

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Inženjerska geologija

METAMORFNE STIJENE

Seminar

**Ivan Sever
R-5**

Zagreb, 2008./09.

SADRŽAJ

1	UVOD	3
2	GEOLOGIJA METAMORFNIH STIJENA	4
2.1	Metamorfoza	4
2.2	Folijacija	4
2.3	Proslojci i ostale strukture	5
2.4	Stupanj metamorfoze	6
2.5	Metamorfno zoniranje	7
3	VAŽNE METAMORFNE STIJENE	8
3.1	Slejt	8
3.2	Filit	8
3.3	Škriljavac	9
3.4	Gnajs	9
3.5	Kvarcit	10
3.6	Mramor	10
3.7	Ostali tipovi metamorfnih stijena	11
4	TROŠENJE I NEDOSTACI U METAMORFNIM STIJENAMA	12
4.1	Trošenje	12
4.2	Pukotine	13
4.3	Smicanje po folijaciji	13
5	INŽENJERSTVO U METAMORFNIM STIJENAMA	14
5.1	Istraživanje	14
5.2	Opasnosti od klizanja	14
5.3	Površinska iskapanja	15
5.4	Temelji građevina, uključujući brane	15
5.5	Podzemna iskapanja	17
5.6	Materijali	18
6	POVIJEST BOLESTI	19
6.1	Stijenski uvjeti u Washington D.C., područje glavnog grada	19
6.2	Slom brane St. Francis	19
6.3	Slom brane Malpasset	21

1 UVOD

Metamorfoza podrazumijeva procese kod kojih se tekstura i mineraloški sastav čvrste stijene dramatično mijenja tako da nastaje potpuno nova stijena – metamorfna stijena.

Proučavanje metamorfnih stijena je izazov zbog velikog broja različitih minerala koje možemo pronaći u njima, a koji je puno veći nego kod eruptivnih ili sedimentnih stijena. Inženjeri moraju dobro poznavati metamorfne stijene i njihova svojstva jer su među njima stijene koje mogu uzrokovati brojne poteškoće i opasnosti. Svaka pojedina stijena je zagonetka koju treba riješiti, treba odrediti porijeklo materijala, okolinu u kojoj je nastala te kemijske uvjete koje je pretrpjela i zbog toga je geolozima vrlo zanimljiva.

Metamorfoza je proces koji se događa u područje visoke temperature ili u dubokim dijelovima zemljine kore. Metamorfne stijene su nove promijenjene stijene nastale pri povišenoj temperaturi i to čak pri temperaturi taljenja minerala ili pri velikim naprezanjima na velikim dubinama.

2 GEOLOGIJA METAMORFNIH STIJENA

2.1 Metamorfoza

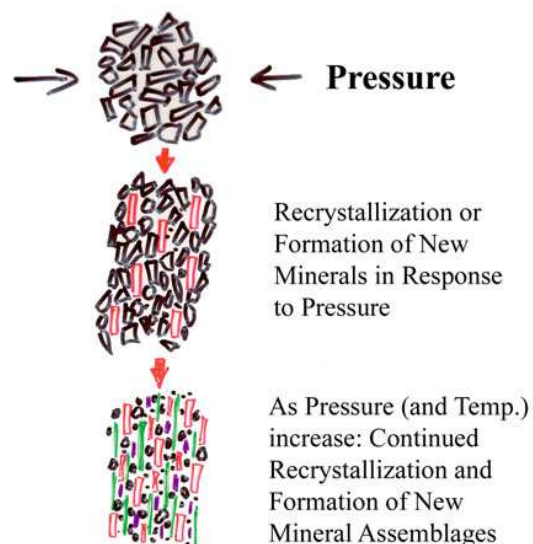
Metamorfoza obuhvaća promjenu, uglavnom kemijskog sastava stijene u potpuno izmijenjenoj okolini, a ponekad promjenu i uz magmatski utjecaj. Reakcija se odvija uglavnom u čvrstom stanju, gdje dolazi do formiranja novih kristala unutar pukotina ili zamjenom prvobitnih minerala ili izgurivanjem materijala na stranu. Neke stijene su nastale djelomičnim taljenjem prvobitne stijene.

Prilikom metamorfnih procesa monomineralne stijene razvijaju mozaičku teksturu opisanu kao jednoliku, krupno zrnatu, nepravilnih oblika zrna. U stijeni sastavljenoj od različitih minerala, neka zrna rastu više od drugih razvijajući porfirni tip teksture opisan kod metamorfnih stijena kao porfiroblastičan.

Metamorfoza mijenja prvobitnu strukturu stijene novom, uz promjenu veličine zrna njihov raspored i deformaciju mikrostrukture. Potpunom metamorfozom stijene slojevitost postaje manje važna jer do izražaja dolazi foliacija nastala rasporedom novih minerala.

2.2 Foliacija

Metamorfne stijene zbog foliacije imaju različite čvrstoće u različitim smjerovima. Radi ove karakteristike metamorfne stijene su slične sedimentnim stijenama, iako nije slojevitost ta koja uzrokuje anizotropiju nego foliacija, težnja dijeljenju u jednoj ravnini kroz stijenu.



Mineral Growth under Stress

Foliaciju dijelimo prema različitim svojstvima. Frakturni klivaž – familija bliže smještenih pukotina daje stijeni izrazitu anizotropiju. Klivaž slejta – stijena ima svojstvo pucanja po mikroskopski utvrđenim paralelnim mineralnim pločicama (tinjac, klorit).

Klivaž sleita se ne smije miješati sa slojevitošću. Stijene koje imaju izraženu slojevitost i klivaž sleita lakše pucaju po klivažu sleita nego po slojevitosti. Slojevitost je obično horizontalna dok je klivaž sleita obično pod nekim kutom. Kada bi klivaž sleita bio horizontalan, razlika između njih se ne bi mogla utvrditi pa bi to mogli nazvati slojeviti klivaž.



Škriljavost je folijacija nastala ne slučajnom orijentacijom makroskopskih minerala. Metamorfne stijene mogu imati lepidodlastičnu škriljavost, paralelna orijentacija plosnatih minerala, odnosno lističasti minerali raspoređeni paralelno s orijentacijom ravnine. Najčešći uzročnik lepidoblastične strukture je tinjac, ili biotit ili muskovit.

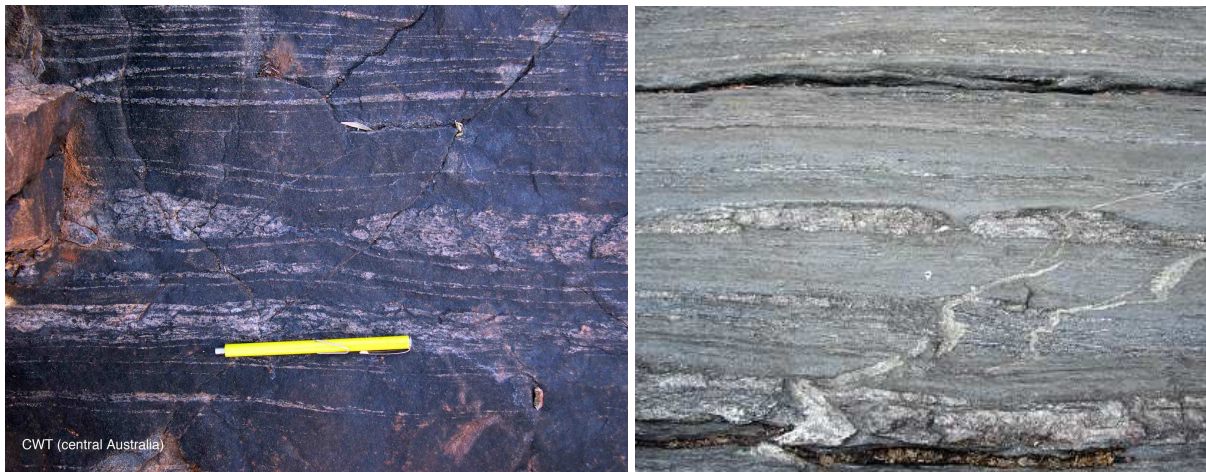
Druga vrsta škriljaste folijacije je nematoblastična škriljavost nastala od izduženih minerala nasumce raspoređenih po jednoj ravnini kao npr. čačkalice bačene na pod. Nematoblastičan mineral je amfibol.

2.3 Proslojci i ostale strukture

Segregacija različitih minerala u određenim proslojcima isto tako razvija folijaciju u jako metamorfiziranim stijenama. Proslojci mogu nastati rastom novih minerala i djelomičnim taljenjem. Rastom novih minerala koji razmiču prvobitnu stijenu stvaraju se okasti oblici.



Druga vrsta mineralne segregacijske strukture je budinaž. Pri relativno malom naprežanju krhki slojevi pucaju i kako se pukotine šire od akumuliranog naprežanja dodirni plastični materijal ulazi u njih te ih tako ispunjava.



Neke metamorfne stijene imaju linearnu strukturu ili lineaciju u određenom smjeru. Lineacija, za razliku od folijacije, je polarizacija linearnih elemenata unutar strukture metamorfne stijene tako da su svi okrenuti u istome smjeru.

2.4 Stupanj metamorfoze

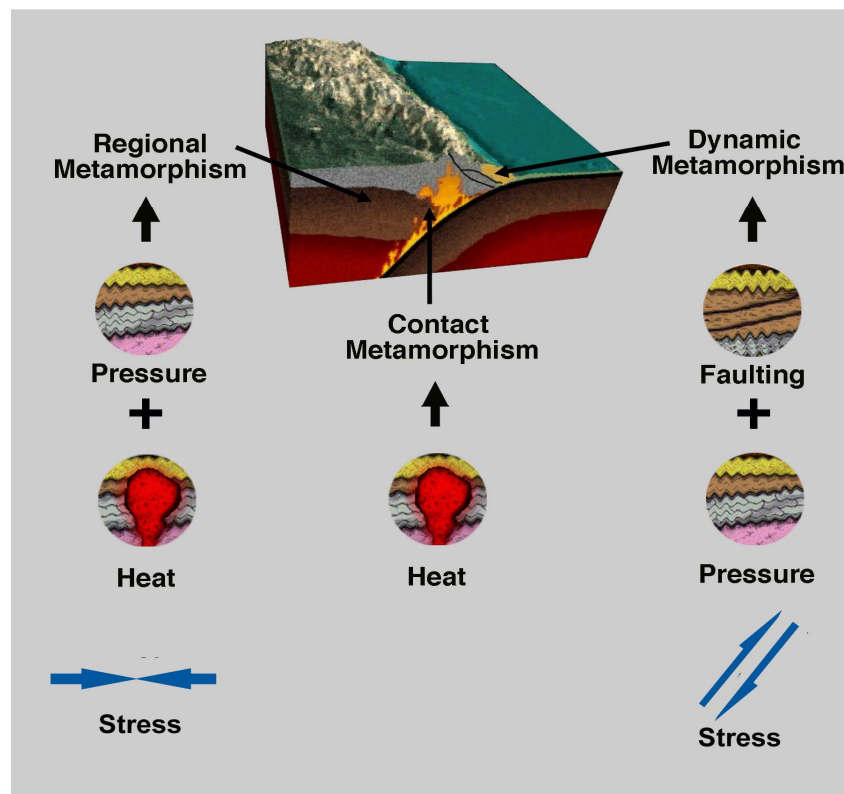
Kartiranje metamorfnog terena i laboratorijska simulacija metamorfnih procesa je otkrila da se intenzitet metamorfoze može prikazati pomoću nekih ključnih minerala. Npr. u metamorfnim stijenama dobivenim iz muljnjaka i šejla po stupnju rastućeg intenziteta su klorit, biotit, granat, staurolit, kijanit i silimanit.

Nakon što se slojevitost potisne i kada se kontakti različitih tipova stijene izmiješaju sa smjerom folijacije, može se teško shvatiti raspored različitih tipova metamorfne stijene. Raspoznavanje ključnih minerala stupnjeva metamorfoze omogućuje klasifikaciju i kartiranje tih stijena.

2.5 Metamorfno zoniranje

Metamorfne stijene postupno se mijenjaju preko terena. U područjima visoke temperature povezane sa granicom intruziva, metamorfni procesi tvore proslojak metamorfni stijena zvanih metamorfna aureola koja okružuje intruziv. Najbliže intruzivu su stijene najvišeg stupnja metamorfoze sačinjene od visoke temperature i niskog tlaka. Ovi minerali su nasumce raspoređeni i stijene nemaju folijaciju. Temperaturni gradient opada sa udaljenošću od intruziva prelazeći postepeno na nemetamorfoziranu stijenu.

Pojam regionalna metamorfoza se koristi kako bi razlikovali te stijene od onih nastalih kontaktnom metamorfozom.



Temperature oko 800 °C i niski tlaci su karakteristični za kontaktni metamorfizam. Visoke temperature i visoki tlakovi karakteristični su za okolinu u kojoj se formiraju minerali regionalne metamorfoze. Velike deformacije i visoki pritisci na malim temperaturama su uvjeti za nastanak nabora, izvijanja, pucanja i drobljenja koje se odnosi na dinamičku metamorfozu.

3 VAŽNE METAMORFNE STIJENE

3.1 Slejt

Sleitovi su afanitične stijene sa izraženim klivažom sleita tako da se kamen može gotovo sa dlijetom raskoliti na jako tanke ploče. Ako je stijenska masa prirodno dijeli na ploče koje se više ne mogu dijeliti, to je zato što kalavost nije kontrolirana mikroskopskom orijentacijom minerala već se radi o pukotinskom klivažu, a ne o klivažu sleita. Stijena s tim osobinama se naziva argilit.

Svježi sleitovi su obično crni, ali mogu biti zeleni ili čak crveni zbog prisustva željeza. Ovisno o sadržaju željeza može biti šaren ili točkast.

Točkasti sleit je sleit sa običnim porfiroblastima ili mineralima vezanim uz visoke temperature i relativno male tlakove; koji formira zonu tipičnu za metamorfnu aureolu.



3.2 Filit

Filit nastaje daljnjom metamorfozom slejta i razvojem gotovo vidljivih kristala muskovita. Pojedinačni kristali se ne mogu vidjeti golim okom te paralelnost finih pločica tinjca stvara svjetlucavu površinu folijacije. Filit može nastati od klorita, grafita ili talka. Od klorita stijena postane zelena, od talka dobije sapunast opip na površini folijacije, a od grafita dobije metalni sjaj.



3.3 Škriljavac

Škriljavci imaju izraženu foliaciju. To su slojevite metamorfne stijene sa krupnim kristalima. Škriljavost se obično formira kod muskovita i biotita, ali je češći kloritni škriljavac. Grafitni i talkni škriljavci su važni ali rjetki. Kvarc i feldspat su česte komponente škriljavca te mogu biti odvojeni u ne kontinuirane proslojke. Česte su okaste strukture.



3.4 Gnajs

Gnajs je slojevita stijena sa potpuno kontinuiranom segregacijom različitih minerala. Gnajsna folijacija može biti opisana lineacijom prutićasto segregiranih minerala i planarnom segregacijom u proslojcima. Tamniji proslojci su bogati biotitom i hornblendom dok svjetliji sadrže kvarc i feldspat.

Gnajs potječe iz metamorfoze granita. Uglavnom gnajs potječe od visokog stupnja metamorfoze sedimentnih stijena.

Folijacija gnajsa nije toliko intenzivna kao kod škriljavaca pa je stoga čvrstoća stijene puno veća. Iz tog razloga gnajs je pogodniji za izgradnju objekata u odnosu na škriljavac.



3.5 Kvarcit

Kvarcit je čvrst, tvrd kamen koji se sastoji uglavnom od kvarcnih kristala u zbijenoj mozaičkoj teksturi. Zrna su veća nego u sedimentnim stijenama iz kojih nastaju. Metamorfozom stijena koje ne sadrže kvarc nastaju dodatni minerali kvarcita kao tinjac, klorit, feldspat, granat i hornblenda. Ponekad kvarcit može sadržati kontinuirani tanki proslojak tinjca ili klorita.



3.6 Mramor

Vapnenci metamorfoziraju u dolomitni i kalcitni mramor. Obično nema nikakvih tragova sedimentne slojevitosti ili fosila. Neki mramori koji se koriste kao građevni kamen pokazuju sačuvane osobine ili tvore potpuno cementirane breče od originalnih vapnenačkih fragmenata u finoj karbonatnoj matrici.

Mramor obično nema folijaciju ili ima slabo izraženu folijaciju. Velike debljine mramora su rijetke.



3.7 Ostali tipovi metamorfnih stijena

Hornfels je afanitična stijena koja nema folijaciju, a nastala je kontaktnom metamorfozom glinovitih sedimenata.



Milonit je upotrebljen kao ime stijene kojim se opisuje produkt metamorfoze kojim nastaje zdrobljeni stijenski prah koji je uzrokovan rasjedanjem ili intenzivnim plastičnim deformacijama. Ako milonit ima sjaj i folijaciju kao filit onda ga nazivamo filonit.



Granulit je faneritična stijena bez folijacije sa zrnima jednake veličine izgrađen od kvarca, tamnog feldspata, piroksena, a ponekad i od ostalih metamorfnih minerala nastalih pri visokim temperaturama i visokim tlakovima.

4 TROŠENJE I NEDOSTACI U METAMORFNIM STIJENAMA

4.1 Trošenje

Metamorfne stijene uključuju širok raspon različitih struktura i tekstura pa je i trošenje različito. Gnajs, granulit i ostale stijene bogate kvarcom i sa široko razmaknutim pukotinama podliježu trošenju te nastaje ostatak poput pjeskovitog tla. Od slejta i filita nastaje ostatak poput muljevitog tla, dok se mramor troši u crvenu glinu.

Trošenje otvara stijenu duž folijacije te naglašava svoju važnost kao bitan dio slabosti u stijenskoj masi. Na većim dubinama ravnine folijacije mogu biti potpuno povezane i stijena zdrava. U zoni trošenja pukotinski razmak okomit na folijaciju može biti milimetarski mali, a ravnine folijacije mogu biti pokrivene glinom.

Dubina trošenja ovisi o razmaku između pukotina u stijeni.



Trošenjem gnajsa u kojem dolazi do segregacije tinjca nastaju proslojci saprolita sa muskovitom i glinom. Tvori strmo nagnutu površinu sa malom posmičnom čvrstoćom koja je opasna prilikom iskapanja.

Saproliti koji su bogati tinjcem imaju veliku poroznost. Ova tla se prilikom sušenja stišću do određene točke, a zatim se počinju širiti što je znak gubitka kapilarne kompresije na strukturi između kvarca i tinjca.

4.2 Pukotine

Metamorfne stijene sa niskim stupnjem folijacije mogu sadržati četiri ili više setova pukotina. Obično je jedan set pukotina paralelan sa slojevitošću, jedan set paralelan sa folijacijom, a dva ili više setova pukotina u ostalim smjerovima. Trošenje otvara sve setove pukotina i ispunjava ih sa slabom glinom ili prahom. Sjecišta svih pukotina sa površinom iskapanja usitnjava stijensku masu u izolirane i potencijalno odvojive blokove.

4.3 Smicanje po folijaciji

Uz važan pukotinski sustav uzrokovan folijacijom postoje i posmične zone paralelne s ravninom folijacije. To je razumljivo iz razloga jer su duž ravnine folijacije vlačna čvrstoća i posmična čvrstoća manje nego u ostalim smjerovima.

Nekoliko folijacijskih smicanja može presijecati cijelo područje inženjerskog zahvata. Svaki je karakteriziran zonom prostiranja od nekoliko centimetara do nekoliko metara u širinu u kojoj je stijena frakturirana ili zdrobljena. Zone smicanja mogu sadržavati vlagu i plastičnu glinu kao kontinuirani sloj. Punjenje može biti nepotpuno i zona smicanja otvorena. Površina pukotine može biti izmijenjena s obje strane. Smicanja po folijaciji su očekivana kod svih stijena s folijacijom, a to su slejt, filit, škriljavac, škriljasti gnajs i anfibolit.

5 INŽENJERSTVO U METAMORFNIM STIJENAMA

5.1 Istraživanje

Kod metamorfnih stijena kao i kod svih stijena, pažnja mora biti koncentrirana na opis, klasifikaciju i kartiranje materijala iz zone trošenja. To se treba činiti iz tog razloga što stijena dok je svježija izgleda dovoljno čvrsta za sve inženjerske namjene, iako neke stijene zadaju probleme i kada su svježije. To su primarno visoko škriljave stijene sa slabim pločastim mineralima.

Prepoznavanje različitih stijenskih vrsta je komplicirano radi njihove velike raznolikosti i kompleksnosti. Kontakti različitih stijena se mogu nalaziti duž folijacije, a oblik stijene može biti kompliciran radi intenzivnog trodimenzionalnog boranja. Geofizičke metode mogu nam pomoći pri kartiranju granica odrađene stijenske cjeline.

Refrakcijska seizmika i električna otpornost nam mogu pomoći u određivanju dubina zone trošenja i lokacije posmičnih zona. Magnetske i elektromagnetske metode se mogu koristiti za kartiranje kontakata različitih tipova stijene jer metamorfne stijene sadrže različite količine magnetita.

Prilikom istražnog bušenja jezgrovanje je efikasno kod većine metamorfnih stijena osim kod erodirajućih saprolita. Velike poteškoće se mogu očekivati prilikom bušenja i uzimanja uzoraka kvarcita, zbog njihove ekstremne čvrstoće. Problem je gotovo nemoguće riješiti kad je kvarcit jako frakturiran.

5.2 Opasnosti od klizanja

Trošna stijena koja se nalazi na prirodnim padinama u brdovitom metamorfnom području obično se kreće polako nizbrdo. Taj proces zovemo puzanje. Puzanje je pogotovo izraženo kod stijena visoke folijacije sa suprotno orijentiranom škriljavosti. Iz perspektive stabilnosti suprotna orijentacija je ona koja se spušta polako prema dolini ili ona koja ide strmo u padinu brijega sa smjerom folijacije paralelne sa padinom. Puzanje može izazvati veće i jače klizanje te ubrzati puknuće stijene zbog akumuliranja materijala koji može oslabiti čvrstoću stijenske mase.

Klizišta nastaju u prirodnim terenima u područjima škriljavaca te su uvjetovana orijentacijom škriljavosti. Pločica stijene se može odvojiti i kliznuti nizbrdo po tinjčastoj površini. Pojavom skliskih minerala kao talka i grafita klizanje nastaje pod kutom škriljavosti od 10° . Do klizanja može doći i u filitu i slejtu, ne samo po klivažu slejta nego i po slojevitosti. Padine u dolinama nas upozoravaju od opasnosti svojom asimetričnošću. Kod onih padina kod kojih je kut škriljavosti s relativno malim nagibom od $20^\circ - 30^\circ$, može doći do nastanka klizanja, dok na suprotnoj strani doline gdje se škriljavost spušta u padinu brda ne mora nastati ni puzanje niti klizanje te tako može biti strmija padina.

Prevrtnje je tipično za pločeste i škriljaste stijene, a pogotovo kad je folijacija strma. Ovo je obično slučaj u trošnome omotaču zato jer se u procesima trošenja otvaraju pukotine duž ravnina folijacije, dijeleći stijensku masu u tanke fleksibilne pločice.

5.3 Površinska iskapanja

Klizanje ploča po folijaciji posebna su prijetnja prilikom svih iskapanja u metamorfnim stijenama velike folijacije. Ovo upozorenje se posebno odnosi na zonu trošenja u kojoj su škriljavost i klivaž otvoreni i oslabljeni, a čvrstoća stijene je znatno smanjena. Prilikom izgradnje kanala za opskrbu vodom u Novom Zelandu koji je bio projektiran usijecanjem u škriljavcu pod kutom od 45° doživio je klizanje ploča na usječenom dijelu škriljavosti tako da je materijal morao biti skinut na prirodni kut orijentacije škriljavosti koji je iznosio 22° . To je prekoračilo volumen iskapanja i usporilo radove.

Uz mogućnost klizanja ploča i prevrtanja po škriljavosti i klivažu slejta koja možemo naći na prirodnim padinama, površinska iskapanja u folijacijskim metamorfnim stijenama moraju se suočiti i sa potencijalno nestabilnim blokovima. Metamorfne stijenske mase mogu imati različito orijentirana četiri ili više setova diskontinuiteta te njihovo križanje sa iskapanjem stvara poliedarske blokove. Neki od tih blokova mogu biti opasno orijentirani s obzirom na prostor iskapanja. Pukotine su obično ekstenzivne i postoje te mogu biti obložene slabim mineralima kao što su talk, klorit i grafit, te mogu biti glatke i sjajne. Potencijalno nestabilni blokovi mogu se pokrenuti ako ih ostavimo bez oslonca. Pomicanjem jednog bloka otvara prostor za pomicanje ostalih iza njega te može doći do velikog sloma. Teorija bloka nam daje bazu za projektiranje iskopa kako ne bi došlo do progresivnog pomicanja blokova.

Procedura teorije bloka nam pomaže pri opisu i lokaciji potencijalnih ključnih blokova prilikom iskapanja prije nego se potpuno oslobode. Metode su geometrijske i mogu se napraviti na stereografskoj projekciji ili na kompjutoru.

Među tipovima blokova koji stvaraju rizik od sloma stijene prilikom iskapanja su klinovi, formirani križanjem dviju ravnina i površine iskapanja tako da linija križanja pukotina izlazi na površinu u područje iskapanja. Prilikom ove vrste sloma blok stijene se kompletno izdvoji iz stijenske mase od samo dvije pukotinske površine i može doći do sloma samo od savladavanja trenja duž tih ravnina bez pucanja stijene.

Serijski klinovi se pojavila u metamorfnoj stijeni iznad Libby brane u Montani. Klinovi su nastali križanjem slojevitosti i klivaža. Klinovi su bili učvršćeni prednapregnutim horizontalnim sidrima. Veliki potencijalni klin je mogao kliznuti u akumulacijsko jezero i uzrokovati destruktivan val. U tu svrhu napravljen je detaljan sistem praćenja koji je programiran tako da upozori na bilo kakvo pomicanje.

5.4 Temelji građevina, uključujući brane

Temeljenjem u trošnim metamorfnim stijenama može se naići na tlo koje se može komprimirati, na pjeskovito ili prašinsto tlo, tako da su potrebni duboki temelji. Zbog manjih ili većih kvarcnih blokova može biti otežano bušenje bušotina velikog promjera za izvedbu pilota te ugradnja pilota do svježije stijene. Mogu se upotrijebiti piloti na trenje, koji nose teret na trenje duž svojih stranica. Još jedna alternativa je da se teret rasporedi na široke temelje na površini koji se zovu temeljne ploče.

Temeljnoj stijeni, tinčastom, kvarcom bogatom sapolitu je potrebna zaštita od isušivanja. Preporuča se u vrućim i suhim razdobljima, nakon iskopa za pripremu temelja, izliti tanka ploča od betona da ne dođe do sušenja prije nego se nalije beton za pravi temelj.

Kada je folijacija nagnuta prema jami inženjer mora biti jako oprezan da temelji na kosini ne bi bili ugroženi od klizanja. Istražne bušotine se buše na mjestu temelja građevine tako da se presijeku sve moguće klizne plohe. Ako je folijacija orijentirana tako da izlazi na površinu na mjestu ispod temelja, inženjer može odabrati tri rješenja: 1) postaviti temelj na veću dubinu da zanemari mogućnost izlaženja bilo koje potencijalne klizne plohe na površinu, 2) postaviti sidra tako da učvrste okolnu stijenu, 3) maknuti temelje negdje drugdje.

Prilikom proračuna slijeganja za građevine temeljene na folijacijskoj stijeni umjesto jednolikog širenja opterećenja, stijena nosi teret u smjerovima okomitim i paralelnim na folijaciju. Zbog stijenske anizotropije, stijena je značajno opterećena u tim smjerovima do dubine značajno veće nego što je diktirano konvencionalnim iskustvom.

U zoni trošenja slojevi kvarcita će dominirati u pojavi izdanaka omogućujući pogrešku prilikom odabira stijenske mase kao temelja za branu. Ako su folijacijski međuslojevi oslabili radi trošenja stijenska masa se može znatno komprimirati pod teretom nanesenim od brane bez obzira na veliku nestišljivost kvarcita. U nekim slučajevima duž slojeva je došlo do smicanja ili erozije te su se otvorile pukotine između slojeva kvarcita.

Na brani Kariba, na granici Zambije i Zimbabvea, prilikom istraživanja je utvrđeno da se desni bok brane sastoji od krutog kvarcita ispod kojeg leži gnajs. Obje stijene su procijenjene pogodnim za temeljenje 128 metara visoke dvostruko lučne brane. Tijekom izgradnje utvrđeno je da je gnajs ispod kontakta sa kvarцитom jako trošan te da je kvarcit jako frakturiran. Stručnjaci su mislili su da je prolazak vode kroz pukotine potrošio gnajs i oslabio kvarcu nosiva svojstva. No međutim površinska tla su bila isprana i zapunila neke pukotine čime su kvarcu vraćena svojstva kompresibilnosti. Ova otkrića su napravljena i istražena 1960 godine, godinu dana nakon rušenja brane Malpasset, u vrijeme velike geološke slabosti pri temeljenju lučnih brana, posebno u škrljastim stijenama. Kvarcit i trošni gnajs koji tvore prirodno uporište brane su djelomično maknuti i zamijenjeni betonom koji je položen direktno na čvrsti gnajs.

Kod lučne brane Tachien na Tajvanu, strmo izmjenično nagnuti slojevi kvarcita, slejtovog kvarcita i slejta izbijaju na površinu u uskom strmom klancu. Određivanje deformabilnosti stijene za temeljenje brane bio je veliki problem. Stijenska masa je uključivala i slojeve gline debele do 0,6 metara, najvjerojatnije nastale smicanjem po folijaciji. Osim toga bilo je pukotina i rasjeda koji su isjekli stijenu na blokove različitih veličina. Deformacijska svojstva stijene su mjerena na opterećenje in situ ispitivanjima. Rezultati su uneseni u veliki fizički model upotrijebljen za dizajniranje brane.

Fontana brana je konstruirana na području ispod kojeg se nalazilo puno pukotina te izmjenični slojevi filita i kvarcita, sa folijacijom koja leži paralelno sa nagibom padine formirajući desno uporište brane i ponirajući strmo u brdo formirajući lijevo uporište brane. Stijena je različito trošna varirajući od 3 – 30 metra. Dobar dio trošne stijene se morao ukloniti jer su bile omotane slojem različitih ostataka trošenja. Većina trošnog stjenkog materijala je uklonjena, dok su neki monoliti u temeljima ostavljeni iako su sadržavali pukotine. Iz tog razloga je bilo potrebno vrlo detaljno ispirati pukotine vodom pod visokim pritiskom i zapuniti ih injekcijskom smjesom (pukotine su bile širine do 0,75 m).

Konstrukcija temelja na predloženom mjestu za izgradnju lučne brane blizu Auburna u Kaliforniji je bila komplicirana zbog tinjčevog škriljavca u boku brane. Kako bi došli do čvrstog materijala za temeljenje iskapanje trošne stijene zahtijevala je posebne postupke u osiguranju stabilnosti pokosa građevne jame. Na mjestima stijena je rezana u ograničenim dijelovima, osigurana sidrima i injektirana prije otvaranja novog rova. Kao i kod brane Tachien, deformabilnost folijacijske stijene za temelj je bila određena opširnim istraživanjima in situ pokusima u podzemnim galerijama.

Škriljavac je zagonetan materijal kao temelj za velike brane. Neke brane smještene na škriljavcima su zadovoljavajuće izvedene, uključujući 285 metara visoku betonsku branu Grande Dixence u Švicarskoj. U drugu ruku škriljavost stvara mogućnost stvaranja ozbiljnih klizišta na pristupnim cestama, bokovima brane i padinama oko jezera. Folijacijski posmik zajedno sa drugim pukotinama može uzrokovati stabilnost blokova u bokovima i temeljima brane. Isto tako, škriljavac je generalno nepoželjan kao agregat betona zbog naoštrenog oblika i pucanja tinjca u tanke klivažne fragmente, sa gubitkom originalne gradacije. Ispuna škriljave stijene može biti nezadovoljavajuća zbog pucanja stijene za vrijeme komprimiranja i kasnijeg slijeganja. Došlo je do dva velika sloma kod kojih je škriljavac i škriljasti gnajs bio temeljna stijena – Malpasset brane i St. Francis brane.

Kod velikih brana, konstrukcija preljeva može biti komplicirana komponenta u projektu. Ovo je obično važno kod metamorfnih stijena, gdje se efekt oslabljenja folijacije pogoršava trošenjem stijene. Poteškoće s klizištima na preljevima i erozija materijala su nastale kod rezervoara Pardee u Sieri Nevadi.

5.5 Podzemna iskapanja

Masivni, gnajsovi bez folijacije stvaraju odlične uvjete za velika podzemne prostorije. Znatan razvoj podzemnih prostorija u Skandinaviji je u stijenama ove vrste. Bazeni, kazališta, hokej igrališta, industrijski objekti, proizvodni pogoni i objekti za puno različitih aktivnosti su vođene sigurno i ekonomično u velikim prostorijama iskopanim u ovim stijenama.

U drugu ruku, slojevit gnajs i stijene velike folijacije mogu stvarati problem stabilnosti kod podzemnih iskopa. Čak i mali tuneli koji se buše u trošnom škriljavcu i filitu može doći do padanja sa krovine i nestabilnosti čela radilišta.

Folijacijske metamorfne stijene su često bogate pukotinama tako da se prilikom iskapanja oslobađaju blokovi stijene. U Morrow Pointu strojarnica izgrađena u okastom škriljavcu i gnajsu blizu Montrosea u Koloradu, nastabilnost ekstremno velikog klina zahtijevala je vrlo brzu instalaciju dodatnih potpora kako bi se izbjegla katastrofa. U ovom slučaju blok je klizio po tankoj rasjednoj pukotini ispunjenoj glinom. Takva stijena predstavlja idealan materijal za upotrebu teorije bloka i u planiranju i projektiranju. Odabir orijentacije podzemne prostorije za minimaliziranje pojave ključnih blokova može znatno smanjiti poteškoće u konstrukciji i potrebnoj potpori.

Poseban problem sa folijacijskim stijenama nastaje kad se pokuša izgraditi tunela pri malom kutu u odnosu na folijaciju. Malo trenje folijacijskih površina uzrokuje skretanje krune svrdla i pomaka tunela sa svojeg određenog pravca. Poslije svakog napretka potrebno je

ispraviti otklon preusmjeravanjem novog napretka, ovo vodi do dugog profiliranja s znatnim gubitkom vremena.

Kvarcit i kvarcitni gnajs mogu uzrokovati veliko trošenje bušaćih kruna. Kvarcit je jako abrazivna stijena te je nemoguće iskapati stijenu sa TBM-om (krticom). Isto tako treba uzeti u obzir da prilikom busenja TBM-om u škriljavcima se mogu pojaviti slojevi kvarcita ili okasti oblici kvarcita te njihov utjecaj na trošenje noža. Nasmijemo se prevariti u mekoći stijene na izdancima. Svježa i netrošena stijena može izgledati i ponašati se sasvim drugačije.

Škriljavci imaju osobinu da se stisnu u tunelima pod velikim pritiscima. Problem može biti jasno izražen kod kloritnih škriljavaca, grafitnih škriljavaca, tinjčevih škriljavaca koji imaju malu čvrstoću stijenske mase. Stišljivost je najgora u normalnom smjeru škriljavosti.

Okna u stijeni sa strmim nagibom škriljavosti zahtijevaju specijalne konstrukcijske zahvate koji osiguravaju da su klinovi poduprti kontinuirano tijekom produblivanja. Znalo je biti ozbiljnih urušavanja okana u metamorfnim stijenama.

5.6 Materijali

Folijacijske metamorfne stijene nisu idealan stijenski materijal. Za početak teško ih je eksploatirati zbog promjenljivih struktura slabosti i potencijalnih pomicanja blokova. Blokovi imaju ravne i zaoštrene oblike koje kontrolira njihova škriljavost. Ako ih se stavi u stijensku ispunu i komprimira tanki rubovi mogu puknuti.

Kao agregat betona, folijacijske metamorfne stijene su manjkave. Klivaž tinjca proizvodi slobodne tinjčeve pločice koje sprječavaju uporabljivost i zahtijevaju veću količinu cementa.

Usprkos ovih poteškoća projekti su uspješno koristili folijacijske metamorfne stijene i kao agregate betona i kao stijenske ispune. Ali u svakom slučaju bile su potrebne studije da bi dokazali uporabljivost materijala.

6 POVIJEST BOLESTI

6.1 Stijenski uvjeti u Washington D.C., područje glavnog grada

Washington D.C., područje glavnog grada djelom se nalazi na trošnim metamorfnim stijenama, uključujući škriljavce, filit, zeleni škriljavac i serpentin. Stupanj metamorfoze škriljavca i filita raste od zapadnog djela predgrađa, obilježen kloritnim i muskovitnim škriljavcem, do centra grada gdje su kijanitni i staurolitni škriljavci. Škriljavost je dobro vidljiva i paralelna sa osnovnim ravninama glavnih bora. U nisko stupanjskom klorit-muskovit škriljavcu trošenje je više naglašeno od škriljavosti i dijeli se duž škriljavosti, razmaknute nekoliko milimetara te dugačkih par metara.

Javljaju se brojne pukotine u barem četiri seta: paralelno sa škriljavosti, izrazito paralelan sa škriljavošću ali ponire u suprotnom smjeru, te dva smjera koso na škriljavost. Većina pukotina su stiješnjene u netrošenoj stijeni, ali su u toliko velikom broju da bi stijena mogla puknuti u blokove od nekoliko metara.

Zone smicanja se javljaju paralelno sa folijacijom.

Trošenjem u području Washingtona je nastalo tlo debelo 10 do 15 metara, ali lokalno i do 50 metara. U zoni saprolita ima manje od 10% stijenskih blokova ili gromada, te sadrži i do 10% gline u gornjim djelovima te tinjac. Sa dubinom raste udio pijeska na račun gline. Saproliti imaju malu jediničnu težinu te se mogu znatno komprimirati.

Podzemna željeznica u Washingtonu je iskopana djelomično u metamorfnim stijenama. Krtica se začepila u saprolitima. Početni promjer tunela od 6 metara pokazao se nedovoljnim u trošnoj stijeni na lokaciji zona smicanja po folijaciji. U trošnoj zoni tunela došlo je do poteškoća zbog pojave izmiješanih materijala i stijene i tla na čelu radilišta. Iskapanje tunela u svježoj metamorfnoj stijeni je bilo suho osim kod iskopa kroz zone smicanja po folijaciji.

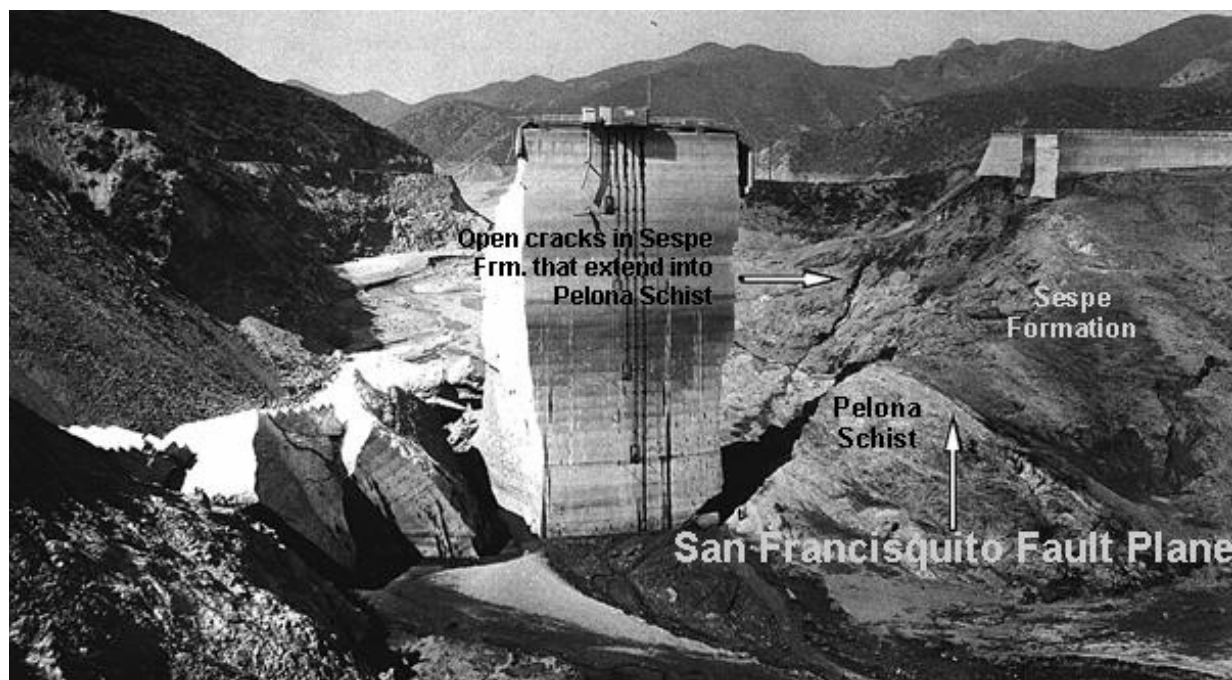
Temeljenje velikih građevina, u saprolitima, je obavljano na stupovima, pilotima ili kesonima na tvrdom temeljnom materijalu kako bi se prevladalo potencijalno slijeganje komprimirajućeg tinjčevog pjeskovitog tla. SPT je nekada nepouzdan u saprolitima zbog prisutnosti kvarcitnih blokova i gromada.

6.2 Slom brane St. Francis

Brana St. Francis je bila zaobljena betonska građevina 62 metra visoka, u kanjonu blizu Saugusa, 45 milja od Los Angelesa. Lijevi bok brane se nalazilo na muskovitnom škriljavcu, sa puno smicanja po folijaciji koje su sadržavale mekani tinjac. Škriljavost je ponirala pod kutom od 35° , paralelno sa padinom kanjona. Pretpostavlja se da je strma padina kanjona nastala klizanjem po škriljavosti. Okolna klizišta su ukazivala na nestabilnost škriljavca.



Desni bok se nalazilo na sedimentnoj stijeni koja je sadržavala konglomerate, pješčenjake i siltit. Direktno ispod brane je bio aluvijalni konglomerat koji je sadržavao oblutke škriljavca i granita u tinjčevoj matrici te je bio išaran žilama gipsa. Konglomerat je bio tvorac brazde koji se brzo omekšao umakanjem u vodu, vjerojatno rastapanjem gipsa, a nalazio se na kontaktu sa škriljavcem. Kontakt je bio glavni rasjed, 20 centimetara debeli žlijeb škriljastih fragmenata u glinastoj matrici kod koje je sa jedne strane bilo 3 metra frakturiranog škriljavca, a sa druge strane 1-2 metra zdrobljenog konglomerata kod kojeg su vene bile ispunjene gipsom.



Brana se srušila dvije godine nakon izgradnje kada je akumulacija bila gotovo puna, po prvi puta. Istraživačka komisija je zaključila da je do puštanja i erozije došlo ispiranjem materijala u rasjednoj zoni. Ispiranjem je nastao privilegirani tok koji se proširio na konglomerat i uzrokovao rušenje desne strane brane. Nakon toga se ispiranje proširilo i erodiralo donji dio škriljaste padine na lijevom boku koje je uzrokovalo pojavu velikog klizišta koje je uništilo lijevi dio brane. Nakon sloma ostao je samo monolit na sredini doline. Oko 420 osoba se utopilo na 54 milje dugom putu poplave do mora.



6.3 Slom brane Malpasset

Malpasset brana je bila duplo zaobljena lučna brana, visoka 63 m, izgrađena blizu Frejus u Francuskoj nedaleko Canna. Stijena koja se nalazila u temelju je škriljasti gnajs, sa kvarcom i feldspatom kao glavnim mineralima te okastom teksturom. Biotit i muskovit raspoređeni kroz strukturu i koncentrirani u škriljaste slojeve su formirali od 30-40% volumena stijene. Gnajs je uslojen, a tinjčasti slojevi su škriljasti sa ponirajućom škriljavosti od 30-50° nizvodno i prema desnoj strani rijeke.



Stijenska masa je intenzivno frakturirana. U mikroskopskim tankim dijelovima pukotine se javljaju između pločica tinjca te su ispunjene sericitom ili argilitom. Dok se golim okom na uzorcima vide dvije vrste pukotina: grube pukotine ispunjene sericitom koje su udaljene 2-3 centimetra i planarne pukotine udaljene 20-50 centimetra. Pukotine se javljaju u tri seta: jedan set pukotina paralelan je sa škriljavosti, a dva seta su okomita na njega. Stijenska masa je ispresijecana mnogim smičnim pukotinama udaljenim nekoliko metara i rasjedima udaljenim oko 20 metara. Smične pukotine i rasjedi su ispunjeni različitim materijalima kao što su milonit ili breča sa razmakom od nekoliko desetaka centimetara. Zbog čega je stijena bila značajno diskontinuirana.

Zbog intenzivne raspucanosti i izmjene minerala, stijena ima malu tlačnu čvrstoću. Čvrstoća suhih uzoraka varira od 10 do 100 MPa, sa prosjekom od 58 MPa. Saturirani uzorci su znatno slabiji od 10 do 80 MPa, u prosjeku 42,5 MPa. Te čvrstoće su slične betonu, ali su izrazito niske za gnajs. Pukotine utječu na čvrstoću stijenske mase, povećanjem uzoraka tlačna čvrstoća znatno otpada.

Brana se potpuno srušila za vrijeme svog prvog punjenja 1959. godine, pet godina nakon izgradnje. Poplava je uništila grad Frejus te ubila 400 ljudi. Klin zvan dihedron protezao se duž cijele visine lijevog boka brane. Formiran je presjecištem dvaju planarnih ploha stijene. Linija presjecišta tih dviju ploha ponire niz padinu i blago uzvodno. Jedna površina klina nastala je rasjedom te je bila okomita na rijeku i ponirala pod kutom od 45° uzvodno te je bila ispunjena glinovitom brečom. Rasjed se protezao preko rijeka, prolazio je ispod brane te je prolazio desnim bokom brane. Druga površina klina je nastala rasjedom brojnih smicanja i bila paralelna folijaciji te je rasjed bilo ispunjen milonitom. Klin stijene koji je ležao na tim površinama iskliznuo je radi punjenja akumulacijskog jezera vodom koja je natopila i tako oslabila njegove kontaktne površine.



Nakon pažljivog i temeljitog istraživanja važnih čimbenika uzrok sloma je pripisan pomaku klina kao rezultat pritiska na branu i pritisak podzemne vode na jednu površinu klina. Problem pritiska podzemne vode se pogoršavao zatvaranjem pukotina ispod linije pritiska lučnog uporišta, koji je prekinuo prirodnu propusnost stijene i stvorio efekt prekinute stijene unutar uporišta.

Klin se odvojio od jedne površine i kliznuo nizvodno istežući i probijajući branu. Cijeli lijevi bok brane je bio oslonjen na jedan veliki odvojivi klin.



Statička analiza klina pod utjecajem svoje težine, pritiska brane i akumulacije te pritisak podzemne vode na jednu površinu klina, pokazuje da je kut trenja od samo 13° na obje površine klina mogao održati ravnotežu. Mali kut trenja rasjedne plohe, očito manji od 13° , dopustio je započinjanje sloma. Jednom kada se blok počeo kretati počeo je djelovati cijeli pritisak akumulacije na otvorenu površinu rasjeda, što je zahtijevalo kut trenja od 30° na drugoj površini klina da zadrži ravnotežu.

