

STRUKTŪRINĖ GEOLOGIJOS PAGRINDAI

Kurso medžiaga geologijos studentams

Audrius Čečys

Dalis I

Įvadas

Skyrius 1

Įvadas į struktūrinę geologiją

1.1 Bendrai apie viską

Geologija nėra laikomas tiksliu mokslu, tačiau naudojami tyrimo metodai, kaip taisyklė yra iš tikslųjų mokslų. Iš ne geologinių disciplinų, struktūrinė geologija neapseistų be geometrijos, matematikos, fizikos...

1.2 Klasikiniai principai

Žmones nuo seno žavėjo aukšti ir didingi kalnai, gilos bedugnės ir plačios jūros. Sukurti tokią didybę galėjo tik dievai ir milžinai, o jiems supykus žemė spjaudėsi ugningais akmenimis, o didžiuliai šamai purtė Žemę... Iki penkiolikto amžiaus, kada Europoje prasidėjo intelektualinis renesansas, prasidėjo sistemingi Žemės stebėjimai, aprašymai ir pirmieji tyrimai bei pamąstymai apie veikiančius procesus ir veiksnius.

Geologijoje, vienas pirmųjų atradimų jaudulį pajuto ir užfiksavo didysis menininkas ir atradėjas Leonardo da Vinči (1452—1519), kuris detalai piešė uolienu kūnų formas tam (Pav. 1.1), kad suprasti Žemės tiktąjį vaizdą. Septynioliktame amžiuje atsirado pirmasis uolienu deformacijos aprašymas.



Paveikslas 1.1: Leonardo da Vinči piešinys, kuriame pavaizduota suraukšlėto sluoksnis, esantis kalnuose Italijoje (apie 1500 metus). Neseniai buvo atrasta, kad be detalių stebėjimų, da Vinči taip pat atlikinėjo ir eksperimentus.

Nilsas Stensenas (Niels Stensen arba Nikolaus Steno (1631-1686) apžiūrino atodangas, kuriose sluoksniai nebuvo horizontalūs ir spėjo, kad jei sluoksniai neguli horizontaliai, tai reiškia, kad jie turėjo būti deformuoti. Ir suformulavo, kas dabar žinoma kaip, **pirminio horizontalumo dėsnį**:

dauguma sluoksnių slūgso lygiagrečiai Žemės horizontui (horizontaliai) arba labai mažu kampu jį (sub-horizontaliai).

Šis Stenseno dėsnis tikriausiai gali būti laikomas struktūrinės geologijos gimimu. Aštuoniolikto amžiaus pradžioje buvo plačiai pripažintas kalnų grandinių, tokių kaip Alpės, sudėtingumas ir jų ištyrinėjimo poreikis, kad suprasti kaip jie susidaro.

Atradimai suintensyvėjo 18a. antroje pusėje ir 19a. Knygoje „Žemės teorija su įrodymais ir iliustracijomis“ {Theory of the Earth with Proofs and Illustrations, James Hutton}, Džeimsas Huttonas (1726-1797) pasiūlė **aktualizmo (uniformitarizmo) doktriną**, kuri teigia,

kad gamta yra pastovi ją valdančių dėsnų atžvilgiu, o tie dėsniai nekinta laike, erdvėje ir aplinkybėse.

Tai taip pat reiškia, kad

„jei nerasime pradžios pėdsakų, nebus jokių pabaigos perspektyvų“

arba

„šiuolaikiniai procesai vykstantys Žemės paviršiuje ar gelmėse tikriausiai vyko panašiai praityje ir panašiai vyks ateityje“

arba

„dabartis yra raktas į praeitį“.

Po Hatono knygos išleidimo 1785 metais, atsirado grupė mokslininkų save vadinančiais geologais. Šie geologai aprašė kalnų grandinių struktūrų geometriją, išmoko sudaryti geologinius žemėlapius, pradėjo suprasti procesus reikalingus uolienoms susiformuoti, spėjo apie struktūrų ir visų kalnų grandinių kilmę.

Vėliau buvo suformuluotos kitos, esminės geologijoje koncepcijos:

- **SUPERPOZICIJOS PRINCIPAS:** nedeformuotų storių aukščiau esantys sluoksniai susidarė vėliau nei esantys žemiau.
- **PIRMINIS SLUOKSNIŲ TĖSTINUMAS:** atskiri sluoksniai ar sluoksnių grupės paprastai turi didelį lateralinį (šoninį) paplitimą ir jų storis išlieka toks pat visame jų paplitime. Atskiri sluoksniai yra labiau negu grupės linke būti abipusiai išgaubti (lęšiuokiniai) nedideliais atstumais.
- **ĮTRAUKTŲ FRAGMENTŲ DĖSNIS:** senesnių uolienų fragmentai gali būti randami jaunesnėse uolienose, bet ne atvirkščiai.

KAS KĄ KERTA {CROSSCUTTING} DĖSNIS: kertantysis elementas (uoliena, lūžis etc) yra vėlesnis negu perkirstasis.

- **FAUNOS EILIŠKUMO DĖSNIS:** fosilijos turi sistematiškai keistis, tikėtinau daugiau išsivystę randami link storių viršaus.
- **PAMPELÍ {PUMPELLY} TAISYKLĖ:** mažos struktūros savo ypatybėmis mėgdžioja didesnes tos pačios generacijos struktūras, esančias tame pačiame plote. Ši taisyklė galioja, jei struktūros susidarė tuo pačiu metu, panašiose uolienose ir visame plote esant panašioms sąlygoms.

Idėjos apie kalnų kilmę vystėsi palaipsniui. Iš pradžių, buvo manoma, kad kalnai susidarė dėl vertikalios kėlimo iš apačios, galbūt dėl išlydytų uolienų skverbimosi aukštyn palei esamas plutos silpnos zonas, o raukšlės ir lūžiai atsirado dėl gravitacinio slysmo žemyn palei tuos pakeltus blokus. Vėliau įsigalėjo požiūris apie horizontalių jėgų reikšmę, ir geologai spėjo, kad kalnų grandinės ir struktūros juose atspindi Žemės gaublio mažėjimą dėl palaipsnio vėsimos. Šiame modelyje, Žemės mažėjimas vedė prie plutos raukšlėjimosi. Vienas žymesnių atradimų (apie 1850) buvo Džeimso Holo {James Hall; 1811-1898} pastebėjimas, kad Paleozojaus sluoksniai Šiaurės Amerikos Apalačių kalnuose buvo kur kas storesni nei tie patys sluoksniai kontinento viduje. Dėl šio pastebėjimo atsirado **geosinklinų teorija** - modelis, kuriame gilūs nuosėdiniai baseinai, vadinami *geosinklinomis*, išsivysto į kalnus. Žemės mažėjimo ir geosinklinų teorijos, ir įvairios jų kombinacijos, buvo plačiai pripažintos iki 1960-ųjų, kada Alfredo Vagenerio {Alfred Wegener; 1880-1930}, Artūro Holmsio {Arthur Holmes; 1898-1965} ir Hario Heso {Harry Hess; 1906-1969} požiūriai paskatino labai skirtingo modelio atsiradimą. Pasiremdamas A. Vagenerio **kontinentų dreifavimo teorija** ir A. Holmsio mantijos konvekcijos modeliu, H. Hesas pasiūlė revoliucinę judraus jūrų dugno idėją (**jūrų dugno skėtros** {sea floor spreading} hipotezė), kuri privedė prie **plokščių tektonikos teorijos**. Pagal šią teoriją, Žemė susideda iš kelių, kietų plokščių, kurios keičiasi laike ir erdvėje. Šių plokščių tarpusavyje sąveikoje atsiranda kalnų grandinės, vandenynų baseinai, žemės drebinimai, vulkanai ir kiti anksčiau nesugretinami reiškiniai .

Geologijos žinioms gausėjant, įvairūs uolienų ir kalnų bruožai gavo vardus ir kažkada amorfiškos ir neaprašomos uolienų masės, atsidengusios ant mūsų planetos paviršiaus, tapo istorijos knyga, kuri saugo Žemės biografiją. Tikriausiai ir jūsų supratimas apie Žemę greitai didėja, klausant įvairių geologinių ir kitų mokslų kursų. Jums dabar uolienos jau nebėra tik pilki pakelelės akmenys, bet kiekvienas jų turi atpažįstamus raštus ir formas. Šio kurso tikslas yra padidinti gebėjimą atpažinti ir suprasti tuos raštus ir formas, ir ypač panaudoti juos kaip būdą procesų, kurie suformavo ir tebeformuoja išorinius Žemės sluoksnius, supratimui.

Taigi, geologija yra Žemės vystymosi istorijos mokslas, o struktūrinė geologija yra geologijos mokslo dalis ir svarbus įrankis pėdsakų, kurie buvo palikti dėl Žemės litosferinių plokščių judėjimo, dėl sunkio jėgos ir nežemiškų kūnų smūgių, atpažinime ir interpretacijoje.

1.3 Struktūrinės geologijos tikslai

Visgi, kokių jėgų vedami žmonės išleidžia daug materialių ir nematerialių resursų tyrinėdami gyvos ir dinamiškos planetos Žemės veidą? Kaip matyti iš geologijos mokslo istorijos, pirmiausia žmonės nori patenkinti savo protinį „esminį instinktą“ - smalsumą. Kaip ir kodėl susidaro keičiantys upių vagų kryptį lūžiai, kaip iškyla kalnai ir pan. Be šių, smalsumą tenkinančių ir žinių pamatą apie mūsų planetą dedančių, **pamatinųjų mokslinių tyrimų** {basic science}, į kuriuos bus teikiamas didelis dėmesys šiame kurse, struktūrinė geologija yra būtina ir **taikomose disciplinose** {applied science}. Struktūriniai tyrimai atliekami sprendžiant inžinerines problemas: statant tiltus, užtvankas, elektrines – visur kur yra didelės apkrovos į gruntą. Geologinių struktūrų tyrimai po minėtais statiniais bei po greitkeliais ar didesniais statiniais yra svarbūs, nes atsinaujine judesiai palei lūžius gali sukelti katastrofinių padarinių. Ypač atkreiptinas dėmesys į didelius ir pavojų keliančius statinius, pvz. atomines elektrines, aukštus pastatus, ar dideles užtvankas. Pvz. Lietuva laikoma seismiškai ramia vieta, bet 2004 m. rugsėjo 21 d. Kaliningrade įvykęs 5 balų pagal Richterio skalę žemės drebėjimas verčia suabejoti, ar iš tikrųjų taip čia ramu. Aišku, čia ne seismiškai aktyvi zona, bet.... Iš kitos pusės, net ir pačiose seismiškai aktyviausiose regionuose yra įmanoma statyti didelius ar pavojingus pastatus, bet prieš tai atlikus ypač detalius ir išsamius struktūrinius tyrimus bei, aišku, parinkus tinkamą statybos metodiką.

Struktūrinė geologija yra tampa susijusi ir naudingų iškasenų paieškoms ir gavyba. Lūžių, geologinių kontaktų ir kitų struktūrų erdvinė geometrija gilumoje ir projekcija paviršiuje yra didelė pagalba geologams, eksploatuojantiems rūdas. Panašiai struktūrinė geologija yra taikoma ir naftos paieškose.

Struktūrinė geologija yra svarbi ir padedant priimti socialinius-politinius sprendimus: naudojamų žemių planavimas, didelių komunalinių, pramoninių ir radioaktyvių atliekų saugojimo vietų radimas.

1.4 Sąryšis su kitais mokslais

Struktūrinė geologija tyrinėja įvairaus, bet santykinai nedidelio mastelio struktūras ir ji yra svarbiausias įrankis tyrinėti didesnio mastelio – geotektonines – struktūras.

Geotektoninių struktūrų tyrimu užsiima kitas geologinis mokslas - (geo)tektonika. Tai yra mokslas apie globalias struktūras: kalnagūbrius, ištisu kontinentų dalis, giliavandenius lovius ir salų lankus, okeanų kalnagūbrius, ištisu kontinentus ir okeaninius baseinus bei jų sąryšį su įtempiais ir plokščių tektonika, plokščių atsiradimą, jų judėjimą ir tarpusavio sąveiką. Paprastai, žodis „tektonika“ naudojamas kalbant apie didelio (globalaus) masto struktūras.

Geofizikiniai metodai (didelės skiriamosios gebos seisminiai, potencialių laukų ir kiti) metodai leidžia įvertinti žemiau žemės paviršiaus (žemės gelmėse) esančių geologinių kūnų dydį ir formą. Izotopiniai tyrimai yra taikomi struktūrų formavimosi amžiui nustatyti.

Yra lengva pastebėti, kad struktūrinė geologija yra tampriai susijusi su kitomis negeologinėmis disciplinomis. Pavyzdžiui, geometrijos žinios yra būtinos struktūrų aprašymui, fizikos žinių tiesiogiai reikia geologinių struktūrų susidarymo ir deformacijos sąlygoms nustatyti, bei geofizikinių metodų supratimui. Cheminė stipriai deformuotų uolienų sudėtis kartais leidžia atpažinti pirminę uolienos sudėtį (protolitą) ir formavimosi aplinką iki deformacijos. Iš esmės, kaip suprasite studijuodami toliau, struktūrinė geologija susijusi su dauguma fizinių mokslų.

1.5 Geologinių struktūrų klasifikacija

Po bendrosios geologijos kurso ir pirmosios geologinės praktikos, jūs jau turite bendrą supratimą kas yra geologinės struktūros. Jos tikriausiai jums primena apie lūžius ir raukšles. Galbūt jūs net turėjote galimybių pamatyti jas "gyvai" kurs nors gamtoje, nors tikriausiai ne Lietuvoje. Šie bruožai susidarė kaip atsakas į pastūmimus ir patraukimus, susijusius su jėgomis atsirandančiomis dėl tektoninių plokščių judėjimo arba dėl plūdumo {buoyancy} skirtingose litosferos vietose. Bet ar nuosėdinių uolienų sluoksniuotumas yra struktūra? O nuosliaužinės raukšlės {slump folds} purvo srautuose {debris flow} - struktūros? Taip, bet sąryšis tarp jų susidarymo ir plokščių judėjimo yra ne toks akivaizdus. Čia reikėtų sudaryti bendresnę geologinės struktūros sąvoką.

Dažnai tie patys objektai gali būti suskirstyti į skirtingas grupes priklausomai nuo tikslo ar tikslų, kuriems jie bus naudojami. Geologinių struktūrų klasifikacija iš esmės kyla iš jos apibrėžimo: **geologinė struktūra** yra geometrinis bruožas¹ uolienose, kurios pavidalas, forma ir išsidėstymas erdvėje gali būti aprašyti. Kitaip tariant, esant reikalui, galima sudaryti keletą vienareikšmių suskirstymų - klasifikacijų, kurios būtų naudojamos organizuojant geologinių struktūrų aprašymą.

Čia bus pateiktas įvadas į įvairius geologinių struktūrų, apie kurias bus vėlesniuose skyriuose, suskirstymus. Šie suskirstymai gali būti kiek painūs, bent iš pradžių, bet vėliau pasidarys aiškiau. Geriausia pradėti nuo pagrindinių *geometrinių* klasių atpažinimo - supratimo apie geologines struktūras pamato. Studijuojant geologines struktūras, remkitės žemiau esančiu suskirstymu, ir pastebėkite kaip tam tikra geometrinė struktūrų grupė tinka į vieną ar daugiau klasifikacijų.

1. KLASIFIKACIJA, PAGRĮSTA STRUKTŪROS GEOMETRIJA, T. Y. FORMA:

¹bruožas, remiantis Lietuvių kalbos žodynu (<http://www.lkz.lt>) turi dvi prasmes: 1) ruožas, brūkšnys, linija; 2) savybė, ypatybė. Čia bus daugiau naudojama antroji prasmė, kuri bendrinėje kalboje naudojama gal kiek rečiau. Angliškai - „feature“.

- (a) Plokštuminis {planar} ar pusiau-plokštuminis {subplanar} paviršius;
- (b) Kreivaplokštuminis {curvilinear} paviršius;
- (c) Linijiškas {linear} bruožas.

Šis suskirstymas yra esminis, pamatinis suskirstymas. Į jį įeina tokios struktūrų klasės kaip plyšiai, gyslos, lūžiai, raukšlės, šlyties zonos, foliacijos ir linijškumai.

2. KLASIFIKACIJA PAGAL SUKELTŲ JĖGŲ PRIGIMTĮ:

- (a) Pirminės {primary} struktūros atsiranda dėl pačios uolienos susidarymo;
- (b) Vietinės sunkio jėgos {local gravity-driven} struktūros susidaro dėl slysmo žemyn ant palinkusių paviršių; bet kokio mastelio nuošliaužos susidarančios dėl vietinio gravitacinio potencialo pertekliaus;
- (c) Vietinės tankio – inversinės {local density - inversion driven} struktūros susidaro dėl skirtingo uolienų tankio šoninio (lateralus) nevienodumo, dėl ko atsiranda vietinės plūdrumo {buoyancy} jėgos;
- (d) Fluidų slėgio {fluid pressure driven} struktūros susidaro dėl nekonsoliduotos medžiagos injekcijos, esant staigiam slėgio atpalaidavimui;
- (e) Tektoninės struktūros susidaro dėl litosferinių plokščių sąveikos, dėl regioninės sąveikos tarp astenosferos ir litosferos, dėl plutos-mastelio ir litosferos-mastelio gravitacinio potencialo energijos ir dėl plutos izostatinės pusiausvyros siekimo.

Pirmosios keturios grupės gali būti priskiriamos prie netektoninių struktūrų, t.y. prie tokių, kurių susidarymas nėra tiesiogiai susijęs su jėgomis, atsirandančiomis dėl plokščių judėjimo. Čia "gali būti" parašyta neatsitiktinai, nes dažnai tokios struktūros susidaro esant tektoniniam aktyvumui. Pavyzdžiui, gravitacinės nuošliaužos gali prasidėti dėl tektoninio seismingumo - žemės drebėjimo, o druskų diapirai gali kilti palei tektoninius sprūdžius. Šios keturios kategorijos bus nagrinėjamos Antroje dalyje [int_link]. Ketvirta struktūrų grupė yra labai didelė ir jai bus skiriama daugiausiai dėmesio šiame kurse [int_link].

3. KLASIFIKACIJA PAGAL TAI, KADA STRUKTŪROS SUSIDARĖ:

- (a) Vienalaikės arba sin-formacinės² {syn-formational} struktūros susidaro tuo pačiu metu, kaip ir medžiaga, sudaranti uolieną;
- (b) Pusiauvienalaikės {penecontemporaneous³} struktūros susidaro iki pilnos litifikacijos (uolienos susidarymo), bet po pirminio nusėdimo;
- (c) Vėlesnės, postformacinės⁴, po uolienų susidarymo {post-formational} struktūros susidaro po pilno uolienos susidarymo ir dėl priešasčių nesusijusių su tos uolienos susidarymu.

4. KLASIFIKACIJA PAGAL DEFORMACIJOS MECHANIZMĄ (struktūrų susidarymo procesą):

²Priešdėlis „sin“ arba „syn“ graikų kalboje reiškia „kartu“, arba „su“. Taigi, sin-formacinės struktūros būtų tokios, kurios susiformavo kartu su pačia uoliena.

³„Pene“ lotynų kalboje reiškia „beveik“

⁴Priešdėlis „post“ lotynų kalboje reiškia po to, vėliau. Taigi, post-formacinės struktūros būtų tokios, kurios susiformavo po to, kai uoliena buvo pilnai susidariusi.

- (a) Plyšiavimo {fracturing} struktūros susijusios su plyšių uolienoje atsiradimu ar susiliejimui;
- (b) Trinties slysmo {frictional sliding} struktūros susijusios su vieno uolienų kūno slysmu palei kitą, arba vienu grūdų (kristalų, mineralų) palei kitus, ir abiem atvejais veikia trinties pasipriešinimas;
- (c) Plastiškos {plasticity} struktūros atsiranda dėl deformacijos, susijusios su vidine kristalų tėkme, neprarandant vientisumo, arba su betrinčiu {non-frictional} vienu kristalų slysmu palei kitus;
- (d) Difuzinės {diffusion} struktūros atsiranda dėl medžiagos pernešimo (transporto) kietame būvyje arba su fluido pagalba (disolucija).

5. KLASIFIKACIJA PAGAL MEZOSKOPINĮ⁵ RIŠLUMĄ {COHESIVENESS} DEFORMACIJOS METU:

- (a) Trapios {brittle} struktūros susidaro dėl rišlumo praradimo skersai atskiro mezoskopinio paviršiaus;
- (b) Plastiška {ductile} struktūros susidaro be rišlumo praradimo skersai mezoskopinio atskiro paviršiaus;
- (c) Trapi/plastiška struktūra susidaro kaip trapių ir plastiškų struktūrų mišinys.

Atkreipkite dėmesį, kad stebėjimo mastelis (šiuo atveju, mezoskopinis) yra kritiškai svarbus atskiriant trapias ir plastiškas deformacijas, kadangi plastiška deformacija gali būti ir mikroskopinio mastelio plyšiavimas ir trinties slysmas. Daugiau apie tai poskyriuose “Mastelio skvarba ir “Skvarbios ir neskvarbios struktūros”.

6. KLASIFIKACIJA PAGAL DEFORMACIJOS VYKSMAŲ TAM TIKROS ATSKAITOS SISTEMOS, PAPRASTAI ŽEMĖS PAVIRŠIAUS, ATŽVILGIU:

- (a) Gniuždymo {contractional} struktūra susidaro dėl regiono gniuždymo (trumpėjimo);
- (b) Tempimo {extensional} struktūra susidaro dėl regiono tempimo;
- (c) Tjosos-slysmo {strike-slip} struktūra susidaro dėl judesių be tempimo ar gniuždymo.

Svarbu suprasti tai, kad gniuždymas viena kryptimi, dažnai gali (bet neturi) būti lydymas tempimo kita kryptimi, ir atvirkščiai. Be to, regioninio mastelio deformacijos paprastai sukelia ir vertikalius Žemės paviršiaus poslinkius - sudedamoji, kuri dažnai yra pražiūrima.

7. KLASIFIKACIJA PAREMTA DEFORMACIJOS PASISKIRSTYMU UOLIENOS TŪRYJE:

- (a) Tęstinės {continuous} - struktūros esančios visame tūryje, bet kokiame mastelyje;
- (b) Skvarbios {penetrative} - struktūros, esančios visame uolienos tūryje, bet, pažiūrėjus iš labai arti, tarp struktūrų yra tarpai;
- (c) Lokalizuotos {localised} - tęstinės ir skvarbios struktūros yra tik tam tikruose apibrėžtuose plotuose, regionuose.

⁵ATODANGOS IR DELNO DYDŽIO, ŽR. POSK. „MASTELIO SVARBA“.

(d) Pavienės arba diskrečios {discrete} - struktūros, kurios yra izoliuotos.

Plyšiai, gyslos, ir tam tikri lūžiai yra pirmiausiai trapios deformacijos apraiškos, o foliacijos ir raukšlės yra daugiausia plastiškos deformacijos procesų apraiškos.

Atskira, ir į šias klasifikacijas nepatenkanti, struktūra yra kontaktai. Kontaktai yra ribos skiriančios vienas uolienas nuo kitų. Šis terminas apima normalius nuosėdinius kontaktus, intruzinius kontaktus, tektoninius kontaktus. Dažniausiai dvi uolienos atskirtos kontaktu skiriasi savo sudėtimi, grūdelių dydžiu, spalva, tekstūra ir pan., tačiau, kaip matysime studijuodami nuosėdinių uolienų struktūras, uolienos gali būti idealiai panašios, bet turėti kontaktą tarp jų. Pagal jų pobūdį, kontaktai gali būti staigūs arba pereinami, ryškūs arba neryškūs ir pan. Kontaktų forma gali būti labai įvairi, nuo beveik idealios plokštumos (pvz. mafinių daikų) iki labai sudėtingų paviršių.

1.6 Struktūros ir tekstūros

Pats pagrindinis terminas struktūrinėje geologijoje yra, aišku, struktūra. Šis terminas yra gana platus ir gali apimti keletą tikslesnių terminų bei su jais susijusių geologinių objektų. Tikriausiai dėl šio termino laisvesnio apibrėžimo, kartais kyla nesusipratimų naudojant jį skirtingose geologinėse disciplinose bei verčiant juos iš/į lietuvių arba anglų kalbas. Patikslinant jau minėtą apibrėžimą, struktūra yra geologinę prasmę turintis geometrinis bruožas, kuris gali būti pastebimas arba interpretuojamas, linižiškas arba plokštuminis, arba suskaidomas į šiuos du, kurio slūgsojimo padėtį erdvėje galima aprašyti, išmatuoti. Kitaip sakant, struktūrinė geologija, bent jau jos aprašomoji dalis, yra geologijos geometrija.

Kaip geologijos moksle, struktūrinėje geologijoje pagrindinis tyrimų objektas yra geometriniai bruožai uolienose (kurios sudarytos iš mineralų). Petrografijoje, kurios pagrindinis tyrimų objektas yra pati uoliena, struktūra yra vadinamas skirtingų mineralų ir jų dydžių tarpusavio santykis, pvz. porfiritinė tekstūra, kurią sudaro santykinai dideli kristalai, esantys kur kas mažesnių mineralų apsuptyje (matricoje). Panašių mineralų lygiagretus ar maždaug lygiagretus išsidėstymas yra vadinamas tekstūra. Pvz. tankus šviesių ir tamsių mineralų persisluoksniavimas sudaro gneisišką tekstūrą.

Taigi, „struktūros“ samprata struktūrinėje geologijoje ir petrografijoje yra ne ta pati. Tam, kad atskirti šiuos du vienodus, bet skirtingą prasmę turinčius terminus, struktūrinės geologijos rėmuose petrografijoje naudojamą „struktūrą“ bus vadinama „petrostruktūra“.

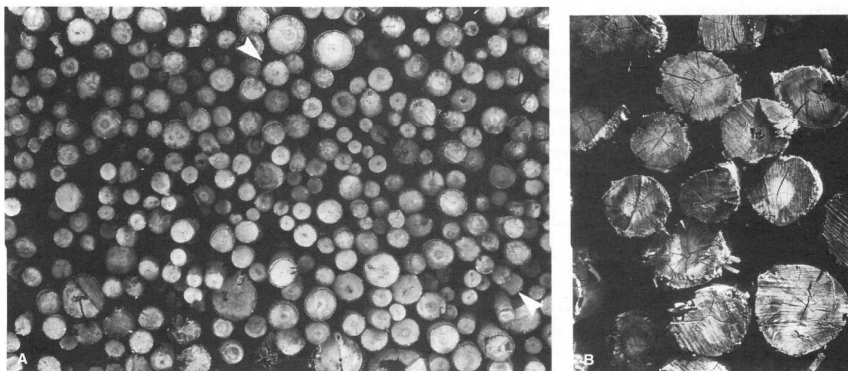
„Tekstūros“ samprata tiek struktūrinėje geologijoje, tiek petrografijoje yra vienoda. Iš esmės, bet kokią ant uolienos paviršiaus matomą mineralų orientaciją galima vadinti tekstūra {texture} arba audiniu {fabric}. Svarbu, kad mineralų orientacija būtų visame uolienos tūryje, t.y. būtų skvarbi arba tęstinė. Dažnai, ypač matuojant erdvinę padėtį lauko darbų metu, „tekstūra“ yra laisvai, vadinama „struktūra“. Taigi, skaitant geologinę literatūrą gali būti nemažai painiavos, tačiau dėl to nereikia nerimauti, nes, suprantant esmę, terminai dažnai būna aiškūs iš konteksto.

Sunkiau šiame kurse gali būti objektų erdvinis vaizdavimas (ant popieriaus, kompiuteriu ir t.t.) ir įsivaizdavimas (mintyse). Nei viena, nei kita padaryti nėra lengva, bet yra labai naudinga ir būtina. Jūs turėtumėte pradėti lavinti

trimatį mąstymą nuo paprastesnių, įprastų objektų, pvz, kaip kambarys ar namas, ir palaipsniui pereiti prie labiau sudėtingų geometrinių figūrų. Atkreipkite dėmesį, kad trimatis mąstymas yra sunkus daugumai iš mūsų, bet to išmokstama besipraktikuojant. Jis yra būtinas raktas į struktūrų supratimą.

1.7 Mastelio svarba

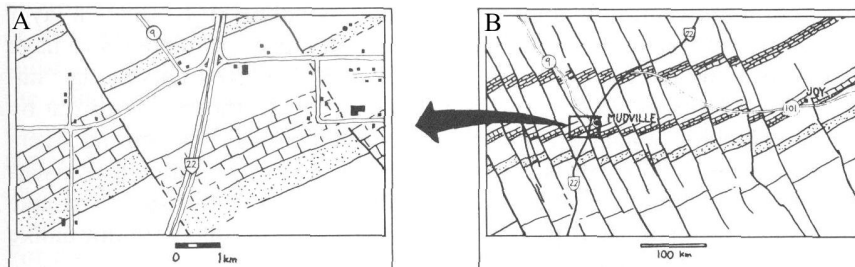
Mastelio samprata ir **stebėjimo mastelis** yra ypatingai svarbūs struktūrinėje geologijoje. Struktūros – tokios kaip geologiniai kontaktai, lūžiai ir pan. – yra paprastai stebimi atodangose ir delno dydžio (pvz. kerne) pavyzdžiuose, t.y. **mezoskopinės struktūros**. Smulkios struktūros, kurios nematomos plika akimi, ir stebimos po mikroskopu ar didelio padidinimo lupa, yra vadinamos **mikroskopinėmis**. **Makroskopinės** struktūros yra didelio mastelio struktūros, pvz. kalnai ar pan. ir analizuojamos naudojant iš satelitų padarytus vaizdus. Kai kada geologai naudoja priešdėlį mega- (**megaskopinės**), kada šnekama apie kontinentų-dydžio struktūras. Nėra griežtų ribų tarp šių mastelių, ir jų naudojimas priklauso nuo konteksto. Yra labai svarbu suprasti įvairių mastelių struktūras ir jų tarpusavio santykį.



Paveikslas 1.2: Kas yra matoma rastų rietuvėje iš dalies priklauso nuo stebėjimo mastelio. Kairėje, fotografija padaryta iš vidutinio atstumo. Rodyklės rodo rąstus išsidėliojusius palei vieną liniją (linijiškumas). Rąstai yra apvalūs. Dešinėje, iš arti padarytoje fotografijoje, rąstai nebėra tokie apvalūs, be to pasimato įdomūs plyšių rąstai.

Paveiksle 1.2, nuotraukos A (kairėje) ir B (dešinėje) nufotografuotos iš skirtingų atstumų. Nuotraukoje padarytoje iš didesnio atstumo (A), rąstus mes aprašytume kaip taisyklingai apvalius, skirtingo skersmens ir net kai kada rodančius linijišką išsidėstymą (parodyta rodyklėmis). Aprašant iš arčiau (nuotrauka B), rąstai nebe atrodo apvalūs, yra netaisyklingi, nelygiai nupjauti, matosi spinduliniai plyšiai. Ant kai kurių matosi pjovimo žymės. Iš šio pavyzdžio matosi, kad aprašomos struktūrinės charakteristikos stipriai priklauso nuo stebėjimo mastelio. Ir, tuo būdu, nuo stebėjimo mastelio priklauso kaip struktūros atspindės aprašyme bei analizėje.

1.8 Skvarbios ir neskvarbios struktūros



Paveikslas 1.3: Mastelio įtaka tam, ką mes matome. A. Stebint santykinai didelio mastelio schemoje (pastebėkite grafinį mastelį), lūžiai atrodo yra per didelį atstumą vienas nuo kito. B. Mažesnio mastelio schemoje, lūžiai jau būtų skvarbūs.

Struktūros klasifikacijoje, paremtoje deformacijų pasiskirstymu uolienos tūryje VII (žr. 1.5 poskyrį „Geologinių struktūrų klasifikacija“ 7 puslapyje), galima suskirstyti į tris grupes: tęstinės, svarbias ir nesvarbias. Į pirmąją grupę patenka, aišku, tik tęstinės, į antrąją skvarbios struktūros, o į trečiąją – visos likusios. Struktūros vadinamos **skvarbiomis** tada, kada atstumas tarp atskirų struktūrų (pvz. lūžių) yra mažas lyginant su tiriamojo uolienų kūno ar ploto dydžiu ir kada tos struktūros paplitusios visame tame tūryje. Reiškia, kad struktūrų skvarbumas priklauso nuo stebėjimo mastelio. Pavyzdžiui, paveiksle 1.3A pavaizduotas didelio mastelio žemėlapis, kuriame lūžiai perstumiantys klin-tis, molio skalūnus ir smiltainius, yra matomi kaip atskiri lūžiai, t. y. neskvarbios, pavienės struktūros. Tačiau mažo (regioninio) mastelio žemėlapyje (1.3B) lūžiai jau būtų skvarbios struktūros.

1.9 Deformacinės ir nedeformacinės struktūros

Kaip jau buvo minėta poskyryje 1.5, mokantis tyrinėti Žemės struktūras yra patogu struktūras skirstyti į tam tikras grupes, pagal tam tikrus kriterijus. Čia mes struktūras suskirstysime į deformacines ir nedeformacines struktūras. Intuityviai galima pasakyti, kad nedeformacinės struktūros yra tos, kurios susidarė be įtempių, o deformacinės struktūros susidaro kada susiformavusi (arba beveik susiformavusi) uoliena verčiama keisti savo formą, tūrį, ar padėtį, nepriklausomai nuo laiko ar priežasties. Nedeformacinės struktūros gali būti toliau skirstomos į pirmines (pvz. nuosėdinių sluoksnių kaupimasis) ir antrines (pvz. erozinės), tuo tarpu deformacinės struktūros yra visada antrinės - jos visada susidaro jau esant uolienoms. Yra atskirų atvejų, kada yra sunku pasakyti ar tikrai deformacinės struktūros yra antrinės. Tokios struktūros bus nagrinėjamos skyriuje apie deformacines struktūras nuosėdinėse uolienose.

Kai kada naudojamas struktūrų suskirstymas į tektonines ir netektonines. Pirmosios struktūros susidarė dėl tiesioginio litosferos plokščių judėjimo, o netektonės struktūros susiformavo be (bent jau tiesioginės) litosferos plokščių judėjimo įtakos. Verta paminėti, kad tos pačios struktūros, pvz. lūžiai, gali susidaryti tiek veikiant tektoniams įtempiams, tiek ir ne - pvz. meteoritinio smūgio (im-

pakto) metu. Toks suskirstymas į tektonines or netektonines, kaip ir dauguma klasifikacijų, nėra universalus - struktūros gali patekti į kelias klases. Pvz. lūžiai, susidarę dėl nuošliaužų: dažnai nuošliaužos sukkeliamos žemės drebėjimų, kurie savo ruožtu sukeliama dėl energijos atpalaidavimo ("staigaus slystelėjimo") palei tektoniškai aktyvius lūžius. Tačiau ne visoms nuošliaužoms susidaryti reikia žemėdrebo, užtenka gausesnio lietaus. Taigi, nuošliaužų lūžius priskirti tektoniniam ar netektoniniam?

Netektoninės struktūros irgi gali būti pirminės, t.y. susidariusios uolienų formavimosi metu, ir antrinės, susidariusios po uolienos susiformavo (litifikavosi ar išsikristalizavo). Tai būdinga tik netektoninėms struktūroms, nes pirminių tektoninių struktūrų nėra, nors kai kurios pirminės struktūros susidaro aktyviose tektoninėse aplinkose.

Visos geologinių struktūrų klasės neturi aiškių ir vienareikšmiškai apibrėžtų ribų. Struktūrų klasifikacija į tektonines ir netektonines irgi nėra išimtis. Šis suskirstymas yra patogus, tačiau turi vieną minusą - jis pagrįstas struktūrų kilme - tyrinėjami struktūras mes turime nuspręsti ar viena ar kita struktūra susidarė dėl tektoninio poveikio ar ne. Toks priskyrimas atsiradus naujiems duomenims gali keistis, todėl tokia klasifikacija yra nepriimtina: *jokia klasifikacija negali būti pagrįsta požymių kilme!*

1.10 Struktūrinė analizė

Dabar jau mes žinome kas yra struktūra ir ką geologui reiškia deformacija. O taip pat žinom, kad yra geologų, tyrinėjančių struktūras ir vadinančių save struktūriniais geologais. Bet ką jie veikia? Atlieka struktūrinę analizę, kuri apima seką veiklų, apibendrintų lentelėje 1.1. Pirmiausia savaime suprantama, atliekama svarbiausia dalis - aprašomoji analizė (struktūrų atpažinimas, aprašymas, padėties nustatymas, struktūrinių elementų matavimas), kuri yra pagrindas kitoms analizėms ir dėl to turi būti atliekama itin kruopščiai. Po to seka kinematinė analizė (ieškojimas poslinkio nuorodų ir jų interpretavimas) ir transformacijos (keitos) analizė. Vėliau seka dinaminė analizė (jėgos, įtempiai ir mechanizmai dėl kurių struktūros susidaro). Deformacinių mechanizmų ir tektoninė analizės atliekamos atlikus prieš tai esančias analizes, tačiau šios dvi neturi sekti ta tvarka kaip parodyta lentelėje 1.1.

Aprašomoji analizė

Geologinių struktūrų formos ir išvaizdos apibūdinimas Į tai įeina tikslaus žodyno (žargono) mokėjimas ir naudojimas, kuris leidžia vienam geologui sudaryti struktūros vaizdą taip, kad suprastų bet koks kitas geologas, ir tikslių metodų, leidžiančių vienareikšmiškai aprašyti struktūros orientaciją trimatėje erdvėje, įsisavinimas.

Kinematinė analizė

Nustatymas kelių (deformacinių takų), kuriais uoliena nuėjo transformuodamasi nuo nedeformuoto iki deformuoto būvio. Tai apima, pvz. bruožų uolienoje panaudojimą tam, kad nustatyti slysmo kryptį ant lūžio.

Keitos analizė

Matematinį įrankių sudarymas ir/arba naudojimas nustatant keitos uolienoje kiekybinį dydį. Tai apima ieškojimą tam tikrų bruožų uolienoje, kurie galėtų būti panaudoti išmatuojant keitą.

Dinaminė analizė

Įtempių ir jų santykių su deformacija supratimas. Tai apima naudojimą įrankių, kuriais matuojamas dabartinis Žemės įtempis ir metodų, skirtų įtempių, atsakingų už mikrostruktūrų uolienose interpretaciją, taikymą.

Deformacinių mechanizmų analizė

Tai tyrimas procesų, kurie vyksta nuo atomo iki grūdo (mineralo) lygyje, ir leidžia struktūroms susidaryti. Tai apima uolienu plyšiavimą ir tekėjimą.

Tektoninė analizė

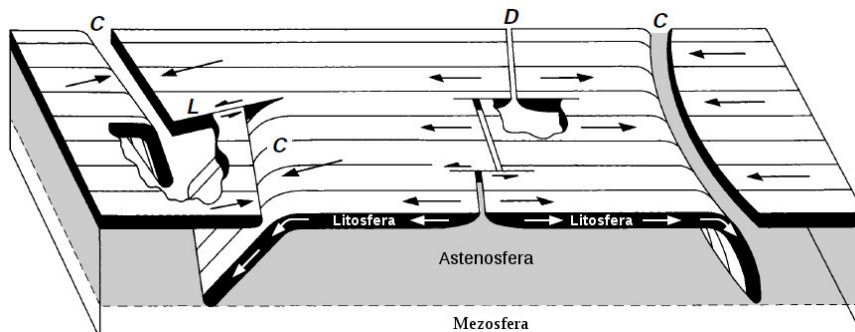
Tai yra nagrinėjimas sąsajų tarp struktūrų susidarymo ir globalių tektoninių procesų. Tai apima regioninio mastelio arba megaskopinių struktūrų tyrimą ir interpretaciją, ir santykių tarp struktūrinės geologijos, stratigrafijos ir petrologijos nustatymą.

Lentelė 1.1: Struktūrinės analizės kategorijos

1.11 Struktūrinė geologija ir tektonika

Pačios didžiausios (ir svarbiausios) struktūros atsiranda dėl lėto litosferinių plokščių judėjimo ant astenosferos. Skirtingi įtempiai (ir jėgos) vyrauja skirtingose litosferinių plokščių vietose, ir priklausomai nuo to susidaro skirtingos struktūros.

Yra trys litosferos plokščių ribų tipai: konvergencinis, divergencinis ir šoninio slysmo arba transforminis (Pav. 1.4). Kiekvienoje iš šių ribų vyrauja tam tikri įtempiai, ir dėl jų susidaro vienos ar kitos struktūros, būdingos tam tikroms plokščių riboms. Tai svarbu atsimiti interpretuojant regioninio mastelio struktūras.



Paveikslas 1.4: Pagrindiniai plokščių tektonikos bruožai. Trys plokščių ribų tipai susidaro dėl santykinio litosferinių plokščių judėjimo: C – koncentruojanti riba, D – diverguojanti, ir L – lateralinio (šoninio) slysmo (arba transforminė) riba.

- Sluoksniai susidaro horizontaliai. Tai yra Pirminio Horizontalumo dėsnis {Law of Original Horizontality}, kuris padaro sluoksniuotumą vietine atskaitos sistema
- Sluoksniai seka vienas kitą chronologine tvarka, bet nebūtinai ištiesai. Tai yra žinoma kaip Superpozicijos dėsnis {Law of Superposition}
- Atskiros, bet išsiriakavę atodangos, rodančios tas pačias uolienas, gali reikšti stratigrafinį vientisumą
- Sluoksniai yra lygiagretūs ir turi vientisą šoninį paplitimą kažkokiam viename regione
- Aštrūs pertrūkimai litologijoje yra lūžai, nedarnos ar intruziniai kontaktai
- Deformuoti plotai gali būti sudalinti į keletą regionų, kuriuose yra vienoda struktūrinė orientacija (struktūrinės sritys arba domenai). Pavyzdžiui, plotas su suraukšlėtais sluoksniais gali būti sudalintas į sritis, kuriose jie turi tokį pat polinkio kryptį (arba vienodą polinkį). Tokios sritys yra didelių raukšlių sparnai ir šarnyrinės zonos
- Paprasčiausia, bet rišli ir pagrįsta, interpretacija yra teisingiausia. Tai žinoma kaip mažiausios nuostabos principas.

Lentelė 1.2: Kai kurios gairės deformuotų vietų interpretacijai.

1.12 Gairės struktūrinei interpretacijai

Baigiant šį skyrių galima padaryti keletą apibendrinimų apie struktūrinę analizę. **Moksliniame darbe, stebėjimai privalo būti atskirti nuo interpretacijų**, tai galioja ir geologiniams žemėlapiams. Visgi, geologinis žemėlapis, geologinis pjūvis ar blokdiagrama be interpretacijos netenka tyrėjo įžvalgos. Jeigu jūs skirsite pakankamai laiko surinkti ir apdoroti duomenis, jūs esate pats tinkamiausias daryti interpretacijas (=mokslinės spėlionės). Žemiau išvardinti patarimai gali padėti žemėlapių interpretacijai, bet turėkite galvoje, kad tai yra tik gairės kreipiančios teisinga linkme, bet ne nurodymai teisingai interpretacijai.

Prielaidos, ant kurių stovi interpretacija, nėra visur tinkančios, universalios. Netgi, įgavę patirties, galbūt su viena ar kita nesutiksite. Tačiau gairės, išvardintos lentelėje 1.2 įgalina pagrįstą, pirmos-eilės, struktūrų interpretaciją.

Šioje lentelėje atskiros gairės tinka tik esant tam tikroms sąlygoms. Gavus naujų duomenų kiekviena prielaida turi būti tikrinama, ir jeigu prielaida išlieka, tik tada galima teigti, kad prielaida yra teisinga. Toks priėjimas vadinamas **darbine hipoteze**, kuri galiausiai gali tapti **modeliu**. Jei modelis yra labai sėkmingas, jis gali pavirsti **teorija** arba **dėsnium**, bet taip geologijoje atsitinka retai. Nežiūrint to, visada yra vietos alternatyvioms interpretacijoms ir modeliams.

Dalis II

Deformacinēs struktūros

Skyrius 2

Įvadas į deformacines struktūras

Paprastai struktūrinė geologija suprantama kaip mokslas apie būtent deformacines struktūras. Kadangi nedeformacinės (ypač nuosėdinės) struktūros irgi yra labai svarbios, ypač Lietuvoje, jos bus nagrinėjamos atskirai. Dabar didžiausias dėmesys bus skiriamas struktūroms, kurios susidarė deformacijos metu. Daugiausia tokių struktūrų susidarė dėl tektoninių įtempimų, t.y. dėl gniuždymų ar tempimų atsiradusių dėl litosferinių plokščių judėjimo, jų susidūrimų. Susidarydamos struktūros, tokios kaip lūžiai ir raukšlės, deformuoja uolienas ir taip išsklaido deformacinius įtempimus po didesnį uolienu tūrį ir taip sumažina tektonines jėgas veikiančias kažkokį į uolienu bloką. Kitaip sakant, struktūrų susidarymas yra prisitaikymas prie aplinkos dėl “geresnės savijautos” - kad būtų jaučiamas kuo mažesnis stresas¹.

Dažniausiai terminas „galiniai nariai“ {end – member} yra, ko gero, daugiausia naudojamas mineralogijoje, nusakantis mineralų eilės du ar daugiau chemiškai gryniausius (kai kada tik teoriškai) mineralus. Žinomiausias pavyzdys yra feldšpatų kietasis mišinys {solid-solution}, kurį sudaro trys galiniai nariai – mineralai: K-feldšpatas (KAlSi_3O_8) - albitas ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) ir anortitas ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$).



Kitas pavyzdys yra „pilkoji-skalė“ {grey scale} skaitmeninėse spalvose, kur ji sudaro visą tolygią eilę nuo baltos iki juodos. Tokių pavyzdžių, aplink apsidairius, rasime nemažai.

Box 1: Galiniai nariai ne geologijoje.

Priklausomai nuo to, kaip besideformuojančios uolienos elgiasi, deformacijos

¹Įtempis ir stresas yra sinonimai, tik pirmasis yra lietuviškas tarptautinio, antrojo, analogas. Kita vertus, žmogus, kaip gamtos dalis, irgi elgiasi panašiai - jei iškyla stresas darbe ar pan., ir nesugeba nuo to pabėgti, patiria deformacijas ir tada prisireikia medikų pagalbos.

skirstomos į **trapias** ir **plastiškas**. Tai yra mokslinis žargonas reiškiantis, kad kai uoliena, jai patiriant gniuždymą ar tempimą, elgiasi trapiai (kaip pavyzdžiui stiklas): plyšta, skeldėja ir panašiai, sakoma, kad ji patiria **trapią deformaciją**. Ir atvirkščiai, kada uoliena, patirianti įtempį, tempiasi, keičia formą ir/ar turi ji patiria **plastišką deformaciją**. Toks deformacijų suskirstymas į plastiškas ir trapias yra, aišku, santykinis. Galima sakyti, kad plastiškos ir trapios struktūros sudaro vienos eilės galinius narius, t.y. yra visa eilė deformacinių elgsenų tarp idealiai trapių ir idealiai plastiškų: plastiškai trapios, trapiai plastiškos ir t.t. (žr. Dėžutė 1).

2.1 Trapių deformacijų struktūros

Nemažai Žemės paviršiuje matomų struktūrų susidarė esant trapiai deformacijai, t.y. esant uolienų perlaužimui/padalimui į dalis palei aiškius plyšius (jų plokštumas, paviršius ar zonas). Priklausomai nuo santykinio uolienų judesio skirtingose plyšio pusėse, plyšiai gali būti **tempimo** arba **šlyties**. Detaliau apie plyšių savybes bus artimiausiuose skyriuose.

Lūžis yra *šlyties* plyšys, kuris rodo *pastebimą atodangoje poslinkį* tarp plyšio plokštumos atidalintų uolienos blokų (lūžio blokų). Kitaip sakant, perstūmimas yra pakankamai didelis, kad būtų pastebimas. Jei perstūmimas yra mažesnis nei tiek - t.y. nematomas ar sunkiai matomas - toks plyšys nėra lūžis, o yra tiesiog plyšys. Didesni lūžiai yra svarbios struktūros plokščių tektonikoje. Tolesniuose skyriuose bus nagrinėjami trys pagrindiniai lūžių tipai: sprūdžiai, antsprūdžiai ir stūmiai. Plyšius detaliau apžvelgsite skyriuje 3, o lūžius skyriuje 4 ir vėlesniuose skyriuose.

Be mokslinio tektoninės evoliucijos tyrinėjimo, plyšiai yra svarbūs mūsų aplinkoje ir svarbūs tęstiniam visuomenės išgyvenamumui. Pirmiausia ir svarbiausia yra vanduo. Dažnai vandens horizontai ir migracijos koridoriai yra susiję su plyšiais. Lygiai taip pat elgiasi ir kiti fluidai, pvz. nafta, ir plyšiuoti angliavandenilių rezervuarai yra nereti.

Žemės reljefas yra stipriai įtakojamas plyšių pasiskirstymo. Pvz. upės dažnai seka lūžių zonomis, nes jos lengvai išdūla. Dažnai naudingos iškasenos yra hidroterminės kilmės, t.y. susidaro iš fluidų, kurie, kaip jau minėta, lengviau teka plyšių zonomis.

Plyšių tyrinėjimas yra svarbus požeminių saugyklų (dujų, radioaktyvių atliekų ir pan.) statyboms. Galiausiai, plyšių netyrinėjimas gali privesti prie tragiškų pasekmių statant užtvankas, tunelius, didelius pastatus ir pan.

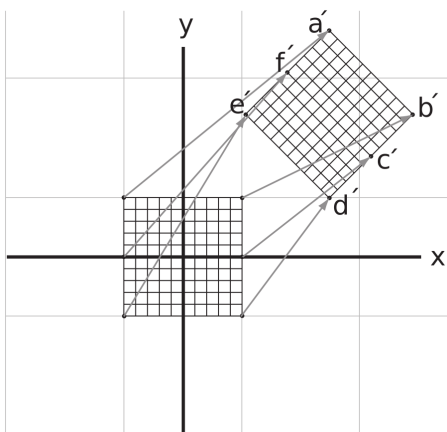
2.2 Plastiškų deformacijų struktūros

Plastiškos deformacijos vyksta giliai Žemės gelmėse, tačiau gali vykti ir ant paviršiaus – viskas priklauso ne tik nuo temperatūros, bet ir deformacijos tempo, medžiagų sudėties, reologijos ir pan. Vykstant plastiškai deformacijai susidaro įvairiausių formų raukšlės ir plastiški lūžiai – t.y. šlyties zonos, per kurias uolienos pasislenka viena kitos atžvilgiu, tačiau vientisumo nepraranda ir laisvi lūžio paviršiai, kaip plyšių atveju, nesusiformuoja.

Vykstant plastiškai uolienų deformacijai atsiranda transformacija (keita) – uolienų deformacija, kurios išraiška yra įvairios foliacijos ir linijiškumai.

2.3 Deformacija

Susipažinus su trapių ir plastiškų struktūrų formomis – aprašomąją struktūrine geologija, toliau logiškai sektų klausimas kaip ir kodėl šios struktūros susidaro. Pagrindinė priežastis yra deformacija. Pagrindinė deformacijos išraiška yra **poslinkis** {displacement} - tiesė tarp pradinio taško padėties (nedeformuotoje uolienoje) iki to pačio taško galutinės padėties (po uolienos deformacijos). **Poslinkio vektorius** {displacement vector} atspindi tos tiesės ilgį (dydį) ir kryptį.



Paveikslas 2.1: Poslinkio vektorių lauko, trumpiau vadinamo poslinkio lauku, iliustracija. Kiekvienas poslinkio vektorius sujungia duoto taško pradinę ir galutinę padėtis. Deformacija, šiame pavyzdyje, yra translacijos ir rotacijos pagal laikrodžio rodyklę kombinacija.

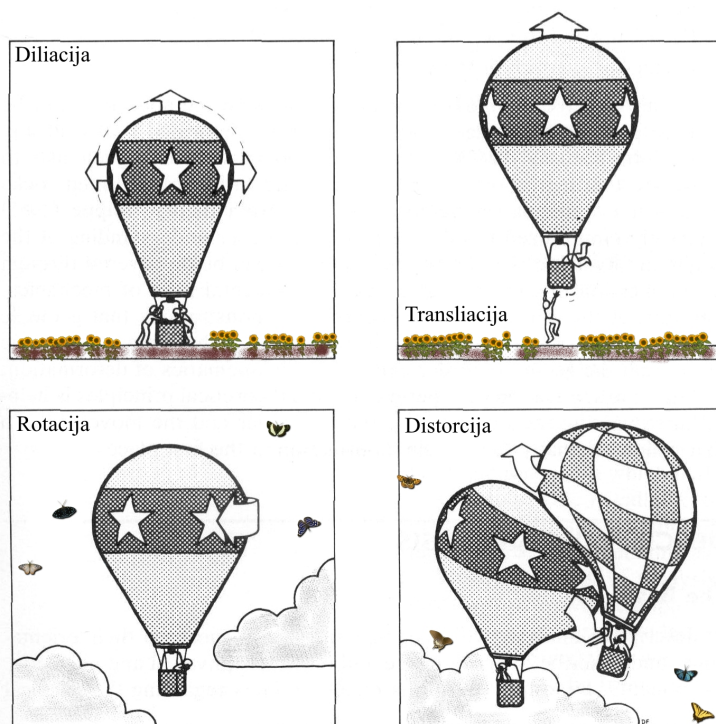
Poslinkio vektorių visuma tam tikrame plote (arba situacijoje) yra **poslinkio vektorių laukas** {field of displacement vectors} arba tiesiog **poslinkio laukas** {displacement field; Pav. 2.1). Būtent poslinkio laukas yra vadinamas **deformacija**, arba, kitaip sakant, poslinkio lauku aprašoma deformacija.

Deformacijos teorijos ir principai yra tie patys tiek geologijoje, tiek ir kituose, fiziniuose ar mechanikos moksluose, ir, norui esant, galima žinias pagilinti studijuojant tokius mokslus kaip kietų kūnų mechanika.

2.4 Transformacija

Kadangi deformacija yra aprašoma poslinkio lauku, panagrinėkime detaliau poslinkio vektorius. Jie gali atspindėti keturis transformacijų tipus. **Transformacija** {transformation} yra tam tikro objekto dydžio, formos ar padėties pokytis dėl išorinės jėgos. Struktūrinėje geologijoje tai yra vienas iš esminių dalykų.

Geologijoje transformacija gali kilti dėl endogeninių (vidinių Žemės) jėgų, ir dėl egzogeninių (veikiančių Žemės paviršiu) jėgų poveikio. Endogeninės jėgos, iš esmės, yra susiję su litosferinių plokščių judėjimu ir dėl jų susidaro dauguma geologinių struktūrų, o egzogeninės jėgos gali būti sukeltos dėl meteoritų (impaktinių) smūgių ar ledynų veiklos.

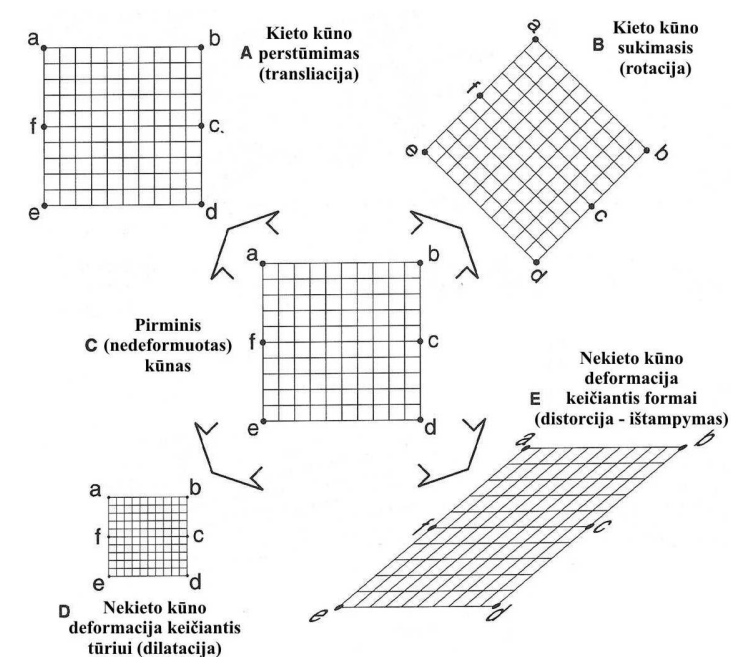


Paveikslas 2.2: Kelionė oro balionu, rodanti keturis deformacijos tipus.

Uolienu transformaciją sukelia **įtempis** {stress}, kuris apibrėžiamas kaip jėga veikianti plokštumą (tiksliau jos ploto vienetą) vienoje linijoje iš abiejų tos plokštumos pusių (apie tai detaliau bus vėliau). Yra išskiriami keturi transformacijos tipai. Kai uolienu kūnas, ar jo dalys, yra verčiamas pakeisti vietą yra vadinama **transliacija** {translation} arba **vietos pokyčio** transformacija. Kai verčiamas pakeisti orientaciją yra vadinama **rotacija** {rotation} arba **posūkių** transformacija. Kai verčiamas pakeisti dydį yra vadinama **dilatacija** {dilatation} arba **tūrio** transformacija, o kai formą – **distorcija** {distortion} arba **formos** transformacija. Šių iliustracijai, paanalizuokime kelionę oro balionu (Pav. 2.2). Pirmiausia balionas yra pripučiamas, t. y. jis patiria dilataciją (viršutinis kairys piešinys), po to jis pradeda kilti – transliacija (viršutinis dešinys piešinys). O pataikius į didesnį vėjo gūšį balionas gali pasisukti (apatinis kairys piešinys), t. y. patirti rotaciją ir nesuvaldytas susidurti su kitu balionu ir patirti distorciją (apatinis dešinys piešinys).

Šiuos tipus reikia suprasti kaip deformacijos galinius narius (paaiškinti Dėžutėje 1) t.y. realiai gamtoje vienu metu veikia daugiau nei vienas atskiras deformacijos tipas. Kaip bus matyti vėliau, struktūrinės geologijos uždavinys yra nustatyti **deformacinius takus** – transliacijų, distorcijų, rotacijų ir dilatacijų seką, kuri nusako kaip kūnas pasikeitė nuo pirminio iki deformuoto būvio.

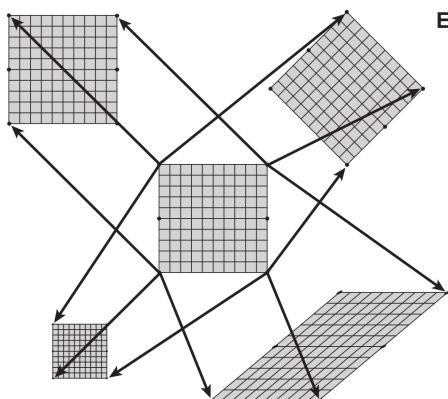
Rotacija ir transliacija vyksta trapiuose uolienose, tuo tarpu dilatacija ir distorcija yra tik plastiškų uolienu požymis. Dvi pastarosios transformacijos bendrai vadinamos **keita** {strain}. Kitaip sakant, trapių kūnų transformacija nesukelia keitos, t. y. atstumai ir kampai tarp menamų linijų (kurios galėtų būti



Paveikslas 2.3: Pirminis, nedeformuotas kūnas diagramos centre (kvadratas abde) yra deformuojamas (A) trapezų kūno transliacija, (B) trapezų kūno rotacija, (D) plastiško kūno dilatacija, ir (E) plastiško kūno distorcija.

užbrėžtos ant uolienų kūno iki įtempio atsiradimo) išlieka nepakitę transformacijos metu - tik keičiasi padėtis (du viršutiniai (A ir B) piešiniai paveiksle 2.3). Tuo tarpu plastiškose uolienose atstumai ir/arba kampai neatstatomai pakinta (du apatiniai (D ir E) piešiniai paveiksle 2.3), pvz. granitas tampa suraukšlėtu gneisu, t. y. uoliena pakeičia savo išvaizdą. Taigi, tokia transformacija vadinsis *keita*. Kaip matysime vėliau, plastiškumas priklauso nuo keleto faktorių, tarp kurių svarbiausi yra temperatūra ir **transformacijos tempas** {strain rate}. Iš vienos pusės, tuo didesnė uolienos temperatūra, tuo ji plastiškesnė. Tačiau net ir labai plastišką uolieną paveikus staigia transformacija, ši pertrūks, t.y. nesiels kaip plastiška, o, tuo tarpu, net ir labai trapą uolieną gniuždant labai lėtai, ji išsilenks kaip plastiška.

Paveiksle 2.4 pavaizduota poslinkio vektoriai kiekvienam iš keturių transformacijos galinių narių. Kiekvieną iš jų apžvelgsime po trumpo įvado į kinematiką.



Paveikslas 2.4: Visų keturių transformacijos tipų, translacijos, rotacijos, dilatacijos, ir distorcijos, poslinkio vektoriai. Cf. pav. 2.3.

2.5 Įvadas į kinematiką

Judesius sukėlusius transformaciją (ir tuo pačiu deformaciją) aprašo **kinematika** {kinematics}, mechanikos dalis susijusi su trimačio medžiagos kūno judėjimo takais ir atskirų taškų judėjimu tame tūryje (apie buvo užsiminta šio skyriaus pradžioje). Kinematinė analizė atliekama kaip aprašomoji analizė, t.y. nekreipiant dėmesio į jėgas, kurios sukėlė judėjimą. Kinematika tiesiog fokusuojasi į judesį.

Daliai kinematinės analizės reikia nustatyti kiekvienam poslinkio vektoriui judesio greitį. Kitaip sakant, sudaryti **greičių vektorius** {velocity vector} kiekvienam materialiam taškui medžiagos tūryje ir **greičių vektorių lauką** {field of velocity vectors} visiems taškams (Pav. 2.1). Transformacijas, kurios vyksta dabar (ypač tektoniškai aktyviuose regionuose), matuojama su GPS² pagalba. Greičių vektorių lauką kur kas sunkiau nustatyti tyrinėjant deformacijas vykusias prieš dešimtis ar šimtus milijonų metų. Atskirais atvejais tai yra įmanoma.

Tiriant deformacijas siekiama išsiaiškinti **deformacinius takus** {deformation path}, kuriais kiekvienas uolienos taškas buvo transportuotas nuo pradinės, nedeformuotos, padėties iki galutinės (po deformacinės) pozicijos. Kartais deformacinis takas sutampa su poslinkio vektoriumi, tačiau tai retos išimtys gamtoje, ne dėsningumas.

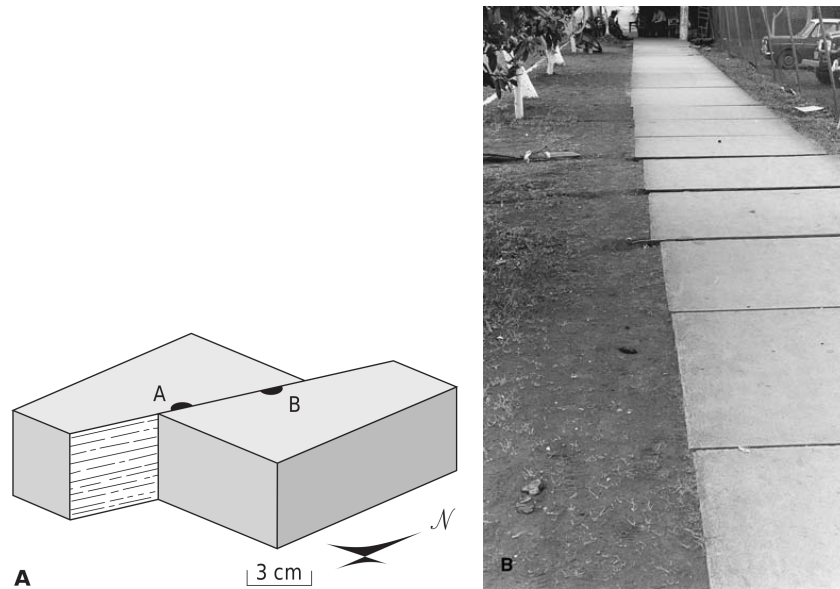
2.6 Transliacija ir rotacija

2.6.1 Transliacija

Vykstant visiškai standaus {rigid} kūno translacijai, uoliena keičia savo padėtį tokiu būdu, kad visi kūno taškai pajuda lygiai tą patį atstumą lygiagrečiomis

²Globalaus vietos nustatymo (pozicionavimo) sistema (Global Position System - GPS) yra viena iš globalios navigacinių palydovų (Global Navigation Satellite Systems - GNSS) sistemų.

linijomis. Nėra jokio sukimo ir kūno taškai nekeičia tarpusavio padėties (Pav. 2.3A). Visi deformaciniai takai yra vienodi (Pav. 2.5).



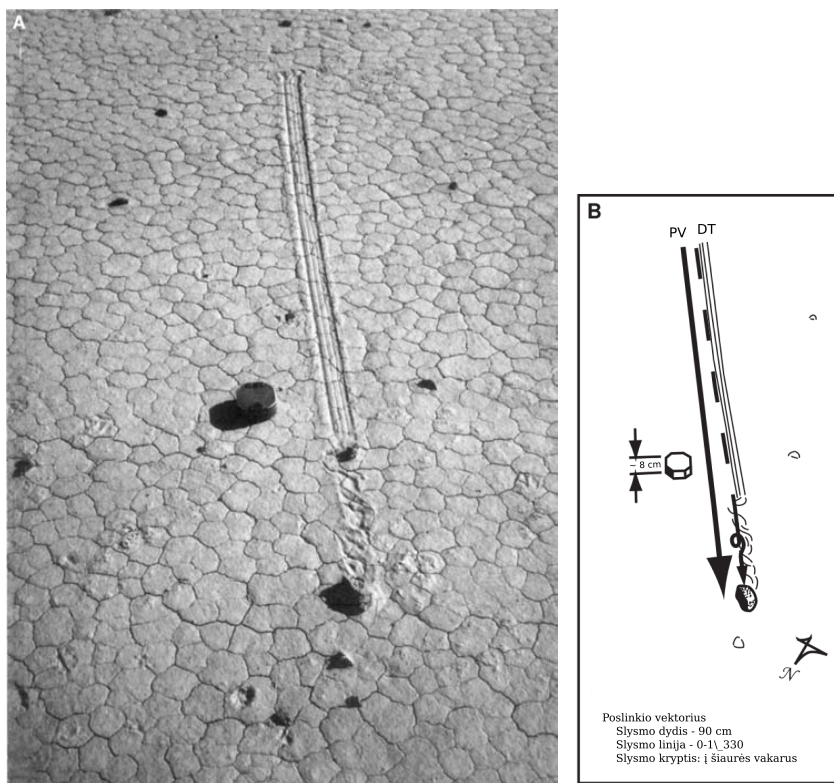
Paveikslas 2.5: Transliacijos transformacijos metu, visi deformaciniai takai yra tokie patys. A. Schematiškai pavaizduotas horizontalus, kairinis stūmis palei vertikalią lūžį. Iki transformacijos žymeklinis taškas deformacijos metu buvo padalintas į dvi dalis, A ir B. Transliacijos dydis yra 5 cm. B. Realus pavyzdys. Standaus kūno – šaligatvio plokščių – transliacija 1972 metų žemės drebėjimo metu Nikaragvoje. Didžiausias poslinkis yra apie 3 cm, tačiau suminis poslinkis pavaizduotoje 12 m. ilgio zonoje yra 29 cm.

Transliacija vyksta labai įvairiuose masteliuose. Iš vienos, stambiausių struktūrų pusės, yra litosferinės plokštės, o iš kitos, smulkiausių struktūrų pusės, kristalinės gardelės. Pastarosiose, transliacija vadinama dislokacijomis.

2.6.2 Poslinkio vektorius

Standžių kūnų transliaciją (vietos pakeitimo deformacija) galima patogiai išreikšti **poslinkio vektoriumi** {displacement vector}, kuris aprašo trumpiausią vietos pokytį tarp kūno pradinės ir galutinės padėties. Jeigu yra žinoma pradinė, iki-deformacinė tam tikro taško kūne padėtis, išreikšta x , y ir z koordinatėmis, ir taip pat galutinė padėtis, yra įmanoma sudaryti poslinkio vektorių. **Geologinis poslinkio vektorius** yra sudarytas iš trijų sudedamųjų dalių: **poslinkio dydžio** arba atstumo {distance of transport}, **poslinkio linijos** arba kelio {direction of transport}, ir **poslinkio krypties** {sense of transport}. Poslinkio dydis gali būti labai įvairus, nuo milimetro dalių iki tūkstančių kilometrų. Poslinkio linija yra, kaip ir kiekviena kita linija struktūrinėje geologijoje, ir išmatuojama azimutu ir gelmėjimo kampu. Pavyzdžiui, mes galima sakyti, kad "poslinkis vyko palei ŠV-PR liniją" arba palei 40 (poslinkio kampas) _ 135 (azimutas) liniją. Poslinkio kryptis yra poslinkio "poliariškumas", nes palei liniją galima

judėti arba į vieną pusę, arba į kita pusę - linija turi du galus. Pavyzdžiui, galima sakyti, kad "poslinkis buvo iš PR į ŠV", arba "į 315 laipsnių azimutą".



Paveikslas 2.6: A. Nuslydęs rieduliukas ant dumblingo plažo paviršiaus. B. Rieduliuko poslinkio vektorius (PV) ir deformacinis takas (DT). Atkreipkite dėmesį, kad poslinkio vektorius yra tiesė ir jis nesutampa su deformaciniu taku, kuris yra truputį kreivas. Be to, tako slysmo pabaigoje nelygumai rodo, kad riedulys slysdamas vartėsi, taigi, jo deformacinis takas dar pailgėjo.

Šios trys poslinkio vektoriaus komponentės yra iliustruotos paveiksle 2.6, kur pavaizduota slystančio rieduliuko fotografija ir jos interpretacija. Šis rieduliukas slydo ant drėgno dumblingo paviršiaus, po to keletą kartų apsivertė ir sustojo. Judėdamas jis paliko pėdsaką (Pav. 2.6A). Rieduliuko pėdsakas leidžia sudaryti poslinkio vektorių (Pav. 2.6B). Poslinkio vektorius sujungia pėdsako pradžią su pabaiga (Pav. 2.6). Pėdsako ilgis, t.y. poslinkio dydis yra apie 90 cm., poslinkio linija yra beveik horizontali - poslinkio kampas 0 ar 1 laipsnio, ir palinkusi į azimutą 330° (sutrumpintai 0-1\ 330), o poslinkio kryptis (iš pietryčių) į šiaurės vakarus.

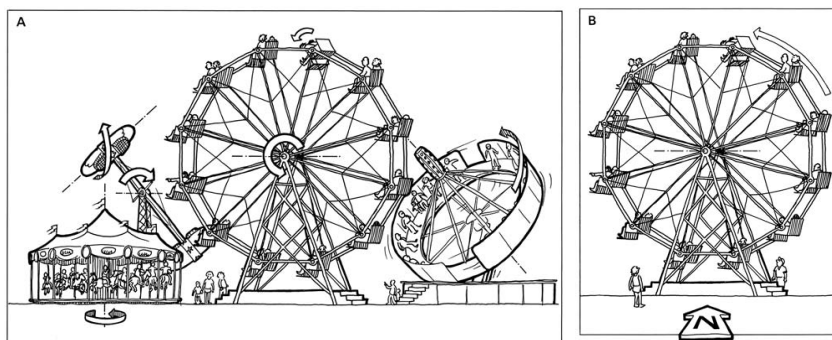
Atkreipkite dėmesį, kad yra skirtumas tarp poslinkio vektoriaus ir deformacinio kelio (Pav. 2.6B). Deformacinis kelias yra pilnas kelias, kurį patyrė, šiuo atveju, rieduliukas, o poslinkis yra tiesiausias kelias nuo pradinio iki galutinio kelio. Rieduliukas iš pat pradžių slydo, o po keletą kartų virto, atsimušdamas į žemę ir vėl atšokdamas (rotacija), taigi jo deformacinis kelias yra ilgesnis už poslinkį. Deformacinis kelias visada yra ilgesnis arba lygus poslinkiui. Šis skir-

tumas tarp kelio ir poslinkio yra paprastai aiškus tektonikoje ir struktūrinėje geologijoje.

Poslinkio vektoriaus koncepcija yra taikoma lūžių analizėje (žr. Skyrių 4) kaip **suminio slysmo** {net slip} apibūdinimas.

2.6.3 Rotacija

Sukantis standžiam kūnui, jo orientacijos pokytį galima būtų apsaakyti, kaip taškų sukimusi aplink vieną ašį. Taškų orientacijos pokyčius galima aprašyti (Pav. 2.3) **sukimosi ašimi** {axis of rotation}, **sukimosi kryptimi** {sense of rotation} ir **sukimosi dydžiu** {magnitude of rotation; Pav. 2.7}. Sukimosi ašis yra išmatuojama kaip bet kokia kita linija geologijoje, t.y. polinkio kampu ir azimutu. Struktūrinėje geologijoje, *linijų azimutai visada matuojami jų gelmėjimo kryptimi!* Sukimosi kryptis gali būti pagal laikrodžio rodyklę arba prieš laikrodžio rodyklę. Vėlgi, svarbu atsiminti, kad tai vertiname žiūrėdami sukimosi linijos *gelmėjimo kryptimi!* Sukimosi dydį matuojame laipsniais (ar kitais kampų matavimo vienetais). Remiantis šiais duomenimis, taškų vietos prieš ar po deformacijos gali būti apskaičiuotos. Taškai esantys ant rotacinės linijos nesisuka.



Paveikslas 2.7: Atrakcijonų parkuose pilna sukimosi. A. Rotacijos analizė apima sukimosi ašies, sukimosi krypties ir sukimosi dydžio nustatymą. B. Sukimo kryptis priklauso nuo žiūrėjimo krypties.

Gali atrodyti, kad, lyginant su translaciija, rotacinės transformacijos pavyzdžių yra reta. Lūžio blokų rotacija, nors ir nedidelė, yra nereta esant sprūdžiams, ypač nuosprūdžiams palei lateraliai įgaubtus ir gilyn lėkštėjančius lūžius - **listrinis nuosprūdžius** (žr.).

2.7 Keita

Keita {strain} atsiranda dėl nestandaus (plastiško) kūno deformacijos arba kintant tūriui, arba kintant formai. Dažniausiai šios abi transformacijos vyksta kartu, tačiau kada vyksta grynoji dilatacija, atstumai tarp visų taškų padidėja arba pamažėja vienodomis atitinkamomis proporcijomis. Kampai nesikeičia.

Grynoji distorcija yra transformacija, kada keičiasi tūris nesikeičiant dydžiui.

2.8 Transformacija, deformacija ir keita

Apibendrinant, deformacija aprašo bendrus materialų taškų kūne poslinkių vektorius. Tai yra trimatė transformacija nuo pradinio iki galutinio būvio, įskaitant, bet ir neapsiribojant, translaciją ir rotaciją. Keita yra deformacijos dalis, kuri apima dilataciją - tūrio pokytį ir distorciją - formos pokytį. Keitos analizė yra, iš esmės, tūrio ir formos pokyčių analizė.

Skyrius 3

Plyšiai

Plyšys {fracture} yra paviršius palei kurį uolienos ar mineralai yra pertrūkę ir dėl yra susidarę du atviri paviršiai, kurie iki plyšio susidarymo neegzistavo. Jie yra paviršiai palei kuriuos uoliena yra praradusi vientisumą.

Plyšiai yra viena labiausiai paplitusių geologinių bruožų; sunku būtų rasti atodangą, kurioje jų nesimatytų. Jie yra svarbūs ir dėl informacijos, kurią jų tyrimas suteikia apie tektoninius ir kitokius įvykius, ir dėl fizinių-mechaninių savybių uolienų, kuriuose jie yra. Plyšiai yra itin svarbūs nustatant uolienų skvarbumą fluidams (vandeniui, naftai, dujoms) ir tų fluidų tekėjimui, įskaitant ir taršalų, požeminėms fluidų saugykloms ir t.t. Be to, jie stipriai paveikia uolienų mechanines savybes ir tai turi didelę svarbą pastatų, tunelių ir t.t. statyboms.

Tačiau reikia atkreipti dėmesį, kad plyšių geologinės istorijos atkūrimas yra ypač sudėtingas. Jų tipų ir geometrinio tarpusavio santykio nustatymas bei susiformavimo laikas dažnai yra sudėtingas ir nevienaprasmis. Kaip uolienos silpnumo plokštumos, plyšiai dažnai atsinaujina, pvz. dėl vėlesnių tektoninių įvykių, dėl ko jų spėjamas susidarymo laikas ir plyšių tipas stebimas atodangoje, gali būti nesusijęs su plyšių formavimosi laiku ir tipu.

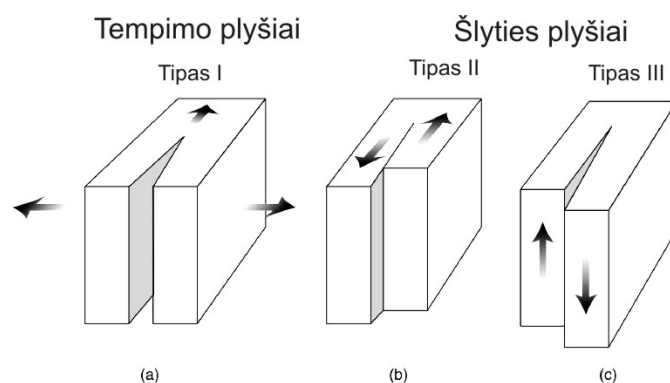
Kadangi lengviausia plyšius ir kitas struktūras stebėti atodangose, aprašomi lauko darbų geologija yra svarbiausia, ir plyšių bruožų aprašymas yra kertinis jų supratimui. Plyšių tyrimai rodo, kad jų geometrija yra **savipanaši**, tai reiškia, kad plyšiai turi tą pačią geometriją ir pasiskirstymą erdvėje nepriklausomai nuo mastelio, t.y. jie atrodo taip pat atodangoje, imste ar žemėlapyje dengiančiame šimtus kvadratinų kilometrų (daugiau apie tai priede, skyriuje 4.6). Šis bruožas yra svarbus norint suprasti kaip plyšiai apsprendžia uolienų fizines savybes.

Jie yra skirstomi pagal santykinus judesius jų susidarymo metu: į **tempimo** ir **šlyties**. Daugelyje atodangų yra matomi plyšiai, kurie turi mažą poslinkį statmenai plyšio plokštumai ir praktiškai jokio šlyties poslinkio, t.y. be poslinkio lygiagrečiai pačio plyšio plokštumai. Tokie plyšiai vadinami **įtrūkiaisiais** {joints}, **tempimo plyšiais** {extension fractures} arba **pirmo tipo plyšiais** {Mode I fractures^{1,2} (Pav. 3.1a). **Šlyties** {shear} arba **tangentiniai** {tan-

¹Reikia pažymėti, kad nėra visuotinai priimto įtrūkių apibrėžimo, todėl įtrūkių ir plyšių naudojimas kiek kinta, priklausomai nuo autorių.

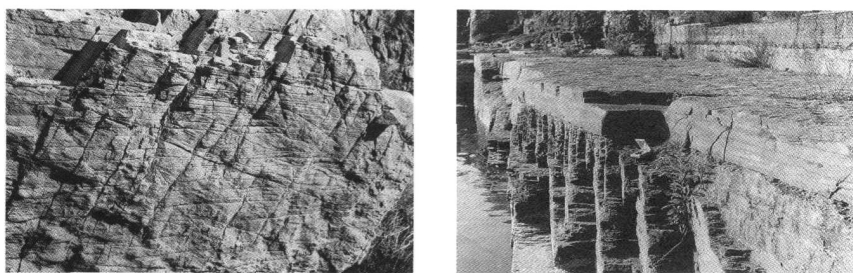
²Įtrūkis su labai mažu šlyties poslinkiu gali būti tempimo plyšiu, bet tik tada, kai šlyties poslinkis yra atsiradęs po plyšio susiformavimo.

gential} plyšiai susidaro kai judėjimas vyksta ne statmenai plyšio plokštumai kaip įtrūkių atveju, o lygiagrečiai plyšio plokštumai. Šie yra skirstomi į du tipus. **Antro tipo** {Mode II} plyšiai susidaro kada slysmo judėjimas vyksta statmenai plyšio plitimo frontui³ (Pav. 3.1b), o **trečio tipo** {Mode III} plyšiai susidaro kada slysmo judėjimas vyksta lygiagrečiai plyšio plitimo frontui (Pav. 3.1c). Jei santykinis judėjimas susidarant plyšiui vyko ir lygiagrečiai, ir



Paveikslas 3.1: Plyšių klasifikacija yra pagrįsta uolienuų priešingose plyšio paviršiaus pusėse sąlyginiu poslinkiu. A. Timpimo, arba pirmo tipo, plyšiai. Santykinis poslinkis yra statmenas plyšiui. B. Šlyties, antro tipo plyšiai. Santykinis poslinkis yra lygiagretus plyšiui ir statmenas plyšio plitimo frontui. C. Šlyties, trečio tipo plyšiai. Santykinis poslinkis yra lygiagretus plyšiui ir lygiagretus plyšio plitimo frontui.

statmenai plyšio plokštumai, jis vadinamas **įstrižu timpimo** {oblique} arba **maišyto tipo plyšiu** {mixed extension fracture}.



A.

B.

Paveikslas 3.2: Įtrūkiai. A. Atodangoje matoma plyšių sistema, sudaryta iš trijų ryškių įtrūkių serijų. B. Skirtingos orientacijos trūkiai, užsibaigiantys prie litologinio kontakto.

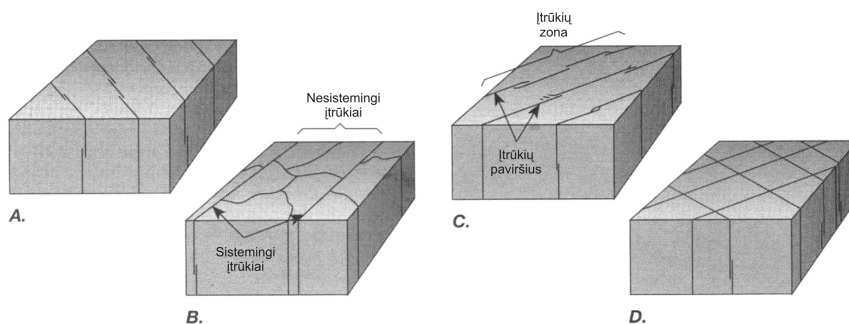
Plyšių tyrinėjimas paprastai apima keturis punktus:

1. plyšių sistemų pasiskirstymas ir geometrija;
2. plyšių paviršių ypatybės;

³Plitimo frontas yra linija, kuri skiria jau atskirtas plyšiu uolienas nuo dar neatskirtų, vientisų uolienuų.

3. sąlyginis įvairių plyšių susidarymo amžius;
4. plyšių geometrinis santykis su kitomis struktūromis.

3.1 Įtrūkių ir plyšių klasifikacija



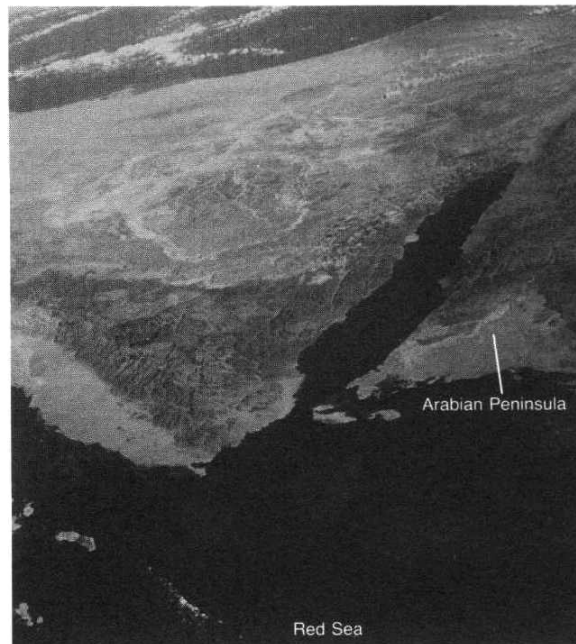
Paveikslas 3.3: Įtrūkių serijų ir sistemų diagrama. A. Sistemingų įtrūkių geometrija. B. Tipiškas nesistemingų įtrūkių raštas ir jų būdingas užsibaigimas ties sistemingais įtrūkiais. C. Įtrūkių zonos formuoja pusiau ištisinius įtrūkius, kurie yra daug didesnio paplitimo nei atskiri plyšiai D. Dvi tarpusavyje susikertančios įtrūkių serijos. Įtrūkiai vienoje serijoje kerta kitos serijos įtrūkius. Nėra pastovių santykių, rodančių, kad viena serija kerta kitą.

Kada plyšiai turi panašų išsidėstymą (geometriją) jie vadinami **serija** {set}. Dvi ir daugiau įtrūkių serijų, kurios turi poveikį viename uolienų kūne, sudaro **įtrūkių sistemą** {joint system}. **Sistemingi plyšiai** turi maždaug plokštuminę paviršiaus formą, yra taisyklingai lygiagretūs ir atstumai tarp jų reguliarūs (Pav. 3.2 ir 3.3a). **Nesistemingi plyšiai** turi išlenktus paviršius, netaisyklingų geometrinių formų, nors regioniniu mastu jie gali sudaryti serijas (Pav. 3.3b). Nesistemingi plyšiai paprastai visada pasibaigia prie senesnių sistemingų plyšių. Kadangi beveik visi sutinkami įtrūkiai yra sistemingi, tai terminas įtrūkis reiškia sistemingą įtrūkį, jei ne, sakoma nesistemingas įtrūkis.

Įtrūkių zona yra pusiau ištisas plyšys, kuris susideda iš daugybės susijusių lygiagrečių, kaip ir vienas kitą pratęsiančių, įtrūkių ir tokia zona tęsiasi daug ilgiau nei individualus įtrūkis (Pav. 3.3a, c). Praktikoje, tokia įtrūkių zona vadinama tiesiog įtrūkiu.

Du ir daugiau įtrūkių serijų, kiekviena iš jų turinti charakteringą orientaciją ir atstumus tarp jų, bei kurios turi poveikį viename uolienų kūne, sudaro **įtrūkių sistemą** (Pav. 3.2 ir 3.3d). Jei vienos serijos sistemingi įtrūkiai nutrūksta ties kita serija, jie vadinami **kryžminiais įtrūkiais** {cross joints}. Įtrūkių serijos ir sistemos kartais tęsiasi didžiulius atstumus, ir rodo tik mažus tįsos svyravimus. Tokios sistemos sudaro lineamentus, kurie matomi iš kosmoso (Pav. 3.4).

Kartais naudinga aprašyti įtrūkius santykinai kitų struktūrų. Pvz. įtrūkių tįsa ir polinkio kampas yra lygiagretūs sluoksniuotumui. Kai įtrūkiai kerta raukšlę ar kitokią linijiską struktūrą stačiu kampu, jie taip pat yra vadinami **kryžminiais** {cross joints}. Jei kitokiais kampais – **įstrižais įtrūkiais** {diagonal, oblique joints}.



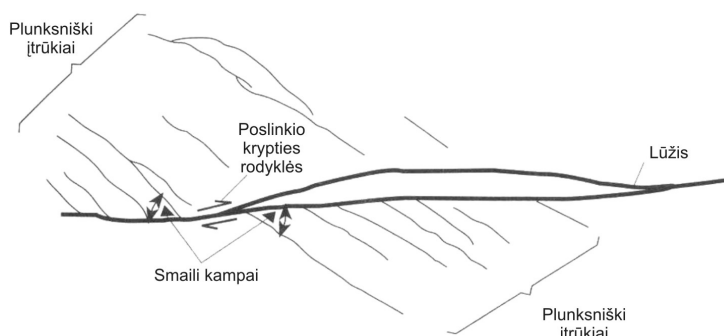
Paveikslas 3.4: Plyšiais kontroliuojama topografija, Sinai pusiasalis, Egiptas. Akaba įlanka dešinėje yra apie 200 km ilgio.

Yra grupė įtrūkių, kurie susidaro dėl terminio uolienų traukimosi, paprastai magminių uolienų vėsimo metu. Plačiau apie tokius plyšius žr. poskyrį 3.5.3.

Gyslos {veins} yra tempimo plyšiai, užpildyti mineraline medžiaga. Tokie plyšiai randami deformuotose uolienose. Užpildanti medžiaga gali būti masyvi ar sudaryta iš pluoštinių mineralų, tokių kaip kvarcas ar kalcitas. Tokia medžiaga yra labai naudinga deformacijų interpretacijai (žr. 3.6; paragrafą “Plėšimo plyšiai” žemiau).

Plunksniški plyšiai {pinnate fractures arba feather fractures} yra tempimo plyšiai, kurie sudaro ešaloninius plyšių rinkinius palei trapius šlyties plyšius. Smailas kampas tarp plunksniškų plyšių ir lūžio plokštumos yra nepakeičiama lūžio **slysmo krypties** {sense of shear} nuoroda ir parodo bloko (vienoje lūžio pusėje) sąlyginio judėjimo kryptį (Pav. 3.5).

Plėšimo plyšiai {gash fractures} yra tempimo plyšiai, paprastai užpildyti mineraline medžiaga, kurie gali susidaryti palei plastiškas šlyties zonas {ductile shear zone} ir išsidėstę zonos atžvilgiu taip pat kaip ir plunksniški plyšiai. Jie paprastai turi S arba Z raidės formas, priklausomai nuo kirpimo zonos slysmo krypties. Paveiksle 3.6 yra parodyti dvi plėšimo plyšių ešeloninės serijos išsidėstę palei kertančią kirpimo zoną. Z formos plyšiai kairėje ir S formos plyšiai dešinėje rodo „viršus apačion“ slysmo kryptį palei kiekvieną šlyties zoną. Plokštuminių plėšimo plyšių slysmo kryptis gali būti nustatoma taip pat, kaip plunksninių plyšių.



Paveikslas 3.5: Smailas kampas tarp plyšio ir lūžio rodo kur santykinai judėjo blokas, kuriame yra tas plyšys. Plunksniški plyšiai ešaloninėje eilėje palei trapų lūžį.

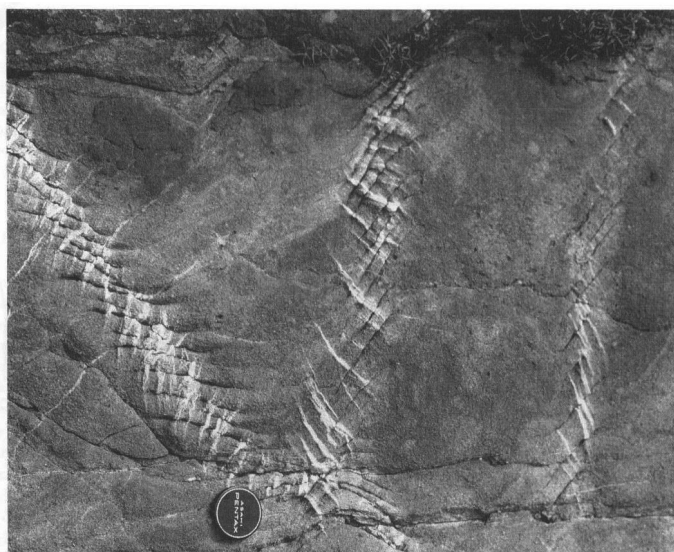
3.2 Plyšių sistemos trimatėje erdvėje

Tyrinėdami uolienų plyšių kilmę, pirmiausia mes surenkame kiekvieno duomenis apie plyšių kiekvienoje serijoje erdvinį raštą ir pasiskirstymą. Tai apima plyšio orientaciją, dydį, atstumą tarp plyšių, ir kaip šis atstumas priklauso nuo uolienų, kurias kerta plyšiai, litologijos. Plyšių sistemos, iš kitos pusės, dažnai apibūdinamos savipanašia geometrija - plyšių sistemų geometrija yra invariantiška masteliui, t.y. atrodo taip pat nepriklausomai nuo stebėjimo mastelio rezoliucijos. Taigi, plyšių dydis ir tarpplyšinis atstumas priklauso nuo stebėjimo mastelio, arba rezoliucijos. Kaip jau buvo apie tai užsiminta šio skyriaus pradžioje, tai reiškia, kad kad plyšių geometrija nepriklauso nuo mastelio - plyšiai geometrija atrodo taip pat iš bet kokio stebėjimo atstumo nuo mikroskopo iki lėktuvo ar kosmoso. Išeina, kad plyšių dydžiai ir atstumai tarp jų priklauso stebėjimo mastelio, arba nuo skiriamosios gebos (rezoliucijos). Tokioje sistemoje, charakteringą dydį ir tarpusavio atstumus sunku apibrėžti, išskyrus nebent **fraktalinę geometriją**⁴ (žr. priedo skyrių 4.6). Čia apžvelgsime kiekvieną iš šių plyšių charakteristikų.

3.2.1 Plyšių orientacija

Daugelis plyšių dažnai susidaro serijomis, kurioms būdinga nuosekli plyšių orientacija. Uolienose esančių plyšių serijų orientacijos nustatymas yra dažniausias plyšių sistemų tyrimo metodas (Pav. 3.7). Dėl objektyvumo, mes turėtumėme išmatuoti orientacijas visų plyšių, kurie yra matomi atodangoje. Ši atodanga turi būti pakankamai didelė atsižvelgiant į plyšius, turinčius didžiausią tarpusavio atstumą - t.y. tokių plyšių, sus dideliais atstumais, atodangoje turi būti pakankamai daug. Norint nustatyti regioninius plyšių raštus, mes plyšius matuojame atskirose atodangose, kurios išsidėstę dideliame plote. Tada mes koreliuojame plyšių serijas, ypač įtrūkių, tarp skirtingų atodangų priimdami,

⁴Fraktalinė geometrija yra matematikos dalis, kuri atpažįsta ir kiekybiškai nustato kaip raštai {patterns} kartojasi nuo vieno mastelio iki kito tokioje sistemoje, kurioje geometrija nepriklauso nuo mastelio.



Paveikslas 3.6: Plėšimo plyšiai (baltos gyslos) yra tempimo plyšiai, kurie paprastai susidaro šlyties zonose. Tamsūs "siūlai" yra tirpinimo bruožai. Plėšimo plyšiai yra išsidėstę lygiagrečiai įvairioms plokštuminės šlyties zonoms ir sudaro apie 50° kampą tarp jų. Plyšių galai linę perkirsti pusiau kampą tarp šių šlyties zonų.

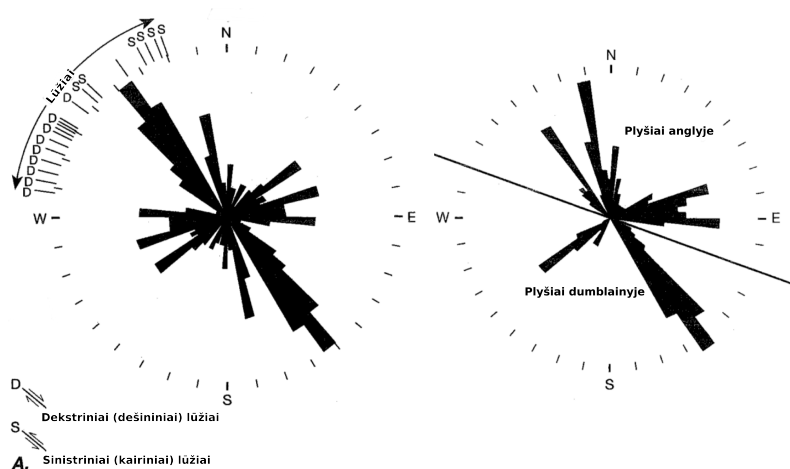
kad serijos yra susijusios, jei turi tas pačias orientacijas, arba jos sutartinai ir tęstinai kinta. Kiti kriterijai, tokie kaip plyšių santykinis amžius, plitimo kryptis, ar plyšių apsiribojimas viename sluoksnyje (cf. pav. 3.7B), irgi gali padėti koreliuojant plyšius. Savaiame suprantama, kad plyšių orientacijų darna visame regione priklauso nuo matavimo kokybės bei nuo koreliacijos tarp atodangų.

Tačiau toks matavimų metodas susiduria su sunkumais. Daug plyšių plokštumų yra išlenktos arba persuktos, ir dėl to būna sunku nuspėti kuri orientacija yra tikroji, ir kiek orientacijų viena plyšių serija turi. Subjektyvus geologo pasirinkimas kuriuos plyšius matuoti gali привести prie klaidingo plyšių geometrijos (rašto) aprašymo ir ignoruoti tuos plyšius, kurių orientacija netinka prie kitų plyšių orientacijos.

Kai kurie geologai sudaro žemėlapius, kuriuose yra pažymėti visi atsideniantys plyšiai tam tikroje atodangos vietoje (žr. pav. 4.6) ir po to analizuoja plyšių raštus. Tačiau tai yra tik dvimatis raštas, o tikrasis plyšių raštas yra trimatis.

Šiame mūsų plyšių supratimo etape, plyšių orientacijos analizės metodo pasirinkimas turi atitikti duomenų surinkimo metodiką. Rinkdami duomenis apie plyšius, geologai iš anksto turi žinoti visus duomenų rinkimo metodų plusus ir minusus.

Struktūrinė interpretacija, kuri remiasi vien tik arba labiausiai orientacijos matavimų duomenimis gali привести prie neteisingų išvadų. Pavyzdžiui, kadangi šlyties plyšiai dažniausiai tarpusavyje susikerta 60° kampu, dažnai yra daroma neteisinga prielaida, kad visi plyšiai, kurie susikerta tokiu kampu yra šlyties plyšiai. Panašiai, įtrūkių orientacijos darnumas kitų struktūrų atžvil-



Paveikslas 3.7: Vėjų rožės diagrama, rodanti įtrūkių tįsas anglies ir dumblainio storumėje. Azimutų intervalai yra 10 laipsnių; ilgiausias pavaizduotas spindulys atitinka maždaug 40 matavimų procentų. A. Užnešti visi įtrūkiai. Atkreipkite dėmesį, kad dviašę simetriją, t. y. viena diagramos pusė yra panaši po 180° posūkio. B. Diagrama kaip ir dalyje A., tačiau rodanti tik įtrūkių tįsas dumblainyje apatinėje pusėje ir įtrūkių tįsas viršutinėje pusėje. Įtrūkių orientacijos skirtumas abiejų tipų uolienose yra pastebimas.

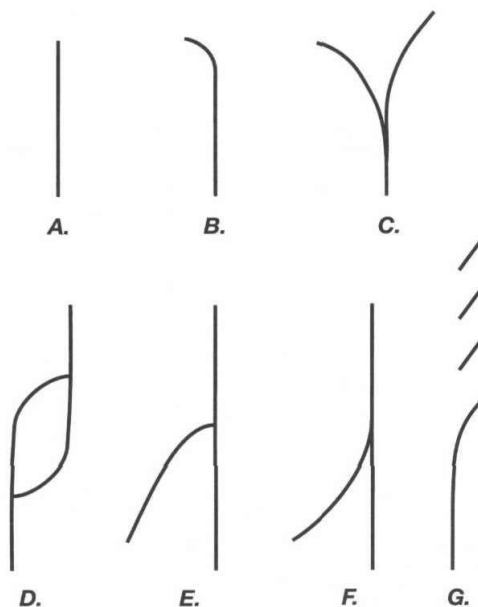
giu yra dažnai priimamas kaip jų genetinės priklausomybės požymis. Nors ir tokių interpretacijų negalima iš anksto atmesti, jos yra nepatikimos be kitokių požymių paramos.

Vieno plyšių susidarymo metu gali susidaryti daugiau nei viena plyšių kryptis, ir dėl to yra svarbiau suprasti struktūrinius santykius tarp įvairių ir tų pačių kryptių plyšių, nei bandyti aklaui matuoti kiekvieną plyšį tikintis, kad statistinė orientacijų analizė kompensuos nuodugnių stebėjimų stygių. Genetiškai susiję plyšiai gali turėti skirtingas kryptis dėl plyšio plokštumos segmentacijos ir persukimo, plokštumos išsilenkimo, plyšio persiorientavimo lygiagrečiai lokalioms uolienų silpnumo plokštumoms arba plyšio išsišakojimo į dvi ar daugiau orientacijų. Kai kurie plyšiai gali būti tik labai mažo paplitimo ir net gali būti susidarę dėl antropogeninių priežasčių (kasinėjimo ar sprogdinimų). Dėl to kiekvienas tyrimas turi būti nuodugnus, nustatantis reikšmingą informaciją.

Genetiškai susijusių plyšių orientacija gali skirtis pereinant iš vienos uolienos į kitą, litologiškai skirtingą, uolieną, tačiau, iš kitos pusės, plyšiai įvairiose uolienose gali susidaryti ir skirtingų įvykių metu. Paveiksle 3.7 pavaizduota vėjų rožės diagrama, kurios viršutinėje pusėje yra pavaizduoti įtrūkiai anglyje, o apatinėje pusėje - dumblainiuose. Įtrūkių raštas skirtingose litologijose yra aiškiai skirtingas. Kruopštus tyrimas parodė, kad įtrūkiai pirma susiformavo anglyje. Silpnas regiono raukšlėjimas padidino ankstesnių įtrūkių orientacijos pasiskirstymą, ir galiausiai susiformavo įtrūkiai dumblainiuose. Tuo būdu, įtrūkių atskyrimas pagal uolienų sudėtį yra svarbus tyrinėjant jų susidarymo istoriją.

Plyšių orientacijos duomenys paprastai yra sugretinami ir palyginami naudojant orientacines histogramas, vėjų rožių diagramas ir stereoprojekcijas.

3.2.2 Plyšių dydis ir forma

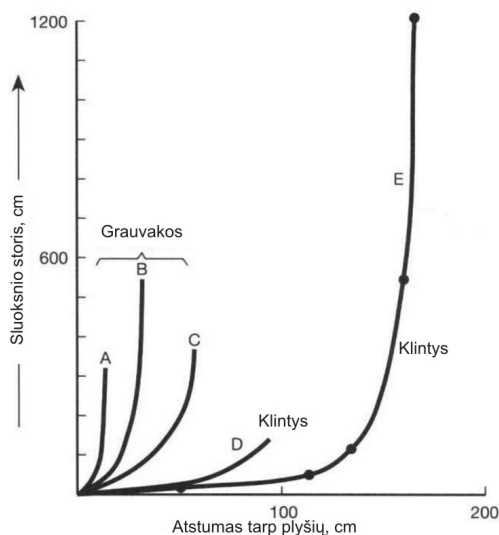


Paveikslas 3.8: Atskirų įtrūkių užsibaigimas. A. Tiesaus įtrūkio užgesimas. B. Įtrūkio išsilenkimas ir užgesimas. C. Įtrūkio išsišakojimas ir užgesimas. D. Du lygiagretūs, bet sklindantys į priešingas puses išsilenkia vienas link kito ir užsibaigia. E. Vienas įtrūkis išsilenkia link statmeno susikirtimo su kitu. F. Vienas įtrūkis išsilenkia link lygiagretaus susikirtimo su kitu. G. Įtrūkio užgesimas sutrūkinėjant į seriją ešaloninių plyšių.

Atskiri plyšių paviršiai nesitęsia be galo. Lauko stebėjimai rodo, kad įtrūčiai užsibaigia paprasčiausiai sunykdami (Pav. 3.8A), išsilenkdami ir išnykdami (Pav. 3.8B), atsišakodami ir išnykdami (Pav. 3.113.8C), užsisukdami į senesnį įtrūkį (Pav. 3.93.8D,E, F), arba susidalindami į smulkius įtrūkius, taip suformuodami ešeloninę eilę (Pav. 3.8G). Poslinkio kiekis skersai įtrūkio mažėja link jo užsibaigimo (ribinės linijos). Tam tikroje įtrūkių serijoje, atskiri įtrūkių pėdsakai arba įtrūkių zonos (žr. Pav. 3.3C) gali tęstis nuo kelių centimetrų iki daugelio metrų ar net kilometrų - tokie vadinami **pagrindiniais įtrūkiais** {master joint}. Plyšiai taip pat egzistuoja ir mažame, mikroskopiniame, mastelyje. Tada jie dažniau vadinami **mikroplyšiais** {microfracture} nei įtrūkiais. Atskirų įtrūkių forma labiausiai priklauso nuo uolienos tipo ir įtrūkio struktūros. Vienalytėse uolienose, kaip granitas, argilitas arba plonasluoksnėse vienodos sudėties uolienose, atskirų įtrūkių paviršiai yra linkę būti maždaug elipsės formos, su ilgąja elipsės ašimi išsidėsčiusia horizontaliai. Nuosėdinių uolienuų sekose, sudarytose iš uolienuų su labai skirtingomis mechaninėmis savybėmis, pvz. esant smiltainių ir dumblainių persisluoksniavimui, viena kryptimi įtrūkis yra apribotas sluoksnio, kuriame įtrūkis yra, kraigu ir padu. Kita kryptimi, įtrūkių paplitimas yra kur kas didesnis, t.y. įtrūčiai yra kur kas ilgesni lygiagrečiai sluoksniuotumui, nei statmenai. Įtrūčiai, susidarę atskiruose sluoksniuose, dažnai užsibaigia ties kitos sudėties sluoksniu (Pav. 3.2B).

Pagrindinių įtrūkių forma nėra gerai žinoma, nes sunku matyti jos trečiąją matą (dimensiją). Tačiau aukšto reljefo vietovėse (kalnuose) įtrūkiai gali būti atsekami į daugiau nei kilometro gylį.

3.2.3 Atstumai tarp plyšių

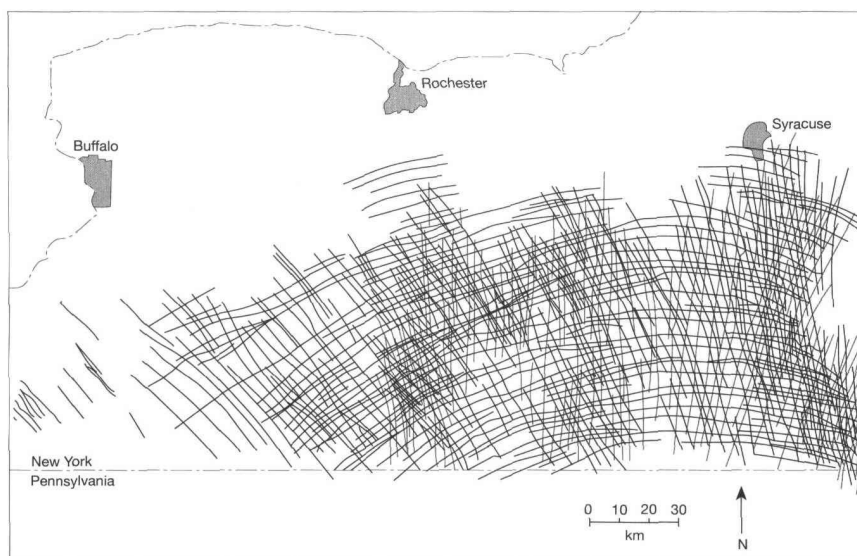


Paveikslas 3.9: Santykis tarp slėksnio storio ir atstumo tarp plyšių, pamatuotų smėlinguose slėksniuose iš (grau)vakų storių, atskirtų įvairaus storio dumblainių tarpslėksniais (duomenų rinkiniai A, B ir C) ir klintyse (duomenų rinkiniai D ir E). Duomenų rinkinyje A dumblainio tarpslėksniai yra mažiau nei 5 cm storio, B ir C jie yra storesni nei 5 cm.

Atstumai tarp plyšių sistemingose serijose gali būti nustatomi arba kaip atskiri atstumai statmenai plyšiams arba kaip vidutinis plyšių kiekis suskaičiuotas statmenai plyšiams tam tikrame tinkamai pasirinktame intervale. Vidutiniai atstumai tarp įtrūkių linę būti stebėtinai pastovūs. Tai dalinai priklauso nuo uolienų tipo, o dalinai nuo slėksnių, kuriame plyšiai formuojasi, storio (Pav. 3.9). Duomenų serijos paveiksle 3.9 nuo A iki C yra pamatuotos smiltainių slėksniuose su įvairaus storio dumblainių tarpslėksniais įvairiose vietose. Duomenų serijos D ir E yra iš skirtingų klinty. Yra du reikšmingi šio grafiko bruožai. Pirmas, kad atstumas tarp gretimų įtrūkių didėja didėjant slėksnio storiui, iki didžiausios reikšmės, kuri nepriklauso nuo slėksnio storio. Antras, kad didžiausi atstumai yra žymiai didesni klintyse nei smiltainių-dumblainių sekose, kas parodo uolienų sudėties reikšmę nepriklausomai nuo slėksnių storio.

3.2.4 Plyšių sistemų erdvinis raštas ir pasiskirstymas

Naudingiausias būdas tyrinėti plyšių raštą ir pasiskirstymą yra žemėlapių sudarymas, kuriame būtų parodyta jų vietos ir orientacija. Vietovėse, kur atodangumas yra geras, galima užkartografuoti atskirus įtrūkius ir po to atsekti jų tarpusavio santykius bei jų santykius su litologija. Tada, sudarant žemėlapius, gal-



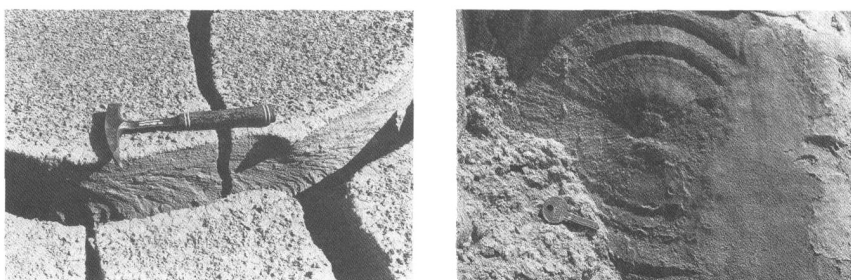
Paveikslas 3.10: Įtrūkių žemėlapis Apalačių plato, Niujorko valstijoje, JAV. Linijos eina lygiagrečiai vyraujančioms įtrūkių tįsoms, kurios buvo išmatuotos atskirose atodangose visame plote.

ima užnešti plyšių tįsas ir polinkio kampus, jų santykius su kitomis lokaliomis struktūromis, šlyties poslinkio, jei toks yra, dydį ir kryptį. Tačiau dažnai atodangumas nėra toks geras, o taip pat nėra laiko tokiam detaliam plyšių kartografavimui. Paprastai struktūriniai duomenys, gauti matuojant atodangose, yra plačiai išsibarstę ant žemėlapiu. Iš tokių duomenų, sujungiant to paties įtrūkių rinkinio tįsas tarp skirtingų atodangų, yra brėžiamos atskirų įtrūkių rinkinių **formų linijos** {form lines}, arba **trajektorijos**. Paveiksle 3.10 parodytas toks žemėlapis iš Apalačių plato. Įtrūkių orientacijos darnumas tokiam dideliame plote reiškia, kad įtrūkiai registruoja regioninį tektoninį įvykį ar įvykius.

3.3 Plyšių paviršiaus bruožai

Bruožai, esantys ant plyšių plokštumų paviršiaus gali būti ypač naudingi atsekant tų plyšių kilmę. Daug įtrūkių turi dėsningus, vos apčiuopiamų gūbriukų ir griovelių, vadinamų **kaklaplunksnėmis** {hackle}, atsišakančių nuo vieno taško ar centrinės ašies, raštus (pvz. Pav. 3.11). Šis raštas yra vadinamas **plunksnine struktūra** {plumose structure}, dėl jų panašumo į plunksnos formą. Plunksninė struktūra yra randama ant įtrūkių paviršių įvairiose uolienose, tačiau geriausiai yra išreikšta smulkiagrūdėse uolienose su masyvia tekstūra ir geriausiai matosi kada šviesa krinta ant įtrūkio paviršiaus smailu kampu. Paveiksle 3.11 parodyta plunksninė struktūra susidariusi dviejų tipų uolienose.

Paveiksle 3.12A pavaizduoti plunksninių struktūrų charakteringi bruožai. Ant pagrindinio įtrūkio paviršiaus matosi plunksniška struktūra su plunksnų linijomis atsišakančiomis nuo **centrinės ašies**. Link pagrindinio įtrūkio plokštumos kraštų, įtrūkio plokštuma gali susidalinti į eilę plokštuminių segmentų,



Paveikslas 3.11: Plunksninė (arba kaklaplunksninė) struktūra: kairėje - dumb-lainyje, dešinėje - kreidoje.

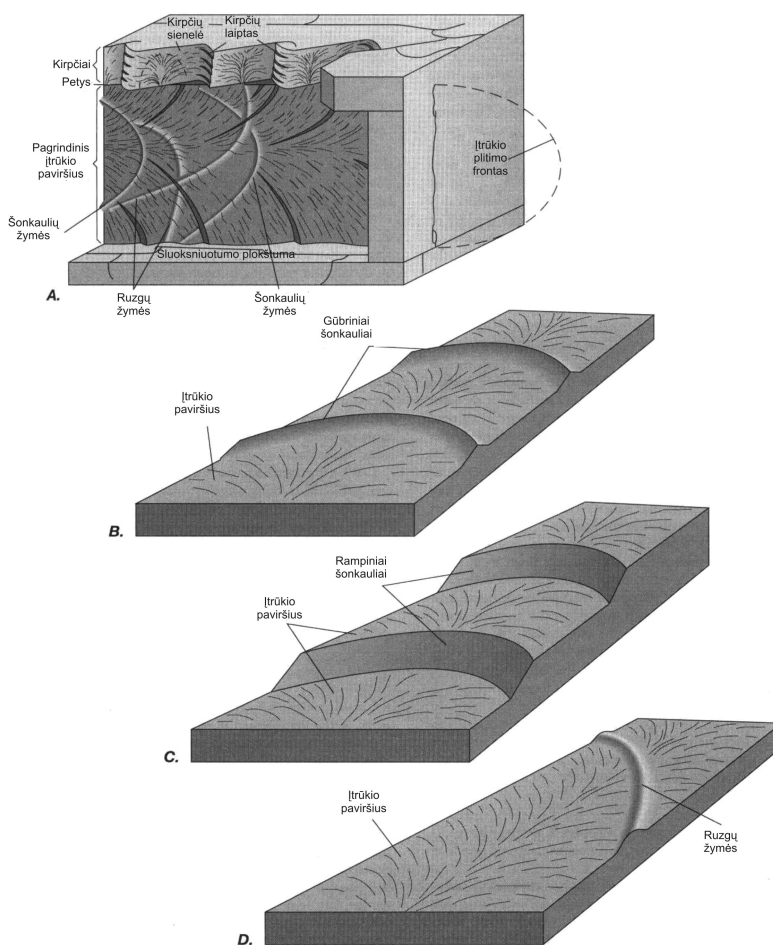
kurie yra truputį pasukti pagrindinės įtrūkio plokštumos atžvilgiu. Tas pasukimas gali didėti einant tolyn nuo ašies (apatinė Paveikslas 3.12A dalis) arba gali staigiai pereiti (Pav. 3.12A viršus) į **kaklaplunksnių kirpčius** {hackle fringe}, sudarytus iš tempimo plyšių, vadinamų **kirpčių sienelėmis** {fringe faces}, ešaloninės serijos. Tarpusavyje plyšiai gali būti susijungę per išlenktus **kirpčių laiptus** {fringe steps}. Ant kirpčių sienelių irgi gali būti antros eilės plunksniškos struktūros su susijusiais kirpčiais. Kirpčiai yra išsirikiavę palei pagrindinį įtrūkio paviršių.

Kirpčių sienelės pagrindinio įtrūkio pakraščiuose neturėtų būti supainiotos su plunksniškais įtrūkiškais ir plėšimo plyšiais, net jei jie visi yra tempimo plyšiai ir sudaro ešalonines eiles. Kirpčių sienelės paprastai sudaro kur kas mažesnę kampą su pagrindiniu įtrūkio paviršiumi nei plunksniški įtrūkiškai ar plėšimo plyšiai sudaro su šlyties paviršiumi. Trimatėje erdvėje, kirpčių sienelės yra tik prie įtrūkio paviršiaus, kuris dažnai turi plunksnišką struktūrą, pakraščio, o tuo tarpu plunksniški įtrūkiškai ir plėšimo plyšiai yra palei visą šlyties plyšį.

Kai kuriais atvejais, išlenkti linijiški bruožai ant plyšio paviršiaus, vadinami **šonkaulių žymėmis** {rib marks} ir **ruzgų žymėmis** {ripple marks}, kerta plunksnines linijas. Šonkaulių žymės turi simetriško gūbrio formą skerspjūvyje (Pav. 3.12B) arba sudarytos iš tolygiai išlenktos rampos, jungiančios gretimus lygiagrečius paviršius ant įtrūkio paviršiaus (Pav. 3.12C). Jos paprastai yra statmenos plunksnų linijoms. Ruzgų žymės yra apvalios skerspjūvyje ir įstrižos plunksnų linijoms (Pav. 3.12D). Plunksniškos struktūros sudaro įvairius raštus (cf. Pav. 3.11), kurie gali charakterizuoti tam tikrą įtrūkių seriją ir kurie atspindi svarbius plyšių atsiradimo skirtumus.

Plunksniška struktūra yra unikalus trapių tempimo plyšių bruožas, kuris atskiria juos nuo šlyties plyšių. Plunksninių linijų divergavimo (išsišakojimo) kryptis yra kryptis, kuria plyšys plito, o plunksnų linijos išsidėsto statmenai plyšio frontui. Plunksnos paprastai užgimsta viename taške, kuris yra ir **plyšio pradžios taškas**. Šonkaulių žymės, arba tiesiog šonkauliai, yra linijos, ties kuriomis plyšio sklidimas (frontas) buvo laikinam stabtelėjęs. Ruzgų žymės susiformuoja kada plyšys sklinda labai dideliu greičiu, ir tuo atveju jos vadinamos **Volnerio** {Walner} **linijomis**. Kruopštaus įtrūkių paviršiaus tyrinėjimo metu galima sužinoti daug apie kur plyšiai užgimė ir kaip jie sklido (žr. skyrelį 3.4).

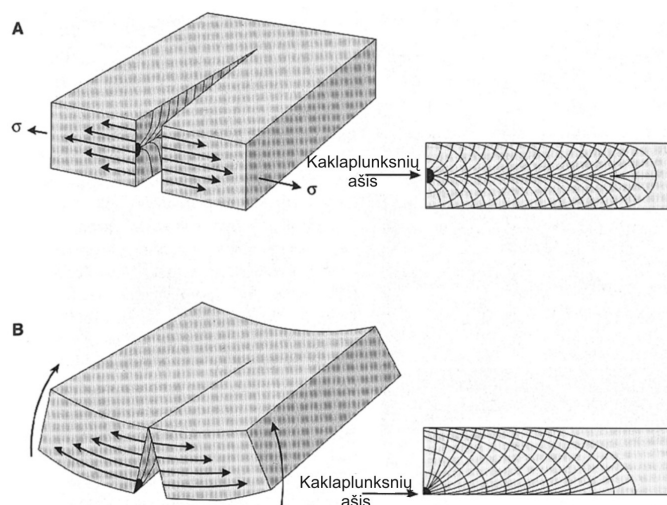
Kai kada ant plyšių paviršių yra randami **slysmo (paviršiaus) linijiškumai** {slickenside lineation}, kurie rodo, kad vyko šlyties slysmas palei plyšį (plačiau apie tai bus vėlesniuose skyriuose apie lūžius ir šlyties zonas). Slysmo



Paveikslas 3.12: Schematinė blokdiagrama, kurioje pavaizduotos struktūros ant įtrūkio paviršiaus. A. Bruožai, kurie yra būdingi sistemingo įtrūkio paviršiui. B. Gūbrinių šonkaulių žymės. C. Rampinių šonkaulių žymės. D. Ruzgų žymės.

paviršiaus linijiškumas yra sudarytas iš lygiagrečių gūbriukų ir griovelių, arba iš smulkiai sumaltos uolienos šviesių ir tamsių dryžių, arba iš linijiškų mineralinių skaidulų. Kadangi paprastai tempimo plyšiai turi nedidelį šlyties slysmą, atsiradusį dėl judesių reikalingų pačiam plyšiui susidaryti, tokio šlyties slysmo aptikimas ant plyšio paviršiaus toli gražu ne visada reiškia, kad plyšys susiformavo dėl šlyties - slysmo linijiškumai gali atsirasti ir dėl kitų priežasčių.

Įtrūkių ir kitokių plyšių paviršiai gali būti padengti plona mineraline plėvele, kuri gali būti sudaryta iš kvarco, feldšpatų, kalcito, ceolito, chlorito ar epidoto. Tokie mineralų sluoksniai reiškia, kad plyšys buvo atviras arba kad fluidų spaudimas buvo pakankamai didelis, kad jį atidarytų, fluidai galėtų juo tekėti ir iš jų nusėsti mineralai. Plyšiai kartais gali būti aiškiai susiję su pakeitimo zona, einančia supančioje uolienoje lygiagrečiai plyšio. Tai rodo, kad vyko medžiagos difuzija į arba iš talpinančių uolienų. Kai kurie plyšiai būna paveikti disoliucijos tiek, kad jie tampa atvirais įskilimais {fissure}.

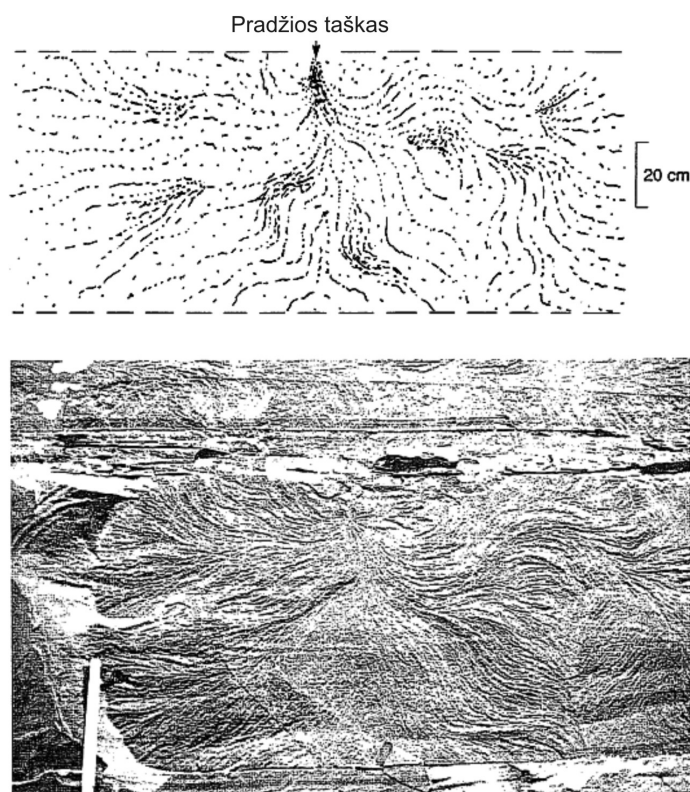


Paveikslas 3.13: A. (Kakla)plunksnines linijos susidarę ant įtrūkio atsiradusio dėl uolienos tempimo. Didesnis taškas yra įtrūkio užgimimo taškas. Plunksnos išsisklaido einant tolyn nuo pradžios taško. Parabolines kreives yra įtrūkio sklaidimo frontas, kuris išlieka kaip šonkauliai. B. (Kakla)plunksnos susidariusios ant įtrūkio paviršiaus, kuris susidarė dėl sluoksnio lenkimo (įtrūkio paviršius A paveiksle).

Paprasčiausias, čia aprašytas, plunksninių struktūrų raštas turi tiesią ir vienišą plunksninę struktūros ašį, lygiagrečią sluoksniuotumui, o plunksnos išspinduliuoja į abi puses. Pati ašis sutampa su įtrūkio plitimo kryptimi, kuri yra ilgiausia linija, kurią galima pravesti ant įtrūkio paviršiaus. Plunksnos atsišakoja nuo ašies $30-35^\circ$ kampu ir prie plyšio paviršiaus pakraščio pasiekia 75° . Šonkauliai yra statmeni ašiai ir plunksnomis (Pav. 3.13).

Tačiau yra ir kitų, sudėtingesnių struktūrų. Viena tokių - kreivaašė plunksninė struktūra (Pav. 3.14). Viena išlenkta ašis dalinasi, vėliau vėl dalinasi ir t.t. Plunksnos išspinduliuoja į abi puses nuo pagrindinės ašies ir nuo jos atšakų.

Eksperimentiniai darbai parodė, kad plunksninės struktūros susidaro kada plyšiai susidaro dėl greito uolienos perplėšimo. Plyšių susidarymo greitis siekia pusę garso greičio uolienoje.



Paveikslas 3.14: Viršuje - kreivaašės plunksninės struktūros schema, o apačioje – fotografija.

3.4 Plyšių susidarymo chronologija

Plyšių supratimas ir jų struktūrinė interpretacija yra didele dalimi paremta plyšių rinkinių (t.y. serijų ir/arba sistemų) susidarymo chronologija, t.y. kurie plyšiai susidarė anksčiau ar vėliau, ir kurie plyšiai susidarė anksčiau ar vėliau santykinai kitų, šalia esančių, struktūrų. Nors tokie laiko santykiai yra dažnai nevienareikšmiški, bet yra nustatyta keletas naudingų dėsningumų.

Kur yra susidariusi daugiau nei viena įtrūkių serija, *jaunesni (susidarę vėliau) plyšiai užsibaigia ties senesniais įtrūkiais*, kadangi tempimo plyšiai negali plisti skersai laisvo paviršiaus, pvz. kito tempimo plyšio. Paveiksle 3.3B, pvz., nesisistemingi įtrūkiai yra aiškiai jaunesni nei sistemingi. Daug plyšių užsibaigia ties senesniais sudarydami didelius, beveik stačius, kampus - susijungimas yra T raidės formos. Jaunesnis įtrūkis artėdamas prie savo pabaigos ties senesniu įtrūkiu dažnai išsilenkia ir susikerta jau sudarydamas beveik statų kampą (Pav. 3.8E). Kai kada susikirtimas sudaro ir smailų kampą (Pav. 3.8F).

Daugeliu atvejų įtrūkiai sudaro tarpusavyje susikryžiuojančias sistemas ir santykinis jų amžius yra, vis dėl to, neaiškus. Chronologijos nustatymas gali būti apsunkintas keletu faktorių.

- Jeigu ankstesnis įtrūkis yra sucementuojamas mineraline medžiaga, tai jis nebėra laisvas paviršius, ir vėlesni įtrūkiai gali kirsti senesni. Vėlesnis

mineralinės medžiagos ištirpinimas sukelia dviprasmiškumą chronologinei interpretacijai.

- Ankstesnis seklus įtrūkis sluoksnyje gali būti perkirstas vėlesniu ir gilesniu įtrūkiu. Vėlesnis plinta iki pirmos ankstesnio įtrūkio pusės, tęsiasi po juo, ir plinta tolyn ankstesne kryptimi, bet taip pat ir atbuline kryptimi iki senojo įtrūkio antrosios pusės (Pav. 3.15A). Santykinis šių plyšių amžius gali būti nustatytas tik tyrinėjant plunksnas ant įtrūkių paviršiaus. Ant jaunesnio įtrūkio paviršiaus centrinė ašis, o taip pat atsišakojančios plunksnų linijos turės atitinkamą formą.
- Du įtrūčiai gali pradėti plisti toje pačioje plokštumoje, vienoje linijoje, bet priešingomis kryptimis ir priešingose senesnio įtrūkio pusėse (Pav. 3.15B). Rezultate, abu jaunesni įtrūčiai atrodys kaip vienas vientisas įtrūkis.
- Dvi įtrūkių serijos kartais gali susidaryti ir vienu metu. Viena iš jų gali prasidėti sluoksniu kraige, sklisti vienu azimutu ir plisti žemyn, tuo tarpu kita gali prasidėti pade ir plisti aukštyn ir sklisti kitu azimutu (Pav. 3.15C). Abiejų plyšių sankirta rodytų nesuderinamus tarpusavio laiko santykius, kadangi skirtinguose įtrūkių sankirtos taškuose plunksnų linijos rodytų, kad skirtingi plyšiai susidarė anksčiau.
- Panaši plyšių geometrija susidarytų jei trys įtrūčiai susidarytų vienu metu (Pav. 3.15D).

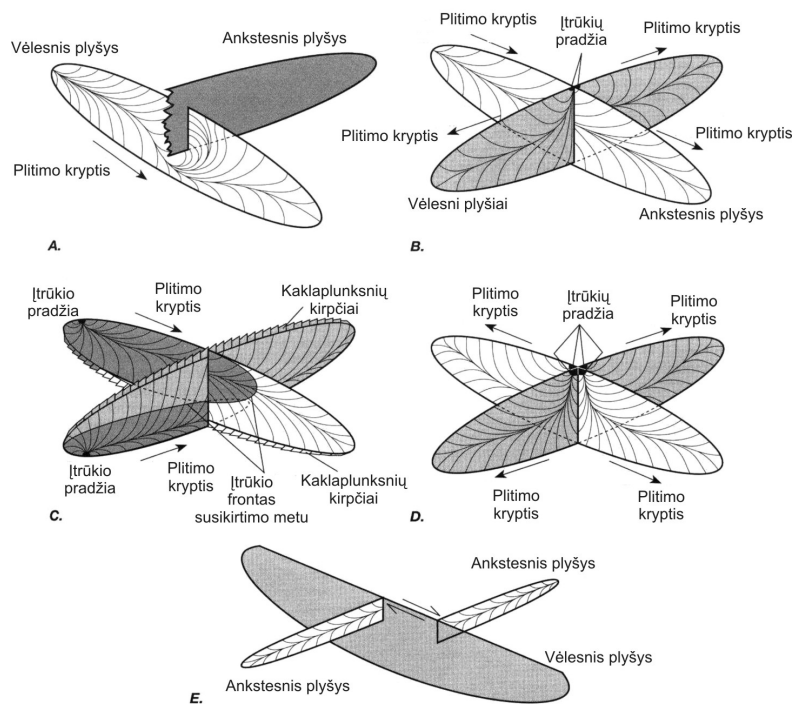
Įtrūkių susidarymo istorijas paveiksluose 3.15B ir D galima atskirti tik tyrinėjant plunksnas ant įtrūkių paviršiaus. Nesuderinami santykiai gali kilti ir dėl šlyties slysmo palei vėlesnio plyšio paviršių. Ankstesnio plyšio perstūmimas palei jaunesnį gali atrodyti kaip ankstesnio įtrūkio užsibaigimas prie senesnio (Pav. 3.15E). Visais paveikslė 3.15 pavaizduotais atvejais tik plyšių paviršiaus struktūrų tyrinėjimas gali padėti atkurti įtrūkių chronologiją.

NB! Plyšiai, kurie kerta geologines ribas (kontaktus) ar geologines struktūras, yra visada jaunesni nei tos ribos ar struktūros.

Pavyzdžiui,

- įtrūkis, kuris kerta intruzinį kontaktą yra jaunesnis nei intruzinis įvykis;
- įtrūčiai, kurie turi tą pačią orientaciją visame suraukšlėtame sluoksnyje, yra susidarę po raukšlėjimo;
- plyšiai, kurie yra aiškiai yra paveikti geologinės struktūros yra senesni nei ta struktūra;
- įtrūčiai, kurių orientacija kinta skirtingose raukšlės dalyse, bet kampai su sluoksniuotumu išlieka tie patys, yra senesni arba vienalaikiai su raukšlėjimu, bet vargu bus jaunesni;
- jeigu viena įtrūkių serija yra mineralizuota ar yra užpildyta magminėmis uolienomis, tada jis yra senesnis nei mineralizacijos ar intruzinis įvykis. Jeigu kita įtrūkių serija tose pačiose uolienose yra nemineralizuota ar užpildyta intruzinėmis uolienomis, tada tikėtina, kad ji yra susidariusi po mineralizacijos ar intruzinio įvykio.

Įtrūčiai gali susidaryti, iš esmės, bet kuriuo uolienos formavimosi laiku. Dėl to yra tikėtina, kad įtrūčiai susidaro nevienu būdu.

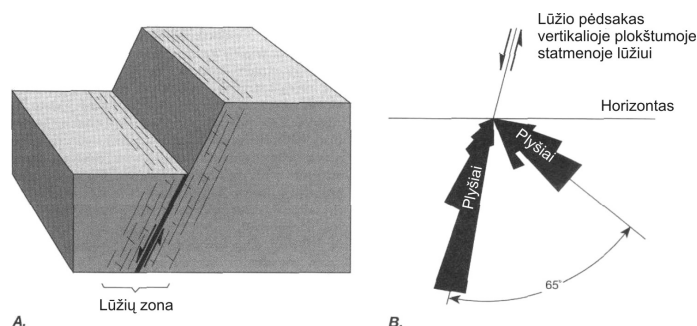


Paveikslas 3.15: Plyšių sankirtų kilmė ir pradžia. Storesnės rodyklės rodo plyšio plitimo kryptį. A. Senesnis priepaviršinis plyšys (pilkas) kertamas gilesnio plyšio. Kas-ką-kerta nustatymas būtų nevienareikšmis, jei nebūtų plunksnų rašto. B. Du plyšiai prasideda gretimuose taškuose, esančiuose skirtingose senesnio plyšio pusėje, ir plinta į priešingas puses, bet būdami vienoje plokštumoje. Plunksnų raštas leidžia nustatyti tikslią įtrūkių pradžia. C. Du susikertantys plyšiai, kurie prasidėjo skirtingomis orientacijomis, vienas viršutinėje, o kitas apatinėje dalyse. Pilkos plyšių paviršiaus dalys ir plyšio frontai (riebios linijos) rodo plyšių plitimo formą tuo metu, kai abiejų plyšių frontai susikirto. Plunksnos rodo, pradžioje sankirtoje susiformavo plyšio A viršus ir plyšio B apačia. D. Trys plyšiai, du iš jų vienaplaniai, prasideda tame pačiame taške. Ši situacija yra identiška B, išskyrus plunksnų struktūras. E. Šlytis perstumia ankstesnį plyšį palei vėlesnio plyšio paviršių ir dėl to gali atrodyti, kad senesnis plyšys užsibaigia prie jaunesnio.

3.5 Plyšių santykis su kitomis struktūromis

3.5.1 Plyšiai, kurie susiję su lūžiais

Plyšiai dažnai susiformuoja kaip lydinčios struktūros, erdviškai susiję su lydimomis struktūromis. Jeigu tokie santykiai yra dokumentuojami (lauko darbų metu), lydintys plyšiai gali duoti naudingų žinių apie lydimą struktūrą.



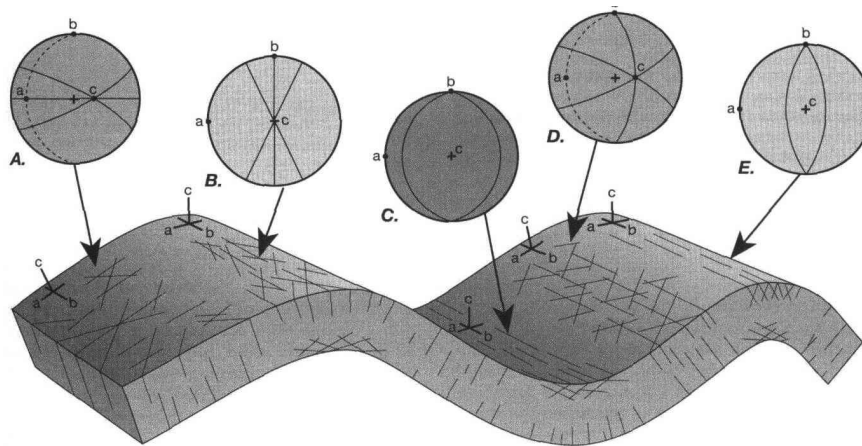
Paveikslas 3.16: Šlyties plyšiai, kurie susiję su lūžiais. A. Sprūdis su vyraujančiais lygiagrečiais šlyties plyšiais (ilgos linijos) ir susiję poriniai šlyties plyšiai (trumpos linijos). B. Vėjų rožės diagrama sudaryta vertikaliajoje plokštumoje, rodo dviejų plyšių, susijusių su sprūdžiu, serijų polinkio kampų pasiskirstymą.

Kartais lūžiai yra lydimi dviejų nedidelio mastelio šlyties plyšių serijų, tarpusavyje sudarančių maždaug 60° kampą, ir turinčių skirtingą slysmo kryptį. Tokie plyšiai yra vadinami **poriniais šlyties plyšiais** {conjugate shear fractures}. Paveiksle 3.16 parodyta poriniai plyšiai, kurie susiformavo zonoje, esančioje šalia žinomo lūžio. Vėjų rožės diagrama, pavaizduota 3.16B, yra sudaryta vertikaliajoje plokštumoje, kuri yra statmena lūžio tiesai, o plyšių polinkio kampų pasiskirstymas nubrėžtas žemiau horizontalios linijos. Lūžių orientacija irgi parodyta paveiksle. Plyšių pagrindinė serija yra aiškiai lygiagreti lūžiui, o antra, mažiau išsivysčiusi serija, išsidėsčiusi maždaug 65° kampu pirmosios atžvilgiu. Iš tempimo plyšių, su lūžiais yra susiję plunksniniai ir plėšimo plyšiai, kurie buvo aprašyti anksčiau.

3.5.2 Plyšiai, kurie susiję su raukšlėmis

Plyšiai dažnai susidaro suraukšlėtose uolienose. Santykinai raukšlės, jie paprastai yra orientuoti su tam tikru dėsningumu. Į plyšių orientaciją yra patogu žiūrėti stačiakampėje koordinatinių sistemoje (a, b, c), kuri yra susijusi su raukšlės geometrija ir su sluoksniuotumu:

- Ašis b yra lygiagreti raukšlės ašiai (RA), kuri dažniausiai guli sluoksniuotumo plokštumoje ir kuri visada turi tą pačią orientaciją nepriklausomai nuo suraukšlėto paviršiaus padėties (Pav. 3.17).
- Ašis a guli sluoksniuotumo plokštumoje ir yra statmena RA, ir
- ašis c yra visur statmena sluoksniuotumui.



Paveikslas 3.17: Plyšiai, kurie susiję su raukšlėmis Stereografinės projekcijos rodo koordinatinių sistemos orientaciją, sluoksniuotumą, kur jis nėra horizontalus (taškiniai didieji apskritimai) ir plyšius (išsitiesiniai didieji apskritimai).

Tai yra schematiškai pavaizduota paveiksle 3.17. Plyšiai, kurių plokštumos lygiagrečios ašims a ir c , yra vadinami **ac plyšiais**, o plyšiai lygiagretus b ir c ašims - **bc plyšiais**. Visi plyšiai, kurių serijos pažymėtos 3.17 A, B ir D, yra statmeni sluoksniuotumui. Serijose A ir B, atitinkamai ac ir bc plyšiai smailiu kampu kerta kitus plyšius, kurie yra **įstriži** arba **įžambūs** {oblique} **plyšiai**. Serijoje D, bc plyšiai su įstrižais plyšiais sudaro buką kampą. Palinkę plyšiai serijose C ir E yra lygiagretūs raukšlės ašiai b . Plyšiai serijoje C sudaro nedidelį kampą su sluoksniuotumu (viršutinėje sluoksnio dalyje), o plyšiai serijoje E - didelį kampą.

Plyšiai serijose A ir D yra įprasti ant raukšlės sparnų. Serijos B ir E linę būti susiję su raukšlės išlenkta puse, kur išlinkimas yra stipriausias. Plyšiai, kaip rinkinyje C, yra būdingi stipriai įlenktoms raukšlės pusėms.

NB! Gali būti, kad visi šie plyšiai susidarė dėl sluoksnio suraukšlėjimo, kur ac ir bc yra tempimo plyšiai, o įstriži ir palinkę plyšiai yra šlyties plyšiai. Tačiau galutinė struktūrinė interpretacija negali būti paremta vien tik plyšių raštu ir orientacija. Kai kada tokie plyšiai susidaro iki raukšlėjimo, o kai kada po raukšlėjimo. Kaip jau buvo minėta anksčiau, *šlyties slysmo buvimas palei plyšių paviršių nebūtinai reiškia, kad plyšiai susidarė kaip plėšimo plyšiai.*

3.5.3 Plyšiai, kurie susiję su magminėmis intruzijomis

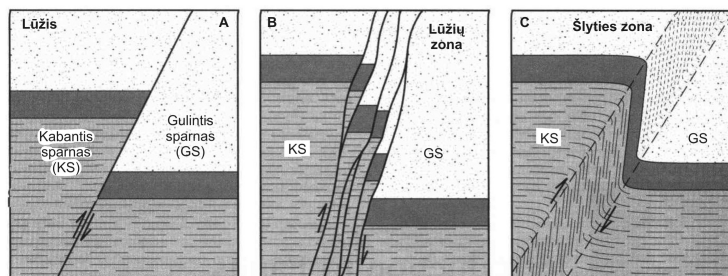
Kai kurie plyšių tipai yra randami tik magminėse uolienose. Pavyzdžiui, vieni tokių - kolonijiniai įtrūkiai (bazaltinis skyrumas) sukuria tokius įstabius gamtos paminklus kaip Velnio bokštas {Devils tower} Vajuominge, JAV. Tokie ir panašūs plyšiai susidaro ne dėl mechaninio įtempio, todėl apie juos bus skyriuje apie nedeformacines struktūras magminėse uolienose.

Skyrius 4

Įvadas į lūžius

Lūžis yra paviršius¹ ar plona zona, palei kurią vienoje to paviršiaus pusėje esančios uolienos buvo perstumtos santykinai kitoje paviršiaus pusėje esančių uolienu, ir perstūmimo kryptis buvo lygiagreti paviršiui. Dauguma lūžių, matomų Žemės paviršiuje, yra trapūs šlyties plyšiai (Pav. 4.1A) arba tankiai išsidėsčiusių plyšių zonos (Pav. 4.1A), bet yra ir plonos zonos, patyrusios plastišką deformaciją ir uolienu perstūmimo metu vientisumas tarp jų nebuvo pažeistas (Pav. 4.1C). Tam, kad tas paviršius ar plona zona būtų lūžis, vienas lūžio blokas turi būti akivaizdžiai pasislinkęs kito bloko atžvilgiu, t.y. kitoje lūžio paviršiaus ar zonos esančio lūžio bloko atžvilgiu. Be to, jie turi būti netrumpesni už metrą ar du, nors paprastai terminas lūžis naudojamas trapiems šlyties plyšiams ar jų zonoms, kurios tęsiasi metrus ar kilometrus. Jei tęsiasi centimetrus ar mažiau, tai tiesiog vadinama **šlyties plyšiais** {shear fractures}, o jei šlyties plyšiai yra milimetrinio mastelio ar mažiau ir matomi tik po mikroskopu, tai vadinami **mikrolūžiais** {microfaults}. Terminu **šlyties zona** {shear zone} arba, išskirtiniais atvejais, kada zona yra labai siaura, **šlyčiu** {shear}, paprastai vadinama plastiškos deformacijos lūžiai, t.y. kada lūžio blokai yra perstumti, tačiau abu uoliena per tą šlyties zoną nėra praradusi vientisumo (Pav. 4.1C).

¹Dažnai sakoma, kad lūžis yra plokštuma, tačiau tikrovėje taip tikriausiai niekada nebūna, nes plokštuma, kaip geometrinė figūra yra tiesi. Terminas “paviršius” yra kur kas tinkamesnis, nes neturi jokių “tiesumo” apribojimų, kaip ir yra gamtoje.



Paveikslas 4.1: Trys lūžių pobūdžiai A. Lūžis sudarytas iš vieno šlyties plyšio. Lūžių zoną sudaro B. trapių deformacijų atveju, pusiaulygiagrečių šlyties plyšių serijos arba C. plastiškų deformacijų atveju, (plastiška) šlyties zona.

Lūžiai dažnai yra svarbiausios struktūros Žemės paviršiuje ir gėlmėse.

Angliškas lūžio atitikmuo *fault* terminas yra kilęs iš aštuoniolikto ir devyniolikto amžiaus kalnakasių žodyno ir reiškė paviršių paviršių pagal kurį anglies klodai yra perstumti. Tas pas angliškas žodis taip pat reiškia defektą, nesklaidumą, bėdą - taigi, nesunku suprasti kodėl perstumiantis klodus paviršius taip buvo pavadintas, nes toks sluoksnių netęstinumas reiškė dideles darbo sąnaudas kasant talpinančias "tuščias" uolienas. Daug geologinių terminų atėjo iš senųjų kalnakasių, kurie dažnai buvo nevienareikšmiai. Šiais laikais terminus stengiamasi apibrėžti tarptautiniu mastu, tačiau nevienareikšmiškumo išliko dar daug. Kadangi Lietuvoje kalnakasybos (beveik) nebuvo, tai dauguma terminų yra vestiniai iš kitų kalbų. Tai irgi kartais prideda nevienareikšmiškumo, nes tas pas terminas kartais turi skirtingus vertimus, kurie kartais prigyja kalboje, o kartais ne.

4.1 Lūžių tipai

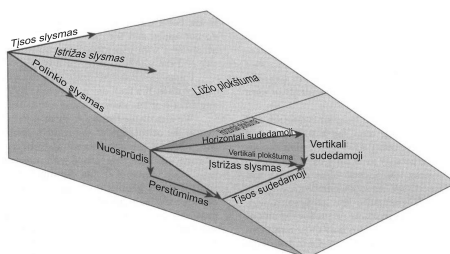
Lūžis kerta uolienas ir padalina į jas du **lūžio blokus** {fault block}. Palinkusiems lūžiams, geologai pritaikė kalnakasių terminologiją ir bloką, esantį po lūžio paviršiumi, dar vadinamą dislokatoriumi², pavadino **gulinčiu sparnu** {foot-wall}, o bloką esantį virš - **kabančiu sparnu** {hanging wall} (Pav. 14.1, 14.2). Kartais, ypač aprašant lūžių paviršius, lūžio sparnus labiau tinka vadinti **lūžio sienomis**, todėl blokas, sparnas ir siena, kalbant apie lūžius, yra sinonimai.

Tunelyje (štolnioje)³, šie blokai tiesiogiai kabo virš galvos ar guli po kojomis. Kitaip sakant, lūžio blokas virš lūžio paviršiaus yra kabantis lūžio blokas, o po lūžio paviršiumi esantis blokas yra gulintis lūžio blokas. Savaiame aišku, vertikaliems lūžiams ši terminologija netaikoma, ir lūžių blokai yra vadinami pagal pasaulio šalis: pvz. jei blokas yra į pietryčius nuo lūžio (besitęsiančio šiaurės rytų – pietvakarių kryptimi), jis yra vadinamas pietrytiniu bloku arba sparnu, ir t.t.

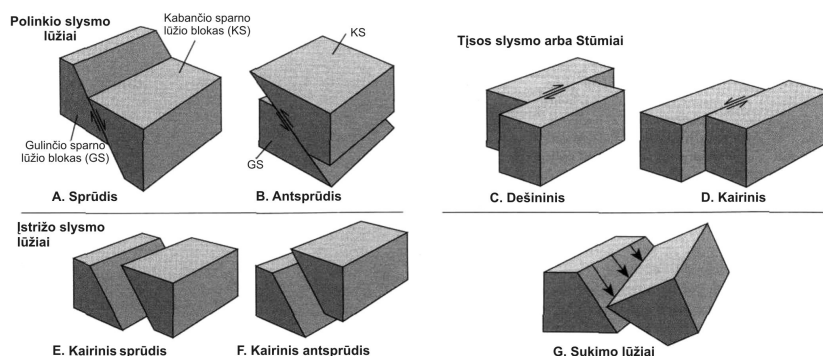
Lūžiai yra skirstomi pagal jų polinkio kampą, kurį jų paviršius sudaro su horizontalia plokštuma. Jei paviršiaus polinkis yra daugiau nei 45° , tai yra **status** arba **didelio kampo** {high-angle} lūžis, o jei mažiau nei 45° , tai lūžis bus **nuožulnus** arba **mažo kampo** {low-angle}.

²Palei lūžį blokai yra perstumiami arba kitaip sakant blokai yra dislokuojami iš vienos vietos į kitą, todėl lūžis yra dislokatorius.

³Paprastai, ypač rytų geologai, horizontalų kasinį vadina štolnia, ne tuneliu. Tunelis „rezervuotas“ keliams ir pan.



Paveikslas 4.2: Slysmo linijos ir slysmo sudedamosios ant lūžio paviršiaus



Paveikslas 4.3: Trapių lūžio blokai, rodantys įvairių lūžių grupių tipiškus poslinkius.

Lūžiai yra taip pat skirstomi pagal blokų **santykinės perstūmos** arba **santykinio slysmo** {slip} orientaciją. Perstūma (slysmas)⁴ yra atstumas ir kryptis, matuojant tiesia linija, kurį sparnas pajudėjo santykinai kito sparno (Pav. 4.2). **Polinkio-slysmo lūžių** – sprūdžių – atveju, slysmas yra (maždaug) lygiagretus lūžio paviršiaus polinkio linijai. **Tįsos-slysmo lūžiuose** – stūmiuose – slysmas yra (maždaug) horizontalus, t.y lygiagretus lūžio paviršiaus tįsai. **Įstrižo-poslinkio lūžių** atveju, slysmas vyksta kryptimi, kuri, ant lūžio plokštumos, sudaro kampą su plokštumos tįsa didesnę už 0 (t.y. nesutampa su tįsa) ir mažesnę nei 90 laipsnių (t.y. slysmas nesutampa su polinkio linija).

Įstrižo slysmo vektorius gali būti aprašomas kaip tįsos-slysmo ir polinkio-slysmo sudedamųjų dalių suma, arba kaip vertikalios ir horizontalios komponenčių suma. Polinkio-slysmo komponentė, savo ruožtu, gali būti aprašoma kaip vertikalios ir horizontalios sudedamųjų suma, kurios atitinkamai vadinamos **amplitude** arba užmetimu {throw} ir **perstūmimu** {heave}.

Toliau lūžiai yra skirstomi pagal santykinį lūžio blokų poslinkį. Palinkę polinkio slysmo lūžiai – sprūdžiai, palei kuriuos kabantis sparnas (KS) santykinai gulinčio sparno (GS) judėjo žemyn, yra vadinami **nuosprūdžiais** {normal faults} (Pav. 4.3A) arba tiesiog sprūdžiais. Jei kabantis sparnas judėjo aukštyn, o lūžio plokštumos polinkio kampas yra daugiau nei 30-45°, tai tokie lūžiai yra vadinami **antsprūdžiais** {reverse faults}, o jei mažiau nei 30-45° kampas – **antstūmiais** {thrust faults}⁵ (Pav. 4.3B). Vertikalūs lūžiai negali būti pavadinti nei sprūdžiais nei antsprūdžiais ar antstūmiais, todėl paprastai nurodoma, kuris blokas pagal pasaulio šalis judėjo viršum ar apačion, pvz. rytinis blokas pakeltas. Stūmio lūžiai gali būti **dešininiai** {dextral; right-lateral}, jei lūžio blokas, esantis kitoje, stebėtojo atžvilgiu, dislokatoriaus pusėje judėjo į dešinę (Pav. 4.3C), arba **kairiniai** {sinistral arba left-lateral}, jei blokas judėjo į kairę⁶ (Pav. 4.3D). Įstrižo-poslinkio lūžiai gali būti aprašomi sujungiant tįsos

⁴Tiek perstūma, tiek ir slysmas reiškia lūžio blokų pajudėjimą vienas santykinai kito. Slysmas daugiau taikytinas trapiems lūžiams, palei kuriuos blokai slysta, susidaro slysmo paviršiai, o plastiškuose lūžiuose (šlyties zonose) tokių slysmo paviršių nesudaro, todėl jiems taikomas tik perstūmos terminas. Angliškas abiejų šių sąvokų atitikmuo yra *slip*.

⁵Atkreipkite dėmesį, kad terminas antstūmis nieko bendro su stūmiu neturi – tiesiog sutapimas

⁶Tam, kad geriau suprasti, reikia įsivaizduoti situaciją, kad jūs sėdite traukinyje ir žiūrite

ir polinkio slysmo lūžių kinematinę terminologiją. Paveiksle 4.3E, pvz., yra parodytas kairinis sprūdis, o paveiksle 4.3F kairinis antsprūdis. **Sukimosi lūžių** {rotational faults} poslinkis keičiasi greitai, žiūrint horizontaliai palei lūžį (Pav. 4.3G). Tokie lūžiai dažnai vadinami **žirkliniais lūžiais** {scissor faults}.

4.2 Lūžių atpažinimas

Lūžių pažinimo požymiai gali būti suskirstyti į tris plačias grupes: bruožai susiję su pačiais lūžiais, poveikis geologiniams ar stratigrafiniams vienetais ir poveikis topografijai. Dabar trumpai apie kiekvieną iš šių grupių.

4.2.1 Pažinimo bruožai, susiję su pačiais lūžiais

Lūžiai paprastai atpažįstami dėl charakteringų tekstūrų ir struktūrų, kurios susidarė uolienose dėl šlyties poveikio (Lentelė 4.1). Šios struktūros ir tekstūros yra gana įvairios ir priklauso nuo šlyties dydžio ir tempo, ir nuo aplinkos (temperatūros, supančio slėgio, fluidų slėgio ir t.t.) sąlygų, prie kurių deformacija vyko. Šios sąlygos dažnai priklauso nuo gylio (Pav. 4.4).

Lūžių zonos, susidarę mažiau nei 10-15 km gylyje, bus sudarytos iš **kataklastinių uolienų** {cataclastic rocks}. Kataklastinės uolienos – **kataklazitai** {cataclastite} yra uolienos, kurios susidarė uolienoms skylant į gabalus – **klastus** {clasts}. Šių klastų dydžiai yra įvairūs, o kai kurie smulkesni trapios deformacijos metu yra pabaigiami sumalti į miltus, kurie sudaro **matricą** (užpildą tarp klastų). Atskiri klastai paprastai turi aštirus kampus ir yra plyšiuoti. Kataklastinės uolienos paprastai neturi jokių foliacijų ar linijiškumų. Necementuotos (palaidos) kataklastinės uolienos paprastai susidaro iki 1 iki 4 km gylio. Rišlūs kataklazitai formuojasi giliau, iki 10-15 km (Pav. 4.4).

Kataklastinės uolienos yra dalinamos į keturias grupes (žr. Lentelę 4.1):

- brekčijos {breccia},
- tektoniniai miltai {gouge},
- kataklazitai, ir
- pseudotachilitai {pseudotachylite}.

Smulkiagrūdės matricos kiekis atskiria brekčijas (mažiau nei maždaug 30% tūrio; Pav. 4.5A) nuo kataklazitų (daugiau nei maždaug 30% tūrio; Pav. 4.5A). Brekčijos savo ruožtu skirstomos į **megabrekčijas** (Pav. 4.5A), **(mezo)brekčijas**, ir **mikrobrekčijas**. Megabrekčijose ir brekčijose, klastai sudaryti iš uolienų fragmentų. Mikrobrekčijose, klastai yra, iš esmės, mineralų grūdelių fragmentai. Nors brekčijos, mikrobrekčijos ir miltai yra paprastai birios uolienos, vienalaikis ar vėlesnis apkvarcėjimas paverčia šias uolienas rišliomis, kietomis, silicifikuotomis lūžių uolienomis.

Tektoniniai miltai yra, iš esmės, brekčių serijos tęsinys su dar mažesniais klastais. Atodangoje, jie atrodo kaip smulkūs, baltoki uolienų miltai.

pro langą į jus išlydinčius asmenis. Traukiniui pradėjus iš lėto judėti, jums atrodo, kad pajudėjo ne traukinys, o palydintys draugai ir traukinių stotis, tarkim į dešinę. Išlydintiems draugams, aišku, atrodo, kad pradėjo judėti traukinys (ir iš tikrųjų taip!) ir irgi į dešinę. Taigi, bet kurioje traukinio pusėje bebūtumėte, jums visada atrodys, kad judate į tą pačią pusę.

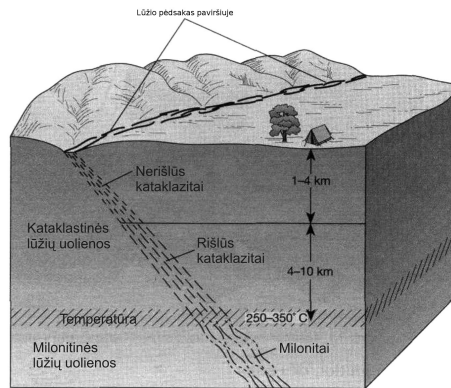
Kataklastinės uolienos

Audinys	Petrostruktūra	Pavadinimas		Klastų dydis	Matrica
Paprastai foliacijos nėra	Kataklastinė: aštrūs, kampuoti fragmentai	Brekčių serija	Megabrekcija	> 0.5 m	<30%
			Mezobrekcija	1-500 mm	<30%
			Mikrobrekcija	< 1 mm	<30%
Foliacija gali būti		Tektoniniai miltai		< 0.1 mm	<30%
Foliacija gali būti		Kataklastitas		Papr. <10mm	>30%
Foliacija gali būti		Pseudotachilitas			

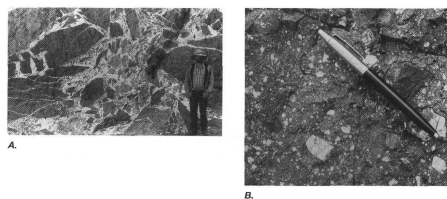
Milonitinės uolienos

Audinys	Petrostruktūra	Pavadinimas		Matricos grūdelių dydis	Matrica
		Milonitinis gneisas		> 0.5 μm	
	Metamorfinė: Vingiuotos grūdų ribos, poligoniški rūdai	Milonitų serija	Protomilonitas	< 0.5 μm	<50%
			Mezomilonitas	< 0.5 μm	50-90%
			Ultramilonitas	< 0.5 μm	>50%

Lentelė 4.1: Lūžio uolienų terminologija



Paveikslas 4.4: Žemės plutos schematinė blok-diagrama, vaizduojanti lūžių zonos pėdsaką and Žemės paviršiaus ir zoną sudarančių uolienų tipų kitimą einant gilyn. Nerišlūs kataklazitai (plius pseudotachilitai, jei uolienos sausos) sutinkami aukščiau 1-4 km gylio. Žemiau to gylio ir iki maždaug 15 km, vyrauja rišlūs kataklazitai (plius pseudotachilitai, jei uolienos sausos). Žemiau 10-15 km ir prie temperatūrų didesnių nei 250-350°C, lūžiai yra plastiški ir sudaryti iš milonitų.



Paveikslas 4.5: Kataklastinės uolienos. A. Megabrekčija sudaryta iš labai didelių klinčių nuolaužų. (Titus Canyon, Death Valley National Monument). B. Kataklastitas iš Whipple Mountain bazalinio lūžio, pietryčių Kalifornija, JAV.



Paveikslas 4.6: Tamsios pseudotachilito gyslos įsikvebiančios į šviesios spalvos gneisą. Paveikslo plotis yra apie 6 cm.

Kataklastitai sudaryti iš įvairaus dydžio klastų, o matricos tūris kinta nuo 30 iki 100% (Pav. 4.5B).

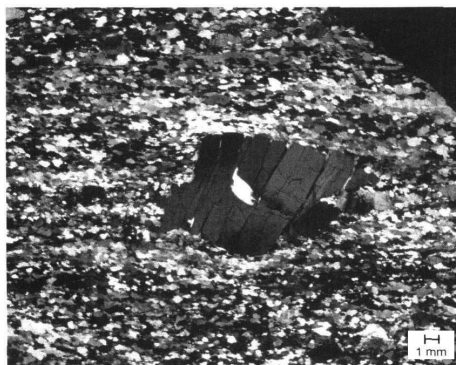
Pastebėtina, kad kataklastinės uolienos yra panašios pačios į save: grūdelių dydis, forma ir išsidėstymas atrodo panašiai nepriklausomai nuo stebėjimo mastelio (cf. Pav. 4.5A ir B). Klastų dydžio pasiskirstymas turi fraktalinę geometriją, t. y. savipanašumas. Tai sutinka su fragmentacijos modeliu, kuris teikia, kad panašaus dydžio fragmentai yra nelinkę turėti bendrą kontaktą, t. y. nesiliečia vienas su kitu. Klastų dydžio pasiskirstymo pobūdis taip pat reiškia, kad „klastų“ ir „matricos“ savokų apibrėžimas priklauso nuo mastelio. Panašiai kai ir su skvarbumu – tam tikro dydžio uolienu fragmentai, kurie priklausytų matricai megabrekčijoje būtų klastai brekčijoje ar mikrobrekčijoje (Lentelė 4.1).

Nors brekčijos, mikrobrekčijos ir miltai yra paprastai birios uolienos, vėlesnis apkarvėjimas paverčia šias uolienas rišliomis, kietomis, silicifikuotomis lūžių uolienomis.

Pseudotachilitai (Pav. 4.6) yra masyvios uolienos, kurios dažnai aptinkamos mikrobrekčijose ar jas talpinančiose uolienose kaip tamsios gyslos, sudarytos iš stikliškos ar kriptokristalinės medžiagos. Pseudotachilitai tipiška yra sudaryti iš itin-smulkiagrūdės matricos, kurioje kristalų skersmuo yra mažiau nei vienas mikronas ir/ar nedidelius kiekius stiklo ar devitrifikuoto stiklo. Pseudotachilitai paprastai gerai sucementuoja plyšiuotą uolieną. Po petrografiniu mikroskopu, jie yra izotropiški, t.y. šviesa nepraeina, jei poliarizatoriai yra sukryžiuoti. Tai būdinga stiklams ir itin smulkiagrūdėms medžiagoms. Žemės drebėjimų metu, esant sausoms uolienoms ir mažiau nei 10-15 km gylyje, kaitinimas dėl staigios ir intensyvios trinties gali būti pakankamas išlydyti nedidelę uolienu dalį. Susidaręs lydalas įsiskverbia į plyšius, esančius aplink, ir momentaliai atšąla ir sudaro pseudotachilitų gyslas. Taigi, pseudotachilitų buvimas yra vienas iš patikimų įrodymų apie buvusius žemės drebėjimus.

Kataklastinės uolienos sudaro zonas, kurių storis kinta nuo kelių mm iki vieno ar daugiau kilometrų. Kaip taisyklė, *kuo didesnis zonų storis, ir kuo smulkesnis grūdelių dydis, tuo didesnis buvo poslinkis (nebūtinai vienalaikis) tarp lūžio bloky.*

Lūžiai, susidarę giliau nei 10-15 km gylyje, yra sudaryti iš kitokio tipo, labai smulkiagrūdžių, uolienu - **milonitų** {mylonite; Pav. 4.7). Šios uolienos



Paveikslas 4.7: Kvarco milonitas, turintis didelius feldšpatų porfyroklastus, esančius kur kas smulkiagrūdiškesnėje matricoje, sudarytoje iš stipriai perkristalizuotų kvarco grūdelių.

susidaro dėl uolienų deformacijos plastiškame būvyje, t.y. žemės plutos temperatūra yra daugiau nei 250°C - 350°C . Milonitinių uolienų matricą sudaro labai smulkūs grūdeliai, susidarę dėl pirminės uolienos grūdelių sumažėjimo. Reliktiniai pirminės uolienos mineralų grūdeliai, vadinami **porfyroklastais** {porphyroclasts}, yra apsupti smulkiagrūdės talpinančios masės. Tokiose uolienose smulkių grūdelių ribos yra poligoninės (daugiakampės) ir dėl to trys grūdeliai sueina 120° kampu (sudaro trigubus suėjimus) - labai būdinga metamorfinėms uolienoms, o ribos tarp grūdelių gali būti tiesios arba dantytos - sutūrinės. Milonitinėms uolienoms ypač būdinga gerai išreikštos foliacijos ir linijiškumai. Šios struktūros yra įprastai lygiagrečios lūžio zonai.

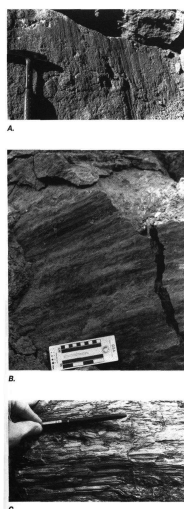
Milonitinės uolienos susiformuoja dėl mineralų persikristalizavimo esant greitai plastiškai deformacijai. Jų poligoniškos ar sutūriškos grūdelių ribos yra skiriamasis bruožas nuo smulkiagrūdžių kataklazitų, kurių grūdeliai yra aštriai kampuoti. Jei uolienos iki deformacijos grūdeliai sumažėja, bet yra stambesni už 50 mikronų, uoliena vadinama **milonitiniu gneisu**. Jei matricą sudarantys grūdeliai yra mažesni nei 50 mikronų, uoliena priklauso **milonitinei serijai**, kuri, didėjant smulkiagrūdės matricos daliai, suskirstoma į (Lentelė 4.1) **protomilonitus**, (**mezo**)**milonitus** ir **ultramilonitus**. Ultramilonituose, dėl mažesnio nei 10 mikronų grūdelių dydžio, matrica delno dydžio imste atrodo stikliška.

Milonitai paprastai randami plastiškose lūžių (šlyties) zonose ir jų storis gali būti nuo metro dalies iki keleto metrų. Kaip kurie milonitai sudaro didelio pločio (storio) šlyties zonas. Tokiose zonose uolienos gali kisti nuo pirminės uolienos (protolito) į milonitinius gneisus ir į ultramilonitus.

4.2.2 Lūžių paviršiai

Lūžių paviršių, kaip ir plyšių paviršių, tyrimas yra labai svarbus ir gali atskleisti daug informacijos apie lūžių ir tiriamos teritorijos struktūrinę evoliuciją.

Kur atsidendgia, lūžių paviršius yra dažnai glotnus, nupoliruotas ir jis vadinamas **slysmo** (arba lūžio) **paviršiumi** {slickenside}. Jei paviršius itin gerai nupoliruotas jis vadinamas **tektoniniu veidrodžiu**. Jie susiformuoja dėl šlyties judesio (trinties) palei lūžio paviršių. Dažnai ant lūžio paviršių, įskaitant ir



Paveikslas 4.8: Linijiškumai, susidarę dėl slysmo palei lūžio paviršių. A. Linijiškumai susidarę dėl lūžio paviršiaus drėskimo ir malimo. B. Gūbrių griovose linijiškumas arba lūžio vidlotės. C. Serpentino slysmo skaidulų linijiškumas.

slysmo paviršius, yra stebimos aiškiai orientuotos linijiškos struktūros. Jos yra vadinamos **slysmo linijomis** {slickenlines}, **slysmo paviršių linijiškumu** {slicken-side lineations} ar **štrichais**⁷ {striations}, ir jie yra lygiagrečios slysmo krypties. Šie linijiškumai yra trijų tipų:

- gūbrių ir griovų {ridges and grooves⁸},
- mineralų dryžių {mineral streaks}, ir
- mineralinių skaidulų {mineral fibers} arba slysmo skaidulų {slickenfibers}.

Gūbriai ir griovos gali susidaryti dėl lūžio paviršiaus režimo ir malimo (smulkinimo) (Pav. 4.8A), dėl tektoninių miltų susikaupimo už kieto išsikišimo - **asperitės** {asperity}, dėl nelygumų išsivystymo ant pačios lūžio plokštumos dėl jau esančių plyšių, kurie formuoja **gūbrių griovose linijiškumą** {ridge-in-groove} - **lūžio vidlotes** {fault mullions} (Pav. 4.8B), ar dėl slysmo skaidulų {slickenfibers} augimo (Pav. 4.8C).

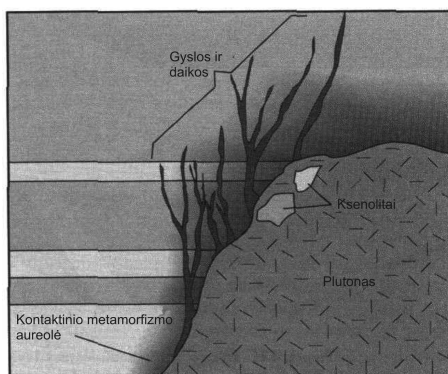
Slysmo skaidulos yra ilgos, vieno kristalo mineralinės skaidulos, kurios auga lygiagrečiai lūžio poslinkio krypties. Jie užpildo tarpus, atsiradusius palei lūžį dėl palaiptinio slysmo.

Mineralų dryžiai {mineral streaks} yra dryžiai ant slysmo paviršių susidarę dėl mineralų grūdų susmulkinimo ir ištempimo šlyties metu tarp lūžio blokų.

Lūžiai, kurie susidaro sekliuose gyliuose, yra dažnai **dilatantiniai** {dilatant}, t.y. juose susidaro atviro erdvės, kurios padidina bendrą uolienos tūrį. Tokie lūžiai sudaro kelius požeminių fluidų (pvz. vandens) migravimui. Dėl to,

⁷geriausias šios sąvokos pavyzdys ne iš lūžių srities yra ledyno paliktos linijos ant uolienų paviršių. Pvz. https://en.wikipedia.org/wiki/Glacial_striation

⁸Griovos {grooves} nuosėdinių paviršių struktūrose vadinama išrėžomis, remiantis daugiau kilme nei forma.



Paveikslas 4.9: Plutoninio intruzinio kūno ir nuosėdinių uolienuų kontakto ypatybės.

daug lūžių zonų yra užpildyti antrinais mineralais, kalcitu (Pav. 4.5A) ir kvarcu (kvarcu, opalu ar chalcedonu) ir sudaro jų gyslas arba prieš tai egzistavusių lūžių miltų ar brekčijų cementą. Daug rūdinių telkinių susiformuoja dėl rūdinių mineralų nusėdimo lūžių zonose iš hidroterminių fluidų.

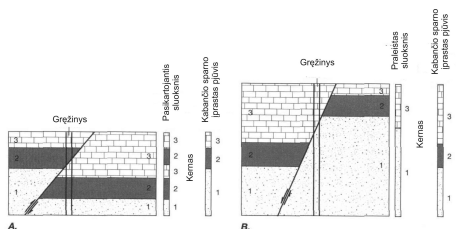
4.2.3 Lūžių poveikis geologiniams ar stratigrafiniams vienetams

Lūžio blokų persislinkimas išskiria uolienas, kurios buvo vientisos ir dažnai sugretina uolienas, kurioms nepriklauso būti greta įprastoje geologinėje sekoje. Dėl to atsiradusi pertrauktis yra geriausiai lūžio buvimo įrodymas.

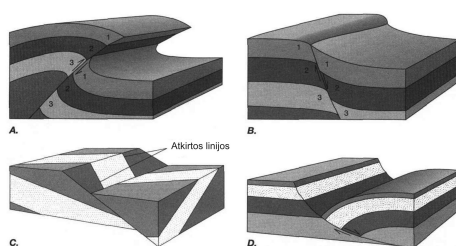
Geologinės tolydžios sekos pertraukimas, pvz. nuosėdinėse uolienose, gali reikšti, kad yra lūžis. Tačiau stratigrafinės pertraukos buvimas nereiškia, kad yra lūžis, t.y. svarbu atskirti tokias struktūras nuo lūžių. Nedarnoms būdingi bruožai apima paleodirvožemių horizontus, erozinius kanalus, bazalinius konglomeratus, nuosėdinius kontaktus, ir sluoksnio, esančio viršuje lygiagretumą nedarnai apačioje. Intruzinių kontaktų ryškus bruožas (Pav. 4.9) yra supančių uolienuų metamorfizmas, supančių uolienuų fragmentai pakibę intruzinėje uolienose (ksenolitai) ir daikos, sudarytos iš intruduojančių uolienuų, įsiskverbusios iš pagrindinio kūno į supančias uolienas.

Lūžio riekų {fault slices}, kitaip **lūžio arklių** {fault horses}, buvimas palei nutrūkusią seką yra aiškus lūžio įrodymas. Lūžio riekės yra uolienos blokai, kurie iš visų pusių apriboti lūžiais. Jie yra "atriekti" nuo gulinčio sparno ar kabančio sparno lūžiui šakojantis ir yra perstumti pastebimais atstumais iš jų pirminės vietos. Taip jie atsiranda ne savo stratigrafinėje padėtyje. Jeigu vietinė stratigrafija yra gerai žinoma, riekų pirminės stratigrafinės padėties išsiaiškinimas gali suteikti žinių apie lūžio poslinkio kryptį ir dydį. Kur lūžio riekės perskiria dvi panašias uolienas, skirtingos litologijos riekė gali būti pačio lūžio įrodymu.

Sluoksnių pasikartojimas {repeated section} ar **nebuvimas** {missing section} gali būti taip pat geras lūžio buvimo indikatorius. Šis kriterijus yra ypač svarbus giluminėje geologijoje, kur geologinė informacija yra gaunama tik iš gręžinių. Paveiksle 4.10 pavaizduota schematinis horizontaliai-sluoksniuoto regiono skerspjūvis su gręžiniu, rodančiu sluoksnių pasikartojimą (Pav. 4.10A)



Paveikslas 4.10: A. Antstūmis aptinkamas dėl pasikartojančių sluoksnių gręžinyje. B. Sprūdis aptinkamas dėl stratigrafinio sluoksnio nebuvimo gręžinyje.



Paveikslas 4.11: Vilkimo raukšlės susidariusi nuosėdiniuose sluoksniuose prie lūžio. A. Antsprūdis, and B. sprūdis. C. Jei sluoksniuotumo atkirtos linijos ant lūžio paviršiaus sudaro mažą kampą su slysmo kryptimi, vilkimo raukšlių susidarymo tikimybė maža. D. Nulenkimo antiklina sprūdžio kabančiame sparne.

ir sluoksnių nebuvimą (Pav. 4.10B). Jei yra pakankamai informacijos, yra įmanoma užkartografuoti požeminį lūžį vien tik remiantis gręžinių duomenimis.

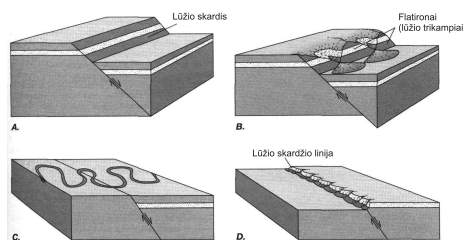
Svarbu įsitikinti, kad sluoksnių nebuvimas nėra dėl nedarnos, o pasikartojantys sluoksniai nėra dėl facijų pokyčio susijusio su transgresijomis ir regresijomis. Atskyrimas struktūrų susidariusių dėl lūžių ir dėl facijinių pokyčių gali kartais būti sudėtingas ir baigtis neteisinga struktūrine analize.

Sluoksniuotumo paviršius prie lūžio gali būti išlenktas kitoje lūžio pusėje esančio bloko judėjimo kryptimi. Šios raukšlės yra vadinamos **vilkimo raukšlėmis** {drag folds}. Jos dažniausiai susidaro kada nuosėdinių sluoksnių pėdsakai⁹ ant lūžio - **atkirtos linijos** {cutoff lines} - sudaro didelį kampą su lūžio slysmo linija (Pav. 4.11A, B). Vilkimo raukšlės susidarys rečiau jei atkirtos linijos yra lygiagrečios slysmo linijai (Pav. 4.11C). Dažniausiai, vilkimo raukšlės susidaro iki lūžio atsiradimo.

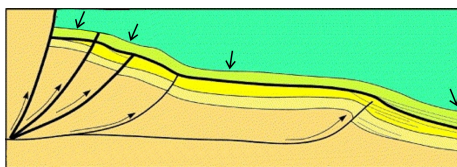
Vilkimo raukšlės yra ypač gerai išsivystę palei antstūmių lūžius (Pav. 4.11A). Palei sprūdžius yra dažnos **nulenkimo antiklinos** {rollover anticlines}, kurios susidaro kabančiame sparne (Pav. 4.11D). Sluoksnio lenkimo, dėl kurio susidaro šios antiklinos, kryptis yra priešinga nei vilkimo raukšlėse. Jos susidaro

⁹Plačiąja prasme, pėdsaku vadiname plokštumos ar linijos užsibaigimo „figūrą“ ties kažkokia tai kita plokštuma ar paviršiumi. Pvz. kai lūžis išeina į Žemės paviršiu, tai jo linija, matoma iš oro ar žemėlapyje vadinsis lūžio pėdsaku. Sluoksniuotumo linijos šurfe vadinsis sluoksniuotumo pėdsakais.

Tačiau siaurąją prasme, pėdsaku vadiname tik plokštumos ar linijos užsibaigimo „figūrą“ Žemės paviršiuje.



Paveikslas 4.12: Lūžio skardžių erozija. A. Slysmas sukuria lūžio skardį. B. Dėl erozinių slėnių susidarymo stačiu kampu į lūžio skardį susiformuoja flatironai. C. Erozija sunaikina ploną erozijai atsparų sluoksnį topografiškai aukštame gulinčiame sparne ir sulygina topografiją. D. Erozija pasiekia atsparaus sluoksnio lygį kabančiame sparne. Greitesnė mažiau atsparaus sluoksnio erozija gulinčiame sparne sudaro topografinį laiptą - lūžio skardžio liniją.



Paveikslas 4.13: Lūžių terasos (pažymėtos rodyklėmis) susidariusios šlaito polinkiui sumažėjus dėl nedidelio kampo antsprūdžių – anstūmių.

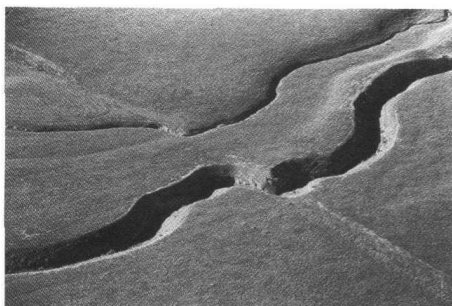
dėl kabančio sparne lenkimosi prisiderinant prie naujai atsirandančios erdvės.

4.2.4 Fiziografiniai lūžių kriterijai

Daug aktyvių ir neaktyvių lūžių turi ryškią įtaką Žemės paviršiui, upių vagoms ir pan. Kadangi šie dažnai susiję su lūžių buvimu, jie yra naudingi geologiniame kartografavime.

Skardžiai {scarps} yra linijiški bruožai, išsiskiriantys dėl staigaus topografinio šlaito padidėjimo. Jie irgi būti susiję su lūžiais. Yra trys skardžių tipai susiję su lūžiais.

- **Lūžio skardžiai** {fault scarps} yra tęstiniai linijiški šlaito pertrūkimai, susidarę dėl tiesioginio topografijos poslinkio palei lūžį (Pav. 4.12A).
- **Lūžio linijos skardžiai** {fault line scarps} yra eroziniai bruožai, kurie yra būdingi tiek aktyviems, tiek ir pasyviems lūžiams. Paveiksle 4.12 pavaizduoti trys etapai progresuojant lūžio erozijai. Pradžioje, dėl sprūdžio, susiformuoja lūžio skardis (Pav. 4.12A). Erozija suformuoja griovus statmenai skardžio kraštui, dėl ko formuojasi **flatironai** {flatirons} arba **lūžių trikampiai** {faceted spurs} išilgai kalnų priešakio (Pav. 4.12B). Palaipsniui gulinčio sparne iškilumas pasiekia kabančio sparne topografinį lygį (Pav 4.12C). Dar vėliau, erozija atidengia ploną sluoksnį kabančiame sparne, kuris yra labiau atsparus erozijai nei sluoksniai gulinčiame sparne. Taip išnešami mažiau erozijai atsparios uolienos (Pav. 4.12D) ir lieka skardis, kuris, šiuo atveju, nerodo lūžio slysmo krypties.



Paveikslas 4.14: San Andreas lūžio fotografija, rodanti upių staigius posūkius palei lūžio pėdsaką.

- **Lūžių terasos** {fault benches} yra linijiški topografijos bruožai, matomi dėl anomalaus šlaito sumažėjimo (Pav. 4.13). Jie susidaro kur lūžis perstumia pirminį tolygų šlaitą taip, kad susidaro nuožulnesnio šlaito juosta, arba kur mažiau erozijai neatsparių uolienų lūžių zonoje erozija suformuoja nuožulnesnį šlaitą negu aplinkinėse, labiau atspariose uolienose. Lūžių terasos gali būti susiję su bet kokio tipo lūžiais.

Kalvų virtinės, slėniai ar upių vagos gali būti perstumtos palei lūžius. Paveiksle 4.14 parodytos dvi **perstumtos upės vagos** {offset streams}, kurios buvo perstumtos dėl tjosos poslinkio lūžio upės vandeniui pastoviai tekant. Upės vagos staigus pasisukimas į šalį gali rodyti poslinkio kryptį palei lūžį, o jei poslinkis yra pakankamai didelis, gali atsirasti nauja upės vaga, o senoji upės vaga likti senvage.

Lūžio paviršius ar zona gali būti tiek kanalas, tiek ir užtvara požeminiui vandeniui, priklausomai nuo uolienų laidumo lūžio ir supančiose uolienose. Brekčijos yra puikus vandens laidininkas, bet stora tektoninių miltų zona, su molio mineralų priemaiša, gali veikti kaip barjeras vandens tekėjimui. Jei perstumimas palei lūžį perstumia vandeningus horizontus arba sugretina nelaidžias uolienas su vandeningu horizontu, tada požeminių vandenų tekėjimas gali būti stipriai paveiktas. Dėl to, lūžių pėdsakai dažnai yra lydimi šaltinių ir vandens užpildytų pažemėjimų - **prielūžinių tvenkinių** {sag ponds}.

Upės vaga paprastai turi nusistovėjusį skerspjūvį, kurio polinkio kampas palaipsniui statėja artėjant prie ištakų. Toks skerspjūvis gali būti pakeistas dėl lūžių poslinkio arba dėl skirtingo dugno uolienų atsparumo erozijai. Bet kokie upės skerspjūvio ar slėnio pokyčiai, kurie tikėtina neatsiradę dėl erozinio atsparumo pokyčių, gali būti atsiradę dėl lūžių poveikio ir dėl to nustatyti staigų upės vagos pokytį reikia atlikti papildomus tyrimus.

Lūžiai dažnai sugretina skirtingas uolienas. Aukščiau skirtingų uolienų susidaro skirtingas dirvožemis ir dėl to augalija skirtingose lūžio pusėse irgi skirtinga. Taigi, staigus augmenijos pokytis irgi gali reikšti lūžio buvimą.

4.3 Lūžių poslinkio nustatymas

Pilnai nustatyti kiek du lūžio blokai pasislinko vienas santykinai kito, arba trumpiau tariant lūžio poslinkį, reikia pilno poslinkio vektoriaus nustatymo:

poslinkio linijos, dydžio ir krypties, kaip tai jau buvo aprašyta aukščiau (poskyris 2.6.2). Kai kurie bruožai leidžia nustatyti tokį pilną poslinkį, tačiau dažniausiai pavyksta nustatyti tik poslinkį tik dalinai. Ne mažiau reikšminga tyrinėjant lūžius yra nustatyti jų pačių ankstesnę (pirminę) padėtį ir susijusius poslinkius, nes šie du parametrai yra svarbūs lūžių klasifikavime ir atskleidžiant jų tektoninę svarbą. Lūžiai po jų susidarymo gali būti pasukti į kitokią padėtį ir to neįvertinimas gali vesti link neteisingos jų interpretacijos. Panašiai gali atsitikti ir kada jėgos, verčiančios uolienas deformuotis pakeičia kryptį ir poslinkis palei lūžius gali tapti kitoks, ar ne priešingas.

Susijusių (genetiškai) lūžių sistemose antriniai (ar pagalbiniai) lūžiai yra **syn-****tetiniai** {synthetic fault}, jei jie turi panašų polinkio linijos azimutą ir slysmo kryptis yra ta pati kaip ir palei pagrindinį lūžį. Ir atvirkščiai, jei antrinių lūžių polinkio linijos azimutas yra priešingas ir slysmo kryptis yra priešinga pagrindiniam lūžiui, tai lūžis yra **antitetinis** {antithetic fault}.

4.3.1 Santykinis ir absoliutus poslinkis

Šnekant apie lūžių kinematiką, dažniausiai kalba eina apie santykinį poslinkį tarp lūžio blokų. Absoliutus poslinkis lauko darbų metu itin retai gaunamas, nes nėra atskaitos taško, santykinai kurio mes galėtumėme išmatuoti abiejų (ar daugiau) lūžio blokų bendrą poslinkį. Taigi, paprastai nėra įmanoma nustatyti ar nuosprūdžio kabantis sparnas nusileido ar gulintis sparnas pakilo.

Tačiau yra atskiri atvejai, kada įmanoma išmatuoti absoliučius poslinkius. Aktyvių deformacijų tyrimai naudojant globalias pozicionavimo sistemas (kur kas geriau žinomoms kaip GPS) gali nustatyti lūžio blokų judėjimą santykinai nustatytos globalios satelitinės atskaitos sistemos. Pvz. buvo išmatuota, kad dėl 1994 metais vykusio Northridge žemės drebėjimo Kalifornijoje (JAV), kabantis sparnas palei antstūmį pakilo keliasdešimt centimetrų.

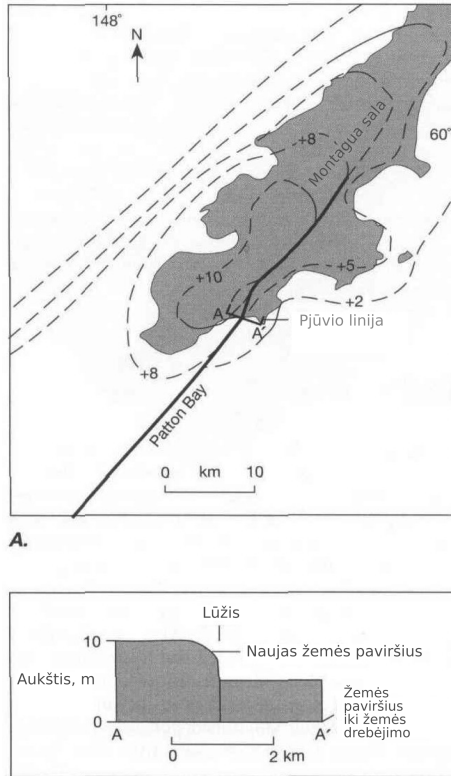
Radarinė interferometrija naudoja dviejų palydovų radarų nuotraukas, padarytas tos pačios vietos, tačiau skirtingu laiku. Ir tai leidžia nustatyti mažus aukščio pokyčius, nuo kelių milimetrų iki kelių milimetrų dešimčių.

Jūros lygis irgi gali būti nepriklausoma atskaitos sistema, nuo kurios galima nustatyti absoliučius lūžių judėjimus. Įdomus pavyzdys gali būti lūžių susidarymas, susijęs su žemės drebėjimu Aliaskoje (JAV) 1964 metais prie Anchorage. Lūžio blokų matavimas santykinai jūros lygio parodė, kad vienoje vietoje, kur susidarė nuosprūdis, abu sparnai pakilo (Pav. 4.15).

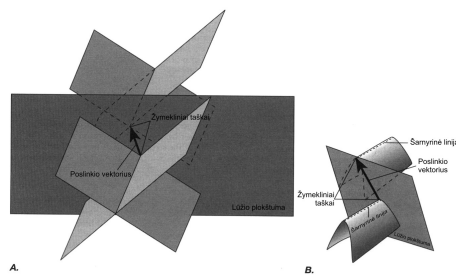
4.3.2 Pilnas poslinkio nustatymas

Pilnam poslinkio palei lūžį nustatymui reikia tam tikrų, egzistavusių iki lūžio atsiradimo, linijinių struktūrų, pvz., šarnyrinės linijos, kurios yra lūžių kertamos ir perstumiamos. Kai tokią linijinę struktūrą kerta lūžis, ji lūžio paviršiuje matomas kaip taškas, ir jis vadinamas **žymekliniu tašku** {piercing point; Pav. 4.16}. Iki lūžio susidarymo, abu žymekliniai taškai buvo vienas šalia kito. Po perstūmimo, vektorius, jungiantis du atitinkamus žymeklinius taškus abiejose lūžio pusėse, vienareikšmiškai nustato poslinkio palei lūžį liniją ir dydį, o santykinė tų taškų skirtingose lūžio pusėse padėtis duoda ir slysmo kryptį (poslinkio vektoriaus sudedamąją).

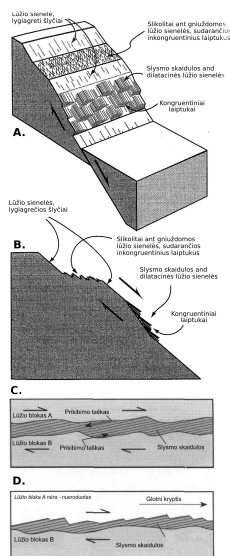
Yra keletas linijinių geologinių struktūrų, kurios gali būti žymekliniais taškais ant lūžio paviršiaus. Dviejų skirtingų plokštumų sankirta yra visada unikali lin-



Paveikslas 4.15: Montague salos pietinėje Alaskoje, lūžis, susijęs su 1964 Alaskos žemės drebbėjimu. A. Izolinijos žemėlapyje rodo, kiek lūžio blokai buvo pakelti. Atkreipkite dėmesį, kad abu lūžio blokai pakelti, tačiau skirtingais kiekiais. Skaičiai prie izolinijų rodo vertikalią poslinkį metrais. B. Skerspjūvis per abu lūžio blokus. Patton Bay lūžis yra nuosprūdis, susidaręs dėl ŠV bloko didesnio pakilimo nei PR bloko.



Paveikslas 4.16: Pilnas poslinkio (arba slysmo) vektoriaus nustatymas pagal unikalių liniščių bruožų perstūmimą palei lūžį. A. Dviejų plokštumų sankirta, B. Raukšlės šarnyras.



Paveikslas 4.17: A. Blok-diagrama. B. Skerspjūvis, kuriame rodoma netaisyklingas lūžio paviršius su slysmo nuorodomis, kurios susidaro ant skirtingai išsidėsčiusių lūžio paviršiaus sienelių (fragmentų). Slikolitai yra tirpinimo struktūros, kurios susidaro ant gniuždomų sienelių (ypač klinties ir marmuro). Slysmo skaidulos susidaro augant mineralams ant atsiveriančių (dilatacinių) sienelių. C. Slymo linijiškumai yra slysmo krypties nuorodos ir parodo mažiausią poslinkio dydį. Rodyklė palei slysmo skaidulą, kurios pradžia yra taškas, kur skaidula sukibusi su vienu lūžio paviršiumi, rodo į kurią pusę judėjo nueroduotas lūžio blokas. Visas skaidulos ilgis yra mažiausio poslinkio tarp lūžio paviršių ilgis. D. Glotni, arba "laiptais žemyn" (pasroviui) kryptis ant laiptuoto, atidengtų slysmo skaidulų, paviršiaus rodo dingusio (nueroduoto) lūžio bloko santykinę judėjimo kryptį.

ija ir, perstumta palei lūžį, gali būti naudojama vienareikšmiu poslinkiui nustatyti (Pav. 4.16A). Tokios dvi susikertančios plokštumos gali būti du senesni lūžiai, dvi skirtingai orientuotos gyslos ar daiktos, sluoksnis ir lūžis ar gysla ar daiktas, nedarna, kontaktas, kaip pvz., tarp sluoksnio ir intrūzinio kūno. Šarnyrinė linija irgi gali sudaryti slysmo atskaitos taškus (Pav. 4.16B). Palaidotos upių vagos ir linijiški smiltainių kūnai yra linijiški stratigrafiniai bruožai, kaip ir cilindriniai kūnai, pvz., vulkanų šnekai ar kai kurie rūdiniai kūnai.

4.3.3 Dalinis poslinkio nustatymas pagal smulkias struktūras

Daugeliu atvejų, kada yra nustatoma lūžių ar šlyties zona, yra įmanoma nustatyti poslinkio liniją ir kryptį, bet ne dydį. Tokia informacija gali būti gauta iš atodangos ar delno dydžio imsto.

Kaip jau buvo minėta, slysmo linijiškumas yra lygiagretus poslinkiui (Pav. 4.8), bet poslinkio dydį yra nustatyti sunkiau. Lūžio vidločių linijiškumas, kuris susidaro plyšiui plintant, gali būti ilgesnis nei lūžio poslinkio vektorius. Mineralų dryžiai, kurie susidaro susmulkinant ir ištempiant mineralų grūdus, gali duoti tik mažiausią poslinkio dydžio įvertinimą, ir tai yra sunkiai įrodoma.

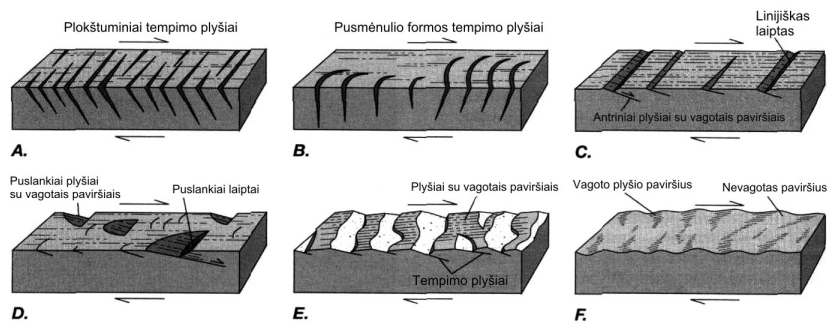
Vykstant trapių lūžių susidarymui, ant lūžio paviršiaus gali susidaryti daug asimetriškų bruožų, kurie gali būti panaudoti kaip kinematiniai indikatoriai, lūžio **šlyties nuorodai** {sence of shear} nustatyti. Šie bruožai gali būti stebimi ant lūžio paviršiaus tik tuo atveju, jei vienas lūžio blokas yra pašalintas (savaiame aišku!). Pašalinto bloko judėjimo kryptį vadinsime “kryptimi pasroviui” {downstream direction}, o priešingą tai kryptį - “kryptimi priešroviui” {upstream direction}. Keletas bruožų yra sudarytų iš asimetriškų laiptelių ant lūžio paviršiaus. Ilgoji jų pusė sudaro mažą kampą su lūžio paviršiumi, o trumpoji pusė - didelį (statų) kampą. Tai jeigu trumpoji laipto pusė yra pasroviui, laiptai yra **kongruentiniai** {congruous}, o jei priešroviui - **inkongruentiniai** {incongruous}. Dažniausi santykinio poslinkio kinematiniai indikatoriai susidaro dėl penkių procesų:

1. antrinių mineralų kristalizacija iš fluido arba lūžio paviršiaus tirpinimas
2. antrinių plyšių susidarymas
3. lūžio paviršiaus raižymas
4. lūžio paviršiaus trynimas
5. sutrintos medžiagos (lūžio miltų) sukaupimas ir ištempimas palei lūžio paviršių.

1. Jei smulkios sienelės ant lūžio paviršius šlyties metu yra linkę atsiverti, t.y. jos yra dilatacinės, mineralai išsikristalيزuoja iš tekančių fluidų ir sudaro pailgas mineralines skaidulas - **slysmo skaidulų linijiškumus** {slickenfiber lineation; Pav. 4.8C, 4.17A ir B). Slysmo skaidulų linijiškumai auga smailiu kampu su lūžio paviršiumi ir taip sudaro rodyklę, rodančią bloko, esančio kitoje lūžio pusėje, judėjimo kryptį: nuo skaidulų pradžios, palei pačias skaidulas, link kito lūžio bloko judėjimo (Pav. 4.17C ir D). Kadangi mineralų augimas yra lėtas, tai skaidulos tikriausiai auga esant lėtam, esant aseisminiam poslinkiui palei lūžius ir skaiduloms spėjant augti su erdvės atsivėrimu. Vieno mineralo skaidulos galai rodo kur skaidulos pradėjo augti. Dėl to skaidulos ilgis turėtų atitikti poslinkio dydį. Šlyties poslinkis, kuris galėjo įvykti iki skaidulų augimo pradžios, žinoma, nebūtų „užrašytas“. Didžiausias poslinkio dydis, išmatuotas skaidulų ilgiu, yra gana mažas, 10-20 cm. Ilgesnės skaidulos arba nesusiformuoja, arba neišlieka. Teoriškai, mažiausias suminis poslinkis palei lūžio zoną turėtų atitikti bendrą skaidulų ilgį, bet kada poslinkis viršija metrą ar kelis metrus, tai paprastai darnai nebeįmanoma išmatuoti, visų pirma dėl didžiulių laiko sąnaudų.

Slysmo skaidulos yra aptinkamos ant lūžių paviršiaus, kurie buvo dėl atidengti nueroduojuant vieną iš lūžio bloką. Kadangi skaidulų kristalai auga mažu kampu į lūžio paviršių ir linkę nulūžti arba lygiagrečiai skaiduloms arba stačiu kampu, skaidulų padengti paviršiai sudaro laiptuotą paviršių (Pav. 4.17B). Dėl to, jei braukiant delnu ant tokio paviršiaus jaučiasi glotniai, tai delno slysmo kryptis atitinka su santykine nueroduoto bloko slysmo kryptimi, o jei jaučiasi laiptukai - priešinga kryptimi (Pav. 4.17D).

Jei lūžio paviršius patiria spaudimą, trumpinimas gali būti patalpintas uolienų, ypač klinčių, tirpinimu. Tirpinimas vyksta palei labai netaisyklingus, dantytus paviršius, vadinamus **stilolitais** {stylolite}. Kada jie susidaro palei šlyties plyšį ir dantukų viršūnės yra orientuotos mažu kampu su lūžio paviršiumi, tada kartais jie vadinami **stikolitais** {stickolite}. Šios viršūnėlės yra nukreiptos priešrovę ir gali sudaryti inkongruentinius laiptukus. Jei ant lūžio yra įvairiomis



Paveikslas 4.18: Šlyties krypties trapiuose lūžiuose nustatymo būdai. Blok-diagramos rodo santykį tarp antrinių plyšių ir šlyties krypties palei lūžį. Viršutinė plokštuma yra šlyties plokštuma; sąlyginis slysmas parodytas rodyklėmis. Tempimo plyšiai neturi vagotumo ir gali būti užpildyti antriniais mineralais. Plyšiai su vagotumu yra šlyties plyšiai.

kryptimis išsidėsčiusių nelygumų sienelių, tai esant tai pačiai slysmo kryptiai palei lūžį, vienos sienelės su stikolitinės, o ant kitų formosis slysmo skaidulų linijškumas (Pav. (Pav. 4.17B ir D).

2. Trapių lūžių susidarymo metu, išilgai lūžio gali susidaryti maži antriniai plyšiai, kurie su pagrindine lūžio plokštuma sudaro mažus ar vidutinius kampus, ir dažniausiai jų kryptis yra pasroviui. Šie antriniai plyšiai gali būti arba tempimo arba šlyties. Paprastai tempimo plyšiai nėra štrichuoti {striated} ir gali būti užpildyti antriniais mineralais, o antriniai šlyties plyšiai dažniau yra štrichuoti. Kadangi antriniai plyšiai gali susidaryti tiek kongruentinius, tiek ir inkongruentinius laiptukus ant lūžio paviršiaus, slysmo krypties ieškojimas braukiant delnu ant tokio paviršiaus nėra geras kriterijus šlyties nuorodai ieškoti.

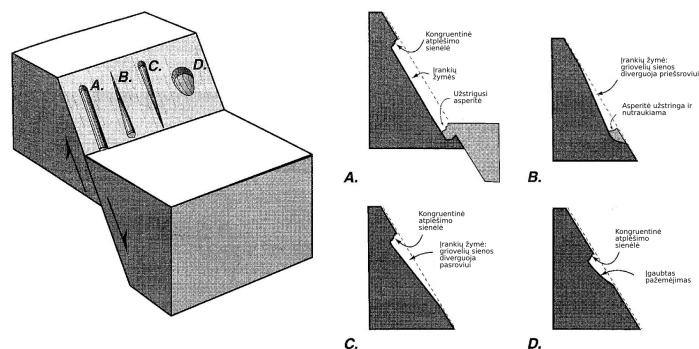
Yra keturi kriterijai, kurie, naudojant antrinius plyšius, yra naudojami nustatyti slysmo kryptį ant lūžio paviršiaus.

a) Žiūrint ant atidengto lūžio paviršiaus, tempimo plyšiai kerta lūžio paviršius ta kryptimi, kuria judėjo nueroduotas lūžio blokas, t.y. plyšiai, esantys žemiau lūžio plokštumos bus palinkę 30° - 50° į tą pusę, į kurią judėjo dingęs blokas (Pav. 4.18A). Šie tempimo plyšiai yra, iš esmės, tas pats kas plunksniški plyšiai, parodyti skerspjūvyje paveiksle skyriuje „Itrūkiai ir plyšiai“. Skerspjūvyje šie plyšiai gali sudaryti **ešelonines** {*en echelon*} plėšimo plyšių eiles, kurios geriausiai matosi pjūvyje žiūrint lygiagrečiai lūžiui ir statmenai slysmo vektoriui.

b) Jei tempimo plyšiai ant atidengto lūžio paviršiaus yra pusmėnulio formos, jų įgaubta pusė yra link tos krypties, į kurią judėjo nueroduotas blokas (Pav. 4.18B). Tokie plyšiai gali akumuliuoti tik labai nedaug antitetinio slysmo ir formuoti inkongruentinius laiptus - blokai tarp šių antrinių plyšių truputį pasisuka į tą pačią pusę kaip šlyties kryptis ant pagrindinio lūžio.

c) Dėl tempimo plyšių, susidariusių dideliu kampu į lūžį, gali sudaryti kongruentiniai laiptukai, jeigu uolienų fragmentai iš pasrovinės plyšio pusės yra atskeliami ir išnešami.

d) Jeigu štrichuoti {striated} antriniai plyšiai įsiskverbia į pagrindinio lūžio bloką, tada jie bus palinkę ta kryptimi, kuria judėjo dingęs lūžio blokas (Pav.



Paveikslas 4.19: Pagal lūžio paviršiaus trynimo (arimo) pobūdį galima nustatyti slysmo kryptį. A. Kai nelygumas (asperitė) viename bloke rėžia kito bloko paviršių susidaro taip vadinamos įrankių žymės. B. Įrankių žymė palaipsniui gilėja pasroviui ir jos sienelės platiėja (diverguoja), kol galiausiai asperitė subyra. C. Įrankių žymės gylis palaipsniui mažėja pasroviui ir jos sienelės siaurėja (konverguoja) kada asperitė pakeliui subyra. D. Įgaubta asperitės duobutė gali susidaryti ant priešsrovinės sienelės dėl atplyšusio gabaliuko įspaudimo.

4.18C). Uolienos pleišto, susidariusio tarp antrinio šlyties plyšio ir lūžio paviršiaus, smaigalys gali būti suplyšiuotas, atskilęs ir išneštas. Toks medžiagos pašalinimas sukuria inkongruentinius laiptukus, kurių paviršius nukreiptas į priešingą pusę nei judėjo nueroduotas lūžio blokas. Laiptukai gali būti linijiški (Pav. 4.18C) arba pusracio formos (Pav. 4.18D).

e) Kai kurie štrichuoti antriniai šlyties plyšiai nesiskverbia žemiau nuo lūžio paviršiaus. Jie gali kaitaliotis su žemiau lūžio paviršiaus įsiskverbiančiais neštrichuotais antriniais tempimo plyšiais (Pav. 4.18E), arba jie gali būti paprasčiausi nelygumų sienelės ant lūžio paviršiaus (Pav. 4.18F). Šiais atvejais, štrichuoti paviršiai žiūri į priešingą pusę nei judėjo nueroduotas blokas. Jei smailaus kampo pleištas tarp antrinio šlyties ir tempimo plyšių nulūžta, susidaro inkongruentinis laiptukas, žiūrintis į priešingą pusę nei nueroduoto bloko judėjimo kryptis (Pav. 4.18E). Dėl to, kad laiptukai susidaro dėl antrinių plyšių, lūžio paviršius, braukiant ranka, jaučiasi lygesnis į priešingą pusę nei judėjo dingęs lūžio blokas. Ši slysmo krypties nuoroda yra priešinga nei ta, kuri susidaro dėl slysmo skaidulų ant lūžio paviršiaus. Taigi, atidumas naudojantis glotnių ir šiurkščių lūžio paviršių slysmo nustatymui yra ypatingai svarbus.

Antriniai šlyties plyšiai, parodyti paveiksle 4.18C, D ir E, yra **Rydelio šlyčių** {Riedel shears}, kuriuos mes aptarsime vėlesniuose skyriuose.

3. Lūžio paviršiaus raižymas {gouging} susidaro kada kietos medžiagos išsikišęs nelygumas - **asperitė** {asperity} - vienoje lūžio sienoje poslinkio metu rėžia per kitą lūžio sieną, ir taip palieka ilgas linijiškas **įrankių žymes** {tool marks}. Išsikišę nelygumai (asperitės) gali būti kietas mineralas ar uolienos dalis. Šių linijškų įrankių žymių (griovelių) sienos yra lygiagrečios, jei nelygumas yra prisitvirtinęs priešingame bloke (Pav. 4.19A); griovelių sienos diverguoja priešsroviui, jei asperitė sminga ir užstringa pasroviui į rėžiamą lūžio sieną (Pav. 4.19B); ir griovelių sienos konverguoja, jei asperitė išskyla iš rėžiamos lūžio sienos (Pav. 4.19C) arba, kas tikriausiai dažniausiai būna, palaipsniui sumažėja,

dėl sunaikinimo šlyties metu. Taigi, naudoti įrankių žymes kaip šlyties krypties nuorodas reikia atsargiai, nebent yra patikimai atpažįstamas kongruentinis laiptas žymės pradžioje, iš kurio asperitė buvo išimta (Pav. 4.19A), arba randama nulaužta asperitė įstrigusi įrankių žymės pabaigoje (Pav. 4.19B). **Asperitės duobutė** {pluck hole; Pav. 4.19D), duobutė kurioje buvo asperitė, yra asimetriškai įgaubta pjūvyje, statmename lūžio paviršiui, su kongruentiniu laiptu, kuris sudaro didelį kampą su lūžio paviršiumi priešsrovinėje duobutės pusėje. Šios duobutės gali būti tuščios arba užpildytos lūžio miltais.

4. Nelygumai ant lūžio paviršiaus gali turėti žalos zoneles, tokias kaip priešsrovinių sienelių trupinimą. Tokie nelygumai gali turėti nupoliruotas ar štrichuotas priešsrovines sienes (Pav. 4.18E).

5. Lūžio miltai gali sudaryti sankaupas pasroviui nuo išsikišimo (nelygumo) iš lūžio paviršiaus ir turėti kūginio gūbrio formą, kuri siaurėja pasroviui. Miltai gali būti ištempti pasroviui ir "užtinkuoti" ant priešsrovinės tuštumėlių pusės. Kartais galima stebėti lūžių miltus besidriekiančius pasroviui iš asperitės duobutės.

Čia nėra pateikti visi lūžio paviršiaus bruožai, kurie gali būti šlyties krypties nuorodos. Yra daugiau, bet rečiau sutinkamų bruožų, leidžiančių nustatyti trapių lūžių slysmo kryptį. Nėra paprastų taisyklių, leidžiančių lengvai tai padaryti, todėl kiekvienas tyrimas turi būti atliekamas individualiai ir kruopščiai, ir taikant šiuos kriterijus.

Plastiškos šlyties zonos irgi turi mažo mastelio šlyties krypties nuorodų. Plokšteliniai mineralai tampa lygiagretūs ir susiformuoja foliacija, pažymėta brūkšniuotomis linijomis, išskyrus B, ir raide S dalyje A dalyje, paveiksle 4.20), kuri sudaro apie 45° kampą su šlyties zona, bet artėjant prie zonos foliacija pasidaro maždaug lygiagreti šlyties zonai (Pav. 4.20A). Toks sigmoidinis raštas yra šlyties krypties nuoroda, kaip parodyta paveiksle.

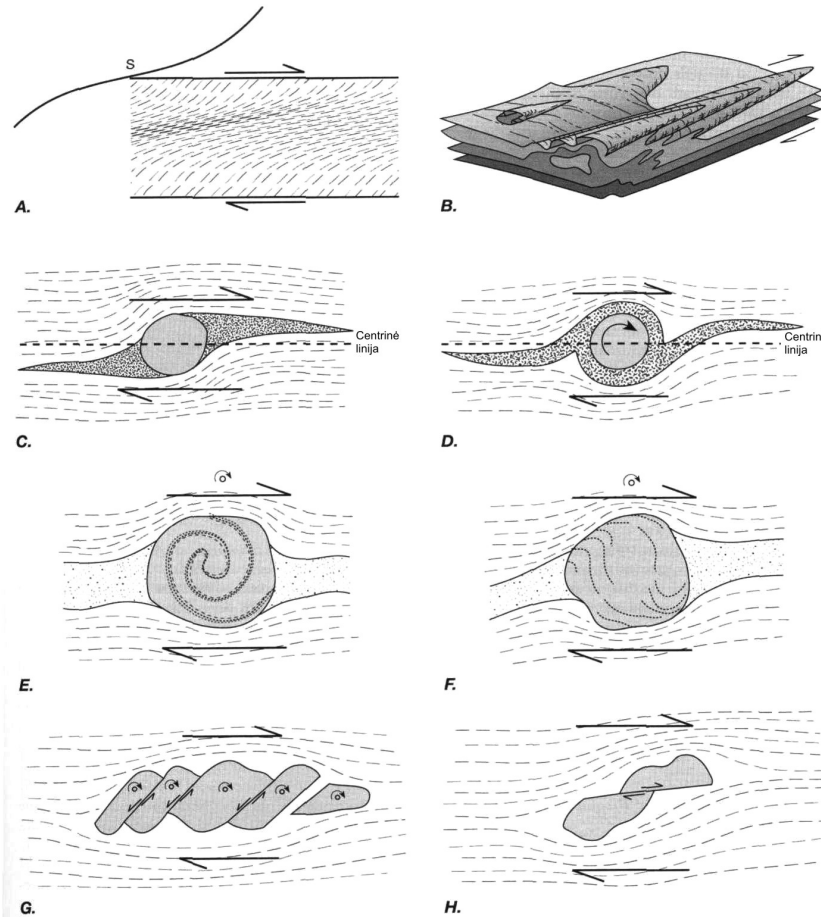
Plastiškos šlyties zonos taip pat kartais turi siaurėjančio vamzdžio formos raukšles, kurios vadinamos **nosies** {nose} arba **dėklo** {sheath} raukšlėmis (Pav. 4.20B). Ilgoji šių raukšlių ašis yra maždaug lygiagreti slysmo linijai, o siaurėjantis galas rodo lūžio bloko judėjimo kryptį.

Įdomios slysmo nuorodos susidaro, jei šlyties zonose (uolienose) yra didelių kristalų. Kai kurie reliktiniai kristalai, vadinamais **porfyroklastais**¹⁰, išgyvena pirminę uolienos šlyties deformaciją bei susmulkinimą. Kiti yra **porfyroblastai**¹¹ - kristalai, kurie augo iki gana didelio dydžio metamorfizmo ar deformacijos metu.

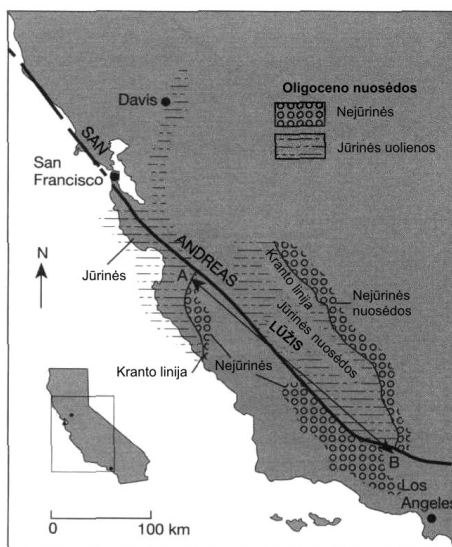
Porfyroklastai milonituose kartais turi simetriškas "uodegas", sudarytas iš smulkiagrūdžių grūdelių, kurie yra perkristalizuoti nuo to pačio porfyroklasto kraštų. Uodegų asimetrija gali būti slysmo nuoroda. Yra išskiriamos dvi skirtingos uodegų morfologijos, σ ir δ . σ porfyroklastuose, uodegos išsitempia į skirtingas grūdo puses palei foliaciją, "pasroviui" matricos grūdelių judėjimui, ir grūdeliai nekerta menamos centrinės linijos - lygiagrečios foliacijai ir einančios per porfyroklasto centrą (Pav. 4.20C). δ -tipas yra kilęs σ -tipo porfyroklasto sukimosi kryptimi, atitinkančią šlyties judesį, o uodegos kerta centrinę liniją (Pav. 4.20D). Panašios formos, nesimetriškos uodegos gali susidaryti dėl mineralo, skirtingo nuo porfyroklasto, kristalizacijos asimetriškose zonose, vadinamose **slėgio** arba

¹⁰lot. porfyras - purpurinis + gr. klastos - sulaužytas. Terminas porfyras, uolienos su dideliais mineralais, kilo iš Romos, kurioje imperatorių statulos buvo daromos iš purpurinių vulkaninių uolienų su dideliais feldšpatų fenokristais (dideli, nedeformuoti kristalai magminėje uolienoje).

¹¹lot. porfyras - purpurinis + gr. blastos reiškia augimas.



Paveikslas 4.20: Šlyties krypties plastiškose šlyties zonose nustatymo būdai. A. Foliacijos, susidariusios dėl plokštuminių mineralų lygiagrečios orientacijos, išlenkimo kryptis. B. Įdėklinių raukšlių orientacija ir asimetrija, parodyta nuėmus supančias uolienas. C. Porfyroklastas su σ -tipo uodegomis, sudarytomis iš porfyroklasto perkristalizuotos dalies, ir tų uodegų asimetrija. D. δ -tipo uodegos. E. Porfyroblasto, tokio kaip granatas ar staurolitas, turinčio savyje spiralinę virtinę mineralinių intarpų, sukimosi kryptis. F. Intarpų virtinė, rodanti nedidelį porfyroblasto sukimąsi nėra savaimė pakankamas poslinkio krypties įrodymas. G ir H. Šlyties kryptis palei plyšių plokštumas mineraluose, pvz. feldšpate ar žerutyje, priklauso tiek nuo šlyties (slysmo) krypties palei lūžį, tiek nuo kampo tarp plyšio ir lūžio plokštumų.



Paveikslas 4.21: Oligoceno nuosėdinio baseino kranto linijos perstūmimas apie 300 km palei San Andreas lūžį, Kalifornijoje, JAV. Taškai A ir B iš pradžių buvo vienas šalia kito.

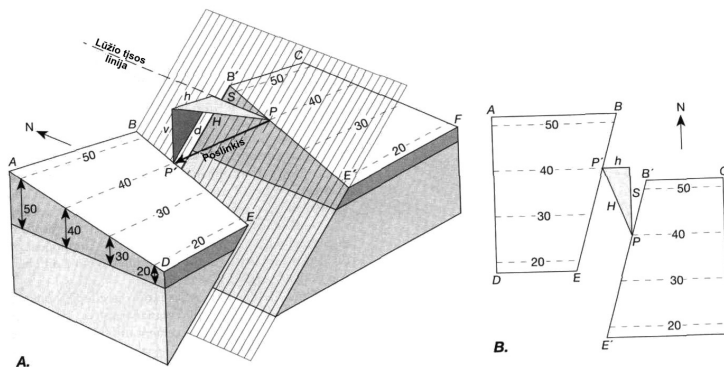
keitos šešėliais {pressure arba strain shadow}. Šias uodegas sunku interpretuoti vienareikšmiškai ir jos neturi būti supainiotos su juostomis, sudarytomis iš perkristalizuoto porfyroklasto mineralo.

Porfyroblastai nesideformuoja kartu su likusia uoliena, bet sukasi kaip kietas kūnas plastiškos matricos deformacijos metu. Dažniausi mineralai, kurie sudaro porfyroblastus yra granatas ir staurolitas. Jiems deformacijos metu augant, jie įtraukia greta esančius mineralus, pvz., žėručius, iš matricos. Dėl kartu vykstančio porfyroblasto sukimosi ir augimo susidaro mineralinių (pvz. žėručio) intarpų spiralinė virtinė porfyroblaste, pagal kurią galima pasakyti porfyroblasto sukimosi kryptį, o tuo pačiu ir šlyties zonos šlyties kryptį (Pav. 4.20E, F). Tais atvejais, kai porfyroblasto intarpai daro tik nedidelę rotaciją, šlyties krypties nustatymas yra nepatikimas, kadangi tokios mineralinių intarpų virtinės gali būti išlikę krenuliacijos pirminėje foliacijoje (apie krenuliacijas bus paaiškinta vėliau), o ne porfyroblasto sukimasis (Pav. 4.20F).

Kai kurie porfyroklastiniai mineralai, tokie kaip žėrutis ir feldšpatas, yra linkę slysti palei tam tikrus plyšius grūdelyje arba kristalografines plokštumas, ir taip patalpinti deformaciją supančioje matricoje. Jeigu tie plyšiai iki deformacijos sudaro didelį kampą su šlyties plokštuma, tada poslinkio kryptis palei šias plyšių ar kristalografines plokštumas yra priešinga nei talpinančioje matricoje (Pav. 4.20G). O jeigu tokie plyšiai turi pirminį mažą kampą su šlyties plokštuma, tada šlyties kryptis ant plyšių plokštumų bus tokia pat kaip ir matricoje (Pav. 4.20H).

4.3.4 Dalinis poslinkio nustatymas pagal stambias struktūras

Regionuose, kur lūžio poslinkis matuojamas dešimtimis ir šimtais kilometrų, dideli geologiniai objektai, kurie buvo perstumti palei lūžius, gali būti panau-

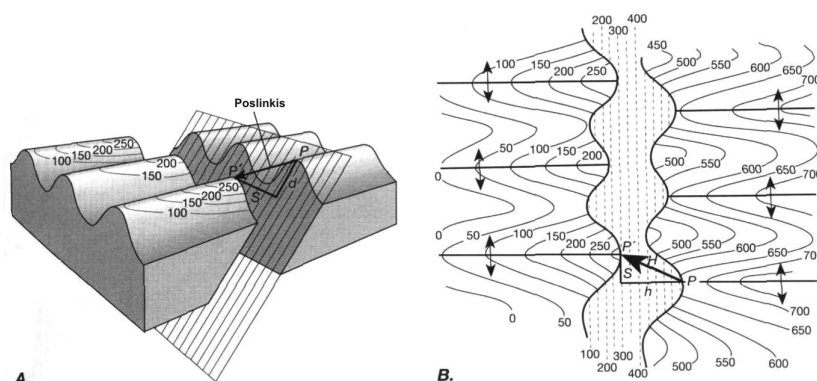


Paveikslas 4.22: Lūžio interpretacija iš pertrūkio izopachų žemėlapyje. A. Blokdiagrama, rodanti kintančio storio sluoksnį, perkirstą lūžiu. Izopachų linijos yra nubrėžtos ant sluoksnio paviršiaus. Tikrasis poslinkis ir tjos-slysmo (S), polinkio-slysmo (d), horizontali (H), ir vertikali (v) sudedamosios yra parodytos. Tam, kad palengvinti trimačio brėžinio supratimą, pavaizduotas ypatingas atvejis, kuriame izopachos yra lygiagrečios sluoksnio paviršiaus tjsai ir statmenos lūžio tjsai. B. Struktūros, pavaizduotos A, izopachų žemėlapis. Poslinkio horizontali sudedamoji (H) yra nustatoma sujungiant taškų P ir P' (kurie žymi tą pačią izopachą skirtingose lūžio pusėse) projekcijas žemėlapyje. Poslinkio vektoriaus tjos-poslinkio sudedamoji (S) yra nustatoma sujungiant tos pačios reikšmės izopachų pratęsimus su linija, kuri yra lygiagreti lūžio tjsai.

doti nustatyti lūžio poslinkio linijai ir slysmo kryptį, o taip pat ir poslinkio dydžio įvertinimui. Tokie objektai gali būti krantų linijos, nuosėdinių baseinų kraštai, ir ryškiai išsiskiriančių regione nuosėdų šaltiniai ir jų sedimentacijos vietos. Paveiksle 4.21 pavaizduotas Oligoceno nuosėdinio baseino, vakarinėje Kalifornijoje (JAV), paleogeografinis žemėlapis ir baseiną kertantis San Andreas lūžis. Skirtingi sutartiniai ženklai atskiria jūrines nuo neįurinių nuosėdų. Kranto linijos perstūmimas palei lūžį nuo A iki B rodo 300 km dešininės separacijos perstūmimą nuo Oligoceno laikų.

Izopachų žemėlapiai¹² yra žemėlapiai, kuriuose pavaizduoti tam tikro geologinio vieneto storių izolinijos (kontūrai). Jeigu yra dėsningas sluoksnio storio kitimas, perstūmimas palei lūžį (Pav. 4.22A) gali atrodyti kaip pertrauktis ant izopachų žemėlapyje (Pav. 4.22B). Kiekviena izopacha yra unikali vienodo sluoksnio storio linija, ir tos pačios reikšmės izopachų skirtingose pertraukimo (lūžio) pusėse panaudojimas (sutapatinimas) galėtų, iš principo, leisti nustatyti poslinkio horizontalią sudedamąją (H) ar tjos-slysmo komponentę (S). Tačiau jei duomenys yra iš gręžinių karotažo (diagrafijos), jie sunkiau interpretuojami, nes gręžiniai paprastai yra nepakankamai tankiai išdėstyti. Taigi, izopachų vieta ir jų susikirtimas su lūžiu yra nustatomi apytiksliai. Be to, nebent lūžio tjsa yra žinoma, poslinkio tjos-slysmo sudedamoji negali būti nustatyta tiksliai. Kadangi izopachų žemėlapiai neturi informacijos apie absoliutų aukštį, jie negali būti naudojami perstūmimo polinkio-slysmo ir vertikalios sudedamųjų nustatymui.

¹²Terminas izopacha yra kilęs iš graikų žodžio isos, reiškiantį vienodas, lygus, ir pathos, kuris reiškia storį.



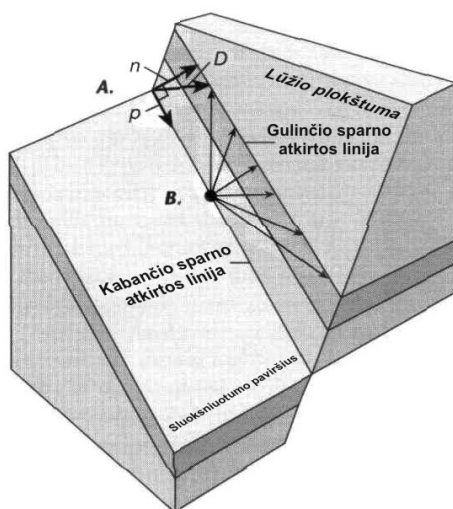
Paveikslas 4.23: Lūžio interpretacija iš stratoizohipsių žemėlapis. A. Trimatė diagrama vaizduojanti suraukšlėtą stratigrafinio kontakto paviršių, kuris buvo perkirstas ir perstumtas lūžiu. Ant kontakto paviršiaus užneštos stratoizohipsės. B. Struktūros, pavaizduotos A, izopachų žemėlapis. Poslinkio horizontali sudedamoji (H) yra nustatoma sujungiant taškus žemėlapyje, kurie yra vertikaliai suprojektuoti žymekliniai raukšlės šarnyro taškai P ir P', esantys skirtingose lūžio pusėse. Tįsos-slysmo sudedamoji (S) yra lygiagreti lūžio tįsai, o horizontali polinkio-slysmo sudedamoji (h) yra statmena lūžio tįsai.

Stratoizohipsių {structure contour} žemėlapiai yra žemėlapiai, rodantys tam tikro geologinio kūno, paprastai stratigrafinio horizonto, vienodo aukščio (gylio) linijas. Iš tokių žemėlapių galima nustatyti lūžius, esančius žemiau Žemės paviršiaus (Pav. 4.23). Jei stratoizohipsės rodo linijišką struktūrą, pvz. raukšlės šarnyrą, kurios tęsinys gali būti surastas kitoje lūžio pusėje (Pav. 4.23A), lūžio poslinkio vektorius gali būti nustatytas. Lūžio poslinkio horizontali sudedamoji (H; Pav. 4.23B) yra nustatoma sutapatinant stratoizohipsių raštą abiejose lūžio pusėse; vertikali sudedamoji nustatoma iš aukščių skirtumo prieš tai buvusiuose sugretintuose struktūriniuose objektuose. Jeigu lūžio tįsa yra žinoma, galima panaudoti trigonometrija nustatyti 1) perstūmimo tįsos-slysmo sudedamąją (S) iš horizontalios sudedamosios (H) ir 2) tiktąjį poslinkio dydį (D) iš tįsos-slysmo (S) ir polinkio-slysmo (d) sudedamųjų (Pav. 4.23A). Kaip ir izopachų atveju, tikslumas priklauso nuo pačių stratoizohipsių tikslumo.

Kai kuriais, labai retais, atvejais pasinaudoti geomagnetiniu lauku (tiksliau, *paleomagnetiniais tyrimo metodais*) santykinio platuminio poslinkio palei lūžius nustatymui. Nuosėdinės ir magminės uolienos dažnai išlaiko savyje informaciją apie magnetinio lauko kryptį uolienos susidarymo metu. Jei tos uolienos buvo perstumtos dideliu atstumu, pvz. pagal ilgą stūmį, paleomagnetinio lauko krypties skirtumas gali būti panaudotas poslinkio vektoriaus nustatymui. Tačiau paleomagnetiniai tyrimai negali nustatyti ilguminio judėjimo, o platuminis poslinkis turi būti didesnis nei 10° .

4.3.5 Nevienareikšmiai poslinkio nustatymai

Dažnai pagrindinis lūžio įrodymas yra kažkokios plokštuminės struktūros, dažnai nuosėdinio sluoksniuotumo, perstūmimas. Yra svarbu suprasti, kad vienas perstūmimas pats savaime niekada nerodo lūžio poslinkio, nepriklausomai nuo

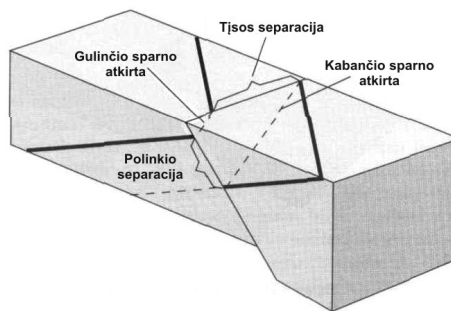


Paveikslas 4.24: Lūžių perstumti plokštuminiai objektai nėra vienareikšmės lūžio poslinkio nuorodos. Tikrasis poslinkis palei lūžį (D) gali būti nusakomas kaip suma sudedamos, esančios statmenai plokštuminio objekto atkirtos linijai (n), ir sudedamos, esančios lygiagrečiai atkirtai (p). B. Kadangi poslinkio lygiagreti sudedamoji (p) neturi pamatuojamo perstūmimo, bet kokia p reikšmė duos tokią pat geometriją lūžio plokštumai, ir poslinkis D nebus vienareikšmiškai nustatomas.

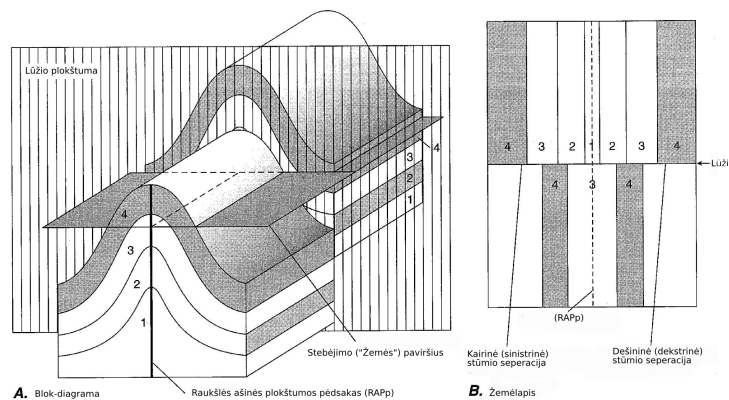
to, kaip lūžis atrodo atodangoje. Priežastį nesunku suprasti (žr. Pav. 4.24). Išreikškime tikrąjį poslinkio vektorių (D) kaip sumą sudedamųjų, esančių lūžio plokštumoje, kurių viena yra statmena (n), o kita lygiagreti (p) **atkirtos linijai** {cutoff line}, kuri yra linija, susidaranti susikertant plokštuminei struktūrai ir lūžiui (Pav 4.24A). Normalinė sudedamoji (n) yra atstumas tarp porinių¹³ atkirtos linijų kabančiame ir gulinčiame sparnuose, išmatuotas statmenai atkirtos linijoms. Šis atstumas yra lengvai išmatuojamas. Jei poslinkis vyksta tik palei sudedamąją (p), kuri yra lygiagreti atkirtos linijai, atkirtos linijos nekeičia savo padėties ar orientacijos, ir negali būti išmatuotas. Dėl to tikrasis poslinkis (D) negali būti vienareikšmiškai nustatytas. Paveiksle 4.24B pavaizduoti šeši iš begalybės poslinkio vektoriai, kurie turi tokią pačią geometriją lūžiu perstumtai sluoksniuotumo plokštumai. Tarp tų šešių vektorių, yra sprūdžio, antsprūdžio, kairinio ir dešinio poslinkio sudedamosios. Kiekvienas vektorius turi tą pačią sudedamąją (n), statmeną atkirtos linijai, bet skirtingas sudedamąsias (p), lygiagrečias atkirtai.

Tuo būdu, jei žinios apie lūžį apsiriboja tik lygiagrečių plokštuminių struktūrų perstūmimu, neįmanoma nustatyti jų poslinkio palei lūžį. Tada mes naudojame **separaciją** {separation}, kuri, šiuo atveju, yra atstumas, išmatuotas tam tikra kryptimi tarp to pačio plokštuminio bruožo skirtingose lūžio pusėse (Pav. 4.25). Separacija leidžia mums nustatyti tik poslinkio sudedamąją, statmeną atkirtos linijai. Bet kokia sudedamoji, lygiagreti tai linijai yra nenustatoma. Paveiksle pavaizduota dvi dažnos separacijos ir kryptys, palei kurias jos išmatuotos - **tįsos**

¹³Kada lūžis perkerta ir perstumia kokį nors plokštuminį kūną, ant abiejų lūžio sienų susidaro po atkirtos liniją. Taigi, galima sakyti, kad viena atkirtos linija visada turi sau porininkę.



Paveikslas 4.25: Blok-diagrama, vaizduojanti polinkio-slysmo lūžiu perstumto sluoksnio tįsos separaciją ir polinkio separaciją, kur gulintis sparnas buvo nuero- duotas iki to pačio topografinio lygio kaip ir kabantis sparnas.



Paveikslas 4.26: Pavyzdys, kaip suraukšlėti sluoksniai, kurie buvo perstumti lūžiu, gali sukurti skirtingas separacijas. A. Polinkio-slysmo vertikaliu lūžiu perstumta raukšlė. B. Žemėlapis, esantis horizontalios plokštumos lygmenyje dalyje A, rodantis priešingas separacijas skirtingose raukšlės pusėse.

separacija {strike separation}, išmatuota lygiagrečiai lūžio tįsai, ir **polinkio separacija** {dip separation}, išmatuota lygiagrečiai lūžio polinkio linijai. Kitos separacijos, kurios kartais naudojamos, yra **stratigrafinė separacija** {stratigraphic separation}, matuojama statmenai sluoksniuotumo plokštumai; **vertikali separacija** {vertical separation}, matuojama vertikalia kryptimi (tai yra vertikali polinkio ir stratigrafinės separacijos sudedamoji); ir **horizontali separacija** {horizontal separation}, matuojama plokštumoje, kuri yra statmena lūžiui (tai yra polinkio separacijos horizontali sudedamoji).

Ant to pačio lūžio, separacija pamatuota vienai plokštumai yra skirtinga nuo separacijos, pamatuotos ta pačia kryptimi, bet jau kitaip orientuotai plokštumai. Iš tikrųjų, esant atitinkami plokštuminių objektų orientacijai, viena tįsos separacija gali būti dešininė, o kita kairinė. Pavyzdžiui, perstumtos palei lūžį raukšlės priešingi sparnai rodys priešingas separacijas (Pav. 4.26). Panašiai, polinkio separacija priešinga poslinkio kryptis dali susidaryti esant atitinkamos orientacijos plokštumoms ir poslinkiams.

Tai pabrėžia separacijos nevienareikšmiškumą ir tai, kad neįmanoma charakterizuoti lūžį naudojantis tik separaciją. Tačiau, jei separaciją tam tikromis kryptimis galima nustatyti dviem skirtingos orientacijos plokštumoms, perstumtoms lūžio, tada yra įmanoma nustatyti poslinkio dydį ir liniją. Tiesą sakant, dviejų susikertančių plokštumų sudaryta linija, kuri perstumiama lūžio, yra unikalus žymeklinis taškas abiejuose lūžio sparnuose (žr. pav. 4.16A).

4.3.6 Poslinkio - ilgio sistematika

Poslinkis negali būti vienodas palei visą lūžio paviršių, kadangi jos turi būti nulinis ties ribine linija, ir paprastai yra didžiausias lūžio centrinėje dalyje (žr. poskyrį 4.4.2). Poslinkio dydis irgi mažėja atsirandant gretimais lūžiams, o taip pat dėl persidengimo su tais gretimais lūžiais. Taigi, reikia tikėtis poslinkio dydžio pokyčių matuojant poslinkio atstumus palei lūžį.

Bendrai imant, statistiniai duomenys rodo, kad maksimalus lūžio poslinkis maždaug linijiškai priklauso nuo lūžio ilgio.

4.4 Lūžių geometrija

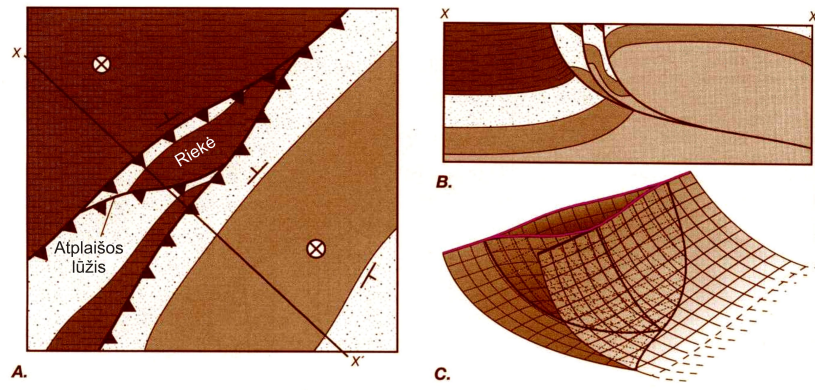
Visi lūžiai yra daugiau ar mažiau netaisyklingi paviršiai (ir labai retai kada plokštumos), kurie trimatėje erdvėje turi pradžią ir pabaigą. Tačiau lūžiai žemės paviršiuje, atodangoje, kerne, žemėlapyje ar pjūvyje dažniausiai matomi kaip pertraukties linijos ar zonos, kurios turi tam tikrą ilgį (Pav. 4.27A). Taigi, analizuodami lūžius ant dvimačių paviršių (Pav. 4.27A ir B), ignoruojame faktą, kad lūžiai yra trimatės struktūros (Pav. 4.27C) ir tai yra labai svarbu siekiant suprasti lūžių kinematiką ir susijusią deformaciją. Šiame poskyryje mes aptarsime įvairius lūžių geometrijos bruožus.

4.4.1 Lūžio ilgis

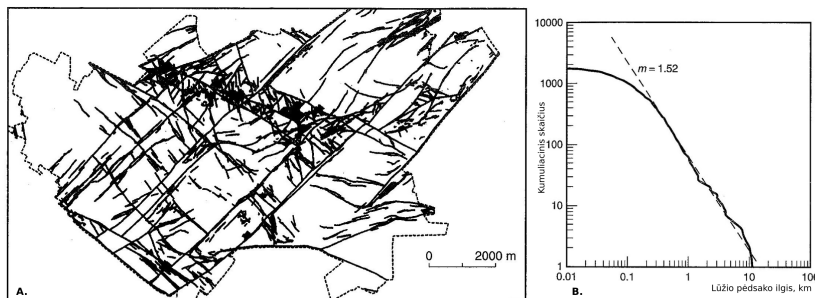
Lūžių užnešimas ant žemėlapiu turėtų atspindėti lūžių ir jų segmentų ilgius. Kada lūžiai ir su jais artimai susiję šlyties plyšiai yra užkartografuoti įvairiais masteliais, lengvai pastebima, kad yra kur kas daugiau trumpų lūžių nei ilgų (Pav. 4.28A ir B). Kumuliatyvinio (kaupiamojo) lūžių, kurių ilgis yra L_f arba ilgesnis, skaičiaus N pasiskirstymas rodo, kad ilgis paklūsta laipsnio dėsniumi {power law; (Pav. 4.28B) ir tai reiškia, kad vienos lūžių sistemos lūžių ilgiai turi fraktalinį, arba savipanašų, pasiskirstymą (palygink su Dėžute 4.6).¹⁴

$$N = \frac{K}{L_f^m} \text{ or } \log N = \log K - m \log L_f \quad (4.1)$$

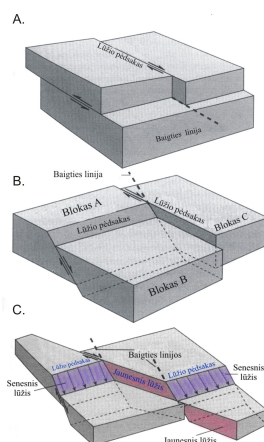
¹⁴Atkreipkite dėmesį, kad Dėžutėje 2-1 buvo aptariama plyšių sistemų fraktalinė geometrija, kurią mes aprašėme tyrinėdami plyšių pėdsakų pasiskirstymą dvimatėje plokštumoje. Anuo atveju, fraktalinis matas atspindi kiek, iki kokio lygio, plyšių pėdsakai užpildo plokštumą, kurioje jie yra. Tačiau šiuo atveju, aptariame tik plyšių ilgių pasiskirstymą - ilgis yra viendimensinis dydis ir neatspindi, kaip plyšių pėdsakai pasiskirstę dvimatėje erdvėje. Taigi, tiek plyšių pėdsakų pasiskirstymas plokštumoje, tiek ir plyšių ilgių pasiskirstymas paklūsta laipsnio dėsniumi (cf. pirmą lygtį (4.1) su antra antra lygtimi (2-1.3 4.6)), tačiau šie du pasiskirstymai apibūdina plyšių serijų charakteristikas skirtingose dimensijose.



Paveikslas 4.27: Trimatis lūžio pavaizdavimas. A. Geologinis žemėlapis, vaizduojantis atsišakančius žvyninius antsprūdžių lūžius, sujungtus šalutiniais atplaišų lūžiu, kuris apriboja lūžių riekę. B. XX' skerspjūvis per lūžių sistemą dalyje A. C. Trimatė lūžių dalyje A ir B geometrija.



Paveikslas 4.28: Lūžių ilgio sistematika lūžiams, kartografuotiems Jungtinės karalystės Pietų Jorkšyro akmens anglies plotuose. A. Lūžių žemėlapis. Plotas - 87 km². Užnešti 2257 lūžių pėdsakai, kurių ilgis kinta tarp 10 metrų ir 12 kilometrų. Lūžiai, kurių tįsa yra ŠR ir ŠV yra nuosprūdžiai; ŠR tįsos lūžiai susidarė seniausi. Lūžiai, kurių tįsa yra VŠV yra dešiniųjų stūmių zonos. B. Kumuliacinio dažnio ir lūžių pėdsakų ilgio diagrama, ŠR ir ŠV nuosprūdžiams (bet ne stūmiams), kartografuotiems žemėlapyje A.



Paveikslas 4.29: Blok-diagramos rodančios baigties linijų geometriją ties lūžio susikirtimu. A. Dešininis stūmis užsibaigia ties horizontaliu ir vienalaikiu lūžiu. Baigties linija yra lygiagreti slysmo kryptčiai. B. Jaunesnis sprūdis užsibaigia ties senesniu vertikaliu lūžiu. Baigties linija yra lygiagreti slysmo linijai, esančiai ant užbaigto sprūdžio. C. Senesnis sprūdis yra perstumtas ir užsibaigia prie jaunesnio stūmio. Baigties linija nėra lygiagreti nei vieno lūžio slysmo linijoms.

kur K ir M yra empirinės konstantos.¹⁵ Toks santykis rodo, kad tarp lūžių ir susijusių šlyties plyšių, galima tikėtis rasti labai daug smulkių šlyties plyšių ir tik keletą didelių lūžių.¹⁶

4.4.2 Terminacinės linijos

Visi lūžiai yra erdviniai paviršiai, nesitęsiantys be galo. Tai yra lengva užmiršti tai, nes dažniausia lūžiai atodangose atrodo kaip linijos ant santykinai dvimačio paviršiaus, ir žemėlapyje (Pav. 4.27A) ar skerspjūvyje (Pav.4.27B) vaizduojamos kaip linijos. Nors toks vaizdavimas yra naudingas, jis lyg ir skatina mus užmiršti apie tikrąjį 3D vaizdą. (Pav. 4.27C).

Lūžio užsibaigimas Žemės paviršiuje (t.y. jo išėjimas į paviršių) yra **lūžio pėdsakas** {fault trace} ant topografinio paviršiaus (Pav. 4.29). Tai gali būti

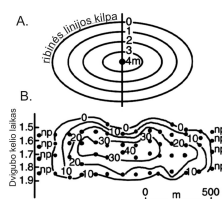
¹⁵Idealiu atveju, šios konstantos turėtų būti gaunamos suskaičiuojant visus lūžius, bet kokio ilgio, tam tikra uolienų tūryje. Tačiau tikrovėje, pamatyti ir suskaičiuoti visų plyšių esančių per visą Žemės plutos gylį yra neįmanoma, todėl matavimai paprastai atliekami nustatant lūžių ilgus ant dvimačio paviršiaus, kaip tai parodyta paveiksle 4.28. Kadangi trumpesnis lūžis turi mažesnę tikimybę kirsti tam tikrą pasirinktą stebėjimo paviršių negu ilgas lūžis, eksponentė m nustatyta iš dvimačio paviršiaus turi būti 1 mažesnė nei eksponentė nustatyta atliekant pilno geologinio (uolienų) tūrio tyrimą (cf. aptarimą Dėžutės 2-1 (ii) pradžioje, 4.6).

¹⁶Tai galėtų būti apibūdinta ketureiliu:

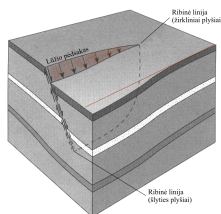
Lūžiai dideli turi daug mažų lūžiukų
 Devynios jų galybės
 O tie maži lūžiukai - turi savo mažuliukų
 Ir taip lig begalybės

Tiesa, visada yra viršutinė ir apatinė ribos, už kurių fizinė sistema nebeapsakoma - taigi, niekas nėra iki begalybės.

Twiss and Moores 2007, vertimas A. Čečio.



Paveikslas 4.30: A. Teorinė lūžio paviršiaus paviršiaus forma ir poslinkių (metrais) izolinijos. Didžiausias poslinkis paviršiaus centre, mažiausias - ant ribinės linijos. B. Sprūdžio poslinkių kontūrinė diagrama. Skaičiai ant kontūrų yra poslinkių dydžiai (milisekundėmis) išmatuoti seisminėmis bangomis; np – poslinkio nėra.

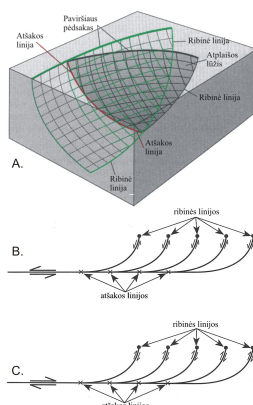


Paveikslas 4.31: Ribinių linijų geometrija. Poslinkis ant sprūdžio užgęsta palei tąsą ir žemyn. Ribinė linija yra ištisinė pusiau elipsinė linija. Kampas, kurį ji sudaro su poslinkio linija keičiasi einant palei lūžio perimetrą, pradedant nuo trečio tipo (šlyties) plyšio (ribinė linija lygiagreti poslinkiui) iki antro tipo (žirklinio) plyšio (ribinė linija statmena slysmui).

pirminė lūžio riba arba tai gali tai gali būti “išlindusi” lūžio riba dėl erozijos. Iš principo tai yra atkirtos linija Žemės paviršiuje.

Jeigu vienas lūžis užsibaigia ties kitu to paties amžiaus lūžiu, jų sankirtos linija turi būti lygiagreti abiejų lūžių *poslinkio* kryptims (Pav. 4.29A). Jei jaunesnis lūžis užsibaigia ties senesniu lūžiu, jaunesnio lūžio poslinkio *vektorius* turi būti lygiagretus baigties linijai (Pav. 4.29B). Jeigu senesnis lūžis yra kertamas ir perstumiamas jaunesnio lūžio, senesnio lūžio baigties linija ant jaunesnio lūžio neturi jokio ryšio su abiejų lūžių *poslinkio kryptimi* palei abu lūžius (Pav. 4.29C). Didelio poslinkio stūmiuose (Pav. 4.29C), kartais galima stebėti sankirtas panašias į parodytas paveiksle 4.29B ir to teisingai neatpažinus, galima neteisinga interpretacija tiek santykinio lūžio amžiaus, tiek ir poslinkio krypties.

Pažvelgus į gausiais lūžiais pasižymincios teritorijos geologinį žemėlapi yra matyti, kad atskirų lūžių pėdsakų linijos turi ribotą ilgį. Taigi, lūžiai nesitęsia iki begalybės, jie yra riboto dydžio paviršiai ir užsibaigia **baigties (terminacinėmis) linijomis** {termination line}. Lūžių paviršiai paprastai yra elipsiniai, su ašių proporcija tarp 2:1 ir 3:1 (Pav. 4.30). Maksimalus lūžio poslinkis yra elipsės centre ir artėja prie nulio ties baigties linija, kuri šiuo atveju vadinama **ribine linijos kilpa** {tip-line-loop} arba tiesiog **ribine linija** {tip line}. Ši kilpa yra menama linija jungianti **ribinius taškus** {tip points}, kur lūžio paviršius baigiasi ir prasideda vientisos uolienos (Pav. 4.30). Baigties linija, priklausomai nuo lūžio užsibaigimo geometrijos, turi skirtingus bruožus.



Paveikslas 4.32: Atplaišų lūžiai ir atšakos linijų geometrija. A. Atplaišų lūžio trimatė geometrija rodo kaip lūžio paviršius yra pilnai apribojamas paviršiaus pėdsaku, atšakos linija arba ribine linija. B. Tempimo žvyninių lūžių zonos. C. Gniuždymo žvyninių lūžių zonos.

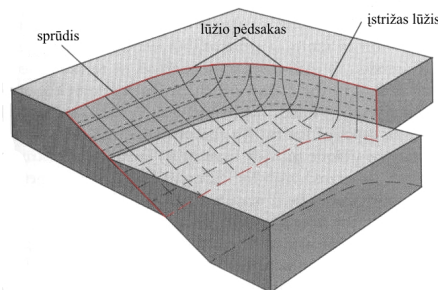
Kitaip sakant, lūžis gali užsibaigti ne tik kaip baigties linija ties kitu lūžiu ar paviršiumi, bet ir tada, kaip lūžio deformacija išsisklaido ir uolienu pertraukimo nebėra - ties ribine linija (Pav. 4.31 ir 4.32) - linija skiriančia pertrauktas uolienas nuo vientisų, nors ties pačia linija, pažiūrėjus giliau, tarpatominiai ryšiai yra išstempti. Paveiksle 4.31 pavaizduota ribinė linija yra lygiagreti lūžio poslinkio vektoriui toje vietoje, kur ribinė linija susikerta su Žemės paviršiumi, ir yra statmena poslinkiui gilumoje (kur ji susikerta su vertikalia blokdiagramos sienele). Kadangi, kaip jau minėta, lūžio ribinės linijos yra maždaug elipsinės formos, ant vienos lūžio plokštumos galimi visi įmanomi kampai tarp šių dviejų galinių narių - nuo nulio iki 90. Tuo būdu, atskiras lūžis formavosi turėdamas savybių būdingų tiek antro, tiek ir trečio tipo plyšiams, priklausomai nuo santykinio poslinkio ir ribinės linijos orientacijos.

Išeina, kad žemiau Žemės paviršiaus, lūžis gali būti apribotas iš visų pusių ištisine ribine linija, kuri susijungia abiemis galais su lūžio pėdsaku Žemės paviršiuje. **Akli lūžiai** {blind faults} yra tokie, kurie neišeina į paviršių ir yra pilnai apriboti baigties linijos, kuri yra arba ribinė linija arba atšakos linija (žr. žemiau). Dėl erozijos, žemės paviršius gali pasiekti aklą lūžį.

Atšakos linija {branch line} yra linija, nuo kurios lūžis išsišakoja į du tokio pat tipo lūžius, arba du to paties tipo lūžių paviršiai sueina į vieną paviršių. Visi lūžio segmentai pavaizduoti paveiksle 4.32A yra pilnai apsupti arba baigties linija, kuri yra lūžio pėdsakas Žemės paviršiuje, arba ribine linija, arba atšakos linija¹⁷. Paveiksle 4.27C, žemiau paviršiaus lūžio riekė palei kraštus apribota atšakos linijomis.

Visų tipų lūžiai dažnai užsibaigia **atplaišų** lūžiais {splay fault}, kurie yra mažesni lūžiai atsišakojantys nuo pagrindinio lūžio (Pav. 4.32A). Kada atplaišų lūžiai atsišakoja nuo pagrindinio lūžio maždaug vienodais intervalais ir geometriškai yra panašūs, jie sudaro **žvyninius lūžius** {imbricated fan}, kurie gali būti tem-

¹⁷ išskyrus, aišku, pėdsaką ant vertikalios kairio bloko sienelės - ši linija yra ne geologinė ir nubrėžta tik lūžio vizualizacijos gilumoje



Paveikslas 4.33: Lūžio paviršiaus orientacijos pokytis pakeičia sprūdį į vertikalų įstrižo poslinkio lūžį. Baigties linijos nėra.

pimo {extensional} (Pav. 4.32B) arba gniuždymo {contractional} (Pav. 4.32C).

Kiekviena atplaiša, kaip kiekvienas kitas lūžis, baigiasi jos baigties linija arba išeina į laisvą paviršių (kitą lūžį ar žemės paviršių). Pagrindinio lūžio išsišakojimas reikalingas tam, kad deformacija išsiskirstytų po didesnę uolienų tūrį ir taip sumažintų deformacijos intensyvumą sukoncentruotą vienoje vietoje.

Dviem atvejais lūžis gali užsibaigti, iš esmės, be ribinės linijos. Vienu atveju, kada lūžis išlenktas, jo tipas gali pilnai keistis ir ribinės linijos tarp jų nebus. Paveiksle 4.33 pavaizduotas sprūdis, kurio orientacija keičiasi ir jis tampa įstrižo slysmo lūžiu.

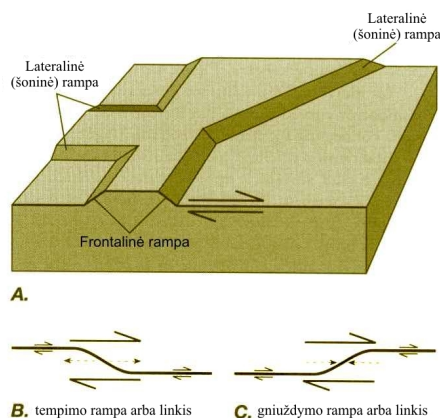
Kitu atveju, kada lūžis tęsiasi gilyn, kur, dėl temperatūros ir slėgio, uolienos yra plastiškos, lūžis pereina į plastišką šlyties zoną, ir tam tikrame gylyje deformacija išsisklaido. Tokiu atveju, lūžio riba lieka neaiški.

Gylis kuriame trapus lūžis pereina į plastišką šlyties zoną nėra žinomas, nes tai priklauso nuo slysmo dydžio ir nuo deformacijos (slysmo) tempo. Trapus plyšiavimas keičiamas plastišku tekėjimu 10-20 km gylyje. Lūžių zonos seisminiais duomenimis yra atsekamos iki 25 km gylio, o kai kuriose vietose iki Moho paviršiaus¹⁸. Subdukcijos zonos, kurios, iš esmės, yra dideli antstūmių lūžiai, gali būti atsekami šimtus kilometrų į mantiją, tačiau tai atskiri atvejais kai plutos lūžiai nueina į tokius gylius.

4.4.3 Rampos, linkiai, dupleksai ir perdavimo zonos

Paprastai atskiri lūžiai nėra plokšti ar vienodai išlenkti paviršiai, bet sudaryti iš **lūžio rampų** {fault ramp}, jungiančių pagrindinio lūžio segmentus (Pav. 4.34A). **Priešakinė (frontalinė) rampa** {frontal ramp} yra orientuota taip, kad jos susikirtimas (sankirtos linija) su pagrindinio lūžio paviršiumi yra maždaug statmenas pagrindinio lūžio poslinkio linijai. Ant stūmio lūžių, tokia rampa vadinama **linkiu** {jog arba bent}. **Šoninė (lateralinė) rampa** {lateral ramp} orientuota taip, kad jos susikirtimas su pagrindinio lūžio paviršiumi yra lygiagretus arba įstrižas pagrindinio lūžio poslinkio linijai. Jei susikirtimas lygiagretus - tai vadinsis **šonine bortine rampa** {sidewall ramp}, o jei įstrižas – **šonine įstriža rampa** {oblique ramp}. Jei lūžis yra segmentuo-

¹⁸Moho (Mohorovičičiaus) paviršius yra seisminė riba tarp Žemės plutos ir mantijos.



Paveikslas 4.34: Lūžio rampų geometrija. Bet kokia diagrama gali būti orientuota sutartinai, todėl gali būti pritaikyta bet kokiam lūžių tipui. A. Schematinė lūžio paviršiaus forma. B. Tempimo priešakinė rampa arba lenkis. Brūkšniuotos rodyklės rodo, kad medžiaga linkusi būti ištempta ties rampa. C. Gniuždymo priešakinė rampa arba linkis. Brūkšniuotos rodyklės rodo, kad medžiaga linkusi būti sustumta ties rampa.



Paveikslas 4.35: Blok-diagrama vaizduojanti dupleksus. Slysmo kryptis ir linija, statmena lūžiui yra judesio plokštumoje.

tas, bet segmentai nėra sujungti ryškiu rampiniu lūžiu, tai struktūra vadinama **peršokiu** {step-over}.

Paprastai lūžio bloko slysmas palei rampos paviršių sukelia bloke deformaciją, ir tai, kaip ta deformacija pasireiškys priklausys nuo lūžio orientacijos ir poslinkio. Priešakinė rampa arba linkis gali būti tempimo (Pav. 4.34B) arba gniuždymo (Pav. 4.34C), priklausomai nuo to ar statmenai rampos uolienos tempiamos ar stumiamos.

Vykstant lūžio slysmui palei rampą, rampos padėtis gali migruoti kada lūžis atsišakodamas skaldo uolienas, esančias aplink rampą, į blokus. To pasekoje susidaro **lūžių dupleksai** {fault duplex}, kurie sudaryti iš lūžio riekių sankaupos. Dupleksai gali būti antsprūdžio (Pav. 4.35A), sprūdžio (Pav. 4.35B) ir stūmio (Pav. 4.35C). Apie juos atskirai - vėlesniuose skyriuose.

Didelės lūžių sistemos yra sudarytos iš pagrindinių, paprastai lygiagrečių, lūžių, ir nei vienas iš jų nesitęsia per visą lūžių sistemos ilgį. Nuosprūdžių, antstūmių ir stūmių sistemos yra gana dažnos. Kadangi atskiri lūžiai užgęsta išilgai sistemos, bendras poslinkis tarp lūžio (mega)blokų skirtingose lūžių sistemos pusėse palaikomas slysmo perdavimu {transfer}, arba estafetiniu {relay} perdavimu nuo vieno lūžio galo į kitą lygiagretų lūžį.

Perdavimo zona {transfer zone} yra vietinė struktūra, kuri patalpina

slysmą tarp dviejų, lygiagrečių, šalia esančių didesnių lūžių. Tokia struktūra gali būti atskiras lūžis - **perdavimo lūžis** {transfer fault}, taip pat vadinamas **estafetiniu lūžiu** {relay fault}, arba tai yra plačiau paskirstytos deformacijos zona vadinama **perdavimo zona** {transfer zone}, taip pat vadinamas **estafetine (lūžių) zona** {relay zone}. Perdavimo zonos viduje, deformacija gali būti išskirstyta lygiagrečiais lūžiais, kurie yra išsidėstę įstrižai pagrindinių struktūrų atžvilgiu, arba mažiau organizuota trapių deformacijų zona (žr. aptarimą apie poveikio zonas poskyryje 4.4.4). Perdavimo zona taip pat gali būti plastiško raukšlėjimo zona. Lūžio rampa (Pav. 4.34), iš esmės, yra perdavimo lūžis, tiksliau **estafetinė rampa** {relay ramp}, o lūžių dupleksą galima, iš esmės, laikyti perdavimo zona (Pav. 4.35).

Terminas *perdavimo lūžis*, vis dėl to, yra dažniausiai naudojamas stūmio lūžiui, kuris perduoda slysmą tarp dviejų lygiagrečių nuosprūdžių ar antstūmių. Iš kitos pusės, sprūdžiai irgi gali būti perdavimo zonos tarp kaimyninių stūmių.

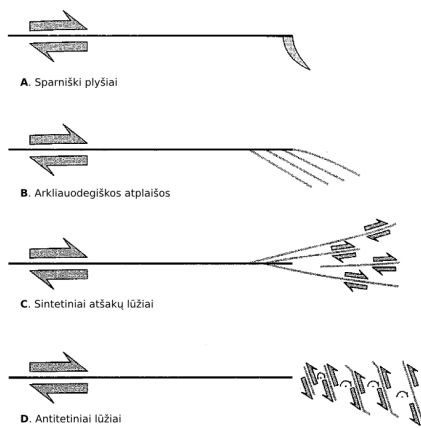
4.4.4 Poveikio zonos

Lūžiai dažnai suprantami (ar įsivaizduojami) labai supaprastintai - kaip atskiros pertraukties plokštumos, kurios perkerta per uolienas (Pav. 4.1). Tačiau pažiūrėjus iš arčiau, pasimato kur kas sudėtingesnės struktūros. Trapus lūžis yra paprastai anastomozinių, susiraizgiusių plyšių zona, kurioje paprastai vyrauja kataklastinės uolienos, kurioje ir susikaupė visas slysmas. Abiejose lūžių pusėse ir ties lūžių ribiniais taškais yra **žalos zona** {damage zone}, susidaranti iš įvairiomis kryptimis išsidėsčiusių ir turinčių įvairias poslinkio kryptis **antrinių plyšių** {secondary fractures}. Ši zona gali būti įvairaus pločio, tačiau kai kuriais atvejais ji gali būti ir platesnė už pačią lūžio zoną.

Kaip jau buvo minėta truputį aukščiau, poslinkis palei lūžį yra didžiausias jo centrinėje dalyje ir mažėja iki nulio ties ribine linija. Poslinkio kitimas palei lūžį ir liekaninis poslinkis ties ribine linija turi būti patalpintas paskirstant deformaciją supančiose uolienose. Didžiausias deformacijos intensyvumas yra prie pat lūžio ir mažėja didėjant atstumui nuo lūžio. Tačiau kur deformacijos intensyvumas didžiausias, gali vykti antrinių plyšių susidarymas ir, tuo būtu, žalos zonos suformavimas. Žala gali susikaupti išilgai aktyvaus lūžio bloko sienų arba ties ribine linija, tačiau bet kuriuo atveju ji bus linkusi išsklaidyti deformaciją didesniame supančių uolienu tūryje, ir taip sumažinant jos intensyvumą atskiriems lūžiams.

Antrinių plyšių susidarymo savybės ties lūžio ribos linija priklauso dalinai nuo poslinkio vektoriaus kampo su ribine linija (šių dviejų tarpusavio orientacijos). Žalos zonos, kurios susidaro dėl antro tipo plyšių susidarymo (Pav. 4.31), gali būti sudarytos iš tempimo plyšių, atplaišų lūžių arba atšakos lūžių (Pav. 4.36). Ties ribine linija gali susidaryti:

- **Sparniški plyšiai** {wing cracks; Pav. 4.36A) yra įtrūkiai (tempimo plyšiai), paprastai susiję su nedideliu poslinkiu pagal smulkius lūžius.
- Esant didesniems lūžiams, dėl panašios deformacijos susidaro plunksniški lūžiai (Pav.) arba **arkliuodegiškos atplaišos** {horsetail splay} su sintetiniu arba įstrižu sintetiniu poslinkiu (Pav. 4.36B).
- Deformacija lūžio riboje gali išsklaidyti dėl **sintetinių atšakų lūžių** {synthetic branch fault; Pav. 4.36C), kurie yra tos *pačios slysmo krypties*



Paveikslas 4.36: Žalos zonos ties lūžių ribinėmis linijomis gali būti įvairios. A. Sparniški plyšiai susidaro ant mažų šlyties plyšių. B. Arkliuodegiškos atplaišos yra antriniai sintetiniai lūžiai, kurių slysmo kryptis yra tokia pat kaip ir pagrindinio lūžio. C. Sintetinių atšakų lūžiai yra irgi tokios pat slysmo krypties kaip ir pagrindinis lūžis. D. Antitetiniai lūžiai apjuosia blokus, kurie turi tokią pačią sukimosi (rotacijos) kryptį kaip ir pagrindinis lūžis, ir dėl ko apjuosiantys lūžiai yra priešingos slysmo krypties.

kaip ir pagrindinis lūžis.

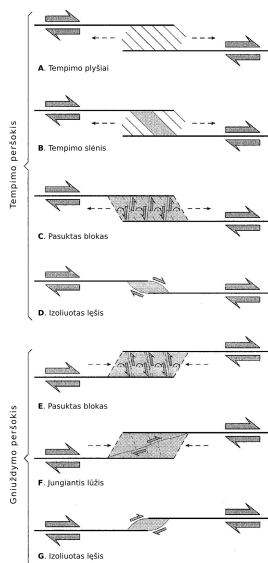
- Žalos zona ties ribos linija gali susidaryti ir iš **antitetinių lūžių** {antithetic branch fault; Pav. 4.36D), kurie yra tos *priešingos slysmo krypties nei pagrindinis lūžis*. Kad tai susidarytų, vyksta blokų rotacija ta pačia kryptimi kaip pagrindinio lūžio slysmo kryptis ¹⁹.

Dar sudėtingesnės žalos zonos susidaro kombinuojantis šiems antriniams plyšiams.

Jei lūžis plinta toliau {propagate} per žalos zoną, tada paveiktos uolienos išsidėsto skirtingose lūžio pusėse. Žala išilgai lūžio sienų gali taip pat atspindėti šlyties (deformacijos) pasiskirstymą platesnėje zonoje už pačio lūžio zoną, arba gali atspindėti deformaciją, susidariusią dėl nelygumų ant pagrindinio lūžio paviršiaus (asperičių). Taigi, žalos zonos yra būdingos kiekvienam lūžio blokui, o antriniai plyšiai, kurie gali parodyti lūžių slysmo kryptį (Pav. 4.18), patys yra žalos zonos dalis.

Žala gali kauptis lūžio peršokyje, t.y. zonoje, kur vienas lūžis baigiasi, o šalia lygiagretus lūžis prasideda. Lūžio peršokis gali tapti perdavimo zona, kurioje uolienų deformavimasis paskirsto slysmo perdavimą nuo vieno lūžio pabaigos iki šalimai esančio lygiagretaus lūžio pradžios (Pav. 3.36-T2207). Lūžio peršokis gali būti tempimo (Pav. 4.37A-D), jei lūžio slysmo kryptis verčia medžiagą

¹⁹Kad tai geriau įsivaizduoti, sudėkite delnus vienas ant kito - bus "lūžis", ir tarp jų įdėkite pieštuką. Atlikdami vienos ar kitos krypties poslinkį palei "lūžį", t.y. stumdami vieną delną palei kitą (panašiai į delnų trynimą), stebėkite kaip sukasi pieštukas. Pvz, jei darysite kairinį stūmį, pieštukas suksis prieš laikrodžio rodyklę. Taigi, jei blokai suksis pagal laikrodžio rodyklę, o šlyties zona bus dešininė, tai blokų rotacija bus ta pačia kryptimi kaip pagrindinio lūžio slysmo kryptis.



Paveikslas 4.37: A-D. Žalos zonos struktūros ties tempimo peršokiais ir E-G. Gniuždymo peršokiais.

lūžio laipte ilgėti, arba gniuždymo, jei medžiaga lūžio laipte turi sutrumpėti (Pav. 4.37E-G). Šios sistemos galiausiai gali išsivystyti į dupleksų sistemas (Pav. 4.35), arba jos gali tapti vieta, pasižyminčia didžiu laidumu, ir dėl to šiose zonose gali formuotis svarbios rūdinės naudingosios iškasenos.

Smulkesnių šlyties plyšių ilgis, jų susidarymo žalos zonoje aplink didesnius lūžius metu, paklūsta laipsnio dėsniai {power law; Lygtis 4.1, skyrelis 4.4.1}

4.5 Išlyginti pjūviai

Pjūviai, sudaryti per nuosėdines sekas, kurios yra perkirstos lūžių ir kurios nepatyrė stipresnių deformacijų statmenai pasirinktos pjūvio plokštumos, turi turėti tą patį atskirų sluoksnių plotą kaip ir prieš jų (ir visos storumės) deformaciją. Tokie skerspjūviai yra vadinami **išlygintu skerspjūviu**, kitaip subalansuotu {balanced cross section}. Toks reikalavimas, kad pjūvio plotas turi būti išlaikytas pastovus, gerokai apriboja gilesnių struktūrų interpretaciją. Tai yra todėl, kad bet koks sudarytas pjūvis (t.y. tikrojo geologinio pjūvio interpretacija) turi galėti būti gražinamas palei lūžius į priimtina priešdeformacinę padėtį taip, kad sluoksniai vėl būtų vientisi, ir, svarbu, kad nebūtų atstatytame į pirminę padėtį skerspjūvyje jokių tuštumų ar persidengimų. Toks “atstatymas” į pirminę nedeformuotą padėtį yra vadinama **palinspatine rekonstrukcija** {palinspastic restoration}. Skerspjūvis turi būti subalansuotas tarp dviejų **žyminčių taškų** {pinning points}, kurie yra dvi pasirinktos vertikalios atskaitos linijos pravestos per nedeformuotą nuosėdinę storumę. Taigi, yra priimama, kad šių linijų forma nesikeičia deformacijos metu.

Jei deformacija nepakeitė storumės sluoksnių storio, tada pjūvio išlyginimas atliekamas linijų palyginimu, t.y. kiekvieno kontakto ilgis tarp dviejų žyminčių taškų turi būti toks pat prieš ir po deformacijos. Jei deformacija sutrumpino

ar pastorino sluoksnius, tada kontaktų ilgis kito ir reikalinga atlikti ne linijų, o ploto palyginimą, kuris reikalauja, kad kiekvieno sluoksnio ar kitokio geologinio vieneto plotai tarp žyminčių taškų yra tie patys prieš ir po deformacijos.

Daugeliu geologinių atvejų deformacija statmenai pasirinktos skerspjūvio plokštumos yra reikšminga, pvz. jei pjūvis eina statmenai stūmio ir tai neatitinka reikalavimai išlygintiems pjūviams. Tokiu atveju, galimas medžiagos judėjimas į vieną ar kitą pusę statmenai pjūvio plokštumos, ir, tuo būdu, pagrindinė prielaida apie nekintančius pjūvių plotus tampa nebegaliojanti. Trimačiai išlyginimo būdai yra sukurti ir kuriami toliau, tačiau tokiam išlyginimui reikalingi dideli detalios informacijos kiekiai ir balansavimas tokiomis sąlygomis tampa tolygiai sudėtingesnis.

Dalis III

Nedeformacinēs struktūros

Dalis IV
Priedai

4.6 Fraktalai ir plyšių rašto apibūdinimas

iš knygos “Structural Geology”, R. J. Twiss ir E. M. Moores, 2007, 2-as leidimas, W. H. Freeman and company. Nuo 46 iki 52 puslapio. (Grįžti į ??)

BOX 2-1 Fractals and the Description of Joint Patterns	
<p>Joints occur in rocks on a vast range of scales, from master joints on the scale of kilometers or tens of kilometers down to small fractures on the scale of centimeters or less. The spacing between joints occurs with a corresponding range of scales. This range of scales has made the characterization of joint systems very difficult. The ability to describe accurately the characteristics of joint patterns, however, is important in predicting such phenomena as the fluid flow and storage properties of rock, necessary in calculating groundwater flow and oil flow in reservoir rock, and the bulk mechanical properties of rock, important to numerous types of construction projects. This complexity has led to the proposal that the geometry of joint systems is fractal. We first introduce briefly what a fractal object is, and then we describe how the concept of fractals might be applicable to joint patterns. A variety of features of a physical system such as a joint system can have fractal characteristics. These might include, for example, the fracture length or the displacement on the fracture, which for extension fractures determines the fracture opening or aperture. We concentrate in this discussion on the fractal geometry, or the spatial distribution of fractures, which defines the</p>	<p>extent to which the fractures fill the space in which they are embedded.</p> <p>i. What Is a Fractal?</p> <p>An object having a fractal geometry is one for which the geometry is scale-invariant. The object is also said to be self-similar, which means that any part of the object viewed at a particular scale looks similar to the object viewed at any other scale. Thus, for example, the pattern of joints viewed from an airplane at the scale of a quadrangle would look the same as the pattern of joints as seen close-up in an outcrop. This idea is actually quite familiar to geologists, who understand the necessity of placing a familiar object such as a ruler or a rock hammer in photographs of geologic structures so that the size of the structure is apparent, because the structures themselves, commonly being self-similar in nature, do not provide any information as to the scale.</p> <p>One way to obtain an intuitive grasp of a fractal geometry is to consider a line embedded in a plane (Figure 2-114). The line has a dimension of 1, and the plane has a dimension</p> <p style="text-align: right;"><i>(continued)</i></p>

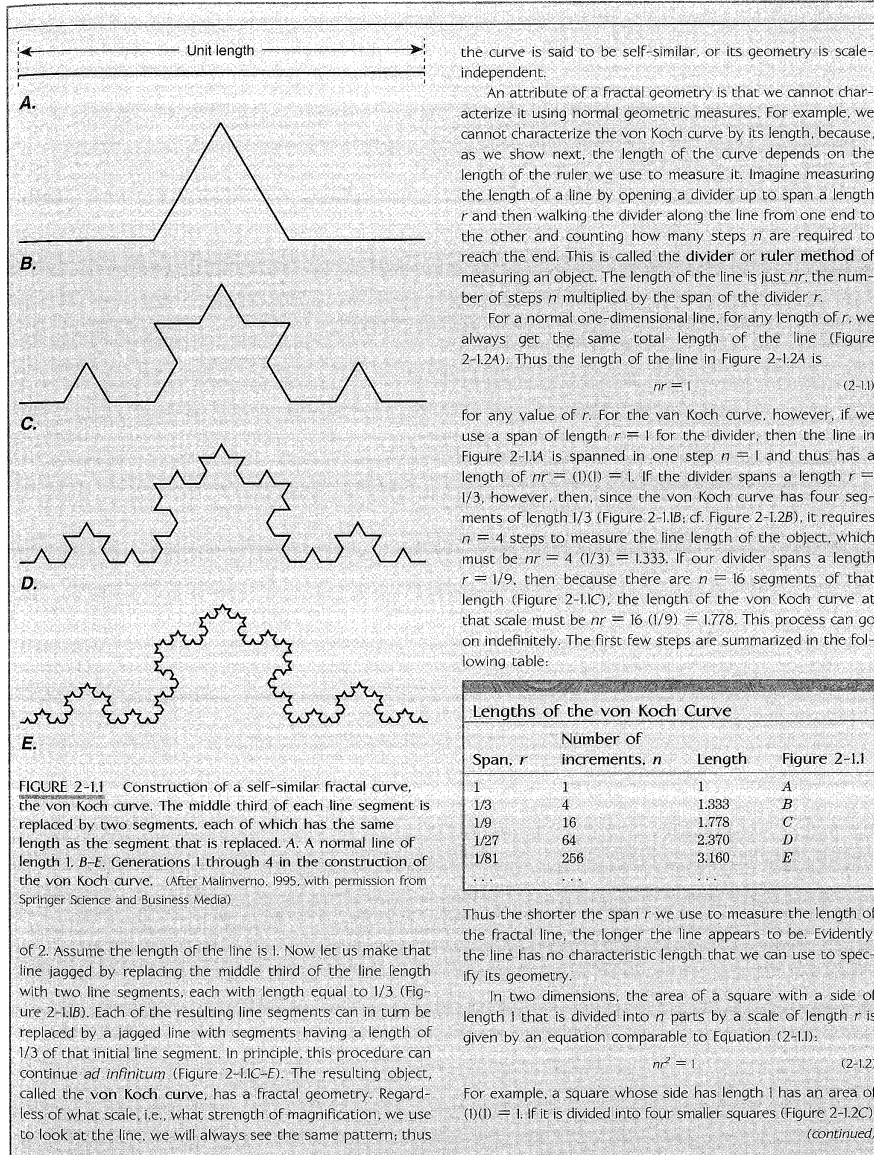


FIGURE 2-1 Construction of a self-similar fractal curve, the von Koch curve. The middle third of each line segment is replaced by two segments, each of which has the same length as the segment that is replaced. A: A normal line of length 1. B-E: Generations 1 through 4 in the construction of the von Koch curve. (After Malinverno, 1995, with permission from Springer Science and Business Media)

of 2. Assume the length of the line is 1. Now let us make that line jagged by replacing the middle third of the line length with two line segments, each with length equal to 1/3 (Figure 2-1B). Each of the resulting line segments can in turn be replaced by a jagged line with segments having a length of 1/3 of that initial line segment. In principle, this procedure can continue *ad infinitum* (Figure 2-1C-E). The resulting object, called the **von Koch curve**, has a fractal geometry. Regardless of what scale, i.e., what strength of magnification, we use to look at the line, we will always see the same pattern; thus

the curve is said to be self-similar, or its geometry is scale-independent.

An attribute of a fractal geometry is that we cannot characterize it using normal geometric measures. For example, we cannot characterize the von Koch curve by its length, because, as we show next, the length of the curve depends on the length of the ruler we use to measure it. Imagine measuring the length of a line by opening a divider up to span a length r and then walking the divider along the line from one end to the other and counting how many steps n are required to reach the end. This is called the **divider** or **ruler method** of measuring an object. The length of the line is just nr , the number of steps n multiplied by the span of the divider r .

For a normal one-dimensional line, for any length of the line we always get the same total length of the line (Figure 2-1A). Thus the length of the line in Figure 2-1A is

$$nr = 1 \quad (2-1)$$

for any value of r . For the von Koch curve, however, if we use a span of length $r = 1$ for the divider, then the line in Figure 2-1A is spanned in one step $n = 1$ and thus has a length of $nr = (1)(1) = 1$. If the divider spans a length $r = 1/3$, however, then, since the von Koch curve has four segments of length 1/3 (Figure 2-1B; cf. Figure 2-1.2B), it requires $n = 4$ steps to measure the line length of the object, which must be $nr = 4 (1/3) = 1.333$. If our divider spans a length $r = 1/9$, then because there are $n = 16$ segments of that length (Figure 2-1C), the length of the von Koch curve at that scale must be $nr = 16 (1/9) = 1.778$. This process can go on indefinitely. The first few steps are summarized in the following table.

Lengths of the von Koch Curve			
Span, r	Number of increments, n	Length	Figure 2-1
1	1	1	A
1/3	4	1.333	B
1/9	16	1.778	C
1/27	64	2.370	D
1/81	256	3.160	E
...	

Thus the shorter the span r we use to measure the length of the fractal line, the longer the line appears to be. Evidently, the line has no characteristic length that we can use to specify its geometry.

In two dimensions, the area of a square with a side of length 1 that is divided into n parts by a scale of length r is given by an equation comparable to Equation (2-1):

$$nr^2 = 1 \quad (2-2)$$

For example, a square whose side has length 1 has an area of $(1)(1) = 1$. If it is divided into four smaller squares (Figure 2-1C),

(continued)

BOX 2-1 Fractals and the Description of Joint Patterns (continued)

FIGURE 2-1.2 Determination of the dimension of an object. **A.** A normal line has dimension $D = 1$. Its length, given by the number of parts n multiplied by the length r of each part, is always the same, regardless of the size of r . **B.** The length of the von Koch curve increases as the scale of the measure r decreases. This property is characterized by the fractal dimension $D = 1.26$. **C.** A normal plane has dimension $D = 2$. Its area, given by the number of parts n multiplied by the area of each part r^2 , is always the same, regardless of the size of r . (After Malinverno, 1995, with permission from Springer Science and Business Media)

each with a side $r = 1/2$, each has an area $r^2 = 1/4$, so the total area of the original square is $(4)(1/4) = 1$. Thus for any dimension D , our usual understanding of the Euclidean size C of a geometric object is given by the general equation

$$nr^D = C \text{ or } n = \frac{C}{r^D} \quad (2-1.3)$$

where $D = 1$ for a one-dimensional line, $D = 2$ for a two-dimensional plane, and $D = 3$ for a three-dimensional block. C is a scaling constant that defines how many parts of dimension $r = 1$ there are in the object; in Equations (2-1.1) and (2-1.2), C is equal to 1.

We see from the first Equation (2-1.3) that D is determined by

$$\log n + D \log r = \log C \quad (2-1.4)$$

$$\log n = -D \log r + \log C = D \log \left(\frac{1}{r}\right) + \log C \quad (2-1.5)$$

We use the results for two different scales to eliminate the constant C from Equation (2-1.4)

$$\log n_1 + D \log r_1 = \log n_2 + D \log r_2 \quad (2-1.6)$$

$$D = \frac{-\Delta \log n}{\Delta \log r} = \frac{\Delta \log n}{\Delta \log \left(\frac{1}{r}\right)} \quad (2-1.7)$$

where we define

$$\Delta \log n \equiv \log n_2 - \log n_1 = \log \frac{n_2}{n_1} \quad (2-1.8)$$

$$\Delta \log r \equiv \log r_2 - \log r_1 = \log \left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (2-1.9)$$

$$\Delta \log \left(\frac{1}{r}\right) \equiv \log \left(\frac{1}{r_2}\right) - \log \left(\frac{1}{r_1}\right) = \log \left(\frac{r_1}{r_2}\right) \quad (2-1.10)$$

Applying the second of the equivalent equations (2-1.7) to the von Koch curve with Equations (2-1.8) to (2-1.10), and using the second and third row in the above table (any two rows would give the same result), we discover that

$$D = \frac{\Delta \log n}{\Delta \log \left(\frac{1}{r}\right)} = \frac{\log \left(\frac{n_2}{n_1}\right)}{\log \left(\frac{r_1}{r_2}\right)} = \frac{\log \left(\frac{16}{4}\right)}{\log \left(\frac{9}{3}\right)} = \frac{\log 4}{\log 3} = 1.26 \quad (2-1.11)$$

A.

Unit length
 $n = 4$ parts, scaled by $r = 1/4$
 $D = \frac{\log(n)}{\log\left(\frac{1}{r}\right)} = \frac{\log(4)}{\log(4)} = 1$

B.

$n = 4$ parts, scaled by $r = 1/3$
 $D = \frac{\log(n)}{\log\left(\frac{1}{r}\right)} = \frac{\log(4)}{\log(3)} = 1.26$

C.

$n = 4$ parts, scaled by $r = 1/2$
 $D = \frac{\log(n)}{\log\left(\frac{1}{r}\right)} = \frac{\log(4)}{\log(2)} = 2$

This result shows that the fractal von Koch curve has a dimension $D = 1.26$, which is part way between that of a normal line and a normal plane. This number is in general not an integer, but a fractional dimension and thus has been termed the **fractal dimension**. Regardless of the scale r at which we

examine the von Koch curve, the fractal dimension is always the same, and thus it characterizes an important aspect of the geometry of this object. The power-law relationship of the type in Equations (2-13) is characteristic of a fractal, or self-similar, system.

A coastline is an example of a natural object that has the characteristics of a fractal geometry. An oft-quoted example is Mandelbrot's analysis of the west coast of Britain, which has a fractal dimension very close to that of the von Koch curve. The von Koch curve, however, is very regular and precisely self-similar, whereas the west coast of Britain is very irregular and only statistically self-similar. Nevertheless, the fractal dimension characterizes a quality of roughness that is similar in the von Koch curve and in the coastline. Natural-looking objects such as coastlines can be generated by including a degree of randomness in the fractal construction.

Of course, in the real world, there are always upper and lower bounds, called the **fractal limits**, beyond which the fractal dimension ceases to describe the object. In the case of a coastline, the upper fractal limit obviously must be no larger than the dimension of the island or continent bounded by the coast, and the lower fractal limit is perhaps no smaller than a grain of sand.

Different fractal objects can have different fractal dimensions. The fractal dimension defines the extent to which a fractal object fills the space in which it is embedded. An object with a dimension between 1 and 2 occupies more area than a line, but does not completely occupy the area of the plane in which it is embedded. Equation (2-15) shows that if we measure the length of a fractal line with a wide variety of scales r and then make a plot of $\log n$ versus $\log (1/r)$, the plot should result in a straight line whose slope is the fractal dimension D . This gives us a way of testing the fractal nature of a physical system. A number of geologic systems have been described using fractals, including joint patterns, fracture surface roughness, and fault gouge grain size. Here, our interest is in fracture patterns, and in the following we look briefly at their fractal nature.

ii. The Fractal Nature of Joint Systems

If joints have a fractal geometry, then the fractures occur on a very wide range of scales with smaller fractures being much more numerous than the larger ones. What does this have to do with describing joints? It has been proposed that joint systems have the quality of being self-similar, so that regardless of the scale at which you look at a joint system, within the fractal limits, it looks the same. It is impractical to try to map a system of joints in three dimensions, but it can be shown that if a volumetric fractal structure is isotropic¹ and random, the fractal dimensions determined from a planar section through the volume will be 1 less than the fractal dimension determined for the volume, and the fractal dimension of a linear section through the volume will be 2 less. Thus if we de-

termine the fractal dimension of a joint system on a plane to be D_2 and if that system is isotropic and random, then the fractal dimension of a linear section determined from a drill hole through the structure would be $D_1 = D_2 - 1$ and the dimension of the three-dimensional structure would be $D_3 = D_2 + 1$. This provides some justification for examining the pattern that a joint system makes on an outcrop surface. Figure 2-13 shows four maps of joint systems. Note the wide variety of scales and the fact that nothing about the joint patterns gives any indication of the scale at which the pattern was mapped.

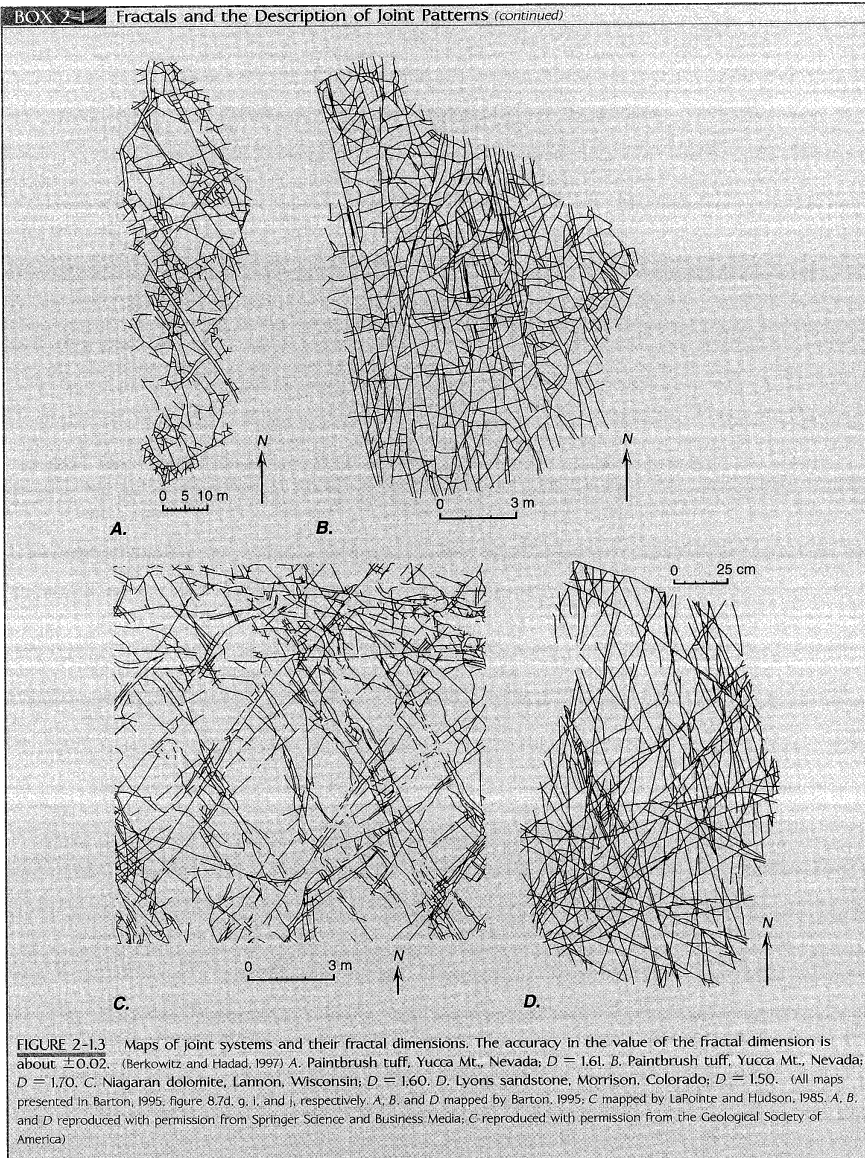
In order to determine whether such joint patterns are fractal, we use a measurement method called the **box method**, which is comparable to, but more convenient than, the divider method. The box method measures the length of the object by counting the number of boxes of dimension r that are required to completely cover the object, rather than using a divider spanning the length r to step out its length. To use the box method, we construct a square grid with a grid spacing of r , place the grid over the object (in this case a system of joints), and count the number of boxes n in the grid in which the object is found. Repeating this procedure for a large number of values of r and plotting the results on a graph of $\log n$ versus $\log (1/r)$ (Equation (2-15)) should, for a fractal object, give a straight line with a slope equal to the fractal dimension D (Figure 2-14).

Figure 2-15 shows the results of applying the box method to the joint system maps in Figures 2-15A and 2-13, with the lower and upper fractal limits defined, respectively, by the shortest line length in the map and the length at which the number of occupied boxes equals the total number of boxes. The lines are the least-squares fit to all the points measured, but points are plotted for only three of the lines, and only a selection of the points that were measured is plotted. The data all give an excellent fit to a line, and the fractal dimension for the four maps varies from 1.5 to 1.7, with an accuracy of about ± 0.02 , so the differences in the value of D are significant. The different intercepts of the lines simply reflect the different scaling constants C (Equation (2-15)) used in the measurement of the different maps. Thus the geometry of a joint system can be characterized, at least in part, by its fractal dimension. The fractal dimension for each map has been determined over less than an order of magnitude range of scale, which is smaller than would be ideal for such a measurement. Taken together, however, the scales in Figure 2-13 span a range of more than three orders of magnitude.

Analysis of fracture patterns formed by different fracturing mechanisms shows that the fractal dimension is not characteristic of particular mechanisms. The fractal dimension also does not characterize all the geometric properties of a fracture system. For example, although the fractal dimension increases with increasing fracture density, it seems to be rather

¹Isotropic means that the properties are the same in all directions.

(continued)



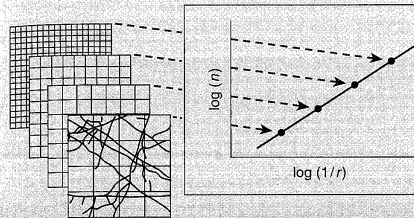


FIGURE 2-1.4 The box method of measuring fractal dimension. A grid of squares each with a side of length r is superimposed on the fracture map, and the number of squares n occupied by fractures is counted. Grids of successively smaller grid size r are used to generate a series of points on a plot of $\log(1/r)$ versus $\log n$. For a fractal object, the plot is a straight line whose slope is the fractal dimension D . (After Barton, 1995, with permission from Springer Science and Business Media)

insensitive to the distribution of lengths and orientations of the fractures in the system. It also is insensitive to tendencies for clustering or scattering (antidustering) of fractures, which determines the extent to which fractures are clustered together or are evenly spaced. Moreover, fracture sets commonly develop sequentially (Figure 2.15), and thus the fractal dimension for the joint system would then describe just the final fracture pattern, regardless of when different sets of fractures formed.

iii. A Model for Fragmentation

With these caveats in mind, we present as an example a model for fragmentation, or **comminution**, that results in a fractal geometry of fractures. One hypothesis for the process of comminution proposes that when two grains of comparable size come into contact, one of them will fragment, but a large fragment is unlikely to break if it is in contact only with small fragments, and a small fragment is unlikely to break if it is in contact with a large fragment. The result is that, in general, no two fragments of roughly equal size should end up in contact with each other.

A model for producing a fractal structure with these characteristics is illustrated in Figure 2-1.6. An initial cube is divided into eight pieces by three mutually perpendicular bisecting planes. Of those eight, two cubes on a diagonal of the initial cube are left intact, and the other six are each subdivided into eight other cubes. This process continues indefinitely, always at each scale leaving two cubes on a diagonal intact and subdividing the remaining cubes according to the same scheme. If the length of an edge of the initial cube is $r_0 = 1$, then the number of cubes N_k of size r_k is given in the following table.

Step No., k	Cube Size, r	Number of Cubes, n
0	1	1
1	1/2	2
2	1/4	12
3	1/8	72
4	1/16	432
...

The fractal dimension of the fragmented cube is given from Equations (2-1.7)–(2-1.10):

$$D = \frac{\Delta \log n}{\Delta \log \left(\frac{1}{r}\right)} = \frac{\log \left(\frac{12}{2}\right)}{\log \left(\frac{4}{2}\right)} = \frac{\log 6}{\log 2} = 2.58$$

The dimension for the fractures on a surface of the cube is one less than for the corresponding three-dimensional structure, or 1.58. This dimension is very close to the dimensions observed for the joint patterns in Figure 2-1.3. The joint

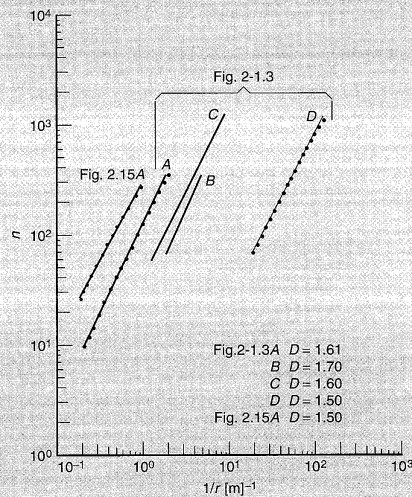
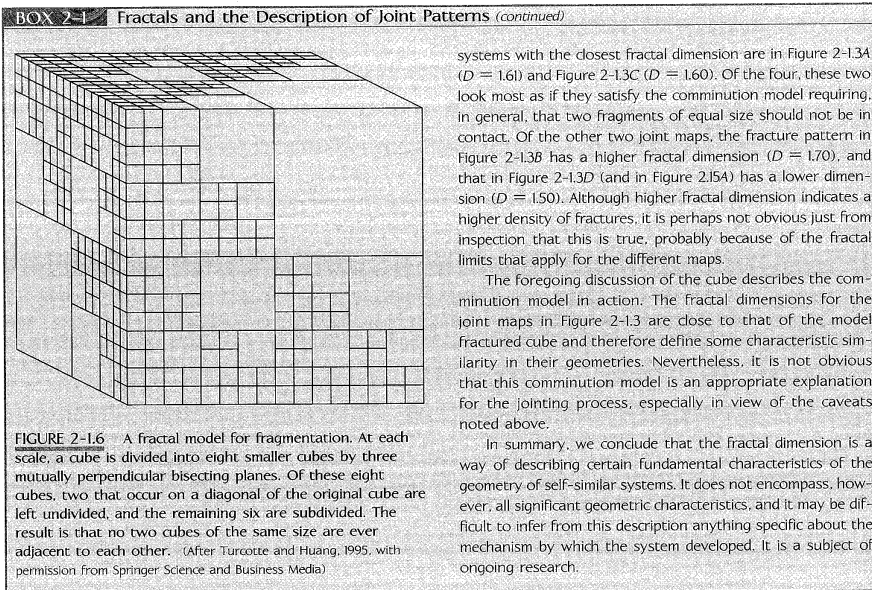


FIGURE 2-1.5 Results of applying the box method to the joint maps of Figure 2-1.3 and 2.15A. For the lines with plotted data points, the plot shows every third point generated from the analysis. The correlation coefficient for the fits to these lines is better than 0.99, where 1 indicates a perfect fit. (After Barton, 1995, with permission from Springer Science and Business Media)



Dalis V
Praktikum