rasjeda 1a koji nastaje u zadnjoj fazi kompresije i svojom aktivnošću ipak naglašava pomak po rasjedu 1. U konačnici, sasvim je sigurno postojanje reverznog pomaka po rasjednoj rampi, bez obzira na nemogućnost točnog otkrivanja položaja tog rasjeda u najmlađem, plavom sloju, te će se taj rasjed može uzeti kao rasjed ispod antiklinale, tj. rasjed koji stvara antiklinalu.

Bitno je primijetiti kako su kutovi nastanka antilistričkih rasjeda jednaki ili bliski 30° . Ovakav kut te rasjede čini zrcalno simetričnim rasjednoj rampi (slika 25). Antilistrički rasjedi su u svojem gornjem dijelu kroz cijeli tijek provedbe pokusa kutom nagiba zrcalno simetrični gornjem dijelu rasjeda 1, izuzev u zadnjoj fazi kompresije gdje na njihov kut i geometriju utječe pomični zid. Ova je spoznaja veoma je bitna u detaljnijem proučavanju kinematike rasjednog boranja (fault-propagation folding), no u ovom radu promatrane su samo opće karakteristike kinematike nastanka struktura kako bi se potencijalno olakšalo njihovo terensko otkrivanje i interpretiranje.



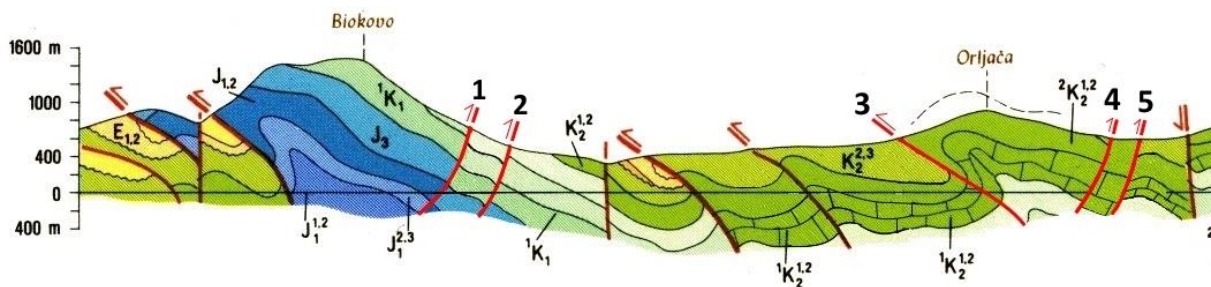
Slika 25: Zrcalna simetričnost kuta nagiba antilistričkog rasjeda 2 pri nastanku sa kutom nagiba rasjedne rampe i rasjeda 1, PKRR pri kompresiji od 12%.

Rezultat pokusa kompresije na rasjednoj rampi pri kompresiji od 36% mogao bi se usporediti s djelom profila A-B sa Lista Imotski Osnovne geološke karte SFRJ [21] (slika 26). Strukture Biokova i Orljače nalikuju onima dobivenim u PKRR. Na prebačenoj antiklinali (Biokovo) iznad rasjeda na profilu označenim s 1 (koji bi mogao odgovarati rasjedu R u pokusu) vidljivo je jasno zadebljanje lijasko-dogerskih vapnenaca ($J_{1,2}$), a mlađi lijaski ($J_1^{2,3}$) vapnenci su samo borani u položaj prebačene antiklinale. Odnos najmlađeg plavog sloja u pokusu i prvog od njega starijeg žutog, upadljivo podsjeća na odnos između slojeva jurskih vapnenaca na profilu. Treba obratiti pozornost na rasjede koji su na profilu označeni sa 2, a na OGK su fotogeološki interpretirani. Uzevši u obzir sličnost navlačne strukture s rezultatima pokusa, ove bi se rasjede moglo interpretirati kao antitetičke reversne rasjede koji bi odgovarali antitetičkim rasjedima u pokusu, primjerice rasjedu 2 i 3, a tome bi odgovarao i interpretirani pomak na profilu. Dakle, na temelju spoznaja iz provedenog pokusa, rasjede koji su na profilu označeni s brojem 2 moglo bi se interpretirati kao reversne rasjede, točnije back-thrust rasjede te bi im se u tom slučaju mogao korigirati i smjer nagiba. Kada bi ova struktura bila tako interpretirana uvelike bi odgovarala strukturi dobivenoj u pokusu. Na karti (slika 26, dolje desno) je duž Orljače ucrtana prebačena antiklinala ispred čijeg je tjemena ucrtan fotogeološki interpretiran rasjed nepoznatog karaktera. I ovdje je uočljivo zadebljanje mlađih gornje krednih naslaga ($^2K_2^{1,2}$) u odnosu na starije gornjokredne vapnence ($^1K_2^{1,2}$) u tjemenu antiklinale. S obzirom na sličnost strukture s pokusom rasjed označen s 3 na profilu, i na karti ucrtan kao fotogeološki, mogao bi se interpretirati kao reverzni rasjed sa smjerom nagiba sličnim smjeru nagiba rasjeda 1 i ostalih reversnih rasjeda ucrtanih na profil. Tvrdnji da je rasjed označen na profilu s brojem 3 reversni ide u prilog postojanje na kartu aproksimirano ucrtanog, utvrđenog reversnog rasjeda (A na slici 26) u neposrednoj blizini čije se pružanje gotovo podudara s njegovim pružanjem. Fotogeološki interpretirani rasjedi, koji su na profilu označeni s 4 i u ovom bi slučaju mogli biti interpretirani kao back-thrust rasjedi. Kada bi ih se ucrtalo na kartu kao reversne rasjede s



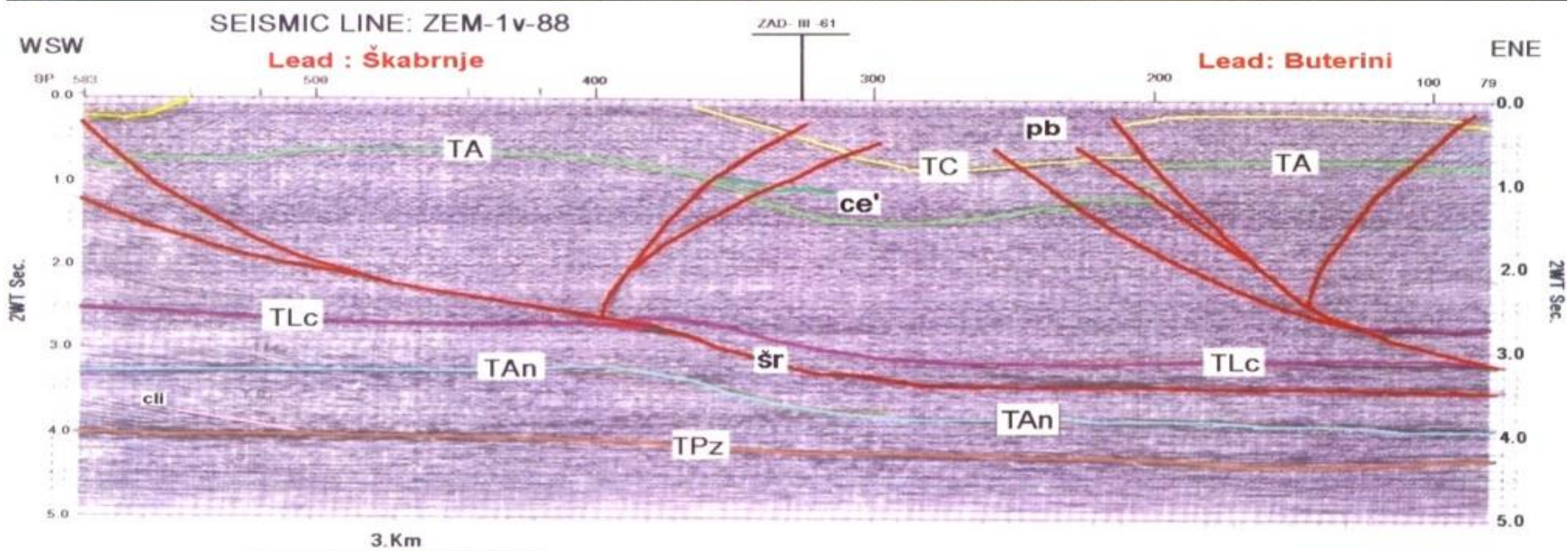
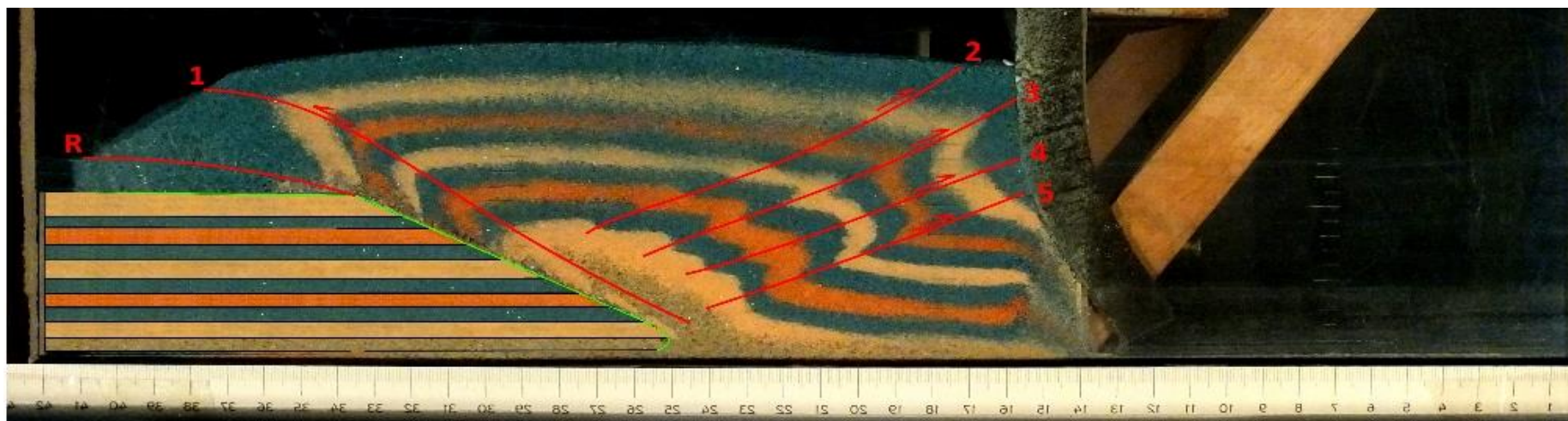
Slika 26: Usporedba dijela profila A-B sa Lista Imotski Osnovne geološke karte SFRJ [20] (gore) sa PKRR pri 36% kompresije (dolje lijevo). Slika PKRR je zrcalno izokrenuta. Vidljivo je zadebljanje sloja u čelu antiklinale i u pokusu i na profilu. Postoji mogućnost primjene dobivenih rezultata u pokusu na nadopunjavanje Osnovne geološke karte. Dolje desno: dio OGK koji prikazuje promatrani prostor, Biokovo i Orljaču. Crna linija na karti označava profil.

nagibom prema tjemenu antiklinale Orljače, njihov bi reversni karakter odgovarao situaciji na karti, tj. stariji gornjokredni vapnenci (${}^2K_2^{1,2}$) našli bi se iznad mlađih gornjokrednih vapnenaca ($K_2^{2,3}$) u navlačnom kontaktu. Slika 27 prikazuje kako modificirani dio profila A-B sa Lista Imotski Osnovne geološke karte SFRJ, u kojem su izmijenjeni karakteri rasjeda označenima 1, 2, 3, 4, i 5 u skladu s modelom. Pomak rasjeda broj 2 na slici 27 je normalan, no, treba uzeti u obzir puno veći pomak njemu susjednog rasjeda na slici označenim s 1.



Slika 27: Modificirani geološki profil A-B sa Lista Imotski Osnovne geološke SFRJ, kada bi u interpretaciji bile primijenjene spoznaje iz PKRR. Izmijenjeni su karakteri rasjeda označenih sa 1, 2, 3, 4 i 5.

Rezultat pokusa kompresije na rasjednoj rampi mogao bi se usporediti s područjem Ravnih Kotara, gdje je postojanje back-thrust rasjeda dokazano u više seizmičkih profila, između kojih je i seizmički profil Smiličić-Pridraga [22]. Sličnosti i razlike PKRR i navedenog seizmičkog profila vidljive su na slici 28. Na seizmičkom profilu vidljivi su glavni reverzni rasjedi koje prate back-thrust rasjedi, te bi geološke karte tog dijela Ravnih Kotara i geološka karta PKRR bili veoma slični. No, na seizmičkom profilu ne postoji antiklinala iznad glavnog navlačnog rasjeda, a i sama geometrija back-thrust rasjeda se razlikuje. Oni su u pokusu ravni ili listrički (izuzev njihove geometrije u posljednjoj fazi kompresije koja je rezultat blizine pomičnog zida), za razliku od back-thrust rasjeda na seizmičkom profilu koji su antilistrički. Struktura koja je vidljiva na profilu vrlo je vjerojatno pozitivna cvjetna struktura nastala transpresijskim djelovanjem u najmlađoj tektonskoj fazi Dinarida. Iz ovog razloga treba biti oprezan u korištenju rezultata PKRR u interpretaciji geoloških struktura, te obraćati pozornost na svaki strukturni element promatranog područja prije donošenja zaključaka.

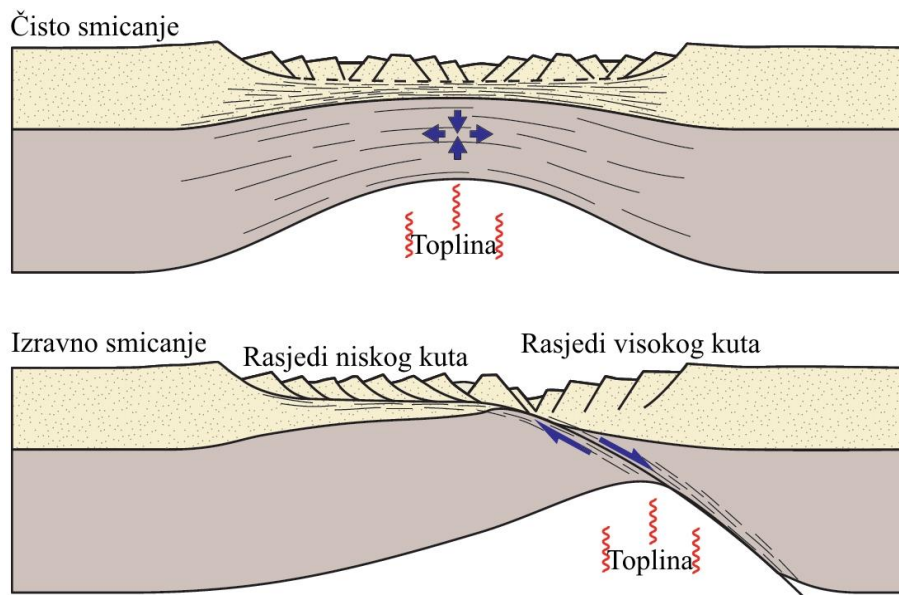


Slika 28: Sličnosti i razlike između PKRR pri 36% kompresije (gore) i seizmičkog profila Smiličić-Pridraga ZEM-1v-1988 [22] (dolje).

6.4 Pokus Ekstenzijske tektonike (PET)

U pokusu ekstenzijske tektonike nastaje vrlo kompleksna struktura. Svi rasjedi nastaju kao normalni i zasebno, bez stvaranja dekolmanskog horizonta. Rasjedi su u ovom pokusu nastajali veoma brzo jedan iza drugoga pa postoji određeni postotak mogućnosti pogreške pri interpretaciji redoslijeda njihova nastanka. Kako bi se taj postotak smanjio, gotovo istovremenim rasjedima su dani jednaki brojevi nastanka uz pripadajuća slova koja označuju pretpostavljenu sukcesiju. Rasjede u ovome pokusu možemo grubo podijeliti na one zapadno orijentirane i na one istočno orijentirane. Iako je ekstenzija u pokusu jednolika i rezultat razvlačenja gume ispod materijala, ona je ipak generalno ekstenzije u jednom smjeru, točnije u smjeru kretanja pomičnog zida. Dakle os riftinga je negdje do nepomičnog zida, iako bi na zrcalnoj slici na mjestu osi riftinga bilo uzdignuće, a ne depresija, što je rezultat ekstenzije u smjeru pomičnog zida. Tako su rasjedi čiji je smjer nagiba suprotan smjeru ekstenzije, tj. oni zapadno orijentirani, ravni, listrički ili antilistrički, dok su oni smjerom nagiba orijentirani u smjeru ekstenzije ravni ili antilistrički. Dakle ni jedan rasjed s istočnim smjerom nagiba nije geometrijom listrički. Za detaljniju kinematičku analizu važno je reći kako istočno orijentirani rasjedi rastu od površine prema dnu materijala, a zapadno orijentirani rastu od dna prema površini materijala te su neki od tih rasjeda značajno aktivniji od svoji susjednih suprotno orijentiranih rasjeda pa tako sijeku njihove paraklaze. Takvi se rasjedi nalaze bliže pomičnom zidu, odnosno istočno od rasjeda 8, dok rasjedi za zapadnim smjerom nagiba zapadno od rasjeda 8 ne sijeku svoje istočno nagnute susjede. Dakle, istočno od rasjeda 8 prevladavaju zapadno nagnuti listrički i ravni rasjedi, manjeg kuta nagiba, gdje je njihovo djelovanje izraženije od brojčano inferiornijih istočno orijentiranih rasjeda, dok zapadno od rasjeda 8 prevladava struktura veoma nalik domino strukturi s brojčano nadmoćnijim zapadno nagnutim rasjedima većeg kuta. Ovakav raspored rasjeda odgovarao bi asimetričnom modelu riftinga, što se i slaže s činjenicom kako je smjer ekstenzije samo u jednom smjeru, tj. u smjeru pomičnog zida.

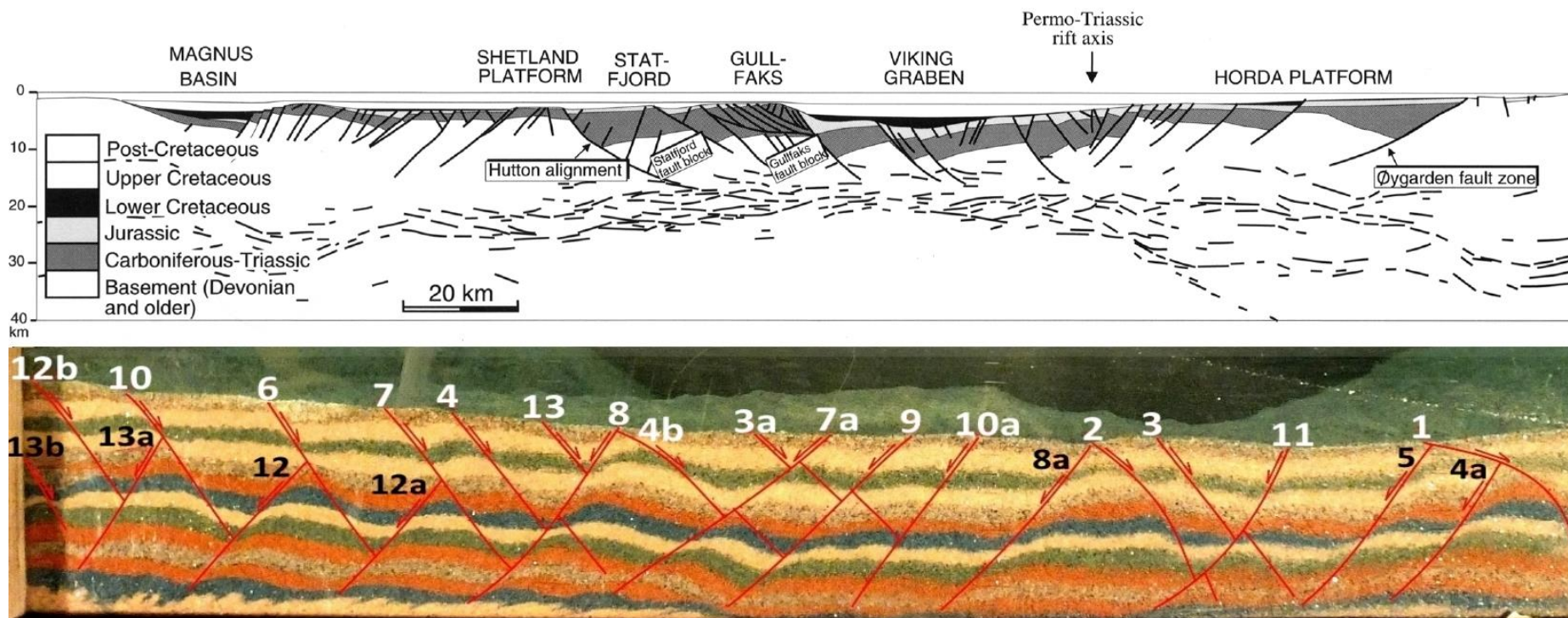
U ovom bi slučaju izvor topline odgovoran za ekstenziju u pokusu bio ispod domino sistema (slika 29). Kada bi smo napravili zrcalnu sliku rezultata PET pokušavajući simulirati ekstenziju s obje strane, dobili bi smo simetrične strukture, no ne bi smo dobili sliku simetrične ekstenzije zato što bi u tom slučaju u centru ekstenzije imali domino strukture, a ne strukturu tektonskih graba i horstova kakva pripada centru ovog modela.



Slika 29: Idealizirani modeli simetrične (gore) i asimetrične (dolje) ekstenzije [10].

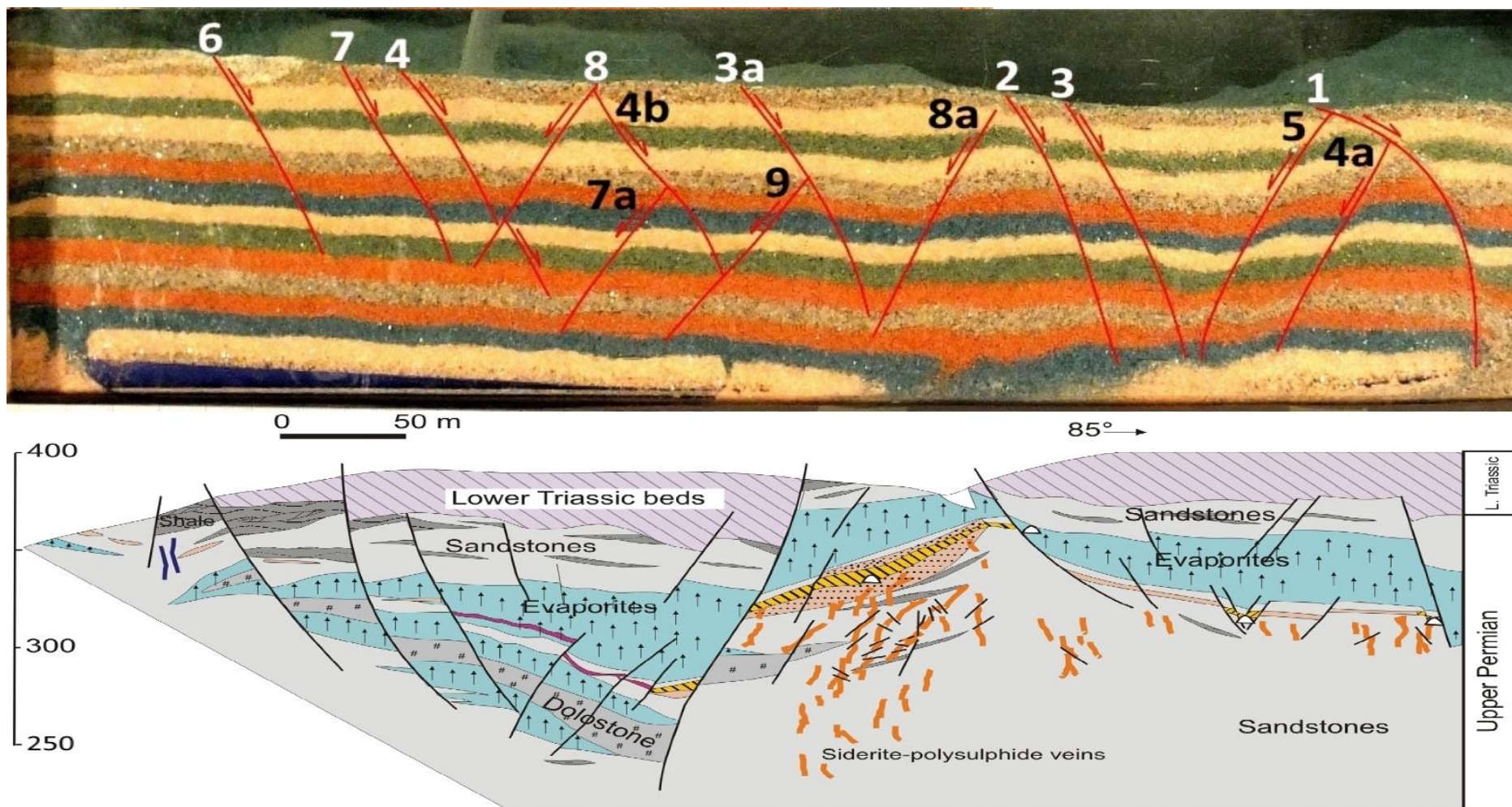
Rezultat pokusa ekstenzijske tektonike može se usporediti s regionalnim profilom riftnog sistema Sjevernog Mora, baziranom na seizmičkom profilu NSDP84-1 [23]. Riftni sustav Sjevernog Mora je post-Kaledonski sustav grabena s višefaznom ekstenzijom koja započinje u devonu [23]. Glavnina struktura nastala je u permo-trijaskoj fazi ekstenzije, a tada nastale strukture su reaktivirane u narednim fazama ekstenzije, uz nastanak novih struktura. Smatra se kako se ekstenzija mijenja iz simetrične u asimetričnu između trijasko i kasnijih faza ekstenzije što je dovelo do stvaranja asimetričnih struktura [24]. Još uvijek nije sa sigurnošću utvrđen točan model nastanka riftnog bazena Sjevernog Mora, a postoji mogućnost da on sadrži elemente oba modela ekstenzije [10]. Sličnost rezultata PET sa profilom Sjevernog mora vidljiva je na slici 30. Smatra se kako su na profilu listrički rasjedi u zapadnom dijelu Viking Grabena nastajali pri većem kutu nagiba, a da je njihov kut smanjen u daljnjoj ekstenziji [23].

Ovi rasjedi pripadaju rubnom djelu ekstenzije, a spoznaje o variranju njihovog kuta nagiba mogle bi se primijeniti i na listričke rasjede Horda platforme. Tim bi rasjedima po smjeru nagiba na profilu i rezultatu PET (slika 30) odgovarali zapadno orijentirani listrički rasjedi istočno od rasjeda 8 u pokusu, iako ovi rasjedi po svom mjestu nastanka, a to je rubni dio riftnog sistema, odgovaraju i listričkim rasjedima Viking Grabena. Navedeni listrički rasjedi u pokusu također imaju veći kut nastanka koji se kroz daljnju ekstenziju smanjuje te su njihove paraklaze nagnute suprotno od smjera ekstenzije, baš kao i paraklaze listričkih rasjeda na profilu. Domino sistem koji nastaje u pokusu odgovarao bi Gullfaks domino sistemu na profilu. Nastanak asimetričnog domino sistema povezuje se s postojanjem slabog sloja koji ima blagi kut nagiba ili blago nagnute strukture, a to može biti primjerice sloj gline ili već postojeći rasjed koji je podložan reaktivaciji [10]. Postojanje dekolmana ispod Gullfaks domino sistema dokazano je na seizmičkim profilima i upravo se tome pripisuje njegov nastanak [23]. No u pokusu ne postoji nikakav sloj ispod domino sistema koji bi bio drugačiji ili slabiji od gornjih slojeva na bilo kakav način, niti nastaje ikakav rasjed koji se pruža ispod sistema. Stoga se može reći kako je nastanak domino sistema u pokusu rezultat asimetrične ekstenzije materijala. Gullfaks domino sustav pripada jurskoj fazi ekstenzije [23] za koju nije sigurno da li je ona bila prva asimetrična ili neka kasnija. Kako je sigurno da je model ekstenzije u pokusu asimetričan, moglo bi se reći da postojanje domino sistema potvrđuje asimetričnost. U tom je slučaju moguće nagađati kako je jurska faza ekstenzije Sjevernog Mora bila asimetrična.



Slika 30: Usporedba rezultata PET sa regionalnim profilom riftnog sistema Sjevernog Mora, baziranom na seizmičkom profilu NSDP84-1 [23].

Na području Dinarida ranu fazu intrakontinentalnog riftinga Neotethisa, moguće je promatrati u naslagama permskog polisulfidnog siderit-barit-hematitnog ležišta Rude kraj Samobora [25]. Usporedimo li geološki profil ležišta [25] s pokusom ekstenzijske tektonike pri ranijoj fazi, tj. pri fazi od 36%, uočiti ćemo neke sličnosti (slika 31). Strukturna situacija na geološkom profilu i modelu mogla bi se nazvati zrcalno simetričnom. Na profilu su listrički rasjedi (smjer nagiba u smjeru 85°) smjerom nagiba orijentirani suprotno smjeru ekstenzije, te bi odgovarali zapadno orijentiranim listričkim rasjedima u pokusu. Treba naglasiti kako su neki zapadno orijentirani rasjedi u pokusu pri ekstenziji od 36% antilistrički, no oni prelaze u listričke već u narednih 2 do 3% ekstenzije te će ih se smatrati takvima. Rasjedi na profilu sa smjerom nagiba suprotnim od 85° su ili ravni ili antilistrički ili ramp-flat-ramp, dakle niti jedan od tih rasjeda nije listrički, kako u pokusu niti jedan rasjed sa smjerom nagiba ka istoku nije listrički. Na desnoj strani profila primjetan je mogući početak stvaranja asimetričnih domino struktura, što bi također bila sličnost sa pokusom. Ovaj profil je dimenzijama i dubinom puno manji od dimenzija koje bi trebao predstavljati pokus, pa se i to treba uzeti u obzir. Na temelju usporedbe pokusa i profila ležišta Rude nije moguće sa sigurnošću utvrditi kakav je bio model riftinga na ovom području. No, kako na profilu nedostaju simetrični listrički rasjedi, te postoji naznaka početka stvaranja domino strukture, moglo bi se reći kako se i u ovom slučaju radi o asimetričnom riftingu, međutim potrebno je detaljnije istražiti područje.



Slika 31: Usporedba PET pri 36% ekstenzije sa profilom rudnog ležišta Rude kraj Samobora [25].

7. Zaključci

Iz prvog pokusa kompresijske tektonike (PK1) može se sa sigurnošću zaključiti slijedeće:

- (1) Pri kompresiji materijala jednake granulacije nastaju rasjedi u setovima, sa zajedničkim korijenom odnosno dekolmanskim horizontom.
- (2) Kut nastanka mlađih rasjeda manji je od kuta nastanka starijih, tj. kut nastanka rasjeda se smanjuje napredovanjem kompresije.
- (3) Rasjedi se ustrmljuju tijekom kompresije s obzirom na početni kut njihovog nastanka, što dovodi do stvaranja vrlo strmih reversnih rasjeda.
- (4) Velika većina rasjeda u pokusu nastaje kao antilistrička i vrlo brzo mijenjaju geometriju u flat-ramp-flat. Tek u najnaprednijoj fazi kompresije nastaju listrički rasjedi.

Uspoređujući rezultate pokusa s geološkim profilom A-B sa Lista Ploče Osnovne geološke karte SFRJ, [11] uočene su sličnosti u rasporedu rasjeda i njihovoj geometriji, kao i njihovom kutu nagiba. Rezultat pokusa također je usporediv s Miljuševim profilom [12] Premuda – Olib – Pag – Velebit po povećanju kuta nagiba idući u smjeru glavne kolizije, po spajanju rasjeda u dekolmanski horizont te po grupiranosti rasjeda u setove. No, usporedi li se rezultat PK1 s geološkim profilom sa Lista Gospić Osnovne geološke karte SFRJ [13], uočit će se velika odstupanja.

Iz drugog pokusa kompresijske tektonike (PK2) sa sigurnošću se može zaključiti kako u materijalu sa slojevima različite granulacije:

- (1) Rasjedi nastaju zasebno, na međusobno relativno jednakim udaljenostima, i tek se napretkom kompresije spajaju u dekolmanski horizont.
- (2) Nastaju antitetički reversni rasjedi, koji generiraju pseudoantiklinalu.

- (3) Kutovi nagiba svih nastalih rasjeda sekundarno se povećavaju tijekom napredovanja kompresije
- (4) Nastaju slijepi sintetički rasjedi.
- (5) Većina glavnih rasjeda nastaju kao ravni ili antilistrički, te se njihova geometrija mijenja u flat-ramp-flat, a tek najmlađi glavni rasjed nastaje kao listrički. Geometrija sintetičkih i antitetičkih rasjeda se ne mijenja.

Glavna razlika između PK1 i PK2 je nastanak antitetičkih reversnih rasjeda u PK2. Nadalje se ova dva pokusa razlikuju u nastanku slijepih sintetičkih rasjeda u PK2, te po nastanku odvojenih glavnih rasjeda u PK2 za razliku od PK1 gdje oni nastaju u setovima. Rezultat pokusa PK2 usporediv je s geološkim profilom A-B sa Lista Trebinje Osnovne geološke karte SFRJ [16] po rasjedima koji su samostalni i odvojeni te po njihovoj geometriji, uzevši u obzir dubinu ucrtanog profila i debljine koju predstavlja model u pokusu. Rezultat pokusa također je usporediv sa modelima koje su napravili F. Storti i suradnici (1997) [17]. Oni također u pokusima kompresije koriste materijale različite granulacije, te dobivaju glavne reversne odvojene rasjede i njima antitetičke reverzne rasjede.

Možda najveću sličnost rezultat PK2 ima s pojednostavljenim geološkim profilom područja Himalaja [18], gdje reversni antitetički rasjedi predstavljaju granicu između dvije tektonske jedinice, a glavni reversni rasjedi su odvojeni i njihov se kut nagiba povećava u smjeru glavne kolizije. Sličnost sa strukturom u Dinaridima rezultat drugog pokusa kompresijske tektonike pokazuje s profilom Senj-Ogulin [19]. Na ovom pojednostavljenom profilu postoje antitetički reversni rasjedi, te su glavni rasjedi odvojeni i samostalni.

Iz pokusa kompresije na rasjednoj rampi može se zaključiti slijedeće:

- (1) U pokusu nastaju strukture koje odgovaraju modelu rasjednog boranja (napredovanjem rasjedanja, odnosno fault-propagation folding).
- (2) Reverzni rasjed paralelan rasjednoj rampi snosi većinu navlačnog pomaka.

- (3) Back-thrust rasjedi pri nastanku su kutom zrcalno simetrični rasjednoj rampi, a njihov se kut nagiba tijekom pokusa generalno povećava.
- (4) Glavni navlačni rasjed nastaje kao antilistrički i ne mijenja svoju geometriju, dok su back-thrust rasjedi promjenjive geometrije no generalno listrički.
- (5) U pokusu je zadebljanje najmlađeg sloja uzrokovano sekundarnom kompresijom ispod glavnog rasjeda koje je posljedica njegovog suprotnog djelovanja u odnosu na rasjednu rampu.

Rezultat pokusa u usporedbi sa djelom geološkog profila A-B na Listu Imotski Osnovne geološke karte SFRJ [21] pokazuje određene sličnosti, prvenstveno u postojanju prebačenih antiklinale iznad navlačnih rasjeda, te u zadebljanju najmlađeg sloja u tjemenu antiklinale. Rezultat pokusa vjerojatno je upotrebljiv u interpretaciji i kartiranju područja sa spomenutog lista OGK. Na području Ravnih Kotara postojanje back-thrust rasjeda dokazano je u više seizmičkih profila, između kojih je i seizmički profil Smiličić-Pridraga [22] što odgovara situaciji u pokusu. No, za razliku od pokusa, na spomenutim seizmičkim profilima nisu vidljive prebačene antiklinale. Zaključuje se kako je struktura koja je vidljiva na geološkom profilu vrlo je vjerojatno pozitivna "cvjetna struktura" nastala transpresijskim djelovanjem u najmlađoj fazi tektonske evolucije Dinarida, te kako iz ovakvih razloga treba biti oprezan u korištenju rezultata PKRR u interpretaciji geoloških struktura.

Iz pokusa ekstenzijske tektonike sa sigurnošću se može zaključiti slijedeće:

- (1) Rezultat pokusa odgovara asimetričnom modelu riftinga.
- (2) Svi rasjedi nastaju zasebno, bez razvijanja dekolmanskog horizonta.
- (3) Rasjedi čiji je smjer nagiba suprotan smjeru ekstenzije su ravni, listrički ili antilistrički, dok su oni smjerom nagiba orijentirani u smjeru ekstenzije ravni ili antilistrički. Dakle ni jedan rasjed sa smjerom nagiba suprotan smjeru ekstenzije nije listrički.
- (4) Rasjedi čiji je smjer nagiba suprotan smjeru ekstenzije manjeg su kuta nagiba.

(5) Rasjedi čiji je smjer nagiba suprotan smjeru ekstenzije rastu od dna prema površini materijala, a oni nagibom orijentirani u smjeru ekstenzije rastu od površine prema dnu materijala.

(6) U pokusu domino struktura nastaje kao posljedica asimetrične ekstenzije.

Rezultat pokusa ekstenzijske tektonike uspoređen je sa regionalnim geološkim profilom riftnog sistema Sjevernog Mora [23] te su uočene sličnosti u geometriji i razvoju kuta nagiba rasjeda nagibom orijentiranih suprotno smjeru ekstenzije. U profilu kao i u pokusu uočen je domino sistem, doduše različitog tumačenja postanka. PET pri 36% kompresije pokazuje strukturne sličnosti s ranom fazom intrakontinentalnog riftinga Neotethisa, vidljivom u profilu ležišta Rude kraj Samobora [25]. Sličnosti se očituju u geometriji rasjeda čiji je smjer nagiba suprotan smjeru ekstenzije, ali i u geometriji rasjeda nagibom orijentiranih u smjeru ekstenzije.

S obzirom na rezultate provedenih pokusa u ovom radu koji su uspoređeni s profilima iz Osnovne geološke karte SFRJ, a posebice s obzirom na novija istraživanja koja provode geolozi na području Dinarida, ne može se ne zaključiti kako je vrlo vjerojatno da navedene karte trebaju biti provjerene i ažurirane novim podacima, ako ne i nanovo kartirane uz primjenu posljednjih saznanja o tektonici ovoga područja.

8. Literatura

- [1] Crook, A. J. L., Wilson, S. M., Yu, J. G. & Owen, D. R. J (2006): Predictive modelling of structure evolution in sandbox experiments. *Journal of Structural Geology* 28, 729-744.
- [2] Koyi, H. (1997): Analogue modelling: from a qualitative to a quantitative technique—a historical outline. *Journal of Petroleum Geology* 20 (2), 223–238.
- [3] Withjack, M.O., Islam, Q.T. & La Pointe, P.R. (1995): Normal Faults and Their Hanging-Wall Deformation: An Experimental Study. *AAPG Bulletin* 79 (1), 1 – 18.
- [4] Storti, F. & McClay, K. (1995): Influence of syntectonic sedimentation on thrust wedges in analogue models. *Geology* 23 (11), 999 – 1002.
- [5] Blašković, I. & Aljinović, B. (1981): Mikrotektonski elementi kao osnova za model tektonske građe šireg područja Kvarnera, Simpozij „Kompleksna naftno-geološka problematika podmorja i priobalnih dijelova Jadranskog mora“ Split, 19.-21.5.1981, Zbornik radova 1, 87 – 100.
- [6] McClay, K. & White, M. (1995): Analogue modelling of orthogonal and oblique rifting. *Marine and Petroleum Geology* 12, 137-151.
- [7] http://www.geo.umass.edu/structure/analog_models/, (pogledano 29.3.2016 god.)
- [8] <http://rocktraumacenter.wikispaces.com/Sandbox+Models>, (pogledano 29.3.2016 god.)
- [9] Fossen, H. & Gabrielsen, R. (1996): Experimental modeling of extensional fault systems by use of plaster. *Journal of Structural Geology* 18. 5, 673 – 681.
- [10] Fossen, H. (2010): *Structural Geology*. Cambridge University Press.
- [11] Marinčić, S., Magaš, N. & Benček, Đ. (1977): Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000, List Ploče K33-23, Savezni geološki zavod Beograd, 1977 god.
- [12] Miljuš, P. (1971): Naftoplinonosni bazeni cirkumjadranske oblasti. Simpozij o istraživanju ležišta nafte i plina na Jadranu i u zoni vanjskih Dinarida, Zadar 10-14.5.1971, 4-5, 437 – 356.

- [13] Sokač, B., Nikler, L., Velić, J. & Mamužić, P. (1974): Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000, List Gospić L33-115, Savezni geološki zavod Beograd, 1977 god.
- [14] Korbar, T. (2009): Orogenic evolution of the External Dinarides in the NE Adriatic region: a model constrained by tectonostratigraphy of Upper Cretaceous to Paleogene carbonates, *Earth-Science Reviews* 96, 296–312.
- [15] Picha, F.J. (2002): Late orogenic strike–slip faulting and escape tectonics in frontal Dinarides–Hellenides, Croatia, Yugoslavia, Albania and Greece, *AAPG Bulletin* 86/9, 1659–1671.
- [16] Geološki zavod Sarajevo (1967): Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000, List Trebinje K34-25, Savezni geološki zavod Beograd, 1967 god.
- [17] Storti, F., Salvini, F. & McClay, K. (1997): Fault-related folding in sandbox analogue models of thrust wedges. *Journal of Structural Geology* 19, 3-4, 583 – 602.
- [18] Jessup., M. (2013): Mid-crustal processes in Himalaya, *Speaking of geoscience*, <http://speakingofgeoscience.org/2013/08/28/mid-crustal-processes-in-the-himalaya/>, (pogledano 4.4.2016)
- [19] Matičec, D., Vlahović, I., Fuček, L., Oštrić, N. & Velić, I. (1997). Stratigraphy and Tectonic Relationships Along the Senj-Ogulin Profile (Velika Kapela Mt., Croatia). *Geologia Croatica*, 50(2), 261-268.
- [20] Suppe, J. & Medwedeff, D. A. (1990). Geometry and kinematics of fault-propagation folding. *Eclogae Geologicae Helveticae* 83(3), 409-454.
- [21] Raić, V., Ahac, A. & Papeš, J. (1976): Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000, List Imotski K33-11, Savezni geološki zavod Beograd, 1976 god.
- [22] Grandić S., Kratković I., Kolbah S. & Samaržija J. (2004): Hydrocarbon potential of stratigraphic and structural traps of the Ravni Kotari area – Croatia, *Nafta* 55 (7-8), 311-327

[23] Fossen, H., Odinsen, T., Færseth, R. B. & Gabrielsen, R. H. (2000). Detachments and low-angle faults in the northern North Sea rift system. *Special Publication-Geological Society Of London* 167, 105-132.

[24] Henstra, G. A., Rotevatn, A., Gawthorpe, R. L. & Ravnås, R. (2015). Evolution of a major segmented normal fault during multiphase rifting: The origin of plan-view zigzag geometry. *Journal of Structural Geology* 74, 45-63.

[25] Palinkaš, L. A., Borojević Šoštarić, S., Strmić Palinkaš, S., Prochaska, W., Spangenberg, J., Cuna, S. & Šinkovec, B. (2010). Permian–polysulphide–siderite–barite–haematite deposit Rude in Samoborska Gora Mts., Zagorje–Transdanubian zone of the Inner Dinarides. *Geologia Croatica*, 63 1, 93-115.

9. Zahvale

Želim se zahvaliti svome mentoru izv. prof. dr. sc. Tihomiru Marjanacu na strpljenju i uloženom trudu pri izvođenju pokusa i pomoći pri pisanju rada, kao i na ugodnom društvu tokom rada.

Posebna zahvala v. pred. dr. sc. Borni Lužar-Oberiteru na dopuštenju za korištenje i modifikaciju aparature, kao i za savijete tijekom modificiranja.

Također se želim zahvaliti doc. dr. sc. Ervinu Mrinjeku na ustupljenoj literaturi i tumačenju procesa tektonike, koje je uvelike pomoglo mom razumijevanju istih.

Na kraju se zahvaljujem svojim roditeljima na bezuvjetnoj potpori tokom mog cijelog dosadašnjeg, a vjerujem i budućeg školovanja, te svojoj djevojci.

10. Sažetak

Autor: Mario Poletto

Naslov: Primjena analognog modeliranja u proučavanju tektonskih procesa i geološkom kartiranju

Ključne riječi: analogno modeliranje, tektonika ploča, model kompresijske tektonike, model ekstenzijske tektonike, geološko kartiranje

Sažetak: U radu je opisana izrada i modifikacija aparature za analogno modeliranje rasjeda. Aparatura je korištena kako bi se provela četiri pokusa: dva pokusa kompresijske tektonike koja su se razlikovala po granulometriji postavljenog materijala, pokus kompresije na rasjednoj rampi, te pokus ekstenzijske tektonike. Strukture nastale u pokusima opisane su i prikazane sukcesijski, te detaljno interpretirane i uspoređene sa strukturama iz stvarnog svijeta. U raspravi su dane mogućnosti primjene ovakvih pokusa u interpretaciji geoloških struktura i geološkom kartiranju. Pokusi analognog modeliranja geoloških struktura dali su vrijedan uvid u kinematiku njihovog nastanka.

11. Summary

Author: Mario Poletto

Title: Application of analog modelling in study of tectonical processes and geological mapping

Key words: analog modelling, plate tectonics, collision tectonics model, extensional tectonics model, geological mapping

Summary: The paper describes the creation and modification of apparatus for analog fault modeling. The apparatus is used to implement four experiments: two experiments of compression tectonics that had different granulometry of used materials, one experiment of compression on fault ramp, and one experiment of extensional tectonics. The structures created in these experiments are described and shown in succession, thoroughly interpreted and compared with structures of in real world. In discussion are given the possibilities of application of these experiments in interpretation of geological structures and geological mapping. Analog modelling of geological structures provides valuable insight into the kinematics of their origin.