

Sveučilište u Zagrebu
Prirodoslovno-matematički fakultet
Geološki odsjek
Mineraloško-petrografski zavod

**Skripta iz Mineralogije i petrologije
(168821, 159520, 46593, 102431)
za studente preddiplomskog i diplomskog studija geografije i
geografije i povijesti**

ak. god 2020./21.

ljetni semestar

Sastavio:
mr. sc. Dražen Kurtanjek

SADRŽAJ

1. MINERALOGIJA.....	4
1.1. Uvod.....	4
1.2. Pravilna unutrašnja građa minerala.....	5
1.2.1. Bravais-ove jedinične ćelije	6
1.2.2. Kemijske veze u kristalima i tipovi struktura	8
1.2.3. Veličina atoma – atomski radijus.....	10
1.2.4. Ionski radijus.....	11
1.2.5. Koordinacijski broj (poliedar).....	12
1.3. Kristalni sustavi	13
1.4. Simetrija kristala	13
1.5. Kristalne forme	16
1.6. Polimorfija	17
1.7. Izomorfija.....	19
1.8. Kristali mješanci	19
1.9. Amorfni minerali	22
1.10. Fizička svojstva minerala.....	24
1.11. Sistematizacija minerala	28
1.11.1. Silikati	30
2. PETROLOGIJA.....	33
2.1. Uvod.....	33
2.2. Magmatske stijene	33
2.2.1. Karakteristike magme	33
2.2.2. Oblici pojavljivanja magmatskih stijena.....	35
2.2.3. Vulkanske erupcije.....	37
2.2.4. Lučenje magmatskih stijena.....	39
2.2.5. Tekstura i struktura eruptivnih stijena	40
2.2.6. Mineralni sastav	44
2.2.7. Klasifikacija magmatskih stijena	45
2.2.8. Geneza magmatskih stijena.....	47
2.2.9. Kristalizacijski stadiji.....	49

2.3. Sedimentne stijene	51
2.3.1. Uvod.....	51
2.3.2. Klasifikacija sedimentnih stijena	51
2.3.3. Sedimentni ciklus.....	52
2.3.3.1. Trošenje.....	52
2.3.3.2. Transport i taloženje	57
2.3.3.3. Dijageneza.....	63
2.3.4. Siliciklastični (terigeni) sedimenti	64
2.3.4.1. Uvod.....	64
2.3.4.2. Građa siliciklastičnih sedimenata/stijena.....	65
2.3.4.3. Strukturne karakteristike	66
2.3.4.4. Teksturne karakteristike	68
2.3.4.5. Klasifikacija siliciklastičnih sedimenata/stijena	69
2.3.5. Karbonatni sedimenti/stijene	71
2.3.5.1. Uvod.....	71
2.3.5.2. Vapnenci	72
2.3.5.3. Dolomiti	79
2.3.6. Silicijski sedimenti.....	80
2.3.7. Ugljen, naftni šejlovi, nafta.....	81
2.3.7.1. Ugljeni.....	82
2.3.7.2. Naftni šejlovi.....	84
2.3.7.3. Nafta.....	84
2.3.8. Fosfatni sedimenti.....	85
2.3.9. Kemijski sedimenti/stijene (evaporiti, željezoviti sedimenti)	86
2.3.9.1. Evaporiti.....	86
2.3.9.2. Željezovite sedimentne stijene.....	88
2.3.10. Vulkanoklastični sedimenti.....	89
2.3.11. Sedimentni okoliši	90
2.4. Metamorfne stijene	92
2.4.1. Uvod.....	92
2.4.2. Pocesi i čimbenici metamorfoze	92
2.4.3. Strukture metamorfnih stijena.....	95

2.4.4. Teksture metamorfnih stijena	97
2.4.5. Vrste metamorfoza.....	99
2.4.6. Mineralni sastav	103
2.4.7. Metamorfni facijesi	105
2.4.8. Klasifikacija metamorfnih stijena	107
3. LITERATURA	111
4. DODATAK.....	112
4.1. Pregled najvažnijih petrogenih minerala i njihovih svojstava	112
4.2. Geotektonska karta svijeta	124
4.3. Poveznice na video zapise	125

1. Mineralogija

1.1 Uvod

Mineralogija je znanost o mineralima koja proučava njihovu unutrašnju građu, oblik, fizikalna i kemijska svojstva, te njihov postanak.

Kratak povijesni pregled razvoja mineralogije:

-Teofrast (371-286 pr. K.) - *“O stijenama”*,

-Plinije Stariji (23-79) - *“Historia naturalis”*

-1530. Georg Bauer (Georgius Agricola) - *“De re metalica”*

-1669. Niels Stensen (Nicolaus Steno) pravilnost na kristalima kvarca

-1772. Jean-Baptiste Romé de l'Isle 1. kristalografski zakon tzv. Zakon o stalnosti kuteva,

-1780. Carangeot - kontaktni goniometar

-1784. René-Just Haüy - *“molekule sastavljačice”* (danas to zovemo jedinične ćelije)

-1801. 2. kristalografski zakon tj. zakon o racionalnom odnosu parametara

-1815. Cordier koristi obični mikroskop, 1828. W. Nicol izumio polarizator,

-1858. H.C. Sorby konstruirao i koristio polarizacijski mikroskop

-druga polovica XIX. st. - E.S. Fjodorov, A. Schönflies i W. Barlow - teorije o unutrašnjoj

simetriji i uređenosti kristalnih struktura - kristalna struktura je izgrađena od pravilno

raspoređenih atoma koji sačinjavaju prostornu rešetku. Svojim teorijama postavljaju temelje rendgenske kristalografije.

-1912. W. Friedrich i P. Knipping na poticaj Maxa von Lauea, pokazali da kristali difraktiraju rendgensko zračenje i time dokazali da imaju pravilnu uređenu unutrašnju građu.

-1914. W.H. Bragg i njegov sin W.L. Bragg objavljuju prve kristalne strukture.

-početkom šezdesetih godina XX. st značajni doprinos razvoju mineralogije dala je pojava elektronske mikroprobe

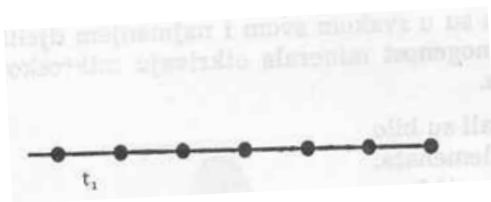
-visokorazlučivi transmisijski elektronski mikroskop početkom sedamdesetih omogućio je svojim povećanjima od nekoliko milijuna puta promatranje unutrašnje građe kristala.

Minerali su homogene čvrste tvari pravilne unutrašnje građe nastale prirodnim, uglavnom anorganskim procesima, definiranog kemijskog sastava koji se može izraziti kemijskom formulom. Iz kemijskih formula vidimo koje kemijske elemente minerali sadrže i u kojim proporcijama.

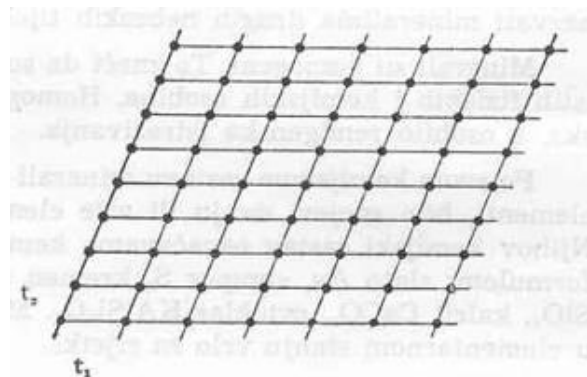
Homogenost minerala odnosi se na jednakost građe, kemizma i fizikalnih svojstava u svakom i najmanjem njegovu dijelu. Iz definicije minerala slijedi da tekućine i taljevine nisu minerali, kao ni staklo (npr. voda kao tekućina zadovoljava većinu elemenata definicije minerala, no ne i onu o pravilnoj unutrašnjoj građi, te stoga nije mineral, ali kad kristalizira u led pri čemu se stvara pravilna unutrašnja, kristalna građa, onda to postaje).

1.2. Pravilna unutrašnja građa minerala

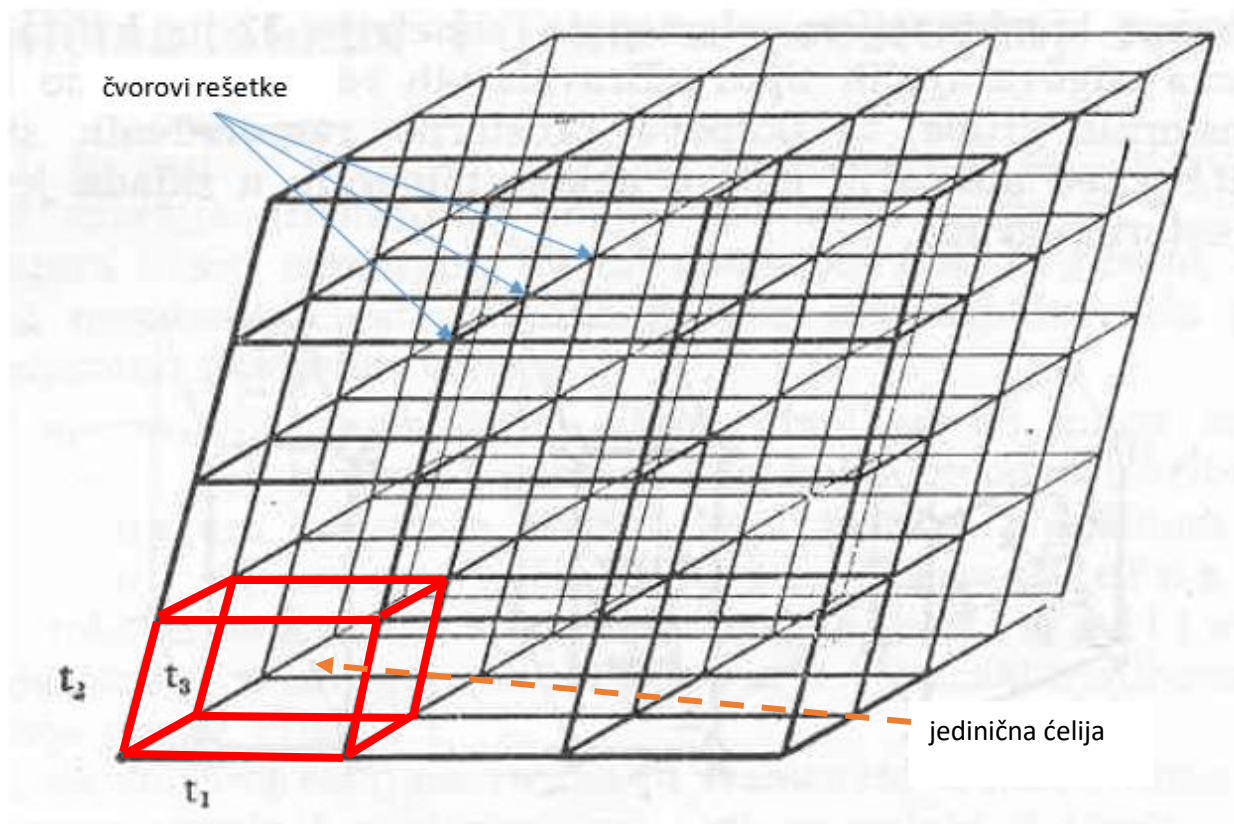
Unutarnja građa minerala može se predložiti pravilnom trodimenzionalnom rešetkom čije čvorove zamjenjuju materijalne čestice – ioni, atomi, molekule (sl. 3). Ako materijalnu česticu ponavljamo, translaticamo za udaljenost t_1 po nekom pravcu dobit ćemo točkasti niz istovrsnih materijalnih čestica (sl. 1). Ako takav točkasti niz translaticamo za udaljenost t_2 po nekom drugom pravcu koji leži u istoj ravnini dobit ćemo mrežnu ravninu (sl. 2), a ako tu mrežnu ravninu translaticamo za neku udaljenost t_3 u smjeru trećeg pravca, koji ne leži u istoj ravnini s prva dva, dobit ćemo trodimenzionalnu, kristalnu rešetku istovrsnih materijalnih čestica (sl. 3). Temeljna jedinica kristalne rešetke je jedinična ćelija koja ima oblik paralelepipeda (sl. 3). Ona se ponavlja u kristalu periodički u tri pravca od kojih dva leže u istoj ravnini.



Sl. 1 Točkasti niz istovrsnih materijalnih čestica



Sl. 2 Mrežna ravnina istovrsnih materijalnih čestica



Sl. 3 Trodimenzionalna, kristalna rešetka

1.2.1. Bravais-ove jedinične ćelije

Jedinična ćelija je definirana bridovima a , b , c i kutevima između njih, α , β , γ (sl. 4)

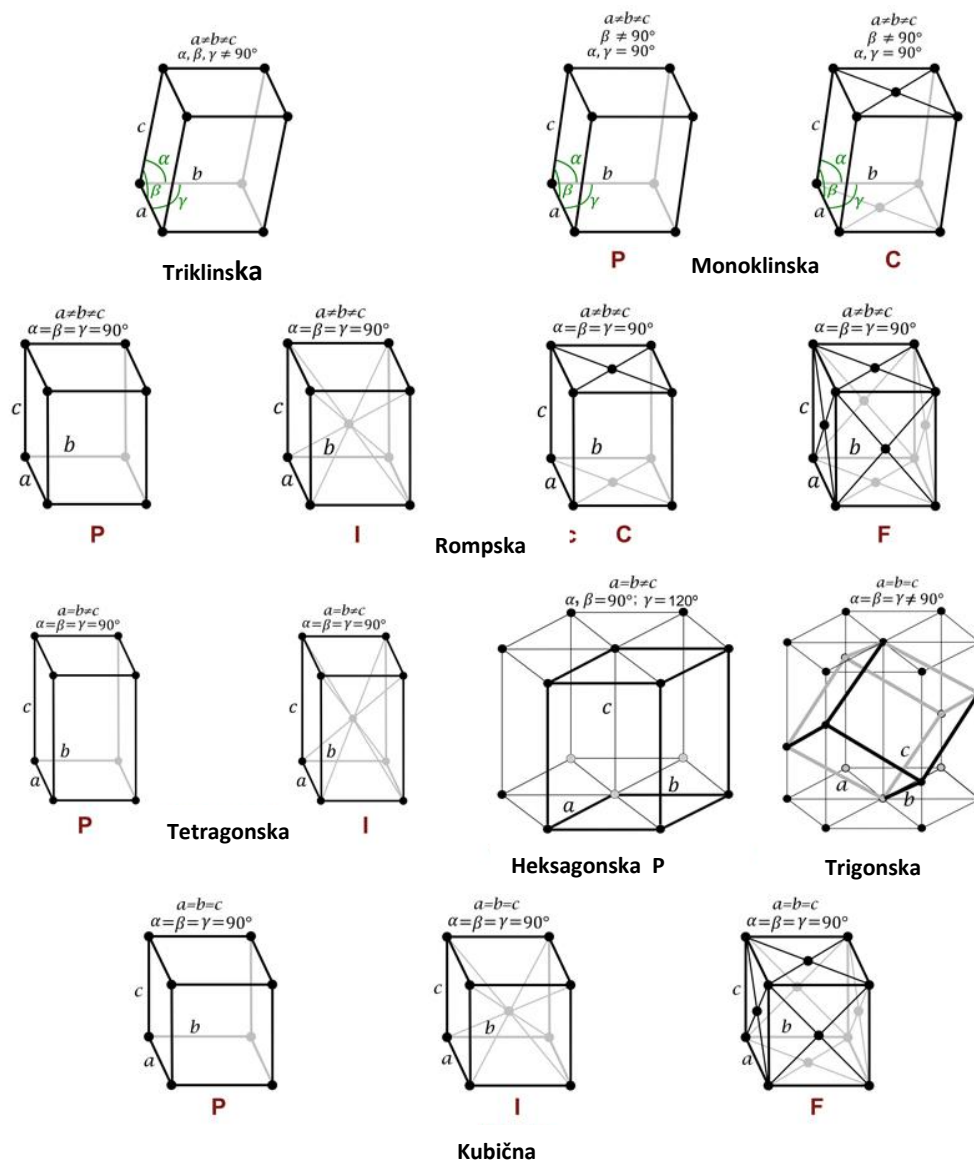
Prema duljini bridova i veličini kutova među njima razlikuje se sedam tipova jediničnih ćelija (kubična, tetragonska, rompska, monoklinska, triklinska, heksagonska, trigonska). Bridovi jedinične ćelije tvore koordinatni sustav koji se u kristalografiji zove osni križ i određuje kristalni sustav, a može biti pravokutni ili kosokutni (vidi poglavlje 1.3).

Prema rasporedu materijalnih čestica u ćeliji razlikuju se četiri tipa:

- **Primitivna ili jednostavna ćelija (P)** (materijalne čestice samo u vrhovima paralelepipeda)
- **Volumno ili prostorno centrirana ćelija (I)** (materijalne čestice na vrhovima i u središtu volumena paralelepipeda)
- **Plošno centrirana ćelija (F)** (materijalne čestice na vrhovima i u sredini svake plohe paralelepipeda)

- **Bazno centrirana ćelija (A, B ili C)** (ćelija centrirana po paru ploha) (materijalne čestice na vrhovima i na sredini dviju nasuprotnih ploha paralelepipeda).

Ako se udruže odnos bridova i kutova te raspored materijalnih čestica u jediničnoj ćeliji, moguće je izdvojiti 14 tipova jediničnih ćelija (Bravais-ove ćelije)(sl. 4)



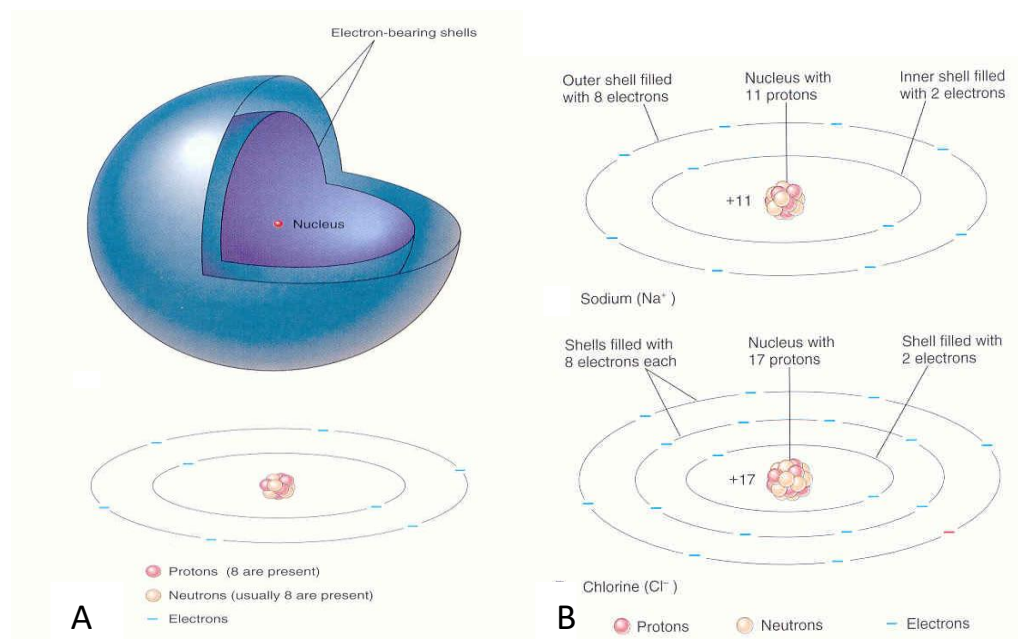
Sl. 4 Bravais-ove jedinične ćelije

Složenije kristalne strukture mogu se interpretirati kao različite kombinacije Bravais-ovih jediničnih ćelija. Tako npr. struktura halita, NaCl, sadrži dvije kubične plošno centrirane jedinične ćelije, jednu od iona Na^+ , a drugu od iona Cl^- utisnute jedna u drugu.

1.2.2. Kemijske veze u kristalima i tipovi struktura

Minerali se sastoje od jednog ili više kemijskih elemenata, a materijalne čestice su raspoređene u čvorovima kristalne rešetke. U ravnoteži su zbog djelovanja kemijskih privlačnih i odbojnih sila, koje su različite vrste i jakosti.

U najvećem broju kristala prevladava ionska veza između iona metala koji lako otpuštaju elektrone i postaju kationi (sl. 5B) i iona nemetala koji lako primaju elektrone i postaju anioni (sl. 5B). Kationi i anioni izgrađuju **ionsku strukturu**.



Sl. 5 Građa atoma (A) i iona (B)

Ionske veze nisu usmjerene, pa privlačne sile djeluju u svim smjerovima jednako. Kao cjelina kristalna je struktura neutralna t.j. mora imati jednak broj kationa i aniona.

U nekim mineralima veza je kovalentna, pa atomi izgrađuju **atomsku strukturu**, npr. dijamant, C. Kovalentna veza ostvaruje se između nemetala tvorbom zajedničkih elektronskih parova koji pripadaju spojenim atomima. Veoma je čvrsta i usmjerena je od atoma prema atomu.

Metalnu vezu ostvaruju atomi metala koji izgrađuju **metalnu strukturu** (npr. kod bakra, željeza itd.). Oni lako otpuštaju elektrone koji su zajednički većem broju atoma i veoma su pokretljivi.

Između neutralnih molekula djeluju slabe Van der Waals-ove sile pomoću kojih se ostvaruje **molekularna struktura** (npr. kod sumpora, grafita).

Tipovi veza imaju veliki utjecaj na fizička svojstva minerala (Tablica 1). Tako npr. kristali s ionskim tipom kemijske veze imaju visoko talište i loši su vodiči električne struje, kristali s kovalentnim tipom kemijske veze imaju veliku tvrdoću, visoko talište, netopljivi su i ne vode električnu struju. Kristali s metalnom vezom su pak dobri vodiči električne struje i topline i kovni su, a oni kod kojih je prisutna Van der Waals-ova sila imaju malu tvrdoću i izraženu kalavost.

Svojstva	Tip veze			
	ionska	kovalentna	metalna	Van der Waals-ova
Jakost veze	Jaka	Vrlo jaka	Varijabilna jakost, općenito srednja	slaba
Mehanička svojstva	Tvrdoća umjerena do visoka, ovisno o međuionskom razmaku i naboju; krhki	Tvrdoća vrlo visoka; krhki	Tvrdoća niska do umjerena; plastičnost, kovnost	Kristali mekani
Električna	Slabi vodiči u čvrstom stanju; taljevine i otopine provode struju	Izolatori u čvrstom stanju i taljevine	Dobri vodiči	Izolatori i u čvrstom i tekućem stanju
Termalna (talište; koeficijent termalne ekspanzije=KTE)	Talište umjereno do visoko ovisno o međuionskom razmaku i naboju; niski KTE	Talište visoko; niski KTE; atomi i molekule u taljevine	Talište varijabilno; KTE također; atomi u taljevine	Nisko talište; visoki KTE; molekule tekućih kristala u taljevine
Topljivost	Topljivi u polarnim otapalima; daju otopine koje sadrže ione	Topljivost vrlo slaba	Netopljivi, osim u kiselinama ili lužinama	Topljivi u organskim otapalima
Strukturna	Strukture visoke koordinacije i visoke simetrije; neusmjerene	Strukture niže koordinacije i simetrije; strogo usmjerene	Strukture vrlo visoke koordinacije i simetrije; neusmjerene	Strukture niske simetrije; neusmjerene
Primjeri	halit, NaCl; kalcit, CaCO ₃ ; fluorit, CaF ₂ ; većina minerala	dijamant, C; sfalerit, ZnS; molekule O ₂ , organske molekule	bakar, Cu; srebro, Ag; zlato, Au; većina metala	Jod, I ₂ ; organski spojevi; grafit, C

Tablica 1. Odnos tipova veze i fizičkih svojstava minerala

Kristali se formiraju (odnosno, dolazi do kristalizacije) iz otopina, taljevina i iz plinovitog stanja. Atomi, ioni, molekule u takvim neuređenim stanjima imaju slučajnu distribuciju (statistička homogenost), ali s promjenom temperature, tlaka i koncentracije oni mogu stvarati uređene, pravilne strukture (periodička homogenost) po principu trodimenzionalne, kristalne rešetke karakteristične za kristalizirano stanje.

Sve kristalizirane tvari, pa tako i minerali, mogu se razviti u kristalima. Kristal je kruto tijelo omeđeno prirodnim ploham nastalim prilikom njegova rasta koje su vanjski odraz njegove pravilne unutrašnje građe. Kristalne plohe su paralelne s mrežnim ravninama. Dakle, vanjski izgled kristala odraz je njegove unutrašnje građe i specifičnih uvjeta kao npr. šupljina, dovoljan prinos građevnih elemenata, odnosno materijalnih čestica, atoma, iona i/ili molekula.

1.2.3. Veličina atoma – atomski radijus

Atomski radijus (sl. 6) je pojam kojim opisujemo veličinu atoma, govori koliko daleko se elektroni u jednom atomu mogu pružati daleko od jezgre, te predstavlja prostor u kojem je vjerojatnost nalaženja elektrona najmanje 95 %, drugim riječima to je udaljenost od jezgre do najzadnje elektronske orbitale ili pojednostavljeno, možemo ga definirati kao radijus kruga, kojemu je središte jezgra atoma, a rub vanjska orbitala elektrona.

Atomski radijus nekog elementa ili ionski radijus iona ne moraju biti konstantni, mogu biti različiti u različitim kristalnim strukturama. To ovisi o tipu kemijskih veza i koordinacijskom broju (broju najbližih susjednih atoma ili iona koji okružuju neki specifični atom ili ion). Tako postoje:

Kovalentni radijus: radijus atoma nekog elementa kada je kovalentnom vezom vezan za drugi atom, izveden iz udaljenosti između jezgri atoma u molekuli. U principu udaljenost između dva atoma vezanih u molekuli (duljina kovalentne veze) treba odgovarati sumi njihovih kovalentnih radijusa.

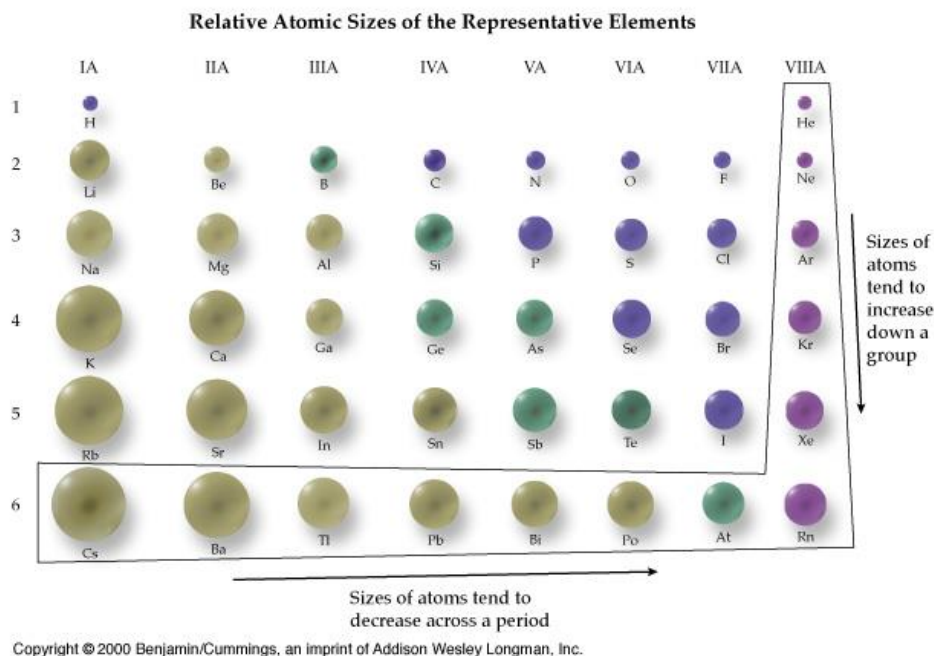
Metalni radijus: radijus atoma nekog elementa kada je vezan za drugi atom metalnom vezom

Van der Walsov radijus: pola minimalne udaljenosti između jezgri dva atoma koja nisu vezana u istoj molekuli, a molekule se drže zajedno van der Walsovom vezom.

Ionski radijus: radijus iona elementa u određenom ionizacijskom stanju, dobiven iz udaljenosti jezgri atoma u kristalima soli koje uključuju taj ion. U principu udaljenost između dva suprotno

nabijena iona koji se dodiruju (duljina ionske veze) treba odgovarati sumi njihovih ionskih radijusa.

Bohrov radijus: radijus elektronske orbite najniže energije predviđen Bohrovim modelom atoma. Prikladan je samo za atome i ione s jednim elektronom.



Sl.6 Veličina atoma - atomski radijusi

1.2.4. Ionski radijus

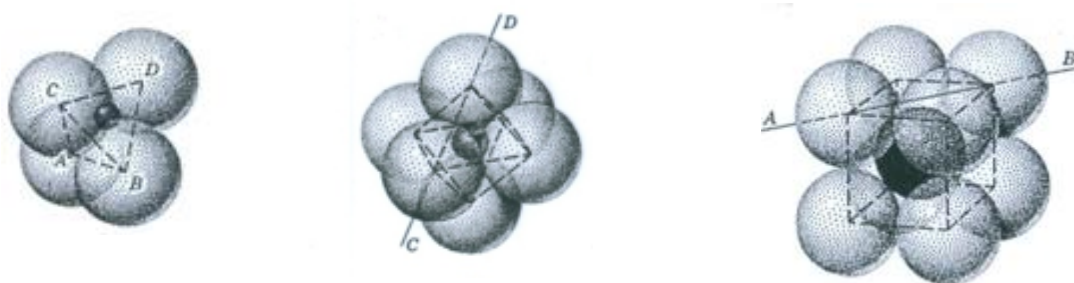
- Prilikom prijelaza neutralnog atoma u ion dolazi do promjene u njegovoj veličini (sl. 7)
- Kationi imaju manji ionski radijus od svojih neutralnih atoma
- Anioni imaju veći ionski radijus nego njihovi neutralni atomi
- Za elemente iste grupe, ionski radijus se povećava s povećanjem atomskog broja (npr. u grupi IIa najmanji ion je Be^{2+} (0,35Å), a najveći ion je Ra^{2+} (1,43Å).
- Za katione istog elementa, ali različitog naboja, npr. Mn^{2+} (0,80Å), Mn^{3+} (0,66Å), Mn^{4+} (0,60Å), Mn^{5+} (0,46Å), radijus se smanjuje s povećanjem naboja

Sizes of atoms and their ions in pm									
Group 1		Group 2		Group 13		Group 16		Group 17	
Li ⁺	Li	Be ²⁺	Be	B ³⁺	B	O	O ²⁻	F	F ⁻
									
90	134	59	90	41	82	73	126	71	119
Na ⁺	Na	Mg ²⁺	Mg	Al ³⁺	Al	S	S ²⁻	Cl	Cl ⁻
									
116	154	86	130	68	118	102	170	99	167
K ⁺	K	Ca ²⁺	Ca	Ga ³⁺	Ga	Se	Se ²⁻	Br	Br ⁻
									
152	196	114	174	76	126	116	184	114	182
Rb ⁺	Rb	Sr ²⁺	Sr	In ³⁺	In	Te	Te ²⁻	I	I ⁻
									
166	211	132	192	94	144	135	207	133	206

Sl.7 Ionski radijusi u usporedbi s atomskim radijusima

1.2.5. Koordinacijski broj (poliedar)

Kad se suprotno nabijeni ioni sjedine u kristalnu strukturu koje je dominantno ionska (elektrostatska), svaki ion ima tendenciju okupiti oko sebe (koordinirati) maksimalan broj suprotno nabijenih iona. Ione zamišljamo kao kugle koje su međusobno u kontaktu. Koordinirani ioni uvijek se grupiraju oko centralnog iona tako da njihovi centri leže u vrhovima poliedra. Tako, u stabilnoj kristalnoj strukturi, svaki kation leži u centru koordinacijskog poliedra građenog od aniona. Broj aniona u koordinacijskom poliedru oko centralnog kationa određuje koordinacijski broj kationa i determiniran je odnosom njihovih veličina. Po istom principu može se odrediti i koordinacijski broj aniona – broj kationa u koordinacijskom poliedru oko centralnog aniona. Najčešći su koordinacijski brojevi 4, 6 i 8, a odgovarajući poliedri tetraedar, oktaedar i heksaedar (sl. 8).



Sl. 8. Koordinacijski brojevi 4, 6 i 8, odnosno koordinacijski poliedri tetraedar, oktaedar i heksaedar

1.3. Kristalni sustavi

Svi kristali svrstani su s obzirom na svoju jediničnu ćeliju u određene kristalne, odnosno koordinatne sustave. Svaki koordinatni sustav određuju tzv. kristalografske osi, paralelne s vektorima koji su definirali jediničnu ćeliju. Na temelju veličina kristalografskih osi, odnosno jedinica po njima koje su u skladu s dužinama bridova jedinične ćelije, te kuteva među osima, razlikujemo 6 odnosno 7 koordinatnih sustava tj. 6 odnosno 7 kristalnih sustava (sl. 8):

Kubični sustav – ima tri jednake i međusobno okomite osi ($a=b=c$ $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$, tj. $a_1=a_2=a_3$)

Tetragonski sustav – ima tri međusobno okomite osi od kojih su dvije vodoravne jednake, a treća okomita je dulja ili kraća od vodoravnih ($a=b\neq c$ $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$, tj. $a_1=a_2\neq c$)

Rompski sustav – ima tri nejednak i međusobno okomite osi ($a\neq b\neq c$ $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$)

Monoklinski sustav – ima tri nejednake osi; dva kuta su 90° , a treći je različit od 90° tako da je os a nagnuta prema promatraču ($a\neq b\neq c$ $\alpha=\gamma=90^\circ$ $\beta\neq(>)90^\circ$)

Triklinski sustav – ima tri nejednake osi i tri kuta različita od 90° ($a\neq b\neq c$ $\alpha\neq\beta\neq\gamma$)

Heksagonski sustav – ima četiri osi od kojih su tri, koje se nalaze u vodoravnoj ravnini i zatvaraju kut od 120° , jednake, a četvrta je okomita, dulja ili kraća ($a_1=a_2=a_3\neq c$ $\alpha_1=\alpha_2=\alpha_3=120^\circ$ $\delta=90^\circ$).

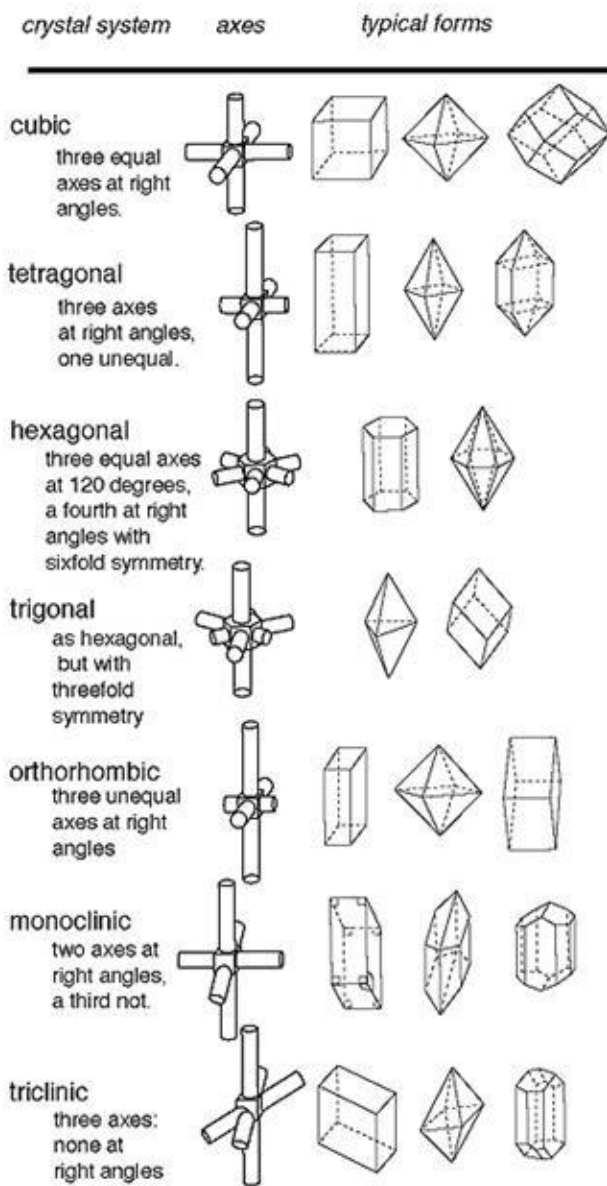
Osni križ heksagonskog sustava uzima se često kao zajednički i za kristale trigonskog sustava, pa trigonski sustav neki mineralozi nazivaju podsustavom heksagonskog sustava.

1.4. Simetrija kristala

Simetrija je jedno od temeljnih svojstava kristala, izraženo 2. kristalografskim zakonom, zakonom simetrije, prema kojem se pri promjeni nekoga geometrijskog elementa kristala mijenjaju i ostali istovrsni geometrijski elementi. Ovaj zakon je 1801. definirao francuski mineralog R. J. Haüy. Ako npr. na jednom vrhu kristala oblika kocke (heksaedra) započne tvorba nove plohe, na svim ostalim vrhovima također će nastati istovrsna ploha.

Elementi simetrije kristala mogu biti elementi makrosimetrije koji imaju odraz na vanjskoj simetriji kristala i elementi mikrosimetrije zbog kojih kristali imaju unutarnju simetriju (na nivou atoma i iona). Na temelju elemenata makrosimetrije kristali su grupirani u 32 kristalne klase, a na temelju svih elemenata simetrije (i makro i mikro) u 230 prostornih grupa. Dakle, svaka kristalna klasa predstavlja jednu jedinstvenu kombinaciju elemenata makrosimetrije. Jednostavni

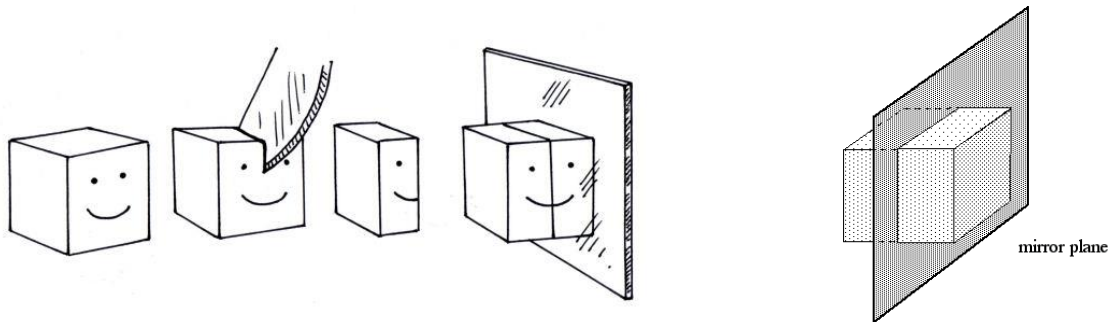
elementi makrosimetrije (ponavljaju istovrsne geometrijske elemente samo jednom simetrijskom operacijom) su ravnina simetrije (zrcaljenje), rotacijske osi simetrije (rotacija) i centar simetrije (inverzija).



Kristalni sustav	Osni sustav
Kubični	$a=b=c$ $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ tj. $a_1=a_2=a_3$
Tetragonski	$a=b\neq c$ $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ tj. $a_1=a_2\neq c$
Heksagonski	$a=b\neq c$ $\alpha=\beta=90^\circ$ $\gamma=120^\circ$ tj. $a_1=a_2\neq c$ odnosno $a_1=a_2=a_3\neq c$ $\alpha_1=\alpha_2=\alpha_3=120^\circ$ $\delta=90^\circ$
Trigonski	$a_1=a_2=a_3$ $\alpha=\beta=\gamma\neq 90^\circ$ ili heksagonske osi
Rompski	$a\neq b\neq c$ $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$
Monoklinski	$a\neq b\neq c$ $\alpha=\gamma=90^\circ$ $\beta\neq(>)90^\circ$
Triklinski	$a\neq b\neq c$ $\alpha\neq\beta\neq\gamma$

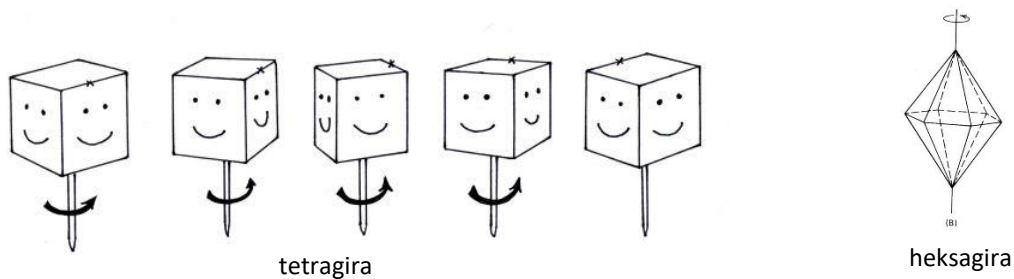
Sl. 8. Kristalni sustavi

Ravnina simetrije – ravnina zamišljena kroz središte kristala koja dijeli kristal na dva jednaka, zrcalno *simetrična* dijela (sl. 9)



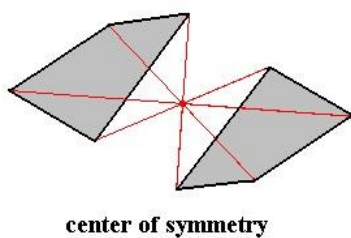
Sl. 9 Ravnina simetrije

Os simetrije (gira) - pravac zamišljen kroz središte kristala oko kojeg se kristal može okrenuti 2 (digira), 3 (trigira), 4 (tetragira) ili 6 (heksagira) puta unutar 360° (tj. Za 180° , 120° , 90° ili 60°), a da pri tome dođe u istovrsan položaj (sl. 10)



Sl. 10. Osi simetrije

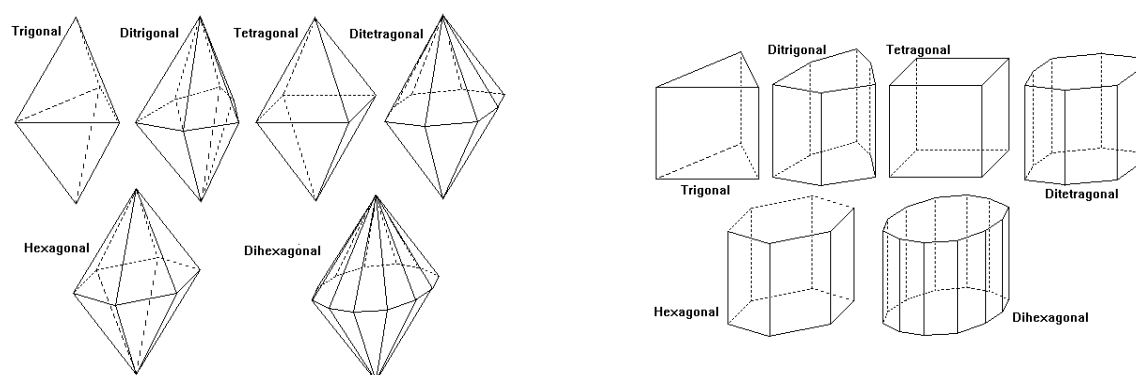
Centar simetrije – zamišljena točka u središtu kristala koja raspolavlja spojnice svih nasuprotnih, istovrsnih geometrijskih elemenata (sl. 11). Na kristalu koji ima centar simetrije za svaku plohu postoji istovrsna, usporedna i protivno orijentirana ploha na suprotnoj strani kristala.



Sl. 11 Centar simetrije

1.5. Kristalne forme

Kristalna forma je skup istovrsnih ploha koji kao cijelina ima određenu simetriju. Zatvorena forma je forma čije plohe zatvaraju neki prostor, npr. heksaedar, bipiramide (sl. 12A), dok plohe otvorene forme ne zatvaraju prostor, npr. prizme (sl. 12B). Kristali mogu biti građeni od jedne ili kombinacije više formi (sl. 13). Unutar svake kristalne klase kristali mogu imati samo sedam različitih formi, ali velik broj njihovih kombinacija. Forme s najvišom simetrijom unutar jednog kristalnog sustava zovu se *holoedri*, a one s nižom simetrijom su *hemiedri*, *tetartloedri* itd.

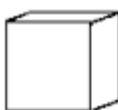
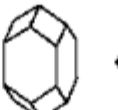
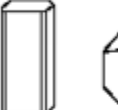
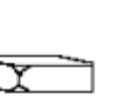
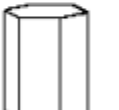
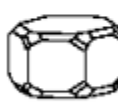


Sl. 12 (A) Zatvorene forme - bipiramide, (B) otvorene forme – prizme

Na kristalima koji imaju oblik pravilnih poliedara ili višeplošnika zapažaju se plohe, bridovi i vrhovi koji su geometrijski elementi kristala. Istovrsne plohe imaju jednaku veličinu, oblik i simetriju.

Prema pravilu geometrijski su elementi kristala, dakle plohe (P), vrhovi (V) i bridovi (B), u međusobnom odnosu: $P + V = B + 2$

Plošni kut, odnosno kut između odgovarajućih ploha na bilo kojem kristalu iste mineralne vrste je jednak, čak i ako je kristal tijekom rasta deformiran. Ova je činjenica definirana zakonom o stalnosti kutova (1669. g. danski znanstvenik N. Stensen), 1. kristalografskim zakonom, prema kojem su na svim kristalima iste mineralne vrste, pri istoj temperaturi i tlaku, kutovi između odgovarajućih ploha jednaki.

1. Cubic				4. Monoclinic					
	cube	octahedron	Galena		Wolframite	Gypsum	Augite	Orthoclase	
2. Tetragonal				5. Triclinic					
	Cassiterite	Zircon	Scheelite		Chalcanthite	Kyanite	Axinite	Rhodonite	Albite
3. Orthorhombic				6. Hexagonal					
	Sulfur	Barytes	Olivine		Beryl	Apatite	Zincite		
				7. Trigonal					
					rhombohedron	Calcite	Corundum	Quartz	

Sl. 13 Kristalne forme nekih minerala
s pripadajućim kristalnim sustavima

Sl. 13 Kristalne forme nekih minerala
s pripadajućim kristalnim sustavima

1.6. Polimorfija

Polimorfija je pojava da se neka kemijska supstancija javlja u prirodi u dvije ili više kristalnih struktura. Iako im je kemijski sastav isti, svaka od tih polimorfnih supstancija kristalizira u drugoj kristalnoj klasi, i pokazuje različita fizička, pa donekle i kemijska svojstva. Uzrok je toj pojavi kristalizacija dotične tvari u različitim genetskim uvjetima, različiti sastav i koncentracija ishodne otopine, te različiti tlak i temperatura.

CaCO_3 kristalizira u dvije mineralne modifikacije, kalcit i aragonit. Ta dva minerala istog su kemijskog sastava, ali kristaliziraju u različitim kristalnim klasama, te pokazuju različita fizička svojstva.

Polimorfne modifikacije smatramo različitim fazama jednoga kemijskog spoja, prouzročene različitom termodinamskom stabilnošću. Svaka faza stabilna je, dakle, unutar određene temperature i tlaka i teži da u drugim *pt* uvjetima prijede u drugu fazu. Svaka kristalna faza ima i drugu strukturnu rešetku.

Polimorfija elementarnih minerala nazvana je i alotropija, npr. grafit i dijamant.

Neke polimorfne modifikacije prelaze u drugu uz dani tlak pri nekoj strogo određenoj temperaturi. To je prijelazna točka. Kristalna faza stabilna ispod prijelazne točke je niskotemperaturna modifikacija, a kristalna faza stabilna iznad te točke visokotemperaturna modifikacija.

Ako faza X s povećanjem temperature prelazi u fazu Y, a faza Y sa snižavanjem temperature ispod prijelazne točke prelazi natrag u fazu X, proces je enantiotropan.

Leucit se kristalizira pri visokoj temperaturi u kubičnom suslavu. Hlađenjem ispod 550°C prelazi u rompski suslav, a zagrijavanjem iznad 550°C rompska modifikacija ponovo prelazi u kubični. Brzina prijelaza jedne polimorfne modifikacije u drugu, pri normalnom atmosferskom tlaku, može biti relativno brza, relativno troma (spora), ali i vrlo troma.

Zato tridimit, pa i kristobalit, polimorfne modifikacije SiO₂, mogu dulje vremena, u geološkim razmjerima, postojati u metastabilnom stanju i ispod 870°C, dakle, u stijenama pri normalnoj temperaturi.

Ako je uočen samo jednosmjerni prijelaz X-Y, gdje »nestabilna« polimorfna modifikacija X prelazi u »stabilnu« modifikaciju Y, proces je monotropan. Prijelaz se u tom slučaju ne odvija pri nekoj određenoj temperaturnoj točki, nego sukcesivno i pri različitim temperaturama.

Monotropija je svojstvo koje proučavamo samo pri atmosferskom tlaku na površini litosfere npr. polimorfna modifikacija CaCO₃, mineral aragonit, nestabilna je modifikacija, i on pri običnom tlaku na površini litosfere prelazi u stabilni kalcit. Kalcit u prirodi ne prelazi u aragonite.

Proces je monotropan, ali traje vrlo dugo. Koraljni grebeni u vrijeme svoga postanka bili su izgrađeni od aragonita. Geološki stariji s vremenom su prešli u agregat kalcita. Geološki mlađi nisu još dospjeli izvršiti taj preobražaj.

Jedan od poznatih »monotropnih« primjera je prijelaz dijamanta u grafit. Pri normalnim uvjetima tlaka grafit ne može prijeći u dijamant. Ali pri velikom tlaku od 55 000 do 100 000 kg/cm², pri temperaturi od 1200°C do 2400°C i u prisutnosti katalizatora, kao što je Cr, Mn, Co, Ni, Pd, Pt i Fe₂O₃, prijelaz grafita u dijamant ipak je moguć.

Iako u načelu monotropni prijelazi zapravo ne postoje, oni su ipak u »normalnim« uvjetima na površini litosfere vrlo značajne činjenice. Zato se u ograničenim uvjetima atmosferskog tlaka »monotropni« prijelazi mogu pri proučavanju površine litosfere i dalje promatrati kao takvi.

1.7. Izomorfija

Izomorfija je pojava u kojoj se vidi da kemijski slični minerali, čiji su različiti kationi približno istog radijusa, a anioni isti, imaju slične kristalne strukture, gotovo jednake kristalne forme i vrlo slična fizička svojstva. Redovito pokazuju kalavost srnjerom iste kristalne plohe.

Takvi minerali čine skupinu izomorfni minerala, kao npr. izomorfna skupina spinela, granata, karbonatnih minerala.

Izomorfna skupina heksagonskih (romboedrisjkih) karbonatnih minerala:

CaCO_3 kalcit

MnCO_3 rodokrozit

FeCO_3 siderit

ZnCO_3 smithsonit

MgCO_3 magnezit

Svi ti minerali kristaliziraju u istoj, romboedrijskoj hemiedriji heksagonskog susłava, kutovi između kristalnih ploha vrlo su slični, radijus njihovih kationa koleba od 0,99 do 0,66 Å, tvrdoća im je gotovo ista, optičke konstante su im slične, svi se kalaju vrlo dobro smjerom plohe romboedra.

Izomorfna skupina rompskih karbonatnih minerala:

CaCO_3 aragonit

SrCO_3 stroncijanit

PbCO_3 cerusit

BaCO_3 witherit

1.8. Kristali mješanci

Kemijski vrlo slični elementi K i Na zamjenjuju se ograničeno jer su im veličine ionskih radijusa različite: Na^+ 0,97 Å, K^+ 1,33 Å. Naprotiv, jednovalentni natrijski ion zamjenjuje se s

dvovalentnim kalcijским ionom u svim omjerima jer je radijus natrijskog iona gotovo jednak kalcijском Ca^{2+} 0,99 Å.

Za izomorfnu zamjenu iona u kristalnoj strukturi potrebna je nadalje bliskost tipova kemijskih veza onih iona koji se međusobno zamjenjuju. Tako je i karakter strukture minerala značajan za formiranje kristala mješanaca.

Kristali srebra i zlata pokazuju kontinuiran niz kristala mješanaca jer oba minerala kristaliziraju istom kristalnom strukturom, a njihovi ioni su podjednagog radijusa (oko 1,44 Å).

Zamijene li se ioni različite valencije, istovremeno se zamjenjuje drugi par iona, također različite valencije, ali tako da kristalna struktura ostane električki neutralna (valencije ostaju iste). U nekim slučajevima, ako takvom zamjenom nastaje manjak jedne valencije, ulaze u slobodni prostor strukture neki drugi ioni, koji opet uspostavljaju električku ravnotežu.

Klasičan je primjer skupina plagioklasa. To su kristali mješanci albiske $\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$ i anortitske $\text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$ komponente. Polazeći npr. od formule albita, dobivaju se kristali mješanci plagioklasa na taj način što će se u strukturi albita neka količina četverovalentnog silicija zamijeniti trovalentnim aluminijem. Tom zamjenom nastali manjak jedne valencije kompenzira se istovremenom zamjenom jednovalentnog natrija dvovalentnim kalcijem. Tako je u strukturu albita formule $\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$ ušla stanovita količina molekula anortita $\text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$. Dobiven je kristal mješanac, plagioklasa.

Formulu hornblende izvodimo iz formule tremolita $\text{Ca}_2\text{Mg}_5(\text{Si}_8\text{O}_{22})_2(\text{OH})_2$. Komplikirani sastav hornblende nastaje zbog toga što prilikom kristalizacije amfibola silicij u navedenoj molekuli tremolita može biti djelomično zamijenjen aluminijem uz istovremeni ulazak natrija i kalija u slobodni prostor strukture. Nadalje, jedan dio magnezija biva zamijenjen željezom, aluminijem i titanom:



U tom primjeru vidljivo je da trovalentni ion aluminija može zamijeniti četverovalentni ion silicija i dvovalentni ion magnezija.

Postoji li veća razlika u veličini ionskog radijusa pojedinih elemenata, nastaju samo ograničene izomorfne zamjene. Natrij može samo u ograničenoj mjeri zamijeniti kalij. Sposobnost tvorbe kristala mješanaca u tom slučaju može se povećati s porastom temperature. Znači, u strukturi ortoklasa pri višoj temperaturi veći dio kalija može biti zamijenjen natrijem. To je moguće jer je strukturna rešetka ortoklasa pri visokoj temperaturi vrlo plastična. Ako temperatura pada

polagano, iz kalijskog feldspata ortoklasa izdvojiti će se određena količina natrijskog feldspata, albita. Oba će minerala ostati međusobno simetrijski položena u obliku tzv. pertita, odnosno pertitskog sraštanja (eksolucija).

Kristalizacija kristala mješanaca moguća je u taljevinama ili otopinama kompleksnoga kemijskog sastava, kao što je to upravo magma.

Svaki mineral ima svoju karakterističnu kristalnu rešetku koju sastavljaju neke osnovne grupe. Za silikate karakteristične su $(\text{SiO}_4)^{4-}$ grupe koje su formirane tako da četiri velika iona kisika zauzimaju u prostoru pravilnu formu tetraedra, a mali ion silicija smjestio se u sredini toga tetraedra. Kod forsterita $(\text{SiO}_4)^{4-}$ tetraedri su međusobno povezani svojim slobodnim valencijama preko kationa magnezija. Formula forsterita glasi Mg_2SiO_4 . Međutim, gotovo se redovito događa da neki dio iona magnezija u strukturi forsterita može biti zamijenjen ionima dvovalentnog željeza. Količina željeza koja na taj način zamjenjuje magnezij u pojedinim je slučajevima različita, a ovisi o fizičko-kemijskim uvjetima u kojima se kristalizira olivin. Zamjenom Mg iona s ionom Fe nastaje u strukturi odgovarajuća količina Fe_2SiO_4 , molekule fayalita. Zbog mogućnosti potpune zamjene magnezija s dvovalentnim željezom, postoje svi mogući prijelazi od čistog Mg_2SiO_4 preko bilo kojeg omjera $x \text{Mg}_2\text{SiO}_4 + y \text{Fe}_2\text{SiO}_4$ (minerali grupe olivina) do čistog Fe_2SiO_4 .

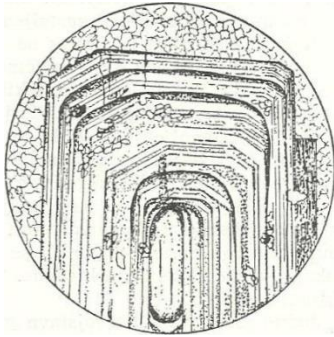
Kemijski sastav takvim kristalima mješancima ne možemo točno izraziti formulom jer se magnezij i željezni silikat ne nalaze izmiješani u nekom stehiometrijskom omjeru. Zato formulu pišemo $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$. Količina magnezija i željeza iz takve se formule ne može proračunati. Ona se dobiva tek kemijskim ili optičkim analizama.

Poznajemo li točan kemijski sastav olivina, količinu jedne i druge komponente izražavamo brojčano. Na primjer, ako neki olivin $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$ sadrži 80% forsterita i 20% fayalita formulu možemo napisati kao $(\text{Mg}_{0,8}\text{Fe}_{0,2})_2\text{SiO}_4$. Svojstva kristala mješanaca funkcije su svojstava čistih komponenata.

Zonarna građa minerala. Zamjena iona u strukturi može se vršiti postupno u sve većem i većem razmjeru za vrijeme kristalizacije minerala. Kako mineral raste sa slaganjem čestica u usporednim slojevima na postojeće plohe, može doći do tzv. zonarne strukture ili zonarne građe toga minerala. Mineral se sastoji od jezgre i nekoliko ovoja oko nje, a svaki je ovoj zbog sve većega izomornog zamjenjivanja malo drugačijega kemijskog sastava.

Plagioklasi često pokazuju zonarnu građu (sl. 14). Jezgra kristala redovito je bogata kalcijem (anortitom). Prema periferiji dolazi za vrijeme kristalizacije do sve većeg i većeg zamjenjivanja kalcija natrijem, pa se može dogoditi da je rub uglavnom natrijski (albit). Od središta prema periferiji postoje, dakle, postupni prijelazi kalcijskog plagioklasa, kalcijsko-natrijskog plagioklasa, natrijsko-kalcijskog plagioklasa u natrijski plagioklas.

Zonarna struktura lijepo se vidi mikroskopom. Poznata je i kod drugih minerala, npr. granata, piroksena, amfibola.



Sl. 14 Zonarana građa plagioklasa

1.9. Amorfni minerali

Većina minerala je kristalizirana. No u prirodi postoje još minerali koji se odlikuju izrazitom izotropijom. Kako je kod njih brzina rasta neovisna o smjeru, mineral raste na sve strane jednakom brzinom. Isto tako je kohezija, širenje svjetlosti, topline u svim smjerovima jednako. Takvi minerali ne javljaju se u pravilnim formama ograničeni ravnim plohama, i zato ih zovemo amornim mineralima. S obzirom na to da amorfni minerali rastu na sve strane jednakom brzinom, imali bi u idealnom slučaju oblik kugle. Često se javljaju u kuglastim, bubrežastim i grozdastim oblicima.

Amorfni minerali mogu nastati na više načina. Staklaste amorfne stijene postaju iz viskoznih magmi naglim hlađenjem. Unutrašnje trenje takvih magmi vrlo je veliko i gibanje čestica vrlo je sporo. Naglim hlađenjem gustih, viskoznih magmi ne može uopće doći do kristalizacije većega stupnja, nego magmatska taljevina postupno tvrdne i prelazi u čvrsto staklasto stanje. Lava granitskog sastava, koja je vrlo kisela i vrlo viskozna, često prelazi u vulkansko staklo koje nazivamo opsidijan.

Staklasto stanje koje je nastalo brzim hlađenjem viskoznih magmi nije stabilno. Kroz duže vrijeme staklasto stanje prelazi u kristalizirano. To se lijepo može vidjeti u nekim starijim efuzivnim stijenama koje je u doba postanka imalo staklastu osnovu, a danas je ta osnova većim dijelom prekrystalizirana.

Medu amorfne minerale ubrajamo i koloidne minerale. Oni se također odlikuju značajnom izotropijom, no razlikuju se od staklastih po tome što je mineralna supstancija koloidnih minerala bila otopljena u topilu, a staklaste su supstancije prije bile u rastaljenom stanju.

Koloidne otopine razlikuju se od molekularnih veličinom svojih čestica (100 do 1 μ) koje zbog svoje veličine ne prolaze kroz membranu, imaju mnogo manji osmotski tlak te lome i reflektiraju svjetlost. U ultramikroskopu koloidne čestice su na indirektan način vidljive (Brownovo gibanje). Koloidne otopine ili soli su u vodenoj otopini (hidrosoli) određenoga električnog naboja. Hidrosoli aluminijskog i željeznog oksida imaju pozitivan električni naboj, a hidrosoli kremične kiseline imaju negativan električni naboj.

Iz vodene otopine soli se obaraju, koaguliraju, prelaze iz sol-modifikacije u gel-modifikaciju kada se susretnu dva različito električki nabijena sola. Postanak glinenih minerala tumači se međusobnim neutraliziranjem sola aluminijskog oksida i kremične kiseline. S druge strane, geli se iz otopina obaraju gubitkom otapala.

Jedno je od važnih svojstava gela velika moć adsorpcije, sposobnosti da geli molekularnim silama vežu uza se neodređene količine pojedinih tvari. Zbog toga je svojstva kemijski sastav koloidnih minerala vrlo kolebljiv. Geli glina rado adsorbiraju kalijske i kalcijske soli. Zemlja crvenica našega krša takav je karakteristični adsorpcijski spoj.

Amorfni minerali, vulkanska stakla i koloidni amorfni minerali vezani su za površinu litosfere. Koloidni minerali nastaju trošenjem primarnih kristaliziranih minerala zbog djelovanja atmosferilija. Zato samo na površini litosfere u njenu kontaktu s atmosferom nalazimo proizvode trošenja amorfne minerale, kao kaolin, opal i limonit. Površinski dio litosfere i nazivamo korom trošenja.

Amorfni minerali nisu stabilni, i oni već u normalnim uvjetima koji vladaju na površini Zemlje prelaze nakon duljeg vremena u kristalizirano stanje. Pri povećanoj temperaturi i tlaku ovaj proces teče relativno brzo. Zbog toga u metamorfnim stijenama ne možemo naći amorfne minerale. Isto tako amorfni minerali ne mogu se nalaziti u dubinskim eruptivnim stijenama koje su se kristalizirale pod velikim tlakom i u dugom vremenskom razdoblju.

Budući da se amorfni minerali odlikuju izotropijom, nemaju pravilnu unutrašnju građu. Međutim, rendgenska su istraživanja u novije doba utvrdila da većina minerala za koje smo smatrali da su amorfni zapravo su agregat submikroskopski kristaliziranih čestica veličina od nekoliko stotina molekula, koje su međusobno nabacane bez ikakve orijentacije, pa se cijeli mineral u polarizacijskom mikroskopu vlada kao amorfna tvar.

1.10. Fizička svojstva minerala

(koja se mogu odrediti na uzorku, prostim okom ili jednostavnim dijagnostičkim postupcima):

- Habitus, agregati
- Tvrdća
- Kalavost
- Lom
- Kovnost
- Gustoća
- Boja
- Sjaj
- Crt (boja praha)
- Luminiscencija
- Toplinska svojstva
- Električna svojstva
- Magnetična svojstva
- Radioaktivnost
- Fiziološka svojstva

Fizička svojstva mogu biti vektorska i skalarna. Vektorska svojstva ovise o smjeru i različita su u različitim smjerovima u kristalu, a jednaka su samo u paralelnim smjerovima. Skalarna svojstva ne ovise o smjeru i jednaka su u svim smjerovima u kristalu. Većina fizičkih svojstava je vektorska, npr. kohezijska (tvrdoća, kalavost, lom, kovnost), optička, toplinska, električna, magnetična. Skalarna su svojstva npr. fiziološka i gustoća.

Habitus ili izgled pojedinačnih kristala kao i način na koji se pojedinačni kristali udružuju u **agregate** vrlo su važno sredstvo i pomoć kod prepoznavanja minerala. Pomoću habitusa definiramo relativnu veličinu pojedinih ploha. Različiti habitusi su posljedica vanjskih utjecaja na rast kristala (pločasti, igličasti, prizmatski...).

Najčešći pojmovi za:

- minerale u izoliranim, pojedinačnim kristalima – **igličasti, vlaknasti, stubasti (prizmatski), pločasti, ekvidimenzionalni (izometrični, kuglasti)**
- agregate pojedinačnih minerala – **kristalna druza** (površina prekrivena slojem malih kristala), **fibrozni** (igličast i vlaknasti kristali međusobno paralelni), **radijalno zrakasti** (radijalno poredani izduženi kristali), **globularni** (radijalno raspoređeni kristali koji tvore sferične do hemisferične oblike), **koloformni** (sferične forme sastavljene od radijalno agregiranih pojedinačnih kristala bez obzira na njihovu veličinu), **dendritični** (razgranati agregati koji podsjećaju na biljku), **lističavi** (agregat koji se može cijepati u vrlo tanke listiće), **granularni** (agregat sastavljen od približno ekvidimenzionalnih zrna), **masivni** (kompaktni materijal bez neke određene strukture ili posebnih, razlikovnih karakteristika)

Tvrdoća je otpor minerala prema djelovanju mehaničke sile na njegovu površinu i to prema utiskivanju, odskoku, brušenju ili paranju. Razlikuju se apsolutna i relativna tvrdoća. Apsolutna može biti tvrdoća prema utiskivanju, odskoku ili brušenju. Relativna tvrdoća prema paranju je bezdimenzijski broj koji označuje je li jedan mineral tvrđi ili mekši od drugoga, bez obzira koliko se oni razlikovali po apsolutnoj tvrdoći. Njemački mineralog E. von Mohs predložio je početkom XIX. stoljeća deset minerala različite tvrdoće kao standarde za određivanje relativne tvrdoće. Svakome je pridodao jedan broj od 1 do 10, idući od najmekšeg, talka, do najtvrđeg, dijamanta (Mohs-ova ljestvica tvrdoće):

talk	1
gips	2
kalcit	3
fluorit	4
apatit	5
ortoklas	6
kvarc	7
topaz	8
korund	9
dijamant	10

Kalavost je pravilno lomljenje minerala paralelno kristalnim plohama (paralelno mrežnim ravninama atoma i iona) kada na njih djeluje vanjska sila. Mnogi minerali posjeduju planarne smjerove u svojoj strukturi koji su sistematično slabiji od ostalih (npr. prisutnost slabije veze, veći međumrežni razmak...), te pri djelovanju vanjske sile pucaju točno tim, određenim smjerovima (kohezija je kod njih različita u različitim smjerovima). Kalavost je svojstvo minerala koje ga jednoznačno i nedvosmisleno određuje i njegova je stalna i nepromjenjiva karakteristika. Minerali se mogu kalati jednom plohom, ali i po više ploha. Neki minerali imaju odličnu kalavost (npr. tinjci, kalcit, galenit...), neki dosta nejasnu (npr. beril, apatit...), a neki je uopće nemaju (npr. kvarc...).

Lom je nepravilno pucanje minerala pod djelovanjem vanjske sile. Lome se oni minerali kod kojih je kohezija podjednaka u svim smjerovima. Prema izgledu površine prijeloma razlikuju se školjkasti, zemljasti, neravni lom ...

Kovnost je svojstvo minerala, osobito kovina, da se pod udarcem tvrdim predmetom stanje, a da pri tom ne pucaju. Uzrok tome je metalna veza u kristalnim strukturama kod koje pokretni oblak elektrona omogućuje klizanje slojeva atoma i/ili iona bez kidanja veze.

Optička svojstva (boja, sjaj, crt minerala) ovise o svjetlosti, Svjetlost, vidljiva ljudskom oku, je dio spektra elektromagnetskog zračenja, valnih duljina između 400 i 700 nm. Dio svjetlosti koja dolazi do površine minerala se odbija (reflektira), dio uđe u mineral i u njemu se apsorbira, a dio prolazi kroz njega. Minerali koji potpuno propuštaju svjetlost su prozirni, koji propuštaju (apsorbiraju) samo dio svjetlosti su djelomično prozirni. Neprozirni minerali svjetlost u potpunosti apsorbiraju.

Boja je posljedica selektivne refleksije i/ili apsorpcije različitih valnih duljina u mineralu. To može biti uzrokovano:

- prisutnošću nekih kromofornih glavnih elemenata (elementi esencijalni za kemijski sastav minerala). Takvim mineralima (*idiokromatski minerali*) boja je stalno i nepromjenjivo svojstvo koje ih jednoznačno određuje (azurit je uvijek plav, sumpor je uvijek žut ...)
- prisutnošću kromofornih elemenata u tragovima (elementi koji mogu (ali i ne moraju) biti prisutni i koji nisu esencijalni za kemijski sastav minerala), te primjesama stranih minerala dispergiranih u mineralu domaćinu. Npr. kvarc je, s obzirom na glavne elemente u svom sastavu, proziran, ali s različitim primjesama i kromofornim elementima u

tragovima može biti ljubičast, crven ružičast, žut, crn ...). Takvi minerali su *alokromatski*, jer im boja nije stalna i ne određuje ih jednoznačno.

- postojanjem određenih defekata u kristalnoj strukturi

Crt (ogreb) minerala je boja praha minerala. U tu svrhu se mineralom zagrebe po neglaziranoj bijeloj keramičkoj pločici (tvrđa je od većine minerala), pa ako je trag koji mineral ostavi na pločici (crt ili ogreb) bezbojan, mineral je *alokromatski*, a ako je obojen onda je mineral *idiokromatski* (pri tome je boja praha slična boji minerala u grumenu, ali svjetlijeg tona)

Sjaj je svojstvo minerala ovisno o refleksiji svjetlosti koja je jača s ravnih i glatkih ploha nego s neravne odlomljene površine. Sjaj je ovisan i o indeksu loma, pa je jači kod minerala većeg indeksa loma. Razlikuju se staklasti, dijamantni smolasti, sedefasti, masni, voštani, metalni sjaj.

Toplinska svojstva. Dovođenjem ili odvođenjem topline u mineralu se udaljavaju, odnosno zbližavaju materijalne čestice u kristalnoj strukturi, što dovodi, uz promjenu temperature, do deformacije strukture. Vanjska manifestacija tog procesa je *toplinska rastezljivost* minerala.

Toplinska vodljivost je količina topline koja prođe u jedinici vremena kroz tijelo jedinične duljine i jediničnog presjeka. Ona ovisi o kristalnoj građi. Najveću toplinsku vodljivost ima dijamant. Minerali kovina su dobri vodiči topline, pa imaju hladan opip.

Električna svojstva. Glavno električno svojstvo minerala je *vodljivost električne struje*, pa se razlikuju minerali koji su dobri vodiči struje od onih koji su loši vodiči ili čak izolatori. Kovine su, zbog metalne veze u kristalnoj strukturi bolji vodiči od nekovina. Neki minerali, koji su inače loši vodiči, mogu zagrijavanjem ili pritiskom proizvesti mali električni naboj, tzv.

piroelektricitet, odnosno *piezoelektricitet*.

Magnetična svojstva. Minerali mogu, s obzirom na magnetska svojstva, biti *feromagnetični*, ako ih privlači obični ručni magnet (npr. magnetit, pirhotit). Minerali koji pokazuju slabi magnetizam kada se nađu u jakom magnetskom polju su *paramagnetični* (npr. siderit).

Dijamagnetični minerali imaju slabo izražena magnetska svojstva, ali ih, za razliku od paramagnetičnih, jaki magnet odbija (npr. kalcit).

Fiziološka svojstva su ona svojstva koja se opažaju neposredno osjetilima. To su okus, miris i opip. *Okus* imaju minerali koji su topljivi u vodi (npr. halit). *Miris* se može osjetiti kod nekih minerala pri mrvljenju (npr. kod nekih sulfida – miris po sumporovodiku), zagrijavanju (npr. spojevi arsena – miris bijelog luka) ili vlaženju (npr. minerali glina – miris sličan mirisu spojeva amonijaka). *Opip* može biti tipičan, npr. masni, za minerale male tvrdoće (npr. talk, grafit)

Radioaktivnost. Jezgre nekih elemenata su nestabilne i mogu se spontano mijenjati, odnosno raspadati u neke druge jezgre, npr. za vrijeme α -raspada iz jezgre nestabilnog elementa izbačene su α -čestice (sastoje se od dva protona i dva neutrona) i pri tome se atomski broj Z tog elementa („roditelja”) smanjuje za dva (zbog manjka dva protona), a maseni broj za četiri (dva protona i dva neutrona). Radioaktivni su, dakle, oni minerali koji sadrže takve elemente s nestabilnim jezgrama, odnosno radioaktivne elemente. Za prijelaz nestabilnog izotopa radioaktivnog elementa („roditelj”) u drugi izotop ili element („kći”) potrebno je vrijeme koje je određeno laboratorijskim istraživanjem. Ono se naziva *vremenom poluraspada* (vrijeme potrebno da se početna količina određenog izotopa smanji na polovicu). Ta zakonitost raspadanja omogućuje izračunavanje apsolutne starosti minerala, odnosno stijena, a time i Zemlje kao planeta i to prema količini radiogenog elementa „kćeri” kao krajnjeg proizvoda raspada u odnosu prema količini radioaktivnog elementa „roditelja”, koji se još neraspadnut nalazi u mineralu ili stijeni.

Gustoća je po definiciji masa jediničnog volumena (omjer mase tijela i njegovog volumena) i izražava se u g/cm^3 . Postoji i razlikovanje minerala po *specifičnoj težini*. Ona se izražava bezdimenzijskim brojem koji predstavlja odnos težine minerala i težine vode istog volumena pri 4°C (to znači da npr. mineral sa specifičnom težinom 2, teži dva puta više od istog volumena vode). Kod minerala gustoća ovisi o kemijskom sastavu i kristalnoj strukturi, pa veću gustoću (specifičnu težinu) imaju minerali koji sadrže elemente većih atomskih brojeva, odnosno minerali s gušćim rasporedom materijalnih čestica u strukturi. Najveću gustoću imaju plemeniti metali (do 23 g/cm^3), petrogeni minerali imaju gustoću između 2,6 i $3,5 \text{ g/cm}^3$, a za rudne minerale ona je između 4,0 i $7,5 \text{ g/cm}^3$.

1.11. Sistematizacija minerala

Minerali se na temelju dominantnog aniona odnosno anionske grupe dijele u mineralne razrede:

1. samorodni elementi
2. sulfidi, selenidi, teluridi
3. oksidi, oksihidroksidi, hidroksidi
4. halogenidi
5. karbonati
6. nitrati

7. jodati
8. borati
9. sulfati, selenati, telurati, kromati
10. fosfati, arsenati, vanadati
11. molibdati, volframati
12. silikati
13. organski minerali

Uz to, silikatni minerali su dodatno podijeljeni u šest skupina na temelju njihove unutarnje strukture, pa se kriterij sistematizacije minerala može definirati kao kristalokemijski.

Evo nekih najvažnijih minerala iz pojedinih razreda:

Samorodni elementi

Metali	Nemetali
bakar, Cu	dijamant, C
srebro, Ag	grafit, C
zlato, Au	sumpor, S

Sulfidi

Halkozit, Cu_2S	Pirhotit, FeS	Realgar, AsS
Galenit, PbS	Halkopirit, CuFeS_2	Auripigment, As_2S_3
Sfalerit, ZnS	Bornit, Cu_3FeS_4	Stibnit (antimonit), Sb_2S_3
Cinabarit, HgS	Pirit, FeS_2	Molibdenit, MoS_2
Covellit, CuS		

Oksidi i hidroksidi

oksidi		hidroksidi
Korund, Al_2O_3	Opal, $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	Gibbsit, $\text{Al}(\text{OH})_3$
Hematit, Fe_2O_3	Kuprit, Cu_2O	Dijaspor, $\alpha\text{-AlOOH}$
Magnetit, Fe_3O_4	Ilmenit, FeTiO_3	Böhmit, $\gamma\text{-AlOOH}$
Kromit, FeCr_2O_4	Rutil, anatas, brookit, TiO_2	Goethit, $\alpha\text{-FeOOH}$
Kasiterit, SnO_2	Cinkit, ZnO_2	Lepidokrokit, $\gamma\text{-FeOOH}$
Kvarc, SiO_2		

Halogenidi

Halit, NaCl
Fluorit, CaF₂
Silvit, KCl
Carnalit, KCl·MgCl₂·6H₂O
Kriolit, Na₃AlF₆

Karbonati

Kalcit, CaCO ₃	Dolomit, CaMg(CO ₃) ₂	Aragonit, CaCO ₃
Magnezit, MgCO ₃	Ankerit, CaFe(CO ₃) ₂	Stroncijanit, SrCO ₃
Siderit, FeCO ₃		Witherit, BaCO ₃
Smithsonit, ZnCO ₃		Cerisit, PbCO ₃
Rodokrozit, MnCO ₃		

Sulfati

Anhidrit, CaSO₄
Gips, CaSO₄·2H₂O
Barit, BaSO₄
Halkantit (modra galica), CuSO₄·5H₂O
Epsomit (gorka sol), MgSO₄·7H₂O
Polihalit, K₂Ca₂Mg(SO₄)₄·2H₂O

Kromati

Krokoit, Pb(CrO₄)

Volframati

Volframit, (Fe,Mn)(WO₄)
Scheelit, Ca(WO₄)

1.11.1 Silikati

Vrlo važna skupina kojoj prvenstveno pripadaju petrogeni minerali. Više od 95% stijena Zemljine kore izgrađeno je od silikata. Silikati su, dakle, najrasprotranjenija i najobilnija skupina minerala, pa ćemo je stoga malo detaljnije obraditi.

Temeljna strukturna jedinica silikata je (SiO₄)⁴⁻ tetraedar u čijem središtu se nalazi ion Si⁴⁺, a na vrhovima ioni O²⁻ (sl. 15). Tetraedri su međusobno povezani na različite načine preko zajedničkih kisika kovalentnim vezama (sl. 16), a preostali negativni naboj se kompenzira ugradnjom različitih kationa, najčešće K, Na, Ca, Mg, Fe i Al.



Sl. 15 Osnovna strukturna jedinica silikata, $[\text{SiO}_4]^{4-}$ tetraedar

NEZOSILIKATI - silikati kod kojih se u strukturi pojavljuju izolirani $(\text{SiO}_4)^{4-}$ tetraedri. Svaki kisik vezan je polovinom svoje potencijalne energije vezanja (kovalentna veza) uz silicij, a preostala neiskorištena valencija (jedan negativni naboj) neutralizira se vezivanjem s nekim drugim kationom izvan tetraedra. Primjer: **olivin** $(\text{Mg, Fe})_2\text{SiO}_4$; **granati** (**pirop** $\text{Mg}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$, **almandin** $\text{Fe}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$, **spesartin**, $\text{Mn}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$, **grosular**, $\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$, **andradit**, $\text{Ca}_3\text{Fe}_2(\text{SiO}_4)_3$, **uvarovit**, $\text{Ca}_3\text{Cr}_2(\text{SiO}_4)_3$); **sillimanit**, Al_2SiO_5 , **andaluzit**, Al_2SiO_5 , **kianit**, Al_2SiO_5 , **topaz**, $\text{Al}_2\text{SiO}_4(\text{F, OH})_2$, **staurolit**, $\text{Fe}_2\text{Al}_9\text{O}_6(\text{SiO}_4)_4(\text{O, OH})_2$

SOROSILIKATI - silikati kod kojih se u strukturi pojavljuju dva tetraedra povezana preko jednog zajedničkog kisika. Osnovna funkcionalna skupina je $(\text{Si}_2\text{O}_7)^{6-}$.

Primjer: **zoisit** $\text{Ca}_2\text{Al}_3(\text{SiO}_4)(\text{Si}_2\text{O}_7)\text{O}(\text{OH})$, **epidot** $\text{Ca}_2(\text{Al, Fe})\text{Al}_2(\text{SiO}_4)(\text{Si}_2\text{O}_7)\text{O}(\text{OH})$

CIKLOSILIKATI - silikati prstenaste strukture kod kojih u strukturi postoje međusobno povezana 3, 4 ili 6 tetraedara u prsten. Funkcionalne skupine ciklosilikata su $(\text{Si}_3\text{O}_9)^{6-}$, $(\text{Si}_4\text{O}_{12})^{8-}$ i $(\text{Si}_6\text{O}_{18})^{12-}$. Primjer: **beril** $\text{Al}_2\text{Be}_3(\text{Si}_6\text{O}_{18})$, **kordijerit** $(\text{Mg, Fe})_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18} \cdot n\text{H}_2\text{O}$, **turmalin** $(\text{Na, Ca})(\text{Li, Mg, Al})_3(\text{Al, Fe, Mn})_6(\text{BO}_3)_3(\text{Si}_6\text{O}_{18})(\text{OH})_4$.

INOSILIKATI su minerali lančaste strukture s jednostrukim ili dvostrukim lancima. Kod jednostrukih su lanaca (pirokseni) tetraedri povezani u beskonačni lanac preko svoja dva kisika i kompleksni anion je $(\text{Si}_2\text{O}_6)^{4-}$. Kod dvostrukih lanaca (amfiboli) spojena su dva jednostruka lanca preko jednoga kisika svakog drugog tetraedra i kompleksni anion je $[\text{Si}_4\text{O}_{11}]^{6-}$. Primjeri:

pirokseni - **diopsid** $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$, **hedenbergit** $\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$, **enstatit-ferosilitna serija** $(\text{Mg, Fe})\text{SiO}_3$; **augit** $(\text{Ca, Na})(\text{Mg, Fe, Al})(\text{Si, Al})_2\text{O}_6$; **amfiboli** - **tremolit** $\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$, **antofilit** $(\text{Mg, Fe})_7\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$, **aktinolit** $\text{Ca}_2(\text{Mg, Fe})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$, **hornblenda** $(\text{Ca, Na})_{2-3}(\text{Mg, Fe, Al})_5\text{Si}_6(\text{Si, Al})_2\text{O}_{22}(\text{OH})_2$

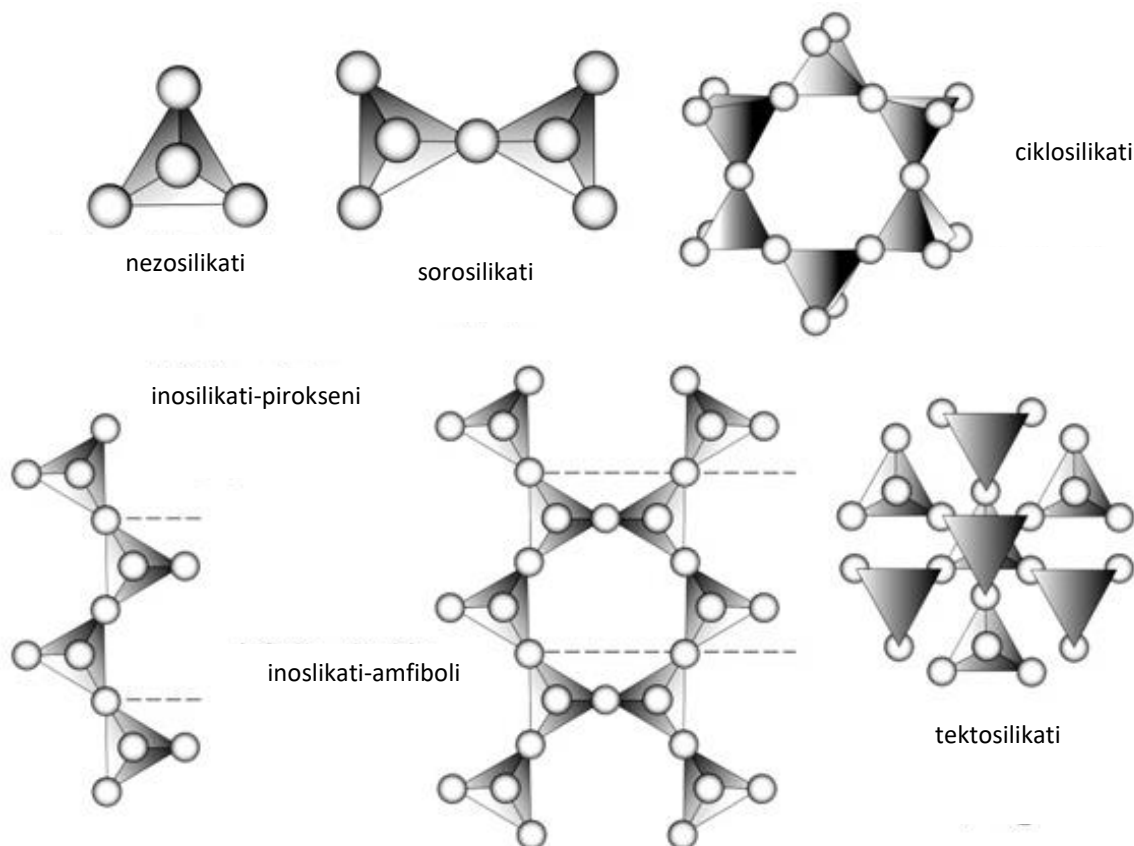
FILOSILIKATI - silikati slojevite strukture kod kojih su tetraedri povezani preko svoja tri kisika stvarajući beskonačan sloj šesterostruke simetrije (poput saća). Slobodni kisici (iz svakog tetraedra po jedan) nalaze se na istoj strani tog beskonačnog sloja i na njih se vežu kationi i hidroksid-ioni koji na taj način povezuju slojeve. Funkcionalna anionska skupina je $(\text{Si}_4\text{O}_{10})^{4-}$.

Primjer: **talk** $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$, **muskovit** $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$,

biotit $\text{K}(\text{Mg},\text{Fe})_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$, **serpentin** $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$

TEKTOSILIKATI - silikati kod kojih su tetraedri povezani prostorno preko sva četiri kisika tako da niti jedan kisik nema slobodne valencije. Često se dio silicija zamjenjuje s aluminijem, pa se na taj način oslobađaju slobodne valencije za vezivanje s drugim kationima. Funkcionalne skupine: $(\text{SiO}_2)^0$ –kvarc; $(\text{AlSi}_3\text{O}_8)^-$, $(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)^{2-}$ -feldspati; $(\text{Si}_3\text{O}_6)^0$, $(\text{AlSi}_2\text{O}_6)^-$, odnosno $(\text{Si}_2\text{O}_4)^0$, $(\text{AlSiO}_4)^-$ -feldspatoidi. Primjer: **ortoklas**, **mikroklin**, **sanidin** KAlSi_3O_8 ,

albit- **anortit** $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 - \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$, **kvarc** SiO_2 (kvarc spada i u okside i u tektosilikate), **leucit** KAlSi_2O_6



Sl. 16 Prikaz struktura silikata na temelju vezivanja $(\text{SiO}_4)^{4-}$ tetraedara

2. PETROLOGIJA

2.1. Uvod

Petrologija je znanost koja proučava sastav, osobine i postanak stijena.

Prema načinu postanka razlikuju se tri skupine stijena: magmatske, sedimentne i metamorfne.

MAGMATSKA STIJENA- nastaje kristalizacijom ili skrutnjavanjem visokotemperaturne taljevine-magme pretežno silikatnog sastava.

SEDIMENT / SEDIMENTNA STIJENA- akumulacija čvrstog materijala nastala na površini ili pri samoj površini Zemlje određenim geološkim, fizikalnim, kemijskim i biološkim procesima.

METAMORFNA STIJENA- nastaje ispod površine Zemlje metamorfozom (preobrazbom) teksture, strukture, mineralnog i kemijskog sastava ranije nastalih stijena magmatskog, sedimentnog ili metamorfnog postanka.

2.2. Magmajske stijene

Magmajska stijena je bilo koja kristalizirana ili staklasta stijena koja nastaje hlađenjem magme. Magma zapravo predstavlja rastaljeni stjenjski materijal, koji može sadržavati i kristale različitih minerala, te plinovitu fazu, koja pak može biti otopljena u taljevini ili odvojena kao posebna faza. Magma nastaje parcijalnim taljenjem u gornjem plaštu ili u donjim dijelovima kore i ima sposobnost migracije u pliće dijelove Zemljine kore gdje se može postupno hladiti i time formirati intruzivne (dubinske) magmajske stijene ili može biti izbačena na površinu Zemlje gdje naglim hlađenjem stvara efuzivne magmajske stijene. Magmu na površini Zemlje nazivamo lava.

2.2.1. Karakteristike magme

Tipovi magme - tipovi magme determinirani su njezinim kemijskim sastavom (Tablica 2). Osam je glavnih elemenata u sastavu magme: kisik (O), silicij (Si), aluminij (Al), željezo (Fe), kalcij (Ca), natrij (Na), kalij (K), magnezij (Mg). Proučavanjem kemizma različitih tipova magmajskih stijena i njihovih asocijacija definirana su tri glavna tipa magmi:

- Bazaltna magma (bazična) – SiO_2 45-55%, visok udio Fe, Mg, Ca, nizak udio K, Na
- Andezitska magma (neutralna) – SiO_2 55-65%, srednji udio Fe, Mg, Ca, K, Na u sastavu

- Riolitska magma (kisela) – SiO_2 65-75%, nizak udio Fe, Mg, Ca visok udio K, Na

Plinovita faza u magmi (uglavnom H_2O , u obliku vodene pare, s nešto CO_2 , manje količine plinova sumpora, klora i fluora) - na većim dubinama, u unutrašnjosti Zemlje plinovi su otopljeni u magmi, ali kada se magma uzdiše prema površini, odnosno kada dođe u područje nižeg tlaka, plinovi se izdvajaju iz magme kao zasebna faza. To se može možda najbolje objasniti na primjeru gaziranih pića, koja su punjena pod visokim tlakom. Visoki tlak drži plin u otopljenom stanju u tekućini, ali kada se tlak smanji, npr. kada otvorimo bocu, plin izlazi iz otopine i formira zasebnu plinovitu fazu koju vidimo kao mjehuriće. Plinovita faza daje magmi eksplozivni karakter, zbog toga što se volumen plina povećava kako se tlak smanjuje. Riolitske magme obično imaju veći udio plinovite faze od bazaltnih.

Temperatura magmi – laboratorijska mjerenja i određena ograničena terenska ispitivanja pokazali su da je temperatura erupcije magmi slijedeća:

- Bazaltna magma – 1000 – 1200 °C
- Andezitska magma – 800 – 1000 °C
- Riolitska magma - 650 – 800 °C

Viskozitet magmi – viskozitet je otpor tečenju (suprotno od fluiditeta). Viskozitet primarno ovisi o sastavu magme i njenoj temperaturi:

Magme s višim sadržajem SiO_2 u svom sastavu imaju veći viskozitet od onih s nižim sadržajem SiO_2 (viskozitet raste s porastom udjela SiO_2 u magmi). Nižetemperaturne magme imaju viši viskozitet od višetemperaturnih. Treba napomenuti da i čvrsta materija, konkretno stijene, imaju viskozitet, koji je, naravno, vrlo velik, milijarde puta veći od viskoziteta vode. Viskozitet je vrlo važno svojstvo magme koje određuje karakter erupcija.

Tip magme	Stijena	Kemijski sastav	Temp. (°C)	Viskozitet (PaS)	Sadržaj plinova
bazaltna	bazalt	SiO ₂ 45-55%, visok udio Fe, Mg, Ca, nizak udio K, Na	1000-1200	10-10 ³	nizak
andezitska	andezit	SiO ₂ 55-65%, srednji udio Fe, Mg, Ca, K, Na	800-1000	10 ³ - 10 ⁵	srednji
riolitska	riolit	SiO ₂ 65-75%, nizak udio Fe, Mg, Ca visok udio K, Na	650 - 800	10 ⁵ -10 ⁹	visok

Tablica 2 Tipovi magme i njihove karakteristike

2.2.2. Oblici pojavljivanja magmatskih stijena (sl. 17)

Magmatske stijene, s obzirom na mjesto postanka dijelimo u dvije velike skupine. Jedne su nastale kristalizacijom u dubinama litosfere i .odlikuju se zrnatom strukturom (**intruzivne stijene**), a druge. su nastale kristalizacijom, ili naglim hlađenjem, na površini Zemlje i karakterizira ih porfirna struktura, katkada i hijalina (**efuzivne stijene**). Između dubinskih (intruzivnih) i površinskih (efuzivnih) stijena smjestile su se stijene s prijelaznim tipom strukture, između zrnaste i porfirne (tzv. **žične ili hipabisalne stijene**). Svaka od tih skupina stijena javlja se u litosferi ili na površini Zemlje u karakterističnim oblicima.

Batolit je golemo intruzivno (plutonsko) tijelo, nepravilna oblika, koje na površini zaprema najmanje stotinu kvadratnih kilometara, a često i tisuće kvadratnih kilometara, a u litosferu dopire u veliku dubinu i zbog toga mu je osnovica redovito nepoznata. Graniti, granodioriti i sijeniti često se pojavljuju kao batoliti.

U batolitima se često nalaze enklave, manjih ili većih inkluzija, koje potječu iz okolnih stijena. Nazivamo ih ksenoliti. Njih je magma u vrijeme intruzije otrgla iz okolnih formacija, uklopila ih, izvršivši pri tom njihovu djelomičnu ili potpunu metamorfozu.

Štok (greda) je manje intruzivno tijelo koje zauzima površinu ispod 100 km², inače je batolit.

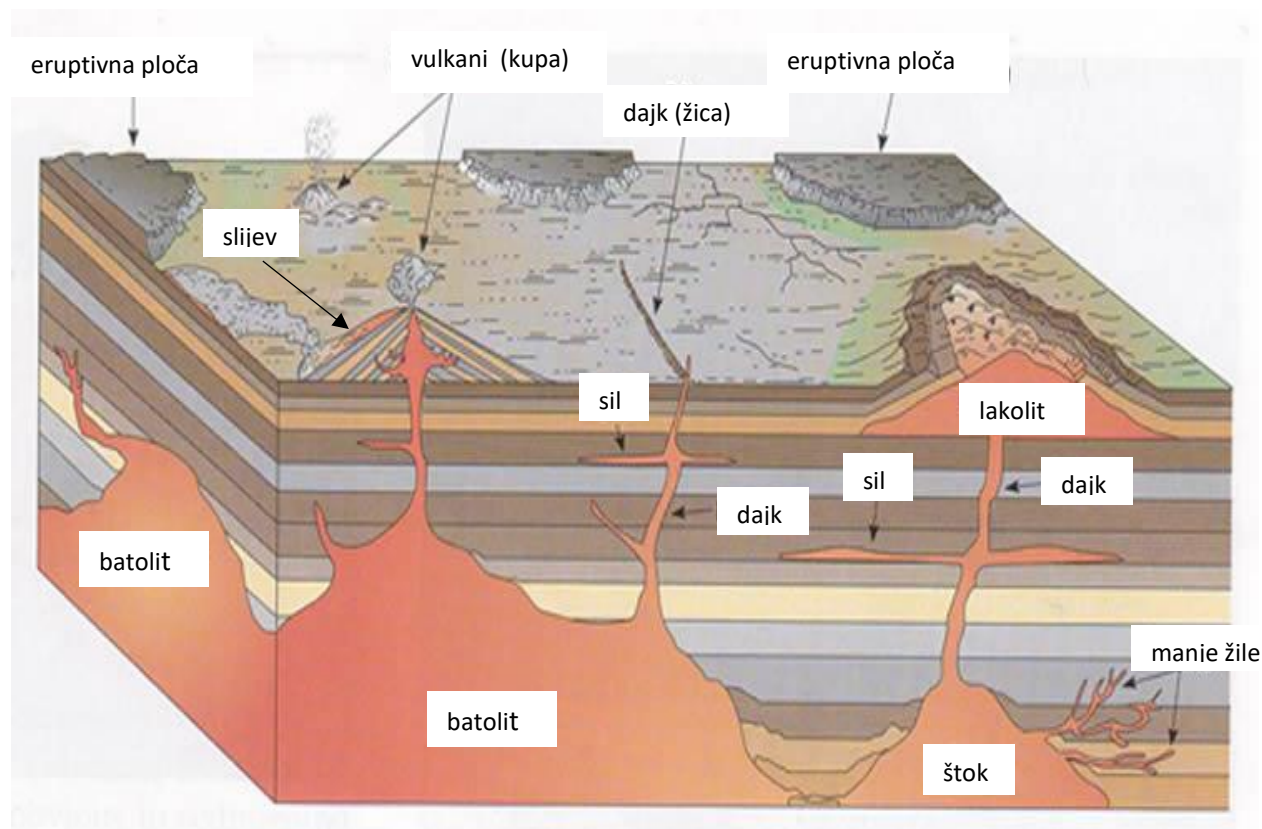
Batolit i štok su plutonski oblici, nastali kristalizacijom u unutrašnjosti litosfere, a na površinu su izbili različitim tektonskim pokretima, kao i denudacijom i erozijom.

Lakolit je zvonoliki ili gljivasti oblik intruziva. Nastaje ako manja količina magme probije kroz neku seriju slojeva i, nagomilavši se na jednom mjestu, uzdigne slojeve iznad sebe. Takvi, ali tanji oblici, pokazuju postupni prijelaz u sil. Lakolit je manje tijelo, dugačko najviše nekoliko kilometara.

Nek (dimnjak) je grotlo nekadašnjih vulkana ispunjeno eruptivom.

Sil (sklad) je intruzivna masa koja se utisnula konkordantno između dva sloja nekog sedimenta poprimajući manje-više pločasti oblik. Može biti različite debljine od nekoliko centimetara do jednog kilometra, a dužina mu može iznositi više kilometara.

Ako takva eruptivna ploča nepravilno isprespjeca sedimente sjekući slojeve pod različitim kutovima, nazivamo je **dajk (žica)**. Od dajkova se odvajaju manje žice, pa govorimo o sporednim žicama, žilama i apofizama. Dajkovima i apofizama stvara se prijelazni strukturni oblik k efuzivnim stijenama.



Sl. 17 Oblici pojavljivanja magmatskih stijena

Kod efuzivnih stijena najznačajniji je oblik **kupa**. To je zapravo vulkanski čunj izgrađen obično od slojeva lave i drugog vulkanskog materijala. **Slijev** je čvrsta efuzivna stjenska masa koja (poput rijeke) ima veliku duljinu, a malu širinu i debljinu i rezultat je kretanja lave niz padinu vulkana. To je zapravo stvrdnuti tijek nekadašnje lave koji danas možemo promatrati kod nekih živih vulkana. **Eruptivne ploče** obuhvaćaju velike površine, ali su obično male debljine.

Zapravo su najveće erupcije koje su se zbivale na Zemlji u njejoj povijesti. Posljedica neprestanih erupcija velikih razmjera može prouzrokovati stvaranje cijelog sistema takvih ploča, koji tada, kao u Dekanu (Indija), dostižu debljinu i do 1000 m.

Uz kompaktne eruptivne stijene postoji i manje-više rastresiti piroklastični materijal (tefra), koji nastaje prilikom vulkanskih erupcija. To su vulkanske bombe, odnosno blokovi (zaobljeni komadi lave odnosno fragmenti čvrstih stijena > 64 mm), lapilli (2- 64 mm), krupni vulkanski pepeo (0,063 – 2 mm) i sitni vulkanski pepeo ($< 0,063$ mm). S vremenom se piroklastični materijal može očvrnuti i tada od vulkanskih bombi ili blokova nastaje aglomerat ili vulkanska breča, od lapila, lapilni tuf, a od vulkanskog pepela tuf.

2.2.3. Vulkanske erupcije

Općenito, magme koje su nastale duboko u unutrašnjosti Zemlje počinju se uzdizati zbog toga što imaju manju gustoću od okolnih stijena. Kako se dižu u pliće dijelove gdje djeluje niži tlak, plinovi koji su do tada bili otopljeni u magmi počinju se izdvajati iz magme i stvaraju zasebnu fazu. Stvoreni mjehurići plina počinju se širiti. Ako magma ima malu viskoznost (bazaltne do andezitne magme), tada se plin može relativno lako proširiti. Kad magma dosegne površinu, mjehurić plina jednostavno će puknuti, plin će se lako proširiti do atmosferskog tlaka i dogodit će se neeksplozivna erupcija, obično kao tok lave (lava je naziv koji magmi dajemo na površini Zemlje). Ako je magma jako viskozna (riolitne do andezitne magme), tada se plin neće moći lako proširiti, pa će se unutar mjehurića (plinova) stvoriti pritisak. Kad magma dosegne površinu, mjehurići plina imat će visok unutrašnji tlak, zbog čega će eksplozivno puknuti po postizanju atmosferskog tlaka. To će uzrokovati eksplozivnu vulkansku erupciju.

Eksplozivne erupcije - oblaci plina i tefre (nekonsolidirani piroklastični materijal) stvaraju erupcijski stup koji se može podići i do 45 km u atmosferu iznad vulkana. Vjetar može pokupiti tefru, nositi je na velike udaljenosti, a zatim tefra pada natrag na površinu stvarajući padajuće piroklastične naslage. Ako se erupcijski stup uruši, stvorit će se piroklastični tok, pri čemu plin i

tefra velikom brzinom jure niz bokove vulkana. Ovo je najopasnija vrsta vulkanske erupcije. Naslage koje nastaju nazivaju se naslage piroklastičnih tokova.

Neeksplozivne erupcije - ako je viskoznost magme mala, obično se stvaraju tokovi lave (neeksplozivne erupcije). Tokovi lave stvaraju se na površini, a teku poput tekućine niz padinu, duž najnižih područja. Tokovi lave nastali erupcijama pod vodom nazivaju se jastučaste lave („pillow“- lava). Ako je viskoznost visoka, ali je sadržaj plina nizak, tada će se lava nakupiti iznad otvora stvarajući vulkanske kupe (dome). Uz dome postoji čitav niz vulkanskih struktura prema morfologiji kao npr.:

Štitasti vulkani - karakteriziraju ih blagi vršni nagibi (oko 5°) i nešto strmiji nagibi u donjim dijelovima (oko 10°), te kružni ili ovalni oblik u pogledu odozgo. Većina štitova formirana je bazaltnom magmom niske viskoznosti koja lako teče niz padinu od središnjeg otvora na vrhu.

Stratovulkani - imaju strmije padine od štitastih, s nagibima pri vrhu od 30° , a u nižim dijelovima od $6 - 10^\circ$. Stratovulkani su građeni od tokova lave i piroklastičnog materijala koji se međusobno izmjenjuju, zbog čega se ponekad nazivaju i kompozitni vulkani. Piroklastični materijal može činiti preko 50% volumena stratovulkana. Lave i piroklasti su obično andezitnog do riolitnog sastava. Zbog veće viskoznosti magmi koje izgrađuju stratovulkane, oni su obično eksplozivniji od štitastih.

Piroklastični vulkani (cinderi) – vulkanska stožasta uzvišenja malog volumena i nagiba bokova od $25 - 30^\circ$ koje se pretežno sastoje od piroklastičnog materijala bazalnog do andezitnog sastava. Česta se pojavljuju na padinama većih vulkana i u većim nakupinama na jednom području.

Krateri i kaldere - krateri su kružne udubine, promjera obično manje od 1 km, koje nastaju kao rezultat eksplozija vrućih plinova i tefre. Kaldere su znatno veće udubljenja, kružnog do eliptičnog oblika, s promjerom od 1 km do 50 km. Kaldere nastaju kao rezultat kolapsa vulkanske strukture usljed brze evakuacije, odnosno pražnjenja magmatske komore (ognjišta) smještene ispod površine, npr. kao kod stratovulkana. Kod stratovulkana to naglo pražnjenje komore i stvaranje kaldera uzrokuje obimne padajuće piroklastične naslage i piroklastične tokove. Kaldere su često zatvorene depresije koje sakupljaju kišnicu i vodu nastalu taljenjem snijega, pa se unutar njih često stvaraju jezera.

Bazaltni platoi - izuzetno veliki izljevi bazaltne magme kroz pukotine i desetke kilometara dugačke koji pokrivaju ogromna područja (stotine četvornih kilometara), relativno su malog nagiba i izgrađuju visoravni.

2.2.4. Lučenje magmatskih stijena

Eruptivne stijene ne pokazuju slojevitost ni škriljavost. one su kompaktne, masivne. U njima se ipak mogu pojaviti neke pukotine koje tada izdvajaju blokove različitog oblika i različite veličine. Katkad pukotine, gotovo usporedne, liče na slojevitost, pa govorimo o pseudostratifikaciji. Često su takve pukotine položene međusobno približno okomito, i posljedica toga su i manje-više pravilno izlučeni blokovi. Lučenje je uglavnom posljedica hlađenja iskristaliziranih stijena, pri čemu se one stežu i pravilno pucaju.

Pločasto lučenje nastaje kad se magmatska stijena luči u manje-više usporednim, debljim ili tanjim pločama. Razvijeno je najčešće u granitu.

Kod stubastog ili prizmastog lučenja magmatske stijene pucaju tako da se pojavljuju gotovo usporedni stupovi, najčešće četverostrani, peterostrani ili šesterostrani. Razvijeno je obično kod efuzivnih stijena, bazalta, andezita i riolita, ili nekih tufova (sl. 18)

Kockasto lučenje nastaje kad se stijena luči u paralelepipednim oblicima, koji često poprimaju oblik gotovo pravilne kocke. Karakteristično je za neke granite i andezite.

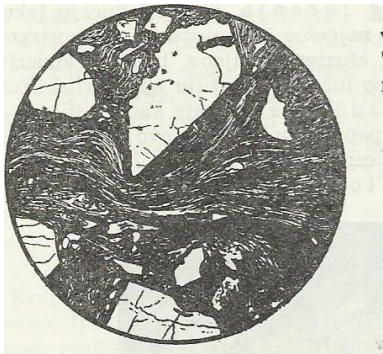
Kada se stijena luči u kuglastim ili jajolikim oblicima, nastaje **kuglasto ili sferoidalno lučenje**. Razvijeno je osobito u efuzivima, npr, bazaltu, dijabazu. Pri nepravilnom lučenju stijena puca u posve nepravilne komade i blokove.



Sl. 18 Stubasto lučenje bazalta

2.2.5. Tekstura i struktura eruptivnih stijena

Tekstura predstavlja način na koji su mineralni individui zauzeli prostor u stijeni. Ako se, na primjer, lava u vrijeme svoga toka naglo iskristalizirala, minerali su zadržali smjer struje, stijena pokazuje **fluidalnu teksturu** (sl. 19).



Sl. 19 Fluidalna tekstura

Vezikularnu teksturu (sl. 20) imaju stijene koje su pune šupljina što su nastale ekspanzijom plinova i para u vrijeme kristalizacije.



Sl. 20 Vezikularna tekstura

Ako su takve šupljine ispunjene sekundarnim mineralima, kremenom, opalom, kalcitom, zeolitima, stijena je **mandulaste (amigdaloidne) tekture**.

Stijene koje nemaju neku preferiranu orijentaciju mineralnih zrna pokazuju **homogenu teksturu**.

Struktura je izražena **stupnjem kristaliniteta, veličinom, oblikom i međusobnim odnosom minerala u stijeni**. Ona je jedna od najvažnijih obilježja eruptivnih stijena jer po njoj možemo odrediti uvjete kristalizacije, genezu stijena, a važna je i za njihovu klasifikaciju.

Glavni faktor koji određuje strukturu magmatske stijene je brzina hlađenja. Uz njega vrlo važnu ulogu imaju i : stupanj difuzije (brzina kojom se atomi, ioni, molekule mogu kretati kroz taljevinu), brzina nukleacije novih kristala, te brzina rasta kristala. To znači da bi se kristal, odnosno njegov nukleus, formirao u magmi mora biti dovoljno kemijskih konstituenata na istom mjestu u isto vrijeme. Kada se jednom nukleus formira, kemijski konstituenti moraju difuzijom dolaziti na površinu rastućeg kristala, te će tako kristal rasti tako dugo dok ne ponestane gradbenih elemenata (atoma, iona...) ili se ne „sudari” s drugim rastućim kristalima. Bitno je napomenuti da do nukleacije neće doći sve dok se ne postigne temperatura ravnotežne kristalizacije.

Evo primjera:

1. Sporo hlađenje –nukleacija je mala, a brzina rasta kristala srednja. Nastat će nekoliko kristala koji će rasti srednjom brzinom dok se međusobno ne sudare. Zbog toga što ima malo nukleacijskih centara, kristali će moći izrasti relativno veliki što će rezultirati **krupnozrnatom strukturom (faneritska struktura)** (sl. 21A, B).
2. Brzo hlađenje –nukleacija i brzina rasta kristala će biti velike. To će rezultirati stvaranju mnoštva kristala koji brzo rastu i koji će se vrlo brzo sudariti međusobno i stoga neće imati dovoljno ni vremena ni prostora da izrastu u velikim dimenzijama. Rezultat takvih uvjeta je **finozrnata struktura (afanitska)** (sl. 21C).
3. Vrlo brzo, gotovo trenutno, hlađenje – i nukleacija i brzina rasta će biti male. Rezultat toga će biti **staklasta, amorfna** osnova sa sporadičnim sitnim kristalima (mikroliti).
4. Dva stadija hlađenja – nakon sporog i postupnog hlađenja koje rezultira krupnim kristalima, slijedi brzo hlađenje i stvaranje finozrnatih kristala koji čine matriks ili osnovu (**porfirna struktura**)

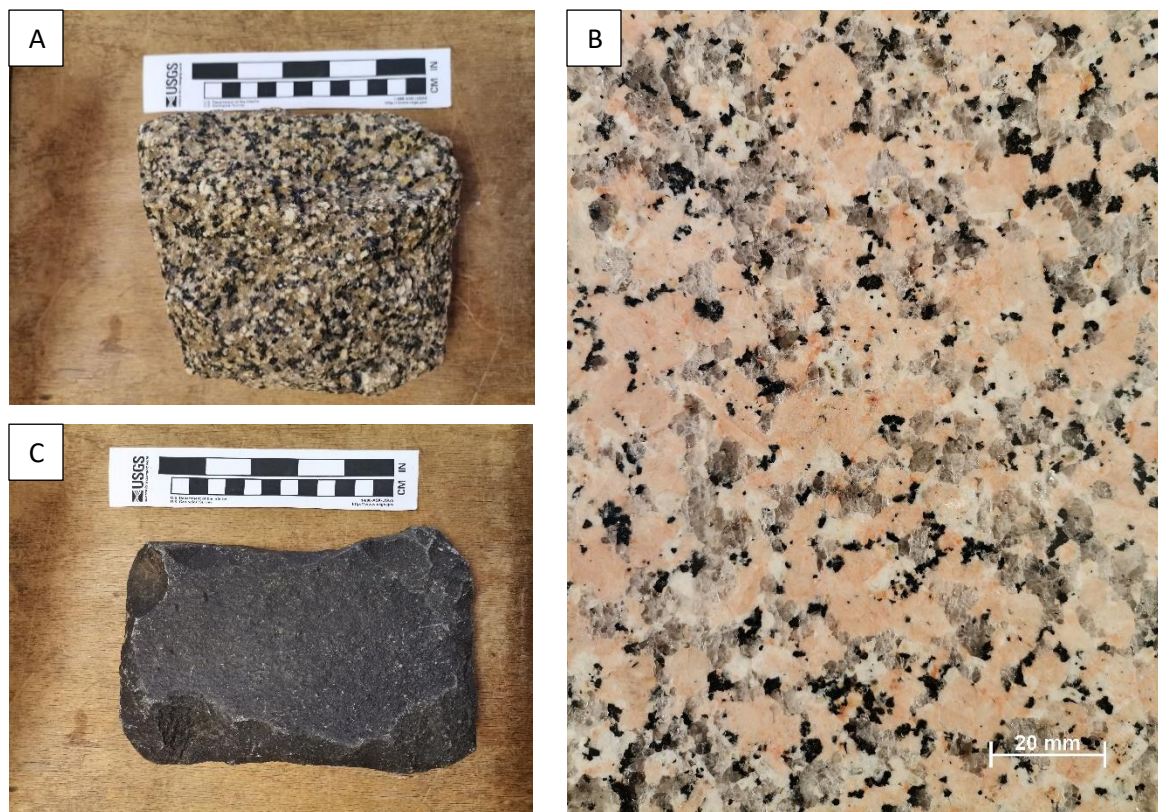
Između dva ekstremna slučaja, amorfnog i krupnokristaliziranog stanja, mogući su svi prijelazni oblici, pa poznamo eruptivne stijene koje su djelomično kristalizirane, a djelomično amorfne. Odnos između kristaliziranoga i amorfnog dijela koleba u širokim granicama.

S obzirom na stupanj kristaliniteta, magmatske stijene mogu biti: **holokristaline** (potpuno kristalizirane), **hijaline** (stijene su potpuno staklaste, amorfne), **hipohijaline ili hipokristaline** (stijene su djelomice kristalizirane, a djelomice amorfne).

S obzirom na veličinu kristala stijena je **makrokristalina** (ili faneritska) ako se sastojci holokristaline stijene mogu razabrati golim okom. Ako se razabiru tek mikroskopom, stijena je **mikrokristalina**. Ako su u holokristalinoj stijeni mineralni sastojci toliko sitni da se ni mikroskopom ne mogu međusobno razlikovati, stijena je **kriptokristalina**.

Minerale koji se razvijaju sa svojim kristalografskim formama definiramo kao **idiomorfne**. One minerale koji u stijeni nemaju svojih kristalografskih oblika, nego se javljaju u nepravilnim zrnima, nazivamo **alotriomorfnim**. Minerale koji samo djelomično imaju svoje kristalografske forme zovemo **hipidiomorfnim**.

S obzirom na međusobni odnos minerala u stijeni razlikujemo dva osnovna tipa strukture: **zrnatu (granularnu) i porfirnu**. **Zrnatu strukturu** sastoji se od mineralnih zrna podjednake veličine (sl. 21A, B; 22C). Takva je struktura karakteristina za intruzive. S obzirom na oblik minerala, zrnata struktura može biti: idiomorfna, alotriomorfna i hipidiomorfna.



Sl. 21 A), B) Faneritska, zrnata struktura (granit); C) afanitska, finožrnata struktura (bazalt);

U znatim strukturama često nalazimo pravilno prorastanje ortoklasa i kvarca (**mikrografska struktura**). **Mirmekitskom strukturom** nazivamo crvoliko prorastanje kvarca i kiselog plagioklasa, obično oligoklasa. **Poikilitiska struktura** je ona u kojoj neki veliki mineral uklapa mnoštvo različitih sitnih minerala.

Porfirna struktura sastoji se od krupnih, većinom idiomorfnih kristala koji se zovu utrusci (fenokristali), a nalaze se u sitnozrnastoj osnovi (sl. 22A, D). Osnova može biti i djelomice amorfna. Takva struktura je karakteristična za efuzivne stijene. Fenokristali su nastali u vrijeme dok se magma kristalizirala u dubini kamene kore. Sitnozrnasta ili hipokristalina osnova nastala je na površini, nakon efuzije magme. Zbog polagane kristalizacije u dubini litosfere utrusci su veliki, a zbog naglog hlađenja na površini litosfere, osnova se sastoji od sitnozrnastoga mineralnog agregata ili je djelomice amorfna, staklasta.



Sl. 22 A) Porfirna struktura (dalenit); B) ofitska-intergranularna struktura (dijabaz); C) zrnata struktura (gabro); D) porfirna struktura (andezit)

Intergranularna struktura – u međuprostorima između različito orijentiranih štapića plagioklasa nalaze se zrna feromagnezijskih minerala, olivina i piroksena (sl.22B).

Ofitska struktura – slična intergranularnoj, osim što su štapići plagioklasa u potpunosti okruženi feromagnezijskim mineralima (sl. 22B). Oba tipa strukture karakteristična su za dijabaze, žične stijene bazičnih magmi, pa se za njih često upotrebljava naziv dijabazna struktura.

2.2.6. Mineralni sastav

Prema udjelu minerala u stijeni razlikuju se bitni (glavni), sporedni i akcesorni minerali. **Bitni (glavni) minerali** su oni minerali koji se u stijeni nalaze u većim količinama, obično preko 10 vol. %, te određuju vrstu stijene. Tako su primjerice, kvarc, feldspati i tinjci bitni sastojci granita, dok je olivin bitan sastojak dunita. **Sporedni se minerali** u stijeni javljaju obično u količini do 10 vol. % i definiraju varijetete unutar osnovnih vrsta magmatskih stijena. Primjerice, bazični plagioklas i piroksen bitni su minerali u stijeni gabro, a ako uz njih dolazi i podređena količina olivina, takav varijetet se može definirati kao olivniski gabro. **Aksesorni se minerali** u stijenama javljaju u količinama do 1 vol % i nemaju značaj pri definiranju vrsta ili varijeteta magmatskih stijena.

Petrogeni minerali se razlikuju i prema vremenu postanka. Oni koji su nastali direktnom kristalizacijom iz magme nazivaju se **primarni minerali**. **Sekundarni** su oni koji su nastali izmjenom primarnih minerala djelovanjem hidrotermalnih procesa i kemijskog trošenja. Neki su minerali jako podložni promjenama (npr. olivin, feldspati), dok su neki izrazito otporni odnosno rezistentni (npr. kvarc). Te se promjene mogu odigravati u kasnijim fazama kristalizacije magme, odnosno neposredno nakon konsolidacije stijene, pa se nazivaju kasnomagmatskim ili postmagmatskim mineralima.

Prema boji razlikujemo dvije skupine minerala, i to leukokratske (salske ili felsične) i melanokratske (femske ili mafitne). Leukokratski minerali su bezbojni ili svjetlo obojeni (npr. bijeli, ružičasti, blago zelenkasti). To su u magmatskim stijenama kvarc, feldspati i feldspatoidi. Melanokratski minerali su tamno obojeni minerali, zeleni do gotovo crni. To su olivini, pirokseni, amfiboli i biotiti.

Leukokratski minerali:

Kvarc: nepravilna i bezbojna zrna, staklasta izgleda. Nepravilno se lome (nemaju kalavosti) i na neravnoj površini pokazuju masni sjaj.

Feldspati: nepravilni, ponekad idiomorfno razvijeni minerali. Mogu biti ružičasti, blago crvenkasti, zelenkasti, a kad ih zahvati trošenje, što je vrlo često, bijele su boje. Imaju izraženu kalavost.

Melanokratski minerali:

Olivin: nepravilna tamnozeleno do crna zrna, bez kalavosti.

Pirokseni: kratkostupičasti zeleni do crni minerali s prizmatskom kalavosti.

Amfiboli: smjerom kristalografske osi c izduženi kristali; prutičasti i igličasti. Zelene su do crne boje. Dobre su prizmatske kalavosti.

Biotit: tamnosmeđi do crni listićavi mineral s odličnom pinakoidskom kalavosti.

Drugi važniji minerali:

Leucit (feldspatoid): bijeli kuglasti mineral. Dolazi u neutralnim i bazičnim efuzivnim stijenama.

Muskovit: srebrnastobijeli listići s odličnom pinakoidskom kalavosti. Može se nalaziti u granitima i pegmatitima.

2.2.7. Klasifikacija magmatskih stijena

Magmatske stijene, s obzirom na mjesto postanka, svrstavamo u tri skupine: intruzivne, efuzivne i žične. **Intruzivne stijene** su nastale kristalizacijom u unutrašnjosti litosfere i odlikuju se zrnatom strukturom. **Efuzivne stijene** su nastale efuzijom lave na površinu Zemlje, a odlikuju se porfirnom i staklastom strukturom. **Žične stijene** čine prijelaz između intruziva i efuziva i po načinu pojavljivanja u litosferi i po strukturi (npr. pegmatitska, ofitska struktura).

S obzirom na pojavljivanje kvarca i na udio SiO_2 u stijeni, magmatske stijene dijelimo na kisele (> 63 mas. % SiO_2 , uključujući >10 vol. % minerala kvarca), neutralne (52-63 mas. % SiO_2), bazične (45-52 mas. % SiO_2) i ultrabazične (< 45 mas. % SiO_2).

Kisele stijene sadrže malo melanokratskih minerala, pa su obično svijetlih boja svjetlosive, svjetloružičaste, svjetlozelenkaste (sl. 21A, B). Neutralne stijene obično su nešto tamnije od kiselih zbog nešto veće količine tamno obojenih, melanokratskih mineral (sl. 22D). Bazične stijene sadrže mnogo feromagnezijskih minerala, pa su tamnosive do gotovo crne boje (sl. 21C,

22C). Ultrabazične stijene redovito su tamnozelene do crne boje, jer se u njima ne javljaju leukokratski minerali.

S obzirom na mineralni i kemijski sastav, razlikujemo tri serije. **Kalcijsko-alkalijskom serijom** nazivamo onu skupinu u kojima su od feldspata zastupljeni plagioklasi. Nasuprot tome stijene u kojima prevladavaju alkalijski feldspati (ortoklas, sanidin, mikroklin i albit) nazivamo **alkalijskom serijom**. Između alkalijske i kalcijsko-alkalijske serije nalazi se **monzonitska serija** u kojoj se plagioklasi i alkalijski feldspati pojavljuju u podjednakom omjeru.

Treba naglasiti da postoje svi mogući prijelazi iz jedne vrste stijena u drugu. Tako, na primjer, između granodiorita i diorita postoje prijelazni oblici s obzirom na količinu kvarca, između diorita i gabra s obzirom na vrstu plagioklasa, između diorita, monzonita i sijenita s obzirom na postotni odnos plagioklasa i ortoklasa.

U tablici 3, koja prikazuje terensku klasifikaciju magmatskih stijena, prvi red se odnosi na kisele stijene, drugi na neutralne, u trećem su zastupljene bazične, a posebno su u dnu tablice navedene ultrabazične magmatske stijene.

	Serijska alkalijska	Serijska monzonitska	Serijska kalcijsko- alkalijska	
<i>Mineralni sastav</i>	<i>K-feldspati ± feldspatoidi</i>	<i>K-feldspati + plagioklasi</i>	<i>Plagioklasi</i>	<i>Mineralni sastav</i>
intruziv efuziv	granit riolit	adamelit delenit	granodiorit dacit	<i>kvarc + biotit (hornblenda)</i> ← kisele
intruziv efuziv	sijenit trahit	monzonit trahi-andezit	diorit andezit	<i>hornblenda ± biotit (piroksen)</i> ← neutralne
intruziv efuziv	alk.gabro alk. bazalti	kentalenit trahi-bazalt	gabro bazalt	<i>piroksen ± olivin</i> ← bazične
				<i>olivin piroksen peridotiti</i> ← ultrabazične

Tablica 3 Terenska klasifikacija magmatskih stijena

Shodno tome, skupina granodiorit-dacit sadrži kisele plagioklase, skupina diorit-andezit sadrži neutralne plagioklase, a skupina gabro-bazalt sadrži bazične plagioklase. K-feldspati poznati su u više modifikacija. To su ortoklas, mikroklin i sanidin. Ortoklas i mikroklin karakteristični su za intruzivne stijene, a sanidin je karakterističan za efuzivne stijene.

2.2.8. Geneza magmatskih stijena

S obzirom da je magma taljevina, potječe li ona iz jedinog dijela Zemlje koji je u rastaljenom stanju, vanjskog dijela jezgre? Malo vjerojatno! Naime, kemijski sastav rastaljenog dijela jezgre nije adekvatan, vanjska jezgra izgrađena je od Fe i Ni, dok je magma silikatna taljevina. Malo je vjerojatno i da magma nastaje taljenjem oceanske kore, budući da je većina magmi koje eruptiraju u oceanima bazalnog sastava, a da bi bazalna magma nastala taljenjem oceanske (bazaltne) kore trebalo bi se desiti gotovo 100% taljenje te kore, što je opet malo vjerojatno. Na kontinentima eruptiraju i bazaltne, andezitne i riolitne magme. Bazaltne magme sigurno ne potječu od kontinentalne kore koja sadrži puno veći udio SiO_2 u sastavu. Za razliku od njih, više kiselijske magme (andezitne-riolitne) mogu nastajati pretaljivanjem kontinentalne kore. Stoga, s izuzetkom kontinenata, magme najvjerojatnije nastaju u plaštu i manjim dijelom u donjim dijelovima kore i to njihovim parcijalnim taljenjem. Treba napomenuti da se magma ne formira bilo gdje ispod površine, već samo u onim dijelovima gdje su zadovoljeni određeni uvjeti. Konkretno, da bi proizveli magmu, moramo ili **povećati temperaturu iznad točke tališta peridotita** (sastav plašta) i/ili moramo na neki način **sniziti temperaturu taljenja peridotita** (npr. prisutnost vode u sistemu) i/ili **sniziti tlak (tzv. dekompresijsko taljenje** – zbog konvekcijskog strujanja jače zagrijani materijal iz dubljih dijelova plašta uzdiže se i pri tom nosi svoju toplinu u pliće dijelove, gdje vlada manji tlak, što rezultira povećanjem temperature i omogućuje parcijalno taljenje okolnih stijena). Drugim riječima, moramo temperaturu dovesti u područje parcijalnog taljenja. Što to točno znači? Treba se podsjetiti da različiti minerali imaju različite točke (temp.) taljenja, a s obzirom da je stijena agregat minerala, taljenje stijena se dešava u intervalu temperatura. To znači da se kod određene temperature tali samo dio stijene i to nazivamo parcijalnim taljenjem.

Koji su to dijelovi ispod površine gdje su zadovoljeni uvjeti za parcijalno taljenje plašta i formiranje magme? To su **divergentne granice ploča (srednje-oceanski hrptovi i riftne**

doline), kovergentne granice ploča (zone subdukcija) i područja tzv. vrućih točaka (unutar ploča).

Glavni process stvaranja magmi na divergentnim granicama je dekompresijsko taljenje, u području vrućih točaka dekompresijako taljenje i povećanje temperature, dok u području konvergentnih granica imamo utjecaj sva tri procesa, dekompresijskog taljenja, povećanja temperature i snižavanja točke (temp.) tališta.

Kada se taljevina jednom formira parcijalnim taljenjem, lako se može separirati od okolne čvrste stijene budući da je mobilnija i ima manju gustoću.

Dok magma migrira u pliće dijelove, gubi toplinu i počinje kristalizirati. Pri tome se sastav magme može mijenjati. Svaki proces koji uzrokuje promjenu sastava magme naziva se magmatskom diferencijacijom. Najčešći procesi magmatske diferencijacije su **frakcijska kristalizacija, miješanje dviju ili više magmi, asimilacija okolnih stijena kore.**

Frakcijska kristalizacija predstavlja kristalizaciju magme prilikom koje dolazi do odstranjivanja novonastalih minerala iz taljevine tako da preostala magma mijenja svoj sastav u odnosu na početnu, parentalnu bazičnu magmu, odnosno postaje sve kiseliya. Takva promjena sastava može uzrokovati i promjene u gustoći i viskoznosti magme i stoga utjecati na sposobnost daljnjeg kretanja prema površini. Npr. kristalizacija 40-50% magme će povećati njenu viskoznost do te mjere da vrlo vjerojatno nikad neće doći do površine, nego će se postupno hladiti/kristalizirati u dubini i stvarati intruzivne stijene.

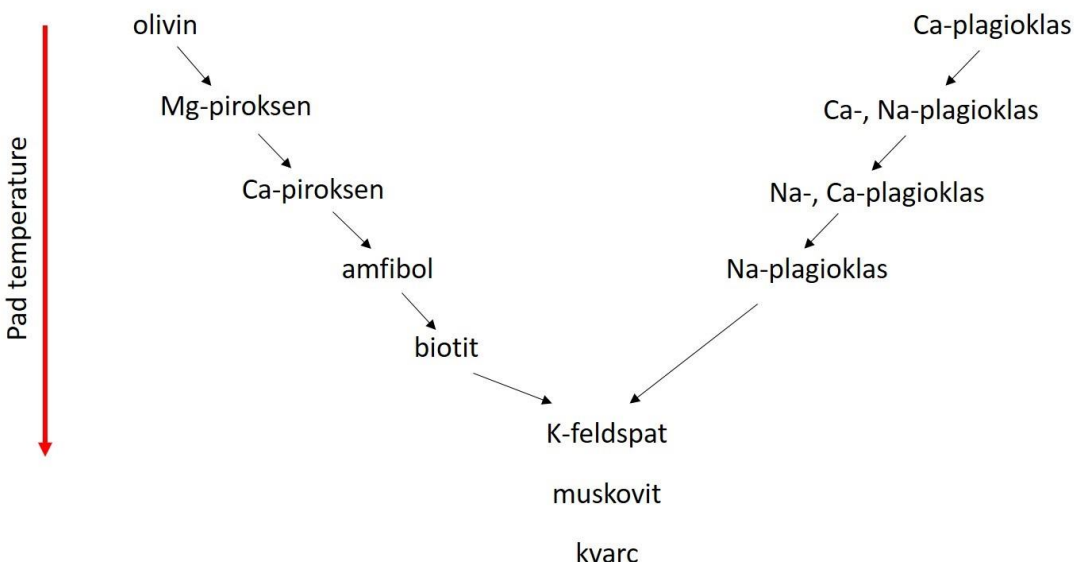
Miješanje magmi - ako prilikom kretanja prema površini dođe do miješanja kisele i bazične magme, nastat će magma neutralnog sastava.

Asimilacija – prilikom kretanja prema površini magma može uklopiti fragmente okolnih stijena kroz koje se kreće. Ti fragmenti se rastale i time dolazi do kontaminacije magme, odnosno do promijene njenog sastava.

Američki petrolog N. L. Bowen na osnovi svojih teoretskih istraživanja zaključuje da su različite magme nastale diferencijacijom jedne jedine magme, bazičnog sastava. Po njemu, dakle, postoji samo jedna izvorna magma, bazalnog sastava, a sve raznolike stijene koje poznajemo nastale su iz nje kristalizacijskom diferencijacijom.

Minerali ne kristaliziraju iz magme istodobno. S obzirom na pad temperature magme, postoji u pravilu slijed kristalizacije pojedinih minerala. Po njemu se kristalizacije magme odvija usporedno u dva reakcijska niza (tzv. Bowenov reakcijski niz, sl. 23), jedan je diskontinuirani niz

feromagnezijskih minerali, a drugi je kontinuirani niz plagioklasa. Ta dva niza kristaliziraju u magmatskom stadiju kristalizacije magmi i tvore većinu magmatskih stijena.



Sl. 23 Bowenov reakcijski niz

2.2.9. Kristalizacijski stadiji

Kristalizacija magme vrlo je složen proces. Od početka kristalizacije uz vrlo visoku temperaturu pa do svršetka kristalizacije pri niskoj temperaturi u intervalu od jedno 800°C razlikujemo nekoliko stadija kristalizacije magme.

Magmatski stadij je stadij u kojemu kristaliziraju magmatski minerali pri temperaturama višim od 600°C. U ovom stadiju kristaliziraju silikatni minerali Bowenovih reakcijskih nizova te sulfidi i oksidi teško taljivih metala (željeza, kroma, titana i drugih). U zaostaloj taljevini koncentriraju se volatili (najvažnija je vodena para) koji se ne ugrađuju u pirogene minerale. Pri visokoj temperaturi prvo kristaliziraju olivini, zatim olivini i rompski pirokseni. Tako nastaju duniti i peridotiti. Ako i dalje pada temperatura, kristaliziraju se monoklinski pirokseni i bazični plagioklasi s olivinom ili bez njega. Nastaju gabri ili olivinski gabri. Pri još nižoj temperaturi kristaliziraju se iz magme neutralni plagioklasi i amfiboli tvoreći stijene dioritske skupine. Konačno se kristaliziraju alkalijski feldspati, biotit i kvarc i tako nastaju graniti. (sl. 21)

U pegmatitnomu stadiju kristaliziraju minerali pri temperaturama približno od 600 do 500°C. U toj magmi koja je granitskog sastava ima dovoljno volatila zbog kojih se mineralna tvar lako

pokreće prema kristalizacijskim centrima, pa nastaju krupni, pegmatitni minerali kao npr. turmalin, topaz beril, cirkon itd. Oni sadrže elemente kao rubidij, cezij, litij, berilij, kositar, niobij, tantal itd. koji se zbog veličine svojih radijusa nisu mogli zamjenom ugraditi u kristalne strukture minerala prvog stadija, a koncentracija im je bila premala za tvorbu vlastitih minerala.

U pneumatolitnomu stadiju kristaliziraju minerali sublimacijom plinova i para (vodena para, SO_2 , CO_2 , H_2S , F_2 , Cl_2 , HF itd.) koji se gomilaju nakon kristalizacije minerala u prethodnim stadijima i time uzrokuju povišenje tlaka do vrijednosti više od vanjskoga tlaka. Pneumatolitni minerali nastaju pri temperaturama višim od kritične temperature vode, tj. višim od 350°C .

Hidrotermalni stadij je završni stadij kristalizacije minerala magmatskog postanka.

Magmatsko-hidrotermalni minerali nastaju iz jako koncentrirane vodene otopine magmatskog postanka koja sadrži mnogo otopljenih soli, a kreće se kroz pore, šupljine i pukotine u stijenama. Zbog toga se hidrotermalni minerali i nalaze najčešće u oblicima žila, žica i impregnacija nastalih ispunjavanjem odgovarajućih prostora. Temperatura njihova postanka je između 350 i 100°C , dakle niža od kritične temperature vode. Među takvim mineralima su i glavni rudni minerali npr. olova, cinka, antimona, žive, arsena, zlata, srebra itd.

Ako plinovi i pare dohvate površinu Zemlje, izbijaju kao izvori vodene pare, ugljične kiseline ili sumpornih spojeva što poznajemo pod imenom fumarole, mofete i solfatare. Takvi izvori redovito su znak zamrle vulkanske aktivnosti toga kraja.

2.3. Sedimentne stijene

2.3.1 Uvod

Približno 70% stijena Zemljine površine sedimentog je postanka, a obuhvaćaju općepoznate pješčenjake, vapnence i šejlove, te manje zastupljene, ali jednako dobro poznate naslage soli, željezovite sedimentne stijene, ugljen i rožnjake.

Taloženje sedimentnih stijena kroz geološku povijest zbivalo se u prirodnim okolišima kakvi postoje i danas. Stoga istraživanja recentnih okoliša i njihovih sedimenata i procesa uvelike doprinose razumijevanju njihovih starijih ekvivalenata. Postoje i takve sedimentne stijene čiji recentni ekvivalenti nisu poznati ili su njihovi taložni okoliši danas slabo razvijeni.

Nakon što se istalože, sedimenti podliježu procesima dijageneze, tj. fizičkim, kemijskim i biološkim procesima uslijed kojih dolazi do kompakcije, cementacije, rekristalizacije i drugih promjena u primarnom sedimentu, a sve to vodi konačnom nastanku stijena.

Jedan od brojnih razloga istraživanja sedimentnih stijena je bogatstvo ekonomskih minerala i sirovina sadržanih u njima. Fosilna goriva nafta i plin nastaju dozrijevanjem organske tvari u sedimentima, a potom migriraju u odgovarajuće rezervoare, većinom u porozne sedimentne stijene. Ugljen je također sastojak sedimentnih naslaga. U potrazi za novim ležištima tih goriva i drugih prirodnih bogatstava, sve više su u uporabi sedimentološke i petrološke metode istraživanja. Sedimentne stijene sadrže veliki dio svjetskih rezervi željeza, kalijevog karbonata (potaše), soli, građevnih materijala i mnogih drugih važnih sirovina.

Istraživanja sedimentnih stijena znatno doprinose poznavanju i razumijevanju geološke prošlosti, ali i spoznajama vezanima za okoliše i procese taloženja, te paleogeografiju i paleoklimatologiju. Život na Zemlji zapisan je u sedimentnim stijenama u obliku fosila, koji predstavljaju glavno sredstvo stratigrafske korelacije fanerozoika.

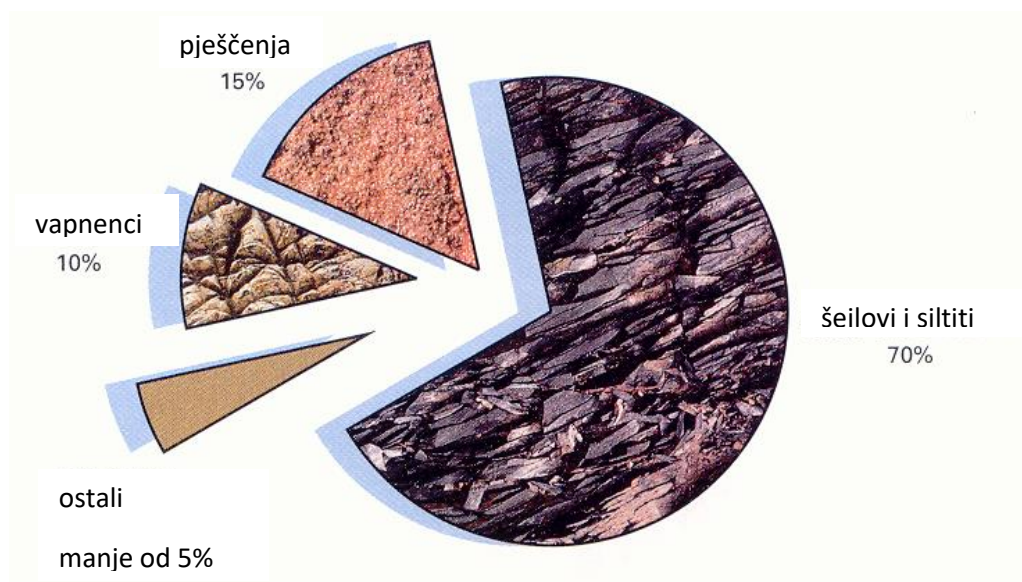
2.3.2 Klasifikacija sedimentnih stijena

Sedimentne stijene nastaju fizičkim, kemijskim i biološkim procesima. Na temelju dominantnih procesa svrstane su u pet velikih grupa:

- SILICIKLASTIČNI (TERIGENI) – šljunak i konglomerati, kršje i breče, pijesci i pješčenjaci, muljevi i muljnjaci, siltovi i siltiti, šejlovi, gline i glinjaci

- BIOGENI, BIOKEMIJSKI I ORGANSKI – vapnenci, rožnjaci, fosfati, ugljeni, naftni šejlovi
- KEMIJSKI – evaporiti, željezoviti sedimenti
- VULKANOKLASTIČNI – tufovi, vulkanski pepeo, ignimbriti...
- REZIDUALNI – lateriti, boksiti

Najzastupljeniji sedimenti su sitnozrnati siliciklastiti, šejlovi i siltiti (70%), zatim slijede pješčenjaci (15%), vapnenci (10%), a svi ostali imaju udio manji od 5% (sl. 24).



Sl. 24 Zastupljenost pojedinih tipova sedimenata

2.3.3 Sedimentni ciklus

Svaki sediment/sedimentna stijena rezultat je određenih procesa koji zajedno čine tzv. sedimentni ciklus. Ti procesi su: **trošenje, erozija, transport, sedimentacija (taloženje), litifikacija (dijageneza)**. Navedeni procesi dešavaju se sukcesivno navedenim redom.

2.3.3.1 Trošenje

Trošenje –destruktivni procesi koji mijenjaju fizikalna i kemijska svojstva stijena na površini ili pri samoj površini Zemlje. Trošenje može biti mehaničko i kemijsko (biokemijsko).

MEHANIČKO TROŠENJE – dezintegracija čvrste stijene bez promjena u mineraloškom i kemijskom sastavu (glavni procesi: pucanje usljed popuštanja pritiska, smrzavanje-otapanje, abrazivno djelovanje vode, vjetra i leda, termalna ekspanzija i kontrakcija, organska aktivnost)

Pucanje usljed popuštanja pritiska (tzv. relaksacija): kada stijene, nastale pod utjecajem povišenog tlaka u dubljim dijelovima Zemljine kore, usljed tektonskog izdizanja ili erozije pokrovnih sedimenata dođu na površinu, one se prilagođavaju novim uvjetima sniženog tlaka (relaksiraju se, ekspandiraju). Pri toj njihovoj prilagodbi novim uvjetima, tzv. relaksaciji, stvaraju se pukotine koje olakšavaju daljnju dezintegraciju stijene drugim procesima

Smrzavanje –otapanje: u umjerenim klimatskim područjima i na visokim planinama tijekom zime u stijenama natopljenim vodom, smrzavanje uzrokuje, zbog povećanja volumena leda u odnosu na volumen vode, velika naprezanja i tlak. Takva naprezanja mogu razarati i najčvršće stijene. Procesom „smrzavanje-otapanje” osobito su podložne stijene visoke poroznosti (bilo primarne međučestične ili sekundarne npr. pukotinske).

Abrazivno djelovanje vode, vjetra i leda:

- npr. udaranjem visokih valova o stjenovitu obalu stijene se razaraju, ne samo zbog snage same vode, nego i zbog toga što se zrak koji voda sabije u šupljine stijene širi eksplozivnom brzinom i snagom i pri tom razara stijene u smjeru svog širenja
- premještanjem velike količine stijenskog materijala u nekom vodenom toku, zbog međusobnog sudaranja i sudaranja s podlogom, dolazi do njihovog usitnjavanja i zaobljavanja
- led pri svom kretanju izrazito abrazivno djeluje na podlogu po kojoj se kreće

Organska aktivnost: stijene mogu biti razarane i djelovanjem organizama npr. korijenje biljaka može u toku rasta prodirati u pukotine stijenske podloge i vrlo aktivno sudjelovati u njezinoj dezintegraciji, odnosno mehaničkom trošenju.

KEMIJSKO/BIOKEMIJSKO TROŠENJE – agensi iz atmosfere, hidrosfere i biosfere kemijski reagiraju sa stijenom i mijenjaju njezin mineraloški i kemijski sastav (glavni procesi: otapanje, hidroliza, oksidacija). Minerali se pritom postupno mijenjaju dok ne postignu ravnotežu s uvjetima koji vladaju u okolišima na površini Zemlje - stvaraju se nove, za površinske uvjete, stabilnije mineralne faze. Drugim riječima, minerali se prilagođavaju novonastalim uvjetima.

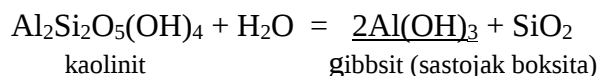
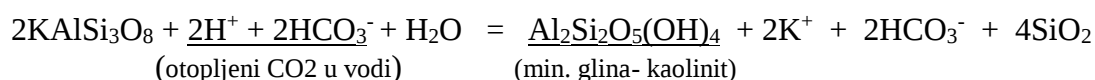
Otapanje i hidroliza -glavni činitelj (agens) kemijskog trošenja je voda. Njezina ”snaga” leži u činjenici da joj molekule imaju dipolni karakter, disocira se (u maloj mjeri, ali i to je dovoljno) na pozitivno nabijene H^+ i negativno nabijene OH^- ione i u njoj je, gotovo redovito, otopljeno

nešto CO₂ (nastaje slaba ugljična kiselina). Na površinama kristala ioni imaju nezasićene valencije i kada kristal dođe u kontakt s vodom dipolne molekule vode spajaju se s nabijenom površinom kristala. Privlačne sile dovode do polarizacije dipolne molekule vode, ona se disocira na H⁺ i OH⁻ ione. H⁺ se veže na negativne ione, a OH⁻ na katione. H⁺ može i zamijenjivati katione na njihovim pozicijama na površini kristala. Dolazi do rušenja strukture minerala i ioni iz kristaliziranog stanja prelaze u otopljeno stanje. Prisutnost otopljenog CO₂ u vodi, što rezultira stvaranjem slabe ugljične kiseline, samo povećava agresivnost vode i pospješuje otapanje minerala.

Budući da je prevladavajuća masa litosfere silikatna treba promatrati utjecaj vode u zoni trošenja na te minerale. Kemijsko trošenje silikata djelovanjem vode očituje se u slijedećem:

- rušenju strukture primarnih minerala i istovremenog oslobađanja kationa (uloga H⁺ iona)
- odstranjivanje određenih kationa u otopljenom stanju (kako će se pojedini kationi ponašati u vodenoj otopini ovisi o njihovom ionskom potencijalu)
- stvaranje sekundarnih minerala (gline, lateriti, boksiti)

Primjer kemijskog trošenja silikatnog minerala (K-feldspat):



Ako se usredotočimo na one elemente koji su najzastupljeniji u silikatima (Si, Al, K, Na, Ca, Mg, Fe, Ti) i na njihovo ponašanje u vodenim otopinama uvidjet ćemo slijedeće:

- K, Na, Ca, Mg, Fe²⁺ - spadaju u topljive katione. Oni lako odlaze u otopinu, stabilni su u vodenoj otopini i mogu se u otopljenom (ionskom) stanju prenositi na velike udaljenosti
- Si, Fe³⁺, Ti, Al - spadaju u hidrolizatne katione. Oni nisu stabilni u vodenoj otopini, vežu se s vodom i stvaraju teško topive hidrokside ili hidratizirane okside i kao takvi ostaju na mjestu trošenja (nisu mobilni), te su stoga rezidualni sedimenti obogaćeni na njima (lateriti, boksiti)

Oksidacija - oksidacija je vrlo važan činitelj kemijskog trošenja stijena. Kao što se željezni predmeti ostavljeni na zraku oksidiraju (kisik iz zraka u prisustvu vode), odnsono prelaze u hrđu, tako se i stijena koja sadrži minerale koji u svom sastavu imaju željezo oksidacijom mijenja,

odnosno troši. Oksidirani dio stijene mijenja boju (smečkasto-crvenkasto obojenje), postaje mekši i lako se mrvi.

Oksidacijskim procesima, dakle, mijenjaju se primarna boja, poroznost, volumen i mineralni sastav stijene. Kisikom, koji je uzročnik oksidacijskih procesa, obogaćene su samo oborinske vode koje u dubinu prodiru kroz pore stijena. U dubljim dijelovima vode postupno gube kisik, sve se više zasićuju otopljenim kationima i anionima i gube oksidacijsko djelovanje.

Učinak oksidacijskih procesa na promjenu boje stijena najljepše se može promatrati na svježe otvorenim izdancima tamnosivih sedimenata duž tektonskih pukotina i ili otvorenih slojnih ploha. Tu se duž pukotina po kojima je cirkulirala oborinska voda obogaćena kisikom vidi promjena boje stijene: tamnosiva boja prelazi u žućkasto-smeđu (sl.25).

Od mineralnih sastojaka najlakše se oksidiraju sulfidi, a od ostalih sastojaka stijena organska tvar.



Sl. 25 Na slici se jasno razlikuju rubni, oksidacijom izmijenjeni dio uzorka (žućkasto-smeđa boja) i svježi, neizmijenjeni tamno sivi, središnji dio uzorka.

Intenzitet kemijskog trošenja - najvažniji pojedinačni faktor koji određuje intenzitet kemijskog trošenja i nastajanje specifičnih sekundarnih produkata (minerala glina, böhmita, dijaspora, gibbsita, goethita...) je intenzitet izluživanja, odnosno odnošenja topivih konstituenata (ispiranjem kišom ili dizanjem i spuštanjem vode temeljnice). Stalno odnošenje, odstranjivanje topivih komponenata s mjesta gdje se dešava trošenje omogućava potpunije i intenzivnije trošenje. Ako bi se kojim slučajem to izluživanje zaustavilo, prekinulo bi se i trošenje. Glavni okolišni faktori koji imaju direktan utjecaj na jačinu izluživanja, a time i na intenzitet kemijskog trošenja su klima i reljef.

Klima i intenzitet kemijskog trošenja – količina padalina direktno kontrolira količinu vlage potrebne za kemijske reakcije, odgovorna je za odstranjivanje topivih komponenata, a temperatura znatno utječe na brzinu reakcija (za svakih 10°C povećanja temp, brzina kemijskih reakcija povećava se za faktor 2-3). Evo dva primjera koji to najbolje pokazuju:

- uvjeti, procesi i produkti trošenja u pustinjskim predjelima – suha klima, evaporacija prevladava nad precipitacijom (padalina), voda, za vrijeme kratkotrajnih kišnih razdoblja, prodire u podlogu i odnosi topive komponente, ali za vrijeme dugih sušnih perioda, usljed evaporacije, ona se diže prema površini kapilarnim crpljenjem, isparava se i iz nje se precipitiraju neki novi minerali (evaporiti) koji u sada u svoju strukturu ugrađuju prije izlužene ione. Topive komponente (ioni) na taj način ostaju, odnosno nisu odstranjene s mjesta trošenja i kemijsko trošenje se zaustavlja. Karakteristike takvih okoliša su: dosta neizmjenjenih primarnih stijena, prisutnost soli (npr. gips, karbonati...), alkalni pH (7,5-9,5), odsustvo vegetacije, odsustvo organske materije (oksidira se), oksidativni uvjeti (Fe u obliku Fe^{3+} - smeđe obojenje na površini stijena), karakteristični sekundarni produkti montmorilonit, ilit, kloriti.
- uvjeti, procesi i produkti u vlažnim, tropskim područjima – primarne stijene su jako izlužene kontinuiranim kretanjem (cirkuliranjem) vode (visoka temperatura, puno padalina), topive komponente odstranjivane su prema dolje do nivoa vode temeljnice i onda sistemom dreniranje dalje. Zbog velike količine padalina, nivo vode temeljnice je obično vrlo plitko, tako da je većina zone trošenja stalno natopljena, uronjena u vodu (reduktivni uvjeti). Izrazita vegetacija dovodi do akumulacije organske materije, pH je 3,5-5,5. Pod tim uvjetima kemijsko trošenje se ubrzano nastavlja, topive komponente, pa i one manje topive (Si npr.) se izlužuju, odlaze u otopinu, a rezidualni talog se obogaćuje na teško topivim kationima (Al, Fe^{3+}) i sastoji se od kaolinita, böhmmita, gibbsita, goethita (boksiti, lateriti)

Reljef i intenzitet kemijskog trošenja

- na vrlo strmim padinama površinski tok vode je izrazito jak, a prodiranje u pore stijene je smanjeno. Kemijsko trošenje je time prigušeno, dok je, zbog izrazitog jakog površinskog toka, mehanička dezintegracija stijena u podlozi naglašena

- u nizinskim, potpuno zaravnjenim predjelima infiltracija vode u pore je maksimalna. Međutim u takvim okolišima dreniranje, odnosno odstranjivanje topivih sastojaka je neznatno, što zaustavlja daljnje kemijsko trošenje

- idealni okoliši za intenzivno kemijsko trošenje su na blagim kosinama, gdje površinsko tečenje vode nije pretjeranog intenziteta, a dreniranje je konstantno omogućeno. U takvim okolišima, zone trošenja mogu dostići i do 100m debljine.

Osim okolišnih faktora, klime i reljefa, na intenzitet kemijskog trošenja veliki utjecaj imaju i karakteristike ishodišnog, primarnog materijala (stijene u podlozi). Tu se prvenstveno misli na strukturne karakteristike i sastav.

Strukturne karakteristike - mehaničko trošenje može povećati reaktivnu površinu stijene, a time i pospješiti njeno izluživanje, odnosno kemijsko trošenje. Usitnjena i mehaničkim trošenjem fragmentirana stijena jače će se kemijski trošiti od one monolitne.

Sastav ishodišne stijene – kisele magmatske stijene, sastavljene od stabilnijih minerala (kvarc, K-feldspati), će biti puno otpornije na kemijsko trošenje od npr. bazičnih i ultrabazičnih stijena (olivin, pirokseni), odnosno, u istim klimatskim i reljefnim uvjetima, bazalt će se jače trošiti i intenzivnije mijenjati od granita.

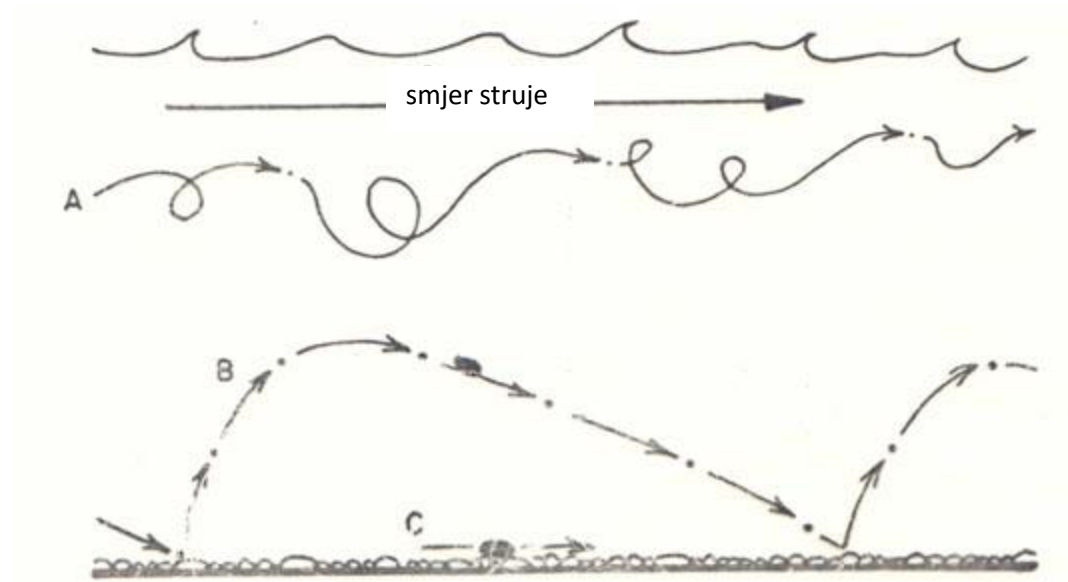
Karbonatni minerali su otporni prema kemijskom trošenju samo toliko dugo dok je voda u ravnoteži s atmosferskim CO₂. Međutim, čim voda primi više CO₂, stvara se slaba kiselina koja lako otapa karbonate.

2.3.3.2 Transport i taloženje

Produkti mehaničkog i kemijskog trošenja erozijom se odvoje od podloge (matične stijene) i prenose se do mjesta taloženja u krutom ili otopljenom stanju. Prijenos materijala vrši se vodom, vjetrom, ledom (gravitacija djeluje na fluid koji onda svojim kretanjem prenosi čestice) i sedimentno-gravitacijskim tokovima (gravitacija djeluje direktno na čestice, npr. na strmim liticama, padinama i t.sl.). Voda je najvažnije sredstvo prijenosa materijala i jedini medij koji može prenositi materijal i u krutom i u otopljenom stanju. U uvjetima u kojima se vrši transport vrši se taloženje, tako da ta dva procesa treba promatrati kao jednu cjelinu.

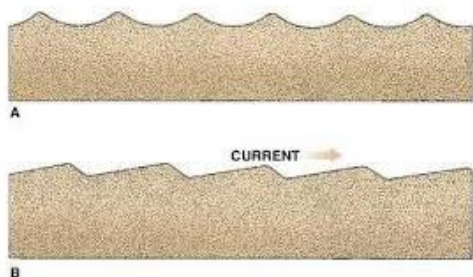
Transport u vodenom mediju - materijal (čestice, klasti) se u vodenom mediju može prenositi uz podlogu („bedload”) i to vučenjem, kotrljanjem i poskakivanjem i u suspenziji („suspended load”). O tome kako će se neka čestica kretati ovisi o njenoj veličini i o snazi

(brzini) toka. No, općenito gledano, sitnozrnati klastični materijal (npr. glinovito-siltozni) prenosit će se uglavnom u suspenziji („suspended load”), krupnozrnati (npr. šljunak) uglavnom uz podlogu („bedload”), dok će se srednjezrnati (npr. pijesak) prenositi i uz podlogu i u suspenziji, ovisno o brzini i snazi toka. Na slici 26 shematski su prikazani spomenuti načini kretanja čestica u vodenom mediju. Sastojci kemijskih i biokemijskih sedimenata transportirani su kao ioni u otopljenom stanju.



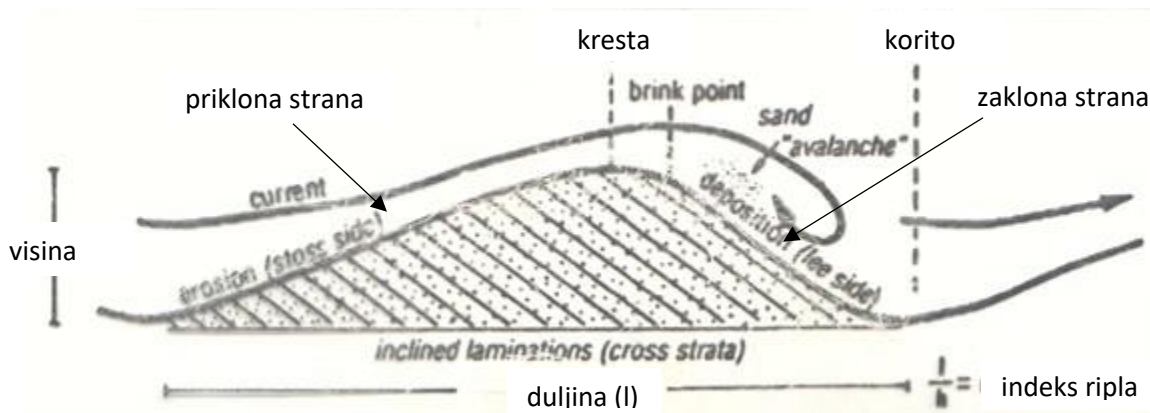
Sl. 26 Načini kretanja čestica u vodenom mediju: suspenzija (A); poskakivanje (B); kotrljanje i vučenje (C).

Određeni način kretanja i taloženja čestica utječe na samu površinu sedimenta na taj način da se počinju stvarati određene forme (riplevi, dine...). Te forme na površini sedimenta se mijenjaju ovisno o brzini toka, njegovoj dubini i veličini čestica. Riplovi i dine se razlikuju u dimenzijama. Dine su forme većih dimenzija. Riplovi mogu biti asimetrični (junosmjerni vodeni tokovi, npr. rijeka) ili simetrični (oscilatorno kretanje valova) (sl.27).



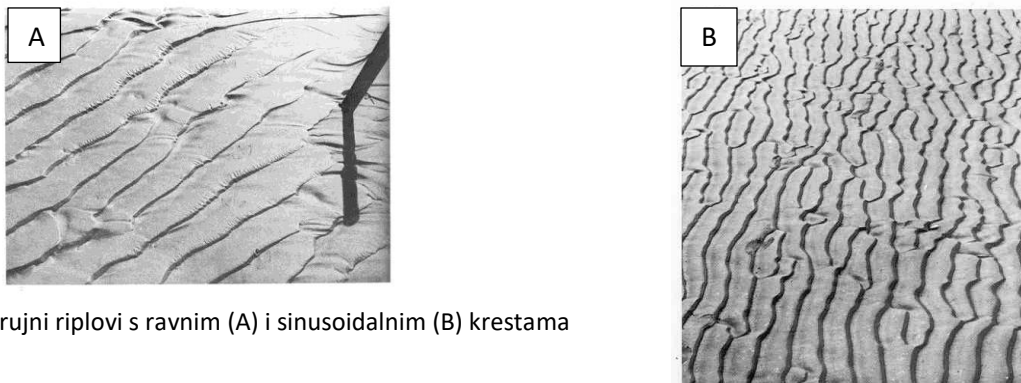
Sl. 27 Valni (simetrični) riplovi (A) i strujni (asimetrični) riplovi (B)

Asimetrični (strujni) riplovi imaju svoju duljinu i visinu. Mali riplovi npr. visine su do 5 cm, a forme visine veće od 5 cm zovemo megariplovima ili dinama. Rippl ima svoj krestu i korito. Zbog svoje asimetričnosti na njima možemo razlikovati priklonu (blaže nagnuta strana) i zaklonu stranu (strmija strana). Priklona strana nagnuta je uzvodno, zaklona nizvodno (sl. 28). To je vrlo važna karakteristika koja se koristi kod određivanja smjera paleotokova.

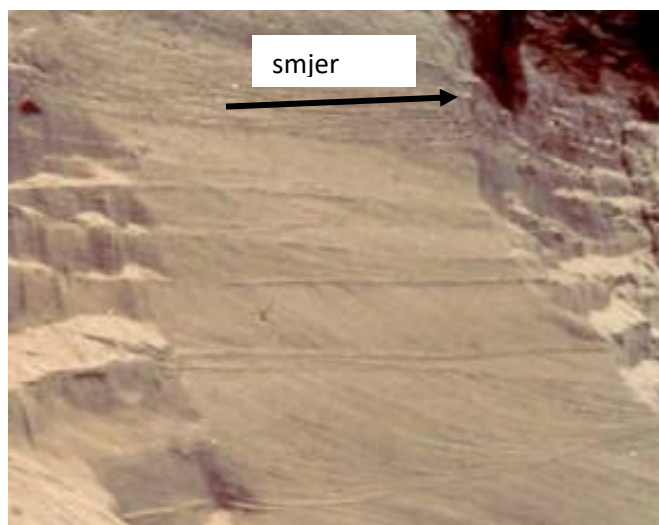


Sl. 28 Građa strujnog (asimetričnog) rippla

Kreste mogu biti ravne ili sinusoidalne (sl 29). Riplovi (megariplovi/dine) su migrabilne forme – one se kreću u prostoru. To se dešava na slijedeći način (pojednostavljeno): materijal se erodira na priklonoj strani, transportira se do kreste ripla i poput lavine se istaloži na strmijoj, zaklonoj strani (sl. 28). S obzirom da je priklona strana mjesto erozije, ona u pravilu nije sačuvana. Sačuva se zaklona strana. Rezultat migracije malih asimetričnih (strujnih) riplova je kosa laminacija, a migracije megariplova/dina kosa slojevitost (sl. 30). Riplovi su forme koje nastaju uglavnom transportom uz dno („bedload”) i vezane su većinom za pješčane (srednjezrnate sedimente). Sitnozrnati materijal transportira se u suspenziji („suspended load”), pa stoga u njemu ne nalazimo riplove, odnosno kosu laminaciju.

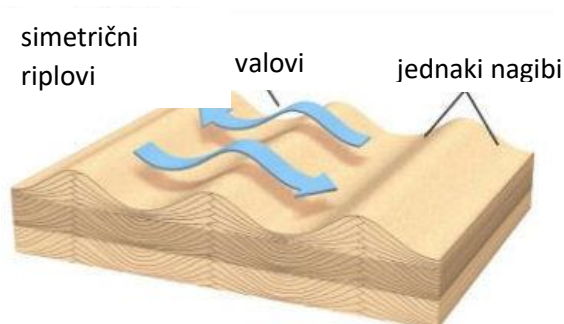


Sl. 29 Strujni riplovi s ravnim (A) i sinusoidalnim (B) krestama



Sl. 30 Koso slojeviti setovi različitih debljina.
Sačuvana je samo zaklona(strmija) strana.

Simetrični (valni) riplovi nemaju prilonu i zaklonu stranu već su im nagibi jednaki s obje strane (sl. 31).

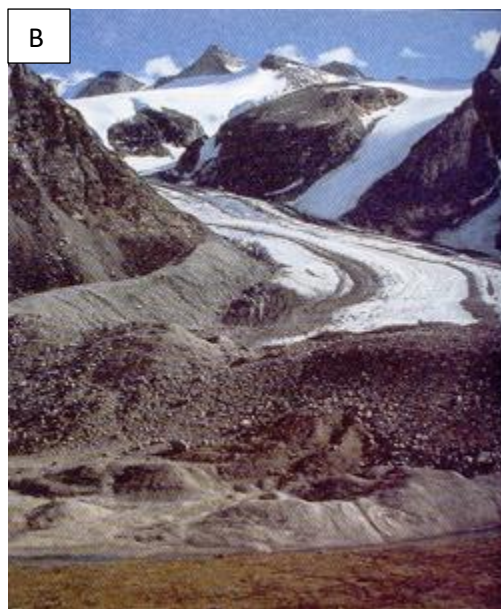


Sl. 31 Valni (simetrični) riplovi

Transport vjetrom -vjetar može prenositi goleme količine materijala sitnih dimenzija (uglavnom čestice dimenzije praha) na velike udaljenosti, osobito u uvjetima suhe, aridne klime (npr. pustinje). Pješčana zrna vjetar ne nosi daleko po zraku, jer samo najsnažniji vjetrovi mogu pokrenuti krupnija pješčana zrna. Vrlo se rijetko vjetrom zahvaćena pješčana zrna podižu više od 1m uvis. Premještanjem pijeska vjetrom nastaju pješčane dine. Principi postanka dina i njihove migracije u prostoru su donekle slični megariplovima u vodenim tokovima, ali su im dimenzije različite. Forme nastale transportom vjetrom su puno većih dimenzija. Najsitniju prašinu (čestice dimenzije praha) vjetar može pak podići tisuće metara visoko u zrak i nositi je stotine kilometara

daleko od mjesta gdje je bila podignuta. Kad se takva prašina istaloži nastaje eolski nanos poznat pod nazivom les ili prapor.

Transport ledenjacima - gomilanjem snijega iz godine u godinu, njegovi se stariji dijelovi zbijaju i zaleđuju u zrnatu masu zvanu „neve” (smrznuti snijeg), koja se poslije, istiskivanjem sveg zraka, pretvori u snježnik ili „firn”.. Zbog sile teže takva se masa pomiče niz padinu, postaje ledenjak koji erodira svoju podlogu i bokove i pri tome u sebe uklapa veliku količinu stijenskog kršja i sitnog detritusa koji na taj način prenosi u niže predjele. Ledenjaci mogu prenositi velike količine materijala, i to, za razliku od vjetra, vrlo različitih dimenzija, od najsitnijih čestica gline pa do blokova metarskih dimenzija. Materijal koji pritom nastaje je izrazito nesortiran, raznolikog sastava i uglatih fragmenata (til, tilit)(sl. 32A). Pojedini veći fragmenti pokazuju glacijalne strije. Najpoznatiji oblici glacijalnih sedimentnih tijela su morene (sl. 32B).



Sl. 32 Nesortirani glacijalni sediment (til) (A)
i najpoznatije glacijalno sedimentno tijelo-morena (B)

Gravitacijski tokovi - Najveće količine sedimenata u morskim (posebice u dubokomorskim okolišima, u blizini i na kontinentalnim padinama) i jezerskim taložnim prostorima prenošene su gravitacijskim kretanjima velikih masa sedimenata. Kod gravitacijskih tokova gravitacija djeluje direktno na sediment, odnosno pojedine čestice („sediment gravity flows”) i/ili na samu stijenu („rock gravity flows”). Razlikuju se slijedeći gravitacijski mehanizmi transporta i taloženja:

kretanje masa litificiranih, vezanih stijena; puzanja, klizanja i slampiranja mekih do poluočvrstih sedimenata; fluidizacijski, zrnsti, deblitni i turbiditni tokovi.

Puzanje sedimenta („creep of sediment”) – proces polaganog puzanja i spuštanja sedimenta niz padinu. Pri puzanju, u talogu koji puzi niz padinu, ne nastaju nikakve unutarnje deformacije.

Takvo puzanje može trajati od samo nekoliko sati pa do tisuću godina. Pri većim brzinama puzanje postupno prelazi u klizanje ili slampiranje.

Klizanje sedimenta („sliding”) – kretanje slabo očvrstelih ili poluvezanih, vodom natopljenih taloga po čvrstoj podlozi duž padine, pri čemu nastaju samo manje unutarnje deformacije.

Slampiranje – kretanje taloga niz padinu, po udubljenim (konkavnim) smičnim površinama pri kojem nastaju jake unutarnje deformacije.

Puzanjem, klizanjem i slampiranjem se, u usporedbi s drugim gravitacijskim tokovima, mase sedimenta prenose na razmjerno kratke udaljenosti i akumuliraju se na blagim padinama ili neposredno uz stopu padine.

Fluidizacijski tokovi uključuju urušavanje (kolaps) nestabilne strukture taloga zbog istiskivanja porne vode navise (npr. kod naglog taloženja). To su vrlo kratkotrajni tokovi i obično su udruženi s drugim gravitacijskim tokovima (npr. obično se zbivaju u završnoj fazi taloženja iz turbiditnih tokova).

Zrnsti tokovi se sastoje od čistog pijeska i pojavljuju se samo na površinama koje imaju nagib veći od 18° (npr. na strmim padinama pješčanih dina).

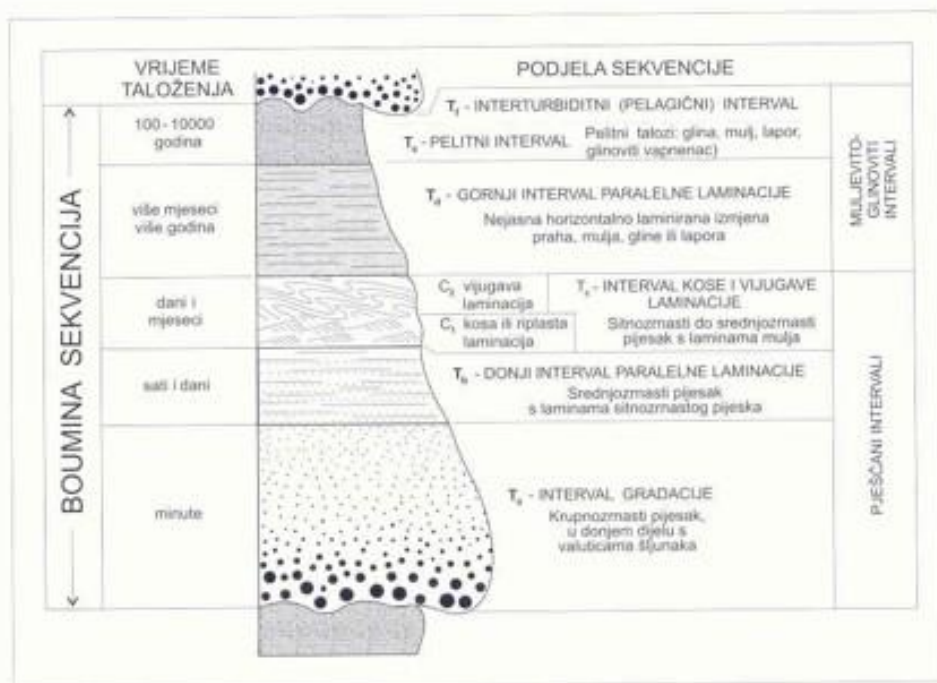
Deblitni tokovi obuhvaćaju brzo kretanje, guste mase loše sortiranog materijala (s vodom izmješanog stjenkog kršja, pijeska, mulja i gline). Veći klasti plivaju u glinovito-muljevitom matriksu i zbog toga imaju matriksnu potporu.

Turbiditni tokovi obuhvaćaju gravitacijske tokove u kojima su klasti podržavani u toku jakim turbulencijom fluida, pa se mogu prenositi na vrlo velike udaljenosti niz dugačke padine.

Turbiditni tokovi nastaju samo u dubljevodnim okolišima, ispod donje granice utjecaja valova (i onih olujnih), na donjim dijelovima podmorskih i jezerskih padina. Nagomilani detritus (npr. na rubu šelfa, gdje šelf prelazi u kontinentalnu padinu) u jednom trenutku klizne niz padinu (zbog prekoračenja kuta stabilnosti, potresa ili tsunamija). Pokrenuta masa materijala klizi niz padinu, postaje sve više turbulentna i suspendirana u vodi. Ako je nagib dovoljno dugačak i dovoljno strm dolazi do potpune suspenzije detritusa u vodi i njegovog granulometrijskog razvrstavanja. Kako se krupnija zrna kreću brže od sitnijih čestica, ona se sve više odvajaju i nakupljaju u

prednjem dijelu toka (čelo toka) i pri njegovom dnu, a sitnija sve više zaostaju i u suspenziji se dižu iznad dna (rep toka). Granulometrijsko razvrstavanje nastupilo je i po horizontali i po vertikali. Na kraju, kada se tok zaustavi slijedi dugotrajno taloženje najsitnijih zrnaca praha i gline iz repa turbiditnog toka. Cjelokupni prostor koji zauzima materijal istaložen iz turbiditne struje naziva se turbiditna lepeza, jer je oblik sedimentnog tijela sličan lepezi, a kompletna taložna jedinica nastala taloženjem iz jedne turbiditne struje *Boumina sekvencija*.

Boumina sekvencija odlikuje se jasno određenim slijedom unutar kojeg se razlikuje pet turbiditnih intervala (sl. 33) točno definiranog granulometrijskog sastava i teksturno-strukturnih značajki (graduiranje, horizontalna i kosa slojevitost, erozivne teksture na donjim slojnim plohama)



Sl. 33 Shematski prikaz kompletne Boumine sekvencije

2.3.3.3 Dijageneza

Dijageneza obuhvaća sve mehaničke i kemijske promjene koje se događaju u sedimentu od njegova taloženja pa do početka metamorfnih procesa. To su procesi koji od rahlih, nevezanih,

vodom natopljenih taloga stvaraju čvrste stijene (procesi litifikacije). U osnovi se razlikuju mehanička i kemijska dijageneza.

Mehanička dijageneza uključuje procese zbijanja (**kompakcije**) koji dovode do smanjenja poroznosti i volumena taloga, te istiskivanja porne vode zbog tlaka nadslojeva.

Kemijska dijageneza obuhvaća procese otapanja, cementacije, autigeneze, rekristalizacije, potiskivanja. **Otapanje** pojedinih mineralnih sastojaka zbiva se u sedimentu ili pod utjecajem povišenog tlaka na kontaktima zrna (tzv. tlačno otapanje) ili pod djelovanjem vode.

Cementacija je proces izlučivanja novih minerala u porama i pukotinama pri čemu se talog očvršćuje i smanjuje mu se poroznost. **Autigeneza** je proces tvorbe novih minerala.

Rekristalizacijom se mijenja samo veličina kristala, bez promjena mineralnog sastava.

Potiskivanje je proces istodobnog otapanja nekog minerala i na njegovom mjestu izlučivanja novog, u datim uvjetima stabilnijeg minerala (npr. potiskivanje kvarca kalcitom).

Svi dijagenetski procesi koji se zbivaju u još nevezanim, vodom natopljenim talozima nazivaju se **ranodijagenetski procesi**, a oni koji se zbivaju u već očvrstnutim stijenama

kasnodijagenetski procesi. Dijagenetski procesi mogu biti izokemijski ili alokemijski.

Izokemijski su oni kod kojih se ne mijenja kemijski sastav stijena (npr. rekristalizacija), a **alokemijski** su oni kod kojih je došlo do promjene kemizma stijene (npr. dolomitizacija, silicifikacija ...).

2.3.4 Siliciklastični (terigeni) sedimenti

2.3.4.1.Uvod

Siliciklastični sedimenti predstavljaju raznovrsnu grupu stijena, raspona od sitnozrnatih pelitnih sedimenata, preko pješčenjaka, sve do krupnozrnatih konglomerata i breča. Oni su većinom sastavljeni od čestica (klasta) koje potječu od magmatskih, metamorfnih i starijih sedimentnih stijena. Klastična zrna oslobađaju se mehaničkim i kemijskim procesima trošenja, a do mjesta taloženja transportiraju se raznim mehanizmima transporta. Konglomerati su sastavljeni uglavnom od valutica i velikih blokova građenih od raznih vrsta stijena. Pješčenjaci također sadrže fragmente stijena, ali većinu čestica čine pojedinačni kristali, uglavnom kvarca i feldspata. Sitnije čestice nastale trošenjem i dezintegracijom primarnih stijena, a sastavljene uglavnom od minerala glina, prevladavaju u pelitnim sedimentima i tvore matriks u nekim pješčenjacima i konglomeratima. Općenito gledano, sastav siliciklastičnih sedimenata odražava

processe trošenja i uvelike ovisi o klimi i geološkoj građi izvorišnog područja. Izvorišna područja su većinom brdovita, planinska područja koja se izdižu, ali detritus također može potjecati od erozije nizinskih i obalnih područja. Na sastav sedimenta još utječu duljina transporta sedimenta i dijagenetski procesi.

Dva važna obilježja siliciklastičnih sedimenata su njihove sedimentne teksture i strukture, od kojih mnoge nastale taložnim procesima, dok su ostale post-taložnog ili dijagenetskog postanka. Mnoge sedimentne teksture prisutne u pješčenjacima nalazimo također i u vapnencima, te u nekim drugim vrstama sedimentnih stijena.

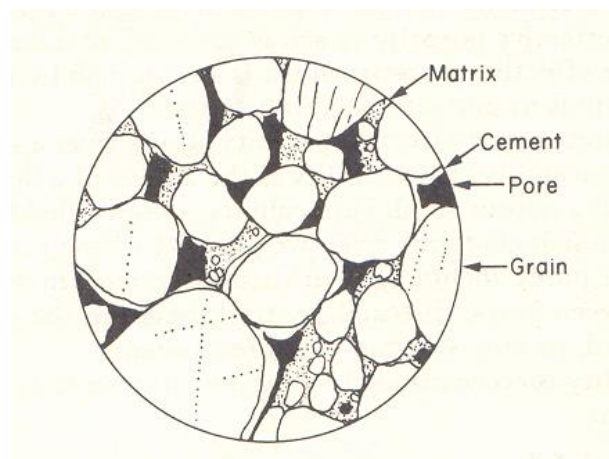
2.3.4.2. Građa siliciklastičnih sedimenata/stijena (sl. 34)

ZRNA – su detritični sastojci – klasti – koji su prošli sedimentni ciklus (trošenje, erozija, transport, taloženje). Zrna čine osnovni skelet, konstrukciju stijene. Ona mogu biti mineralna zrna, odlomci stijena, skeleti ili ljušture (cijeli ili fragmentirani).

MATRIKS – je sitni detritus koji je također prošao sedimentni ciklus, a nalazi se u međuprostorima zrna. Kod pješčenjaka matriks je obično glinovito-siltozni, kod konglomerata može biti i pješčani.

CEMENT – je mineralna tvar precipitirana (kristalizirana) u porama između zrna ili bilo kojim šupljinama u sedimentu nakon njihova taloženja. Cement nije detritus, on je precipitat nastao u dijagenezi.

PORE – su slobodni prostori među zrnima i/ili unutar zrna (npr. ljušturice puževa) koje nisu ispunjene matriksom niti je u njima iskristalizirao cement.



Sl. 34 Građa siliciklastičnih sedimenata/ stijena

Čestica (zrno) klastičnog sedimenta može biti gotovo svaki mineral koji se pojavljuje u prirodi, kao i fragment bilo koje stijene. Obilnost pojedinog minerala u sedimentnoj stijeni ovisi o njegovoj raspoloživosti, tj. o geologiji izvorišnog područja, ali i o njegovoj mehaničkoj i kemijskoj stabilnosti, odnosno o otpornosti na trošenje i izmjene. Glede kemijske stabilnosti, minerali se mogu poredati u niz od najstabilnijeg do najnestabilnijeg: **kvarc, cirkon, turmalin rožnjak, muskovit, mikroklin, ortoklas, plagioklas, hornblenda, biotit, piroksen, olivin**. Intenzitet kemijskog trošenja detaljnije je opisan u poglavlju 2.3.3.1. Mehanička stabilnost minerala ovisi o plohama kalavosti i tvrdoći minerala. Kvarc, koji je relativno tvrd i nema kalavost, mehanički je vrlo stabilan i može izdržati znatnu abraziju tijekom transporta. U transportu se daleko lakše usitnjavaju feldspati zbog svoje izražene kalavosti, kao i mnogi fragmenti stijena zbog svojih uglavnom slabih veza među kristalima ili zrnima; ove čestice nazivaju se nestabilne čestice.

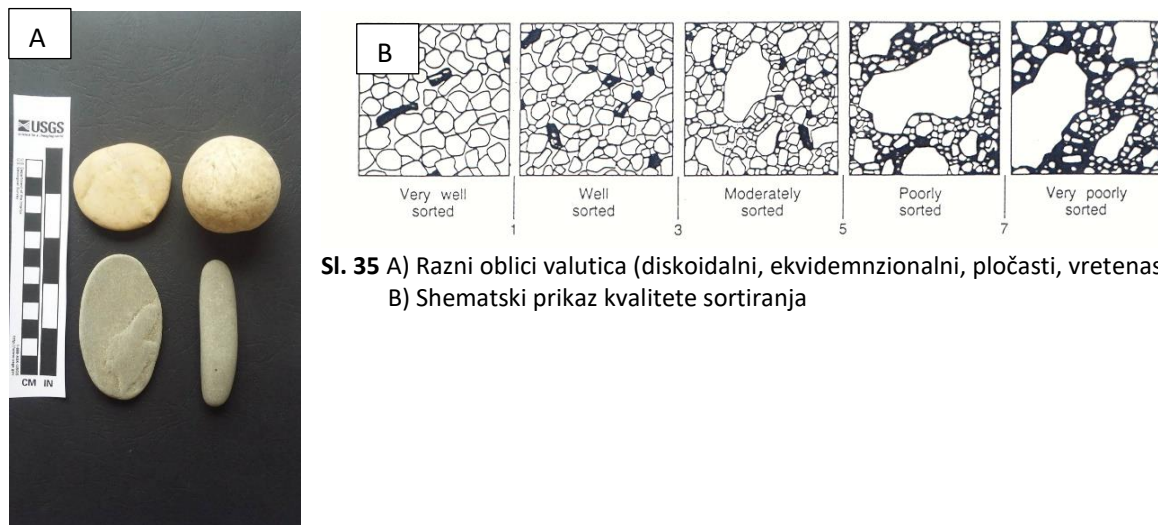
Detritične čestice u siliciklastičnim stijenama mogu se podijeliti u šest kategorija: (a) fragmenti stijena (litoklasti), (b) kvarc, (c) feldspati, (d) tinjci i gline, (e) teški minerali i (f) ostali sastojci.

2.3.4.3. Strukturne karakteristike

Struktura podrazumijeva veličinu čestica, oblik čestica, njihovu sferičnost i zaobljenost, te pakiranje. Iz analize veličine čestica može se odrediti i koeficijent sortiranja, također vrlo važan parametar koji pomaže pri interpretaciji postanka siliciklastičnih sedimenata.

Sortiranje – parametar koji proizlazi iz analize veličina čestica (sl. 35B). Loše sortirani materijal je onaj kod kojeg su prisutne čestice velikog raspona veličina (npr. od čestica dimenzije glina do ruditnih čestica (veće od 2mm). Takvi su obično naglo istaloženi sedimenti (npr. olujni sedimenti, sedimenti istaloženi iz debritnih, muljnih tokova) ili pak glacijalni talozi. Vrlo dobro sortirani sediment je pak onaj koji je prevladavajuće sastavljen od čestica jedne veličinske klase (npr, sedimenti transportirani vjetrom ili vodom).

Zrna po obliku mogu biti ekvidimenzionalna (kuglasta), pločasta, diskoidalna, vretenasta (sl. 35A).



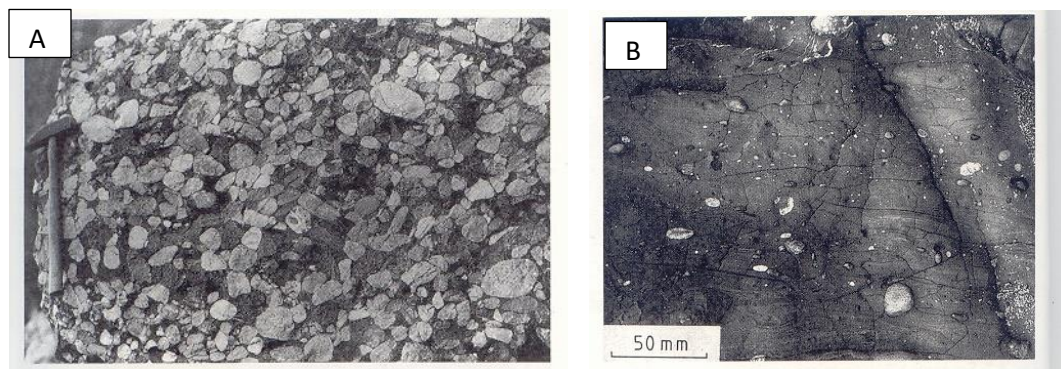
Sl. 35 A) Razni oblici valutica (diskoidalni, ekvidemnzionalni, pločasti, vretenasti)
B) Shematski prikaz kvalitete sortiranja

Zaobljenost zrna odraz je dužine transporta i mehaničke otpornosti zrna. Zrna iste mehaničke otpornosti (iste tvrdoće i kalavosti) će biti zaobljenija ako su pretrpjela duži transport.

Pakiranje podrazumijeva orijentaciju, raspored zrna i prirodu kontakata među njima. Pakiranje ima velik utjecaj na poroznost i propusnost sedimenta. Postoje dva osnovna tipa: pakiranje zrnate potpore i pakiranje matriksne potpore.

Zrnata potpora – klasti (zrna) imaju međusobnu potporu zrno-na-zrno, a između njih se nalazi matriks, cement i/ili prazan prostor (sl. 36A). Zrna su se transportirala individualno (npr. transport vjetrom, vodom).

Matriksna potpora – klasti (zrna) nemaju međusobnu potpru, tj. nemaju kontakte zrno-na-zrno, već „plivaju” u matriksu (sl.36B). Zrna se nisu transportirala individualno, već se kretala cijela masa sedimenta zajedno (neki maseni, gravitacijski tokovi, npr. debitni i/ili muljni tokovi).



Sl. 36 A) Konglomerat zrnate potpore; B) sediment (debit) matriksne potpore

2.3.4.4. Teksturne karakteristike

Sedimentne teksture odražavaju određene načine transporta i taloženja, erozijske procese, postsedimentacijske deformacije, diagenetske procese, djelovanje organizama, dakle odražavaju fizičke procese prije, tijekom i nakon sedimentacije ili su pak rezultat kemijskih procesa. To su obilježja većih dimenzija. Mnoge se teksture istražuju, bilježe i mjere neposredno na terenu, jer su im dimenzije od desetak centimetara do nekoliko desetaka metara, pa i više (npr. pješčane dine). Mogu se izdvojiti četiri glavne grupe tekstura: erozijske, taložne, post-taložne/djagenetske, biogene teksture. Sedimentne teksture, posebno one nastale tijekom sedimentacije, koriste se u razne svrhe npr.:

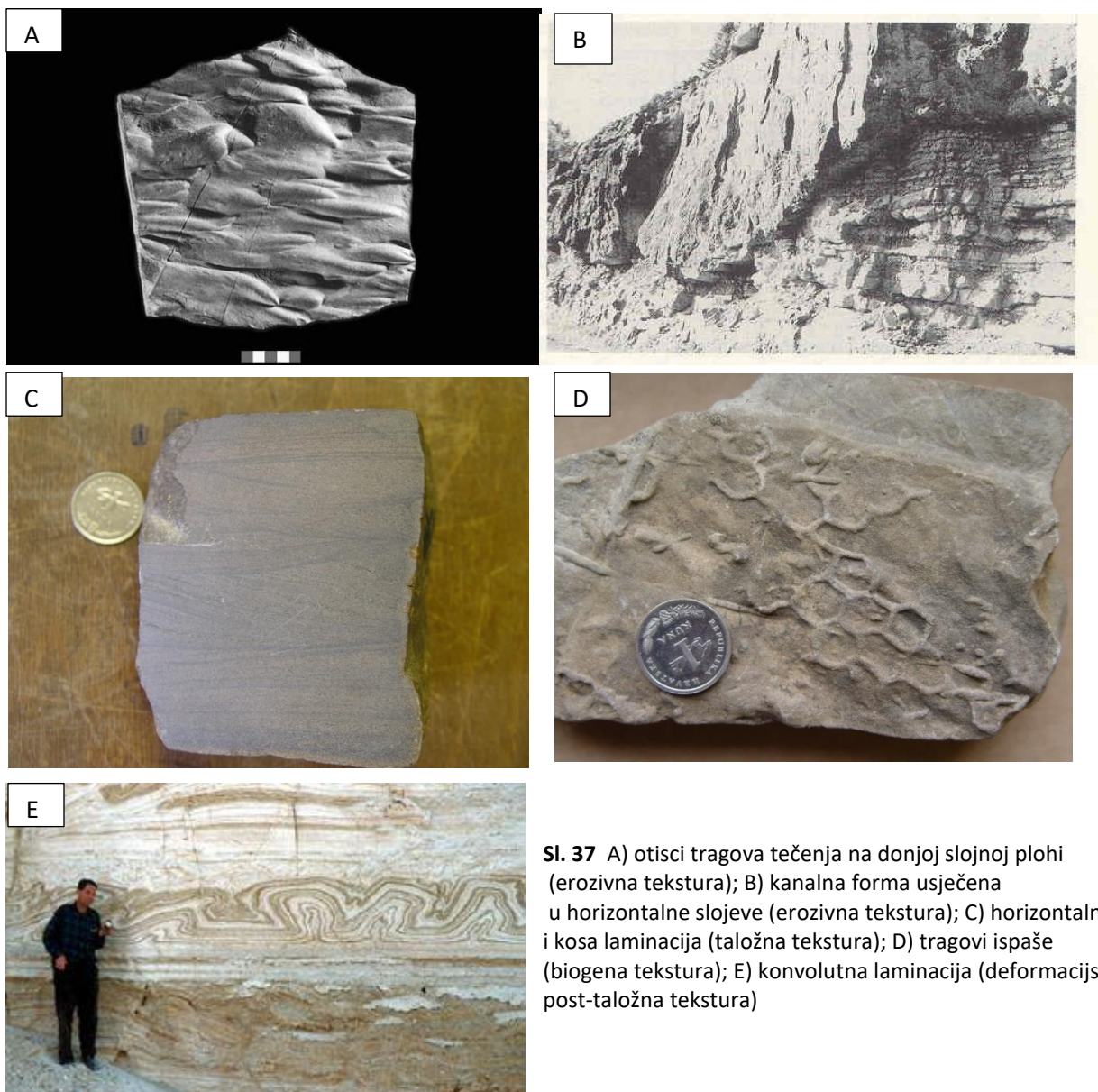
- za tumačenje taložnog okoliša u smislu procesa, dubine vode, jačine vjetrova, itd.
- za utvrđivanje taložne orijentacije (ispravnog, tj. primarnog položaja sloja npr. unutar slijeda naslaga koje su intenzivno borane)
- za donošenje zaključaka o paleotransportu i paleogeografiji

Erozijske teksture – većina ovih tekstura nastala je erozijom tokovima i erozijom čestica koje su tijekom transporta udarale o površinu sedimenta. Najpoznatije su one sačuvane na donjim slojnim plohama (tragovi tečenja, tragovi vučenja (sl. 37A), erozijski žljebovi, tragovi udaraca), te one većih dimenzija kao što su kanali/korita (sl. 37B) (npr. riječna korita).

Taložne teksture – rezultat su različitih procesa transporta, odnosno taloženja (slajdovi 24-42). Tu spadaju: slojevitost (sedimentna jedinica debljine veće od 1 cm) i laminacija (slojevitost milimetarskih dimenzija). Većina slojeva istaloži se unutar vremenskog raspona od nekoliko sati do nekoliko dana (turbiditi, olujni slojevi), a godinama, desecima godina ili čak i dulje talože se slojevi mnogih marinskih šelfnih pješčanjaka ili vapnenaca. Evo nekih primjera najčešćih taložnih tekstura: horizontalna laminacija/slojevitost (sl. 37C), kosa laminacija/slojevitost (sl. 37C), riplovi, dine (sl. 29), graduirana slojevitost, masivna slojevitost...

Post-taložne teksture – uglavnom su to razne deformacije primatnih tekstura, npr. Tragovi utiskivanja, savijena (konvolutna laminacija/slojevitost (sl. 37E), klizanje/slampiranje, pukotine isušivanja...

Biogene teksture – teksture nastale radom, djelovanjem organizama. To mogu biti pojedinačni tragovi u/n sedimentu, ali i u potpunosti izrovan (bioturbirani) sedimenti. Važni su jer pružaju informacije o taložnom okolišu, npr. vrsti podloge, dubini, brzini sedimentacije... Razlikuju se : tragovi odmaranja, puzanja, ispaše (sl. 37D), obitavanja, hranjenja, bježanja.



Sl. 37 A) otisci tragova tečenja na donjoj slojnoj plohi (erozivna tekstura); B) kanalna forma usječena u horizontalne slojeve (erozivna tekstura); C) horizontalna i kosa laminacija (taložna tekstura); D) tragovi ispaše (biogena tekstura); E) konvolutna laminacija (deformacijska, post-taložna tekstura)

2.3.4.5. Klasifikacija siliciklastičnih sedimenata/stijena

Osnovni kriterij podjele siliciklastita je veličina čestica. Na bazi veličine čestica siliciklastiti se dijele na:

- **Sitno-zrnate (lutiti ili peliti)** ($< 0,063 \text{ mm}$) - siliti (silt); glinjaci (glina); muljnjaci (mulj), šejlovi
- **Srednje-zrnate (areniti ili psamiti)** ($0,063 - 2 \text{ mm}$) - pješčenjaci (pijesci)
- **Krupno-zrnati (ruditi ili psefiti)** ($> 2 \text{ mm}$) - konglomerati (šljunak); breče (kršje)

Unutar svake skupine postoje daljnje podjele na bazi sastava, strukture i/ili teksture.

Npr. **klasifikacija pješčenjaka** temelji se na postotnom udjelu pojedinih tipova čestica. Na raspolaganju je nekoliko klasifikacijskih shema, a većina njih temelji se na trokomponentnim dijagramima čije krajnje članove čine kvarc, feldspat i fragmenti stijena (sl. 38). Trokut je podijeljen u razna polja, a stijenama se daju odgovarajući nazivi u skladu s rezultatima modalne analize. Prema toj klasifikaciji, pješčenjaci su na temelju teksture podijeljeni u dvije glavne grupe. Ukoliko su sastavljeni isključivo od čestica tada su to **areniti**, a ako sadrže više od 15% matriksa nazivamo ih **vake (grauvake)**.

U slučaju arenita, naziv kvarcni arenit koristi se za one s 95% ili više kvarcnih zrna. Arkozni arenit odnosi se na arenit s više od 25% feldspata koji nadmašuju sadržaj fragmenata stijena, a naziv litični arenit koristi se kada je sadržaj fragmenata stijena veći od 25% i nadmašuje feldspate. Arkozni areniti mogu se podijeliti u arkoze i litične arkoze. Dva tipa stijena koji su prijelazni prema kvarcnom arenitu su subarkoza i sublitoarenit. Posebni nazivi koji se primjenjuju za litoarenite su filoarenit ako fragmenti stijena potječu većinom od šejla ili slejta, i kalklitit čiji fragmenti stijena potječu od vapnenca.

Vake su prijelazna grupa između arenita i pelitnih sedimenata. Uobičajeni naziv je grauvaka, a razlikuju se dva tipa: feldspatske i litične grauvake. Naziv arkozne vake koristi se za arkoze sa znatnim udjelom matriksa. Rijetka vrsta stijena su kvarcne vake u čijem sastavu prevladava kvarc s nešto matriksa.

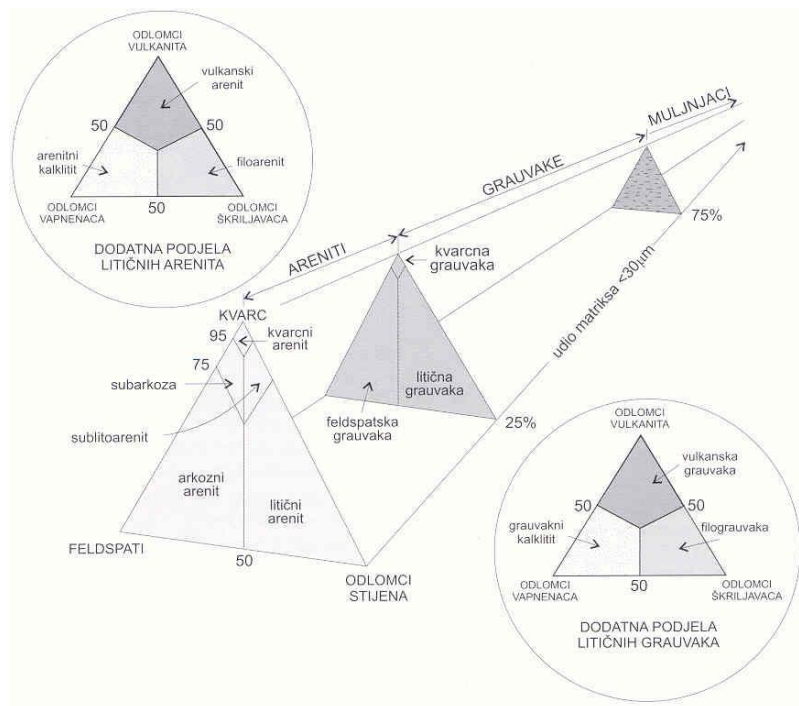
Krupno-zrnati siliciklastični sedimenti/stijene dijele se:

- prema stupnju zaobljenosti na: **šljunak - konglomerat** (zaobljeni klasti), **kršje - breče** (uglati klasti)
- prema pakiranju: **ortokonglomerati** (zrnata potpora, < 15% matriksa), **parakonglomerati** (matriksna potpora, >15% matriksa)
- prema sastavu klasta: **polimiktни** (klasti različitog sastava), **oligomiktни** (rezistentni klasti), **monomiktни** (jedna vrsta klasta)

Sitno-zrnati siliciklastični sedimenti/stijene:

- **glina**: nevezani, rastresiti sediment izgrađen od čestica manjih od 4 μ m. **Glinjak** je litificirani ekvivalent gline
- **silt (prah)**: nevezani sediment veličine čestica 4 μ m - 62 μ m. **Silit (prahovnjak)** je stijena izgrađena od čestica dimenzije silta (praha)

- **mulj**: mješavina čestica gline i silta (praha). Litificirani ekvivalent mulja naziva se **muljnjak** (masivne je građe i nije cjepliv u tanke pločice)
- **šejl**: muljnjak cjepliv u tanke pločice
- **lapor**: hibridna, mješana sitnozrnata stijena izgrađena od kalcita i gline



Sl. 38 Klasifikacija pješčenjaka na bazi sastava i udjela matriksa

2.3.5. Karbonatni sedimenti/stijene

2.3.5.1. Uvod

U karbonatne sedimentne stijene ubrajaju se **vapnenci, dolomitični vapnenci i dolomiti**. Postoje svi međusobni prijelazi od vapnenaca u dolomite. Mineraloški gledano, vapnenci se dominantno sastoje od kalcita, Mg-kalcita i/ili aragonita, dolomitični vapnenci od kalcita i dolomita, a dolomiti od dolomita. Uglavnom nastaju biološkim i biokemijskim procesima, a samo manjim dijelom i čisto kemijskim procesima, anorganskim izlučivanjem. Osim prevladavajućih karbonatnih minerala, karbonatni sedimenti mogu sadržavati i varijabilni udio siliciklastičnog

materijala dimenzija silta, pijeska i gline, te neke autigene minerale (kvarc, opal, kalcedon, anhidrit, gips,...)

2.3.5.2. Vapnenci

Vapnenaca ima posvuda u svijetu u svim geološkim razdobljima od kambrija naovamo. Vapnenci mogu nastajati gotovo svugdje, budući da organizmi karbonatnih skeleta žive posvuda u svjetskim morima i oceanima. Postoji nekoliko faktora koji reguliraju taloženje vapnenaca, a najvažniji su temperatura, salinitet, dubina vode i sedimentacija terigenih siliciklastita. Mnogi organizmi karbonatnog skeleta uspijevaju samo u toploj vodi (npr. grebenotvorni koralji, mnoge vapnenačke zelene alge...), pa stoga glavnina vapnenaca nastaje u tropsko-suptropskom pojasu, približno 30° sjeverno i južno od ekvatora. Nadalje, biološka proizvodnja karbonata najveća je u morskoj vodi normalnog saliniteta, u plitkom (dubine manje od 10 m), uzburkanom dijelu fotičke zone (dubina do koje dopire svjetlost, cca 100-200 m), te u okolišu koji nije „onečišćen” donosom siliciklastičnog materijala. Vapnenci mogu nastajati i u slatkoj vodi (slatkovodni, kontinentalni vapnenci), u područjima viših geografskih širina, te u dubljevodnim okolišima, ali je njihova produkcija u tim okolišima znatno slabija.

Općenito gledano, prostrano (ekstenzivno) taloženje karbonata u korelaciji je sa stadijima visoke globalne morske razine. Zahvaljujući novijim geološkim događajima, prvenstveno pleistocenskoj oledbi i globalno niskoj morskoj razini, danas plitkovodni marinski karbonati ne zauzimaju velika područja. U prošlosti su plitka, epikontinentalna mora povremeno prekrivala ogromna kopnena prostranstva, omogućujući taloženje vapnenaca na prostorima od nekoliko tisuća kvadratnih kilometara.

Ekonomski značaj vapnenaca danas se ponajviše odnosi na njihov rezervoarski kapacitet (sadrže približno polovicu svjetskih rezervi nafte), u njima su smještena neka sulfidna ležišta olova i cinka, koriste se u razne kemijske i industrijske svrhe (npr. proizvodnja cementa).

Mineralni sastav vapnenaca. U recentnim vapnenačkim talozima, kao glavni mineralni sastojci, pojavljuju se **kalcit i aragonit**. To su polimorfne modifikacije kalcijevog karbonata. Ovisno o sadržaju magnezija postoje dvije vrsta kalcita: niskomagnezijski kalcit s manje od 4 mol% $MgCO_3$ i visikomagnezijski kalcit s više od 4 mol% $MgCO_3$, najčešće raspona 11-19 mol.% $MgCO_3$. Za usporedbu, aragonit ima vrlo nizak sadržaj Mg (manje od 5000 ppm), ali zato

može sadržavati i do 10000 ppm (1%) stroncija (Sr) koji zamjenjuje kalcij. Mineralni sastav recentnih vapnenačkih taloga ovisi većinom o prisutnim skeletnim i neskeletnim česticama. Karbonatni skeleti organizama imaju specifičan mineralni sastav ili smjesu minerala. Aragonit je nestabilnija modifikacija kalcijevog karbonata, a visokomagnezijski kalцит s vremenom gubi svoj Mg. Zbog toga tijekom dijagenese svi karbonatni sedimenti primarno miješanog mineralnog sastava prelaze u niskomagnezijski kalцит. Vapnenac može biti i dolomitiziran, pri čemu dolomit, $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ zamjenjuje CaCO_3 minerale. U nekarbonatne minerale u vapnencima ubrajaju se terigeni kvarc i glina, te pirit, hematit. Evaporitni minerali, osobito gips i anhidrit, čestu su tijesno povezani s vapnencima.

Fizikalni, kemijski i biološki uvjeti postanka vapnenaca. Kao što je već spomenuto u uvodu, optimalni uvjeti, odnosno okoliši, za postanak vapnenaca jesu plitka mora s visokom temperaturom vode, malim donosom terigenog materijala i povoljnim ekološkim uvjetima za život organizama koji svoje skelete i ljuštore izgrađuju od karbonatnih minerala. U dubljem moru je produkcija karbonata mnogo slabija jer izravno ovisi o stupnju zasićenosti vode Ca-hidrogenkarbonatom, koja se porastom dubine smanjuje. Dubina vode na kojoj je topljivost kalcita jednaka njihovoj izlučivanju naziva se kalcitna kompenzacijska dubina – CCD (*Calcite Compensation Depth*). Ispod te dubine kalciti su nestabilni, otapaju se, te se ne mogu izlučivati. U današnjim svjetskim morima CCD granica varira u ovisnosti o geografskoj širini, temperaturi i salinitetu. Između 40° sjeverne i 40° južne zemljopisne širine ona se u Atlantskom oceanu nalazi između 4400 i 4900 m, dok je primjerice u područjima između 40° i 50° ona puno plića, na dubini od 1000 do 2000 m. Kompenzacijska dubina aragonita (ACD) bitno je plića od CCD-granice - između 40° sjeverne i 40° južne zemljopisne širine ona se u Atlantskom oceanu nalazi između 1700 i 1800 m.

Izlučivanje Ca-karbonata iz otopine prezasićene s Ca-hidrogenkarbonatom zbiva se prema slijedećoj reakciji: $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 = \text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$

Izlučivanje aragonita pospješeno je:

- visokim molarnim odnosom Mg/Ca
- višom temperaturom vode (20 do 30° C)
- povećanom pH vrijednosti
- prisutnošću iona Sr, Mg, Ba, Pb

- prisutnošću nekih organskih komponenata u vodi

Izlučivanje kalcita pospješeno je:

- niskim molarnim odnosom Mg/Ca
- niskom temperaturom vode (oko 10° C)
- nižom pH vrijednosti (ali ne manje od 7,8)
- prisutnošću SO₄ aniona, NaCO₃ i (NH₄)₂CO₃
- prisutnošću organskih spojeva u vodi kao što su Na-citrati i Na-malonati

Sastojci vapnenaca. Sastojci vapnenaca mogu se podijeliti u četiri grupe: **skeletne, neskeletne, mikrit i cement (sparit).**

Neskeletne čestice su one komponente vapnenaca koje ne sadrže skelete ili kršje skeleta ili ljuštura. U njih spadaju oidi, onkoidi, pizoidi, peloidi i peleti, intraklasti.

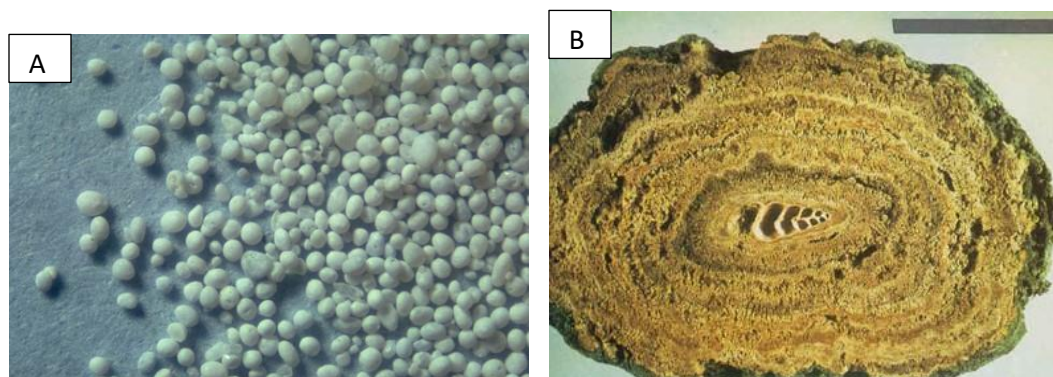
Ooidi – su kuglasto do jajolika zrna sastavljena od jezgre i oko nje koncentrično raspoređenih ovojnica. Promjera su do 2 mm (sl. 39A, 40).

Pizoidi – po građi slična zrna ooidima, samo su većih dimenzija.

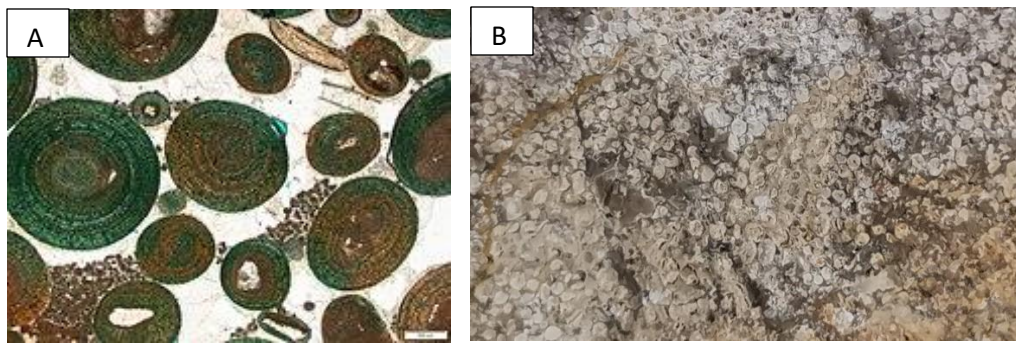
Onkoidi – zrna obavijena mikrobnim ovojnicama, nastala biogenim oblaganjem, djelatnošću cijanobakterija (sl. 39B).

Peleti i peloidi – kuglasta, elipsoidalna do vretenasta zrna, pretežno promjera 0,5 mm, mikritne građe (sl. 40A)

Intraklasti – karbonatna zrna nastala unutar sedimentacijskog prostora erozijom karbonatnih taloga neposredno nakon njihova taloženja



Sl. 39 A) Ooidni pijesak sa zrcima ooida prosječne veličine 1,5mm; B) onkoidna čestica (skala 2cm)



Sl. 40 A) Unutrašnja građa ooida. Između ooida se nalazi sparitni cement i mjestimično sitna peletna zrna (mikroskopski preparat) (skala 0,5mm); B) oosparitni vapnenac tipa grejnston

Skeletne čestice – to su u cijelosti sačuvani ili fragmentirani skeleti ili ljuštore vapnenačkih organizama. Glavni organizmi čiji skeleti doprinose stvaranju vapnenaca su slijedeći: *školjkaši, puževi, glavonošci, ramenonošci, koralji, bodljikaši, mahovnjaci, foraminifere, spužve, alge*.

Mikrit – mikrokristalinični kalcit, čija su zrna manja od $4\mu\text{m}$ - litificirani karbonatni mulj - uglavnom predstavlja matriks u mnogim zrnatim vapnencima, a može biti i glavni i jedini sastojak u sitnozrnatim vapnencima. Glavni proces postanka mikrita je **raspadanje vapnenačkih zelenih algi**. Na taj način nastaju ogromne količine sitnih, primarno aragonitnih čestica, koje kasnije u djagenezi prelaze u mikrokristalinični kalcit (mikrit). Osim dezintegracijom vapnenačkih algi, mikrit može nastati i **bioerozijom**, kojom organizmi, kao što su spužve bušaći, mikrobi, napadaju karbonatna zrna i podlogu; **mehaničkim raspadanjem skeletnih čestica** radom valova i struja; **biokemijskim izlučivanjem** direktno iz otopine.

Sparit – obuhvaća bistre, prozirne kristaliće kalcita promjera većeg od $10\mu\text{m}$ koji su se izlučili kao cement u porama vapnenačkog taloga. Osim precipitacijom, sparit može nastati i rekristalizacijom.

Klasifikacije vapnenaca. U širokoj su uporabi tri klasifikacijska pristupa, svaki s drugačijim naglaskom:

- Prema vrlo jednostavnoj, ali praktičnoj shemi, vapnenci se dijele na temelju veličine čestica na kalcirudite (veličina zrna $> 2\text{ mm}$), kalkarenite (veličina zrna između 2 mm i $62\mu\text{m}$) i kalcilutite (veličina zrna $< 62\mu\text{m}$).
- Klasifikacijska shema R. L. Folka, temeljena uglavnom na sastavu, razlikuje tri vrste sastojaka: (a) zrna (alokemi), (b) matriks, većinom mikrit i (c) cement, uglavnom družni sparit.

Skraćenice koje se odnose na čestice (bio — skeletna zrna, oo — ooidi, pel — peloidi, intra — intraklasti) koriste se kao prefiks pojmovima mikrit ili sparit, ovisno o tome koje od njih prevladavaju. Ukoliko prevladavaju dvije vrste čestica, nazivi mogu biti kombinirani, kao što su npr. biopelsparit ili bio-oosparit. Nazivi se mogu prilagoditi stavljanjem naglaska na krupnija zrna, kao npr. biosparrudit ili intramikrudit. Od ostalih naziva koje koristi Folk su biolitit za vapnenac nastao *in situ*, kao što su stromatolit ili grebenska stijena, te dismikrit za mikrit sa šupljinama (uglavnom ispunjene sparitom).

- Klasifikacija po Dunhamu razlikuje vapnence na temelju strukture: *grainstone*, zrna su u kontaktu, bez matriksa (kao što su bio- ili oosparit) (sl. 40B); *packstone*, zrna su u kontaktu, s matriksom (to može biti biomikrit); *wackestone*, krupnija zrna plivaju u matriksu (to također može biti biomikrit); i *mudstone*, mikrit u kojem je vrlo malo zrna. Dodatni nazivi od A. F. Embrya i J. E. Klovana definiraju tipove vapnenaca krupnijih veličina zrna (*floatstone* i *rudstone*), a kod vapnenaca tipa *boundstone*, istaloženih procesima organskog vezivanja, razlikuju se *bafflestone*, *bindstone* i *framestone*. Nazivi se mogu poboljšati tako da se kombiniraju Folkova i Dunhamova klasifikacija, npr. oolitični *grainstone*, peloidni *mudstone* ili krinoidni *rudstone*.

Glavna zrna u vapnencu	Tipovi vapnenaca			
	Cementacija sparitom		S mikritnim matriksom	
Skeletna zrna (bioklasti)	Biosparit (<i>Biosparite</i>)		Biomikrit (<i>Biomicrite</i>)	
Ooidi	Oosparit (<i>Oosparite</i>)		Oomikrit (<i>Oomicrite</i>)	
Peloidi	Pelsparit (<i>Pelsparite</i>)		Pelmikrit (<i>Pelmicrite</i>)	
Intraklasti	Intrasparit (<i>Intrasparite</i>)		Intramikrit (<i>Intramicroite</i>)	
Vapnenac nastao <i>in situ</i>	Biolitit (<i>Biolithite</i>)		Fenestralni vapnenac-dismikrit	

Sl. 41 Klasifikacija vapnenaca bazirana na sastavu (po Folku)

Prvotni sastojci nisu povezani tijekom taloženja				Prvotni sastojci povezani zajedno	Taložna struktura neprepoznatljiva	Prvotni sastojci nisu povezani posredovanjem organizama tijekom taloženja		Prvotni sastojci povezani su posredovanjem organizama tijekom taloženja		
Sadrži vapnenački mulj			Nema mulja i ima zrnску potporu			>10% zrna >2mm		Organizmi hvataju (baffle) sediment	Organizmi inkrustiraju i vežu (bind)	Organizmi grade čvrsti skelet
Potpora mulja		Zrnska potpora				Potpora matikska	Potpora sastojaka > 2mm			
Manje od 10% zrna	Više od 10% zrna									
Mudstone	Wackestone	Packstone	Grainstone	Boundstone	Kristaliz.	Floatstone	Rudstone	Bafflestone	Bindstone	Framestone

Sl. 42 Klasifikacija vapnenaca bazirana na strukturi (po Dunhamu, nadopunjena s nazivima po Embryu i Klovanu)

Dijageneza vapnenaca. Dijageneza vapnenaca obuhvaća mnoštvo različitih procesa, a odvija se u pripovršinskim marinskim i meteorskim okolišima, sve do velikih dubina. Dijageneza obuhvaća šest glavnih procesa: cementacija, mikroba mikritizacija, neomorfizam, otapanje, kompakcija i dolomitizacija. Karbonatna dijageneza zahvaća uglavnom karbonatne minerale, aragonit, kalcit i dolomit, ali isto tako i druge minerale, kao što su kvarc, feldspati, gline, fosfati, željezni oksidi, sulfidi i evaporiti. Dijageneza karbonatnih sedimenata započinje već na morskom dnu, što znači da taložni i dijagenetski procesi mogu biti istovremeni. Tijekom rasta grebena i pomicanja karbonatnog pijeska valovima, cement se može izlučiti u intraskeletnim šupljinama, a zrna mogu biti izmijenjena mikritizacijom, što rezultira stvaranjem mikritne ovojnice oko bioklasta i potpuno mikritiziranim zrnima. Mikritne ovojnice imaju važnu ulogu u dijagenezi budući da zadržavaju oblik aragonitnih bioklastičnih zrna nakon njihova otapanja.

Cementacija je glavni dijagenetski proces kojim od nevezanog sedimenta nastaje čvrsti vapnenac, a odvija se prvenstveno na mjestima velikog protoka pornih fluida zasićenih cementnom fazom. **Neomorfizam** obuhvaća procese zamjene i **rekristalizacije** kojima može doći do promjene mineralnog sastava. Primjeri su porast veličine kristala vapnenačkog mulja/mikrita (agradacijski neomorfizam) i zamjena aragonitnih ljuštura i cementa kalcitom (**kalcitizacija**). Mnoge vapnenice **otapaju** porni fluidi nezasićeni prisutnom karbonatnom fazom. To je glavni proces u pripovršinskom, meteorskom dijagenetskom okolišu koji može dovesti do okršavanja, ali moguć je isto tako i na morskom dnu i tijekom zatrpavanja na velike dubine. Sekundarna poroznost nastala otapanjem karbonata važna je za neke rezervoare ugljikovodika. Do **kompakcije** dolazi zatrpavanjem sedimenta, čime dolazi do tješnjeg pakiranja zrna,

lomljenja i naposljetku otapanja na njihovim kontaktima. **Kemijskom kompakcijom** nastaju stiloliti i šavovi otapanja, kada debljina pokrovnih stijena premaši više stotina metara.

Dolomitizacija je glavni proces izmjene mnogih vapnenaca, pri čemu se dolomit, $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, može izlučiti u pripovršinskom okolišu i na velikim dubinama zatrpavanja.

Razlikuju se tri glavna dijagenetska okoliša: marinski, pripovršinski meteorski i onaj na velikim dubinama zatrpavanja (sl. 43). U marinskom okolišu do dijageneze dolazi na samom morskome dnu ili neposredno ispod njega, kako u plitkovodnom tako i u dubokovodnom okolišu, te u plimno-natplimnoj zoni. Meteorska dijageneza može započeti u sedimentu ubrzo nakon njegova taloženja ako obala progradira ili ako dođe do manjeg pada morske razine, ili pak mnogo kasnije kada se vapnenci s velikih dubina izdignu na površinu. Freatički okoliši nalaze se ispod nivoa vode temeljnice i pore sedimenta su u potpunosti ispunjene pornim fluidom (vodom), a vadozni dijagenetski okoliš smješten je iznad nivoa vode temeljnice do same površine i pore mogu biti djelomično ispunjene pornim fluidom, a djelomično zrakom. Okoliš na velikim dubinama zatrpavanja najmanje je poznat, a započinje na dubinama od nekoliko desetaka do stotina metara ispod površine sedimenta, tj. ispod zone pod utjecajem površinskih procesa; dalje se proteže sve do dubina od nekoliko kilometara gdje prevladavaju metamorfne dehidratacijske reakcije i posvemašnja rekristalizacija.



Sl. 43 Dijagenetski okoliši vapnenaca

2.3.5.3. Dolomiti

Dolomiti su karbonatne stijene pretežito sastavljene od minerala dolomita, $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$. Mineral dolomit vrlo se teško izlučuje izravno iz morske vode kao primarni mineral, već uglavnom nastaje potiskivanjem aragonita, Mg-kalcita i kalcita, odnosno vapnenačkih taloga i stijena. Do takva potiskivanja može doći neposredno nakon taloženja, u mekanom, nevezanom vapnenačkom materijalu, pa nastaju **ranodijagenetski dolomiti** ili u već očvrstnutim vapnenačkim stijenama –vapnencima, pa tada nastaju **kasnodijagenetski dolomiti**.

Ranodijagenetski procesi dolomitizacije zbivaju se u površinskim ili neposredno potpovršinskim uvjetima u izoliranim lagunama, zaljevima, slanim jezerima, gdje se zbog jakog isparavanja doseže potrebna koncentracija Mg-iona. Kasnodijagenetska dolomitizacija zbiva se na većoj dubini prekrivanja, te u podzemnoj zoni miješanja slatke i morske vode i geološki gledano vrlo je spor proces.

Ranodijagenetske dolomite karakterizira očuvanost primarnih teksturno-strukturnih značajki vapnenačkog taloga. Dakle, nakon potpune ranodijagenetske dolomitizacije, osim mineralogije, sve primarne strukture, pa i one najfinije, ostaju neizmjenjene. Kasnodijagenetske dolomite pak karakterizira krupnokristalinična „šećerasta“ struktura i neočuvanost primarnih teksturno-strukturnih značajki vapnenaca. Proces kasnodijagenetske dolomitizacije može biti samo djelomičan, te u kasnodijagenetskim dolomitima mogu ostati nedolomitizirani vapnenački dijelovi (sl. 44).



Sl. 44 Djelomično dolomitizirani vapnenac. Primjer kasnodijagenetske dolomitizacije s euhedralnim (idiomorfnim) kristalićima dolomita. (duljina slike 7mm)

2.3.6. Silicijski sedimenti

U silicijske sedimente ubrajamo stijene pretežno sastavljene od krypto- do mikrokristalastog kvarca, kalcedona i/ili opala. Silicijski sedimenti mogu nastati kao primarne stijene (uglavnom su tada slojeviti), akumulacijom biogeno ili anorganski izlučenih spomenutih silicijskih minerala ili silicifikacijskim procesima iz već postojećih taloga ili sedimentnih stijena (vapnenaca, dolomita, lapora, tufova) (tada su uglavnom nodularni). Najvažniji organizmi koji svojim opalnim skeletima sudjeluju u stvaranju silicijskih sedimenata jesu dijatomeje, radiolarije, spikule spužvi kremenjašica (silicispongija) i silikoflagelati.

U ovisnosti o stupnju litifikacije i poroznosti razlikuju se tri osnovna tipa: muljevi; porozne, poluočvrnute zemlje; čvrsto litificirane stijene (Tablica 4).

prevladavajući Si-sastojak	nevezani talog taložen na dnu sedimentacijskog bazena	slabo do umjereno litificirani sedimenti s visokom poroznošću	izrazito čvrsta gusta stijena bez poroznosti
dijatomeje	DIJATOMEJSKI MULJ	DIJATOMEJSKA ZEMLJA (Kieselgur)	DIJATOMIT
radiolarije	RADIOLARIJSKI MULJ	RADIOLARIJSKA ZEMLJA	RADIOLARIT (LIDIT)
spikule spužvi	SPIKULNI MULJ	POROZNI SPIKULIT	SPIKULIT
autigeni krip- tokristalasti do mikrokris- talasti kvarc, kalcedon ili opal	–	TRIPOLI, PORCULANIT, GEJZIRIT	SLOJEVITI ROŽNJAK, NODULARNI ROŽNJAK, FLINT

Tablica 4 Podjela silicijskih sedimenata

Uslojeni silicijski muljevi prvenstveno se talože u abisalnim područjima, gdje dubine premašuju kalcitnu kompenzacijsku dubinu (CCD) (4500m). Ima ih osobito tamo gdje je velika proizvodnja organske tvari u pripovršinskim vodama. Dijatomeje prevladavaju u silicijskim muljevima u Južnom oceanu oko Antarktike i u sjevernom dijelu Tihog oceana. Muljeva bogatih radiolarijama ima u ekvatorskim područjima Tihog i Indijskog oceana. Kompenzacijska dubina opala (OCD) je približno 6000m. Neki slojeviti rožnjaci pojavljuju se zajedno s vulkanskim stijenama. Oni su uglavnom istaloženi unutar ili iznad jastučastih lava. Slojeviti rožnjaci s kojima nema vulkanita, obično su u zajednici s pelagičkim vapnencima, te siliciklastičnim i karbonatnim turbiditima

Nodularnih rožnjaka ima najviše u karbonatnim stijenama „domaćinima”. To su manje do veće, približno kuglaste do nepravilne nodule, obično koncentrirane duž određenih slojnih ploha. Česti

su u šelfnim vapnenacima. Nodularni rožnjaci posjeduju dosta dokaza o dijagenetskom porijeklu (npr. sačuvana, silicificirana vapnenačka zrna). Raspršena biogena silika otapa se i ponovno izlučuje kao opalna supstancija u ishodištima nodula. Opal prvo ispunjava porni prostor, a zatim zamjenjuje karbonatne čestice i matriks. Njegovo dozrijevanje u mikrokvarc ili kalcedon širi se iz središta nodula prema van.

Postanak rožnjaka – dva su opća gledišta o postanku rožnjaka:

- prema jednom, rožnjaci su u cijelosti biogenog postanka, bez ikakve veze s magmatskom aktivnošću.
- prema drugom, rožnjaci su produkt podmorskog vulkanizma, bilo da se radi o izravnim procesima anorganskog izlučivanja iz podvodnih magmi i hidrotermalne aktivnosti ili je pak riječ o neizravnim procesima cvjetanja planktona izazvanog podmosrkim vulkanizmom.

2.3.7. Ugljen, naftni šejlovi, nafta

Organska tvar u recentnim i prastarim sedimentima rezultat je njezina primarnog unosa i kasnijih procesa dijageneze. Veći dio organske tvari, međutim, razgradi se pomoću kisika u ugljikov dioksid i vodu, a budući da je većina prirodnih okoliša oksična (bogata kisikom) većina sedimentnih naslaga sadrži vrlo male količine organske tvari. Pješčenjaci prosječno sadrže 0,05%, vapnenci približno 0,3%, a sitnozrnati sedimenti 2% organske tvari. Organska tvar ostaje najbolje sačuvana u anoksičnim uvjetima, kakvi vladaju u ustajalim jezerima i stratificiranim marinskim bazenima, močvarama, te tamo gdje se tijekom rane dijageneze uspostave anoksični uvjeti. U uvjetima niskih koncentracija kisika razgradnja organske tvari je nepotpuna. U procesu razgradnje, koji je aktivan u većini kopnenih i mnogih podvodnih okoliša, najviše sudjeluju bakterije i drugi mikrobi.

Fotosinteza je osnovni proces proizvodnje biljne organske tvari i zapravo je sami temelj sveg života na Zemlji. Njome biljke proizvode ugljikovodike iz ugljikovog dioksida i vode, koristeći sunčevo svjetlo kao energiju i klorofile kao katalizator.

Pojednostavljen prikaz reakcije fotosinteze:



Razgradnja organske tvari u oksidnom okolišu odvija se posredstvom kisika i u biti je obrnuti proces fotosinteze. Truljenjem u anoksičnim uvjetima, kada kisika ima vrlo malo ili ga uopće nema, nastaju ugljikovodici i drugi složeniji organski spojevi.

Recentne naslage organske tvari su: humus (svježa organska tvar u procesu truljenja u gornjim profilima tla; s vremenom se većina humusa oksidira i ne tvori znatnije količine fosilnih organskih naslaga), treset (gusta masa od *in situ* nastalih biljnih ostataka drveća, lišća, mahovina, šaša, koja se akumulira u močvarnim područjima gotovo na svim geografskim širinama; od njih nastaju različiti tipovi ugljena) i sapropel (organski materijal koji se transportira i akumulira iz suspenzije u plitkim i dubokim marinskim bazenima, lagunama i jezerima; organska tvar potječe od fitoplanktona i zooplanktona).

Nazivi koji se koriste za organski materijal u sedimentnim stijenama su sljedeći:

- **Fitoklast** – prepoznatljivi biljni fragmenti (drvo, list ...)
- **Bitumen** – tekući ili kruti ugljikovodici topljivi u organskim otapalima
- **Asfalt** – kruti ili polukruti bitumen koji potječe od nafte bogate cikloparafinskim ugljikovodicima
- **Kerogen** – organske tvari netopljive u organskim otapalima
- **Nafta** – sastoji se od zemnih ulja u kojima mogu biti otopljeni plinovi (metan, etan, propan, butan); u većini slučajeva je migrirala iz matičnih stijena u porozne rezervoarne stijene.

2.3.7.1 Ugljeni

Naslage organske tvari mogu se podijeliti u dvije opće skupine: one nastale na mjestu rasta organske tvari (*in situ*), kao što su treset i humus, te one sastavljene od organske tvari koja je bila transportirana ili istaložena iz suspenzije, kao što su sapropeli.

Većina ugljena pripadaju humusnoj skupini, a nastali su akumuliranjem *in situ* drvenastog i zeljastog biljnog materijala; sapropelni ugljeni nastali su od alga, spora i usitnjenog biljnog detritusa.

Tijekom pougljnjivanja odvijaju se razni mikrobiološki, fizički i kemijski procesi, a svi oni doprinose stupnju pougljnjivanja ugljena (rank). To je mjera stupnja organskog metamorfizma. S povećanjem stupnja sadržaj ugljika ostaje isti, ali se postotno povećava zbog smanjenja sadržaja volatila (hlapivih sastojaka) (Tablica 5). Volatili u ugljenu su gorivi plinovi (uglavnom vodik i metan) i voda. Odstranjuju se zagrijavanjem ugljena bez prisutnosti zraka. Ugljeni niskog

stupnja pougljenjenja i bogati volatilima lako gore zadimljenim plamenom. Ugljeni višeg stupnja i nižeg sadržaja volatila teže se zapale, ali gore plamenom bez dima. Karbonizirani ostatak koji preostaje nakon uklanjanja volatila je koks. Na temelju svog stupnja pougljenjenja, humusni ugljeni se dijele u nekoliko skupina: (a) lignit (meki smeđi ugljen), (b) čvrsti smeđi ugljen, (d) bitumenski ugljen (kameni ugljen), (e) poluantracit i (f) antracit. Nastavkom metamorfizma nastaje grafit (Tablica 5).

Stupanj pougljenjenja	Sadržaj ugljika u uzorku bez vlage i pepela (%)	Sadržaj volatila (%)	Kalorijska vrijednost (kJ g ⁻¹)
treset	<50	>50	
lignit	60	50	15 - 26
sub-bitumenski ugljen	75	45	25 - 30
bitumenski ugljen	85	35	31 - 35
poluantracit	87	25	30 - 34
antracit	90	10	30 - 33
grafit	>95	<5	

Tablica 5 Stupnjevi pougljenjenja i parametri korišteni u njihovoj procjeni

U geološkoj prošlosti, uvjeti pogodni za nastanak ugljena postojali su u vlažnim klimatskim područjima od kasnog devona naovamo, kada su se pojavile i razmnožile kopnene biljke. Razlikuju se paralički (uz rub mora) i limnički (slatkovodni okoliši) ugljeni. Paralički su nastali u obalnim područjima, posebno u okolišima delti, uglavnom kao tanki (< 3 m), ali relativno prostrani slojevi. Limnički ugljeni nastaju u kontinentalnim bazenima oko jezera, a za brzog tonjenja u riftnim bazenima mogu nastati vrlo debeli slojevi (stotine metara). Glavnina karbonskih slojeva ugljena u Europi i sjevernoj Americi paraličkog je tipa; limnički su osobito dobro razvijeni u kasnokarbonskim naslagama u Francuskoj.

U geološkoj prošlosti, uvjeti pogodni za nastanak ugljena postojali su u vlažnim klimatskim područjima od kasnog devona naovamo, kada su se pojavile i razmnožile kopnene biljke. Razlikuju se paralički (uz rub mora) i limnički (slatkovodni okoliši) ugljeni. Paralički su nastali u obalnim područjima, posebno u okolišima delti, uglavnom kao tanki (< 3 m), ali relativno prostrani slojevi. Limnički ugljeni nastaju u kontinentalnim bazenima oko jezera, a za brzog tonjenja u riftnim bazenima mogu nastati vrlo debeli slojevi (stotine metara). Glavnina karbonskih slojeva ugljena u Europi i sjevernoj Americi paraličkog je tipa; limnički su osobito dobro razvijeni u kasnokarbonskim naslagama u Francuskoj.

2.3.7.2. Naftni šejlovi

Naftni šejlovi predstavljaju raznovrsnu grupu stijena koje sadrže organski materijal većinom netopljiv u organskim otapalima, ali koji se može izdvojiti zagrijavanjem (destilacijom).

Organska tvar najvećim je dijelom kerogen, ali može biti i nešto bitumena. Količina izdvojene nafte je raspona od 4% do više od 50% mase stijene, tj. između 50 i 700 litara nafte na tonu stijene. Naftni šejlovi sadrže znatne količine anorganskog materijala sastavljenog ponajviše od kvarcnog silta i minerala glina. Neki naftni šejlovi zapravo su siltiti i pelitni sedimenti bogati organskom tvari, dok su drugi vapnenci bogati organskom tvari.

Tipično sedimentno obilježje mnogih naftnih šejlova je izrazita laminacija milimetarskih dimenzija, sastavljena od izmjene klastičnih (ili karbonatnih) i organskih lamina. Ona se obično tumači sezonskim ili godišnjim cvjetanjima planktonskih alga. Slično procesima nastanka ugljena, i ovdje su potrebni anoksični uvjeti da bi se spriječila oksidacija organske tvari i smanjila razgradnja bakterijama, osim ako proizvodnja organske tvari nije tako velika da je njezina akumulacija moguća i u oksidativnom okolišu. Mnogi naftni šejlovi nastali su u stratificiranim vodenim sredinama čije su oksidativne površinske vode podržavale rast planktona, a anoksične vode uz dno pogodovala očuvanju organske tvari.

2.3.7.3. Nafta

Nafta potječe od dozrijevanja organske tvari istaložene u sitnozrnatim marinskim sedimentima. Sedimenti bogati organskom tvari mogu se istaložiti u anoksičnim zatvorenim bazenima, zatim na rubovima šelfa gdje dolazi do izdizanja morske vode (upwelling) i nastanka zone minimalne koncentracije kisika, te na morskom dnu tijekom razdoblja oceanskih anoksičnih događaja.

Mnoge marinske matične stijene ugljikovodika nastale su za bujanja marinskog planktona, što se podudaralo s transgresijama i stadijem visoke morske razine. Nafta može vući porijeklo i od periplimnih mikrobnih prevlaka, te od organske tvari sadržane u grebenima i ooidima, a važne su i jezerske matične stijene. Dijageneza organske tvari započinje vrlo rano na malim dubinama zatrpavanja, kada bakterijskom fermentacijom mogu nastati znatne količine metana. Metan može pobjeći u atmosferu, ali može ostati i zarobljen. Na velikim dubinama zatrpavanja, dijageneza istaložene organske tvari dovodi do nastanka kerogena.

Zatrpavanje na dubine s temperaturama 50 - 80°C izaziva termo-katalitičke reakcije u kerogenu, pri čemu nastaju cikloalkani i alkani, dva glavna sastojka sirove nafte. Kada dođe do ovog

procesa za matičnu stijenu se kaže da je zrela. S porastom temperature nastaje sve više nafte, čija se količina nakon dosegnutog maksimuma smanjuje, ali zato se povećava količina plina. Glavna faza nastanka nafte događa se na temperaturama oko 60 - 170°C, što u područjima prosječnog geotermalnog gradijenta odgovara dubinama 2 - 3,5 km (to je tzv. naftni prozor). Proizvedeni plin u početku je mokr, ali iznad 150°C nastaje samo metan (suhi plin). Vrijeme je također bitan faktor u dozrijevanju matične stijene; nastanak nafte iz mlađih stijena zahtijeva više temperature i veće dubine zatrpavanja, dok starije stijene mogu postići zrelost i pri nižim temperaturama. Sirova nafta sastavljena je od ugljika (prosječno 85 težinskih postotaka) i vodika (13 težinskih postotaka), u omjeru 1,85 vodikovih atoma na 1 ugljikov atom. Sporedni elementi, S, N i O uglavnom čine manje od 3% mase većine nafti (Tablica 6).

	C	H	S	N	O
ugljikohidrati	44	6	-	-	50
lignin	63	5	0,1	0,3	31,6
bjelančevine	53	7	1	17	22
lipidi	76	12	-	-	12
nafta	85	13	1	0,5	0,5
kerogen	79	6	5	2	8

Tablica 6 Prosječni sastav glavnih organskih spojeva u organskoj tvari, nafti i kerogenu

2.3.8. Fosfatni sedimenti

Sedimentna ležišta fosfata ili fosforiti važni su prirodni resursi. Fosfati su jedni od glavnih sastojaka gnojiva i imaju široku primjenu u kemijskoj industriji. Osim toga, fosforiti često sadrže relativno visoke koncentracije korisnih elemenata, kao što su uran, fluor i vanadij, te često dolaze zajedno s muljnjacima bogatim organskom tvari, koji su potencijalne matične stijene ugljikovodika.

Fosfor je jedan od esencijalnih elemenata i prisutan je u svojoj živoj tvari. Premda fosfat ima sporednu ulogu u izgradnji mekih dijelova biljaka i životinja, on je glavni sastojak skeleta (kostiju) svih kralježnjaka i tvrdih dijelova nekih beskralježnjaka. U marinskom okolišu je primarni nutrijent o kojem ovisi proizvodnja organske tvari. U morskoj vodi, fosfat je prisutan kao otopljeni 'ortofosfat' i u čestičnoj fazi, koju najvećim dijelom čini fosfat sadržan unutar

organskog detritusa ili je na njemu adsorbiran. Glavnina proizvodnje organske tvari u oceanima troši otopljeni 'ortofosfat' putem rasta fitoplanktona u gornjim slojevima vode. Koncentracija fosfata u obalnim vodama, kao što su one u estuarijima, obično je veća nego u površinskim vodama odobalne zone, a visoka je i u vodama anoksičnih bazena.

Mnoštvo sedimentnih stijena sadrži nekoliko postotaka kalcijevog fosfata u obliku zrna apatita, fragmenata kostiju i koprolita. Stijene većinski sastavljene od fosfata relativno su rijetke.

Sedimentna ležišta fosfata podijeljena su u tri grupe:

- 1 nodularni i slojeviti fosforiti, nastali najviše procesima izdizanja morske vode (upwelling) i proizvodnjom organske tvari;
- 2 bioklastični i valutičasti fosforiti, nastali preradom sedimenta ;
- 3 fosforiti oceanskih otoka, odnose se većinom na guano (fosfatna ležišta od izmeta ptica i šišmiša)

2.3.9. Kemijski sedimenti/stijene (evaporiti, željezoviti sedimenti)

2.3.9.1.Evaporiti

Evaporiti su poglavito kemijski sedimenti izlučeni iz vode nakon što se isparavanjem povećala koncentracija otopljenih soli. Glavni evaporitni minerali prikazani su tablici 7.

Marinski evaporitni minerali		Nemarinski evaporitni minerali	
halit	NaCl	halit, gips, anhidrit	
silvit	KCl	epsomit	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
carallit	$\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	trona	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{NaHCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
kainit	$\text{KMgClSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	mirabilit	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
anhidrit	CaSO_4	thenardit	NaSO_4
gips	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	bloedit	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
polihalit	$\text{K}_2\text{MgCa}_2(\text{SO}_4)_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	gaylussit	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
kieserit	$\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	glauberit	$\text{CaSO}_4 \cdot \text{Na}_2\text{SO}_4$

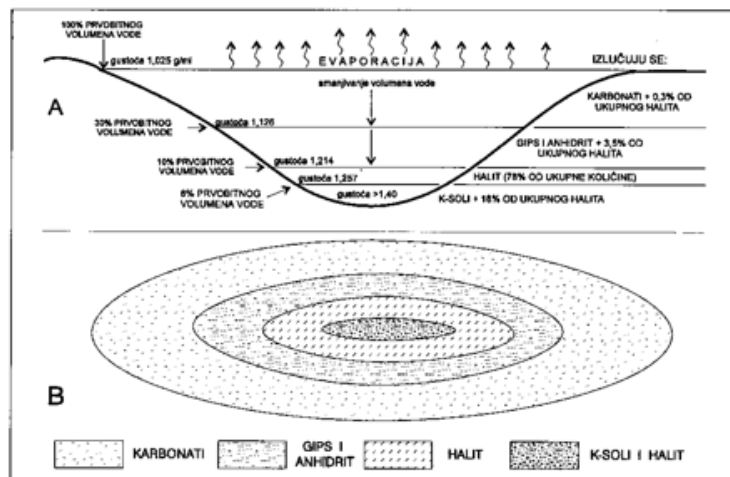
Tablica 7 Glavni evaporitni minerali

Razlikuju se dva glavna načina taloženja evaporita:

- podvodno izlučivanje, u plitkim do dubokim vodenim tijelima malih (jezero/laguna) do velikih (intrakratonski/riftni bazeni) dimenzija (Sl. 45)
- kopneno izlučivanje, unutar sedimenta (sabkha) ili u vrlo plitkim do isušenim „slanim tavama”

Podvodno izlučivanje evaporita u osnovi je jednostavan proces „kipućeg lonca”, pri čemu evaporitni minerali nastaju na granici voda-zrak, kao i nukleacijom na površini sedimenta (rast na dnu). U marinskim uvjetima potrebna je neka barijera koja omogućuje isparavanje do visokih saliniteta, ali i povremeno nadopunjavanje tog rasola (slanice) svježom vodom.

Evaporitna ležišta obično su ciklična. Vrlo debela slana ležišta intrakratonskih bazena uglavnom se sastoje od gipsa-anhidrita, halita, te tankog, vršnog sloja vrlo topljivih gorkih soli (kalijevi i magnezijevi kloridi i sulfati). Ovaj ciklus može se opetovano ponavljati.



Sl. 45 Shematski prikaz redosljeda izlučivanja evaporitnih naslaga i njihovih rasporeda pri isparavanju morske vode u zatvorenom taložnom sustavu

Evaporiti imaju veliki ekonomski značaj i široku primjenu. Njihovi slojevi čine ključnu komponentu mnogih naftnih polja u svijetu, tvoreći „kape” karbonatnih rezervoara ili čineći strukturne zamke zahvaljujući solnom dijapirizmu. Geološki gledano, evaporiti su korisni u paleoklimatološkim istraživanjima jer su uglavnom vezani za sušna područja niskih geografskih širina, gdje su temperature vrlo visoke, relativna vlažnost niska, a isparavanje daleko nadmašuje bilo koju količinu padalina.

2.3.9.2. Željezovite sedimentne stijene

Željezo je prisutno u gotovo svim sedimentnim stijenama u količinama do nekoliko postotaka, a rjeđe tvori željezovite sedimentne stijene (ironstones) i željezovite formacije (iron-formations) u kojima je sadržaj Fe veći od 15%. Ova sedimentna ležišta željeza sadrže važne rezerve željezne rude. Budući da se željezo pojavljuje u dva valentna stanja, kao dvovalentno (fero, Fe^{2+}) i trovalentno (feri, Fe^{3+}), njegovo ponašanje i izlučivanje njegovih minerala jako ovisi o kemizmu površinskih i dijagenetskih okoliša. Najčešći minerali željeza u sedimentnim stijenama dani su u tablici 8.

Tablica 8 Najčešći minerali željeza u sedimentnim stijenama

oksidi	hematit	Fe_2O_3
	magnetit	Fe_3O_4
	goethit,	$\alpha\text{-FeOOH}$
	limonit	
karbonati	siderit	FeCO_3
silikati	chamosit	$(\text{Fe}_5^{2+}\text{Al})(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_8$
	glaukonit	$\text{KMg}(\text{FeAl})(\text{SiO}_3)_6 \cdot 3 \text{H}_2\text{O}$
sulfidi	pirit	FeS_2
	markazit	FeS_2

Glavnina sedimentnih ležišta željeza nastala je u marinskim uvjetima i mnoga od njih fanerozojske starosti sadrže normalne marinske fosile. Postoje bitne razlike između ležišta nastalih u ranom srednjem prekambriju i onih fanerozojskih. Prekambrijski su poznati kao željezovite formacije ili prugaste željezovite formacije (BIFs, banded iron formations); to su debele sedimentne jedinice sastavljene od raznih minerala željeza i proslojene s rožnjacima, a istaložene su u velikim intrakratonskim bazenima. Fanerozojske željezovite sedimentne stijene obično su tanke jedinice oolitične strukture, a istaložene su u lokaliziranim područjima.

Željezo u željezovitim sedimentnim stijenama potječe iz dva izvora: kontinentalnog trošenja i istovremenog vulkanizma. Vulkansko i hidrotermalno porijeklo željeza vezano je uz arhajske željezovite formacije, dok je kontinentalno trošenje glavni izvor željeza fanerozojskih željezovitih naslaga. Intenzivnim trošenjem u uvjetima vlažne tropske klime, željezo se oslobađa iz melanokratskih (mafitnih) minerala magmatskih i drugih stijena, dajući željezom bogate podzemne vode i željezovita lateritna tla. Postoje tri mehanizma transporta željeza: željezo(III)-

hidroksid tvori koloidne suspenzije stabilne u prisustvu organske tvari i u tom obliku se može transportirati rijekama i potom istaložiti u moru flokulacijom koloidne suspenzije; adsorpcijom na organskoj tvari i/ili mineralima glina, bilo kao dio njihove strukture ili kao tanka oksidna ovojnica na njihovoj površini. Nakon što se istaloži, željezo može biti oslobođeno iz glina i organske tvari u pornu vodu pod određenom Eh-pH uvjetima i iznova se izlučiti u obliku minerala željeza

Tumačenje mnogih željezom bogatih sedimentnih stijena otežava činjenica da danas nema dobrih recentnih primjera pogodnih za usporedbu. Jedina ležišta željeza koja danas nastaju u donekle većim količinama su močvarne rude željeza (bog—iron ores) u jezerima i močvarama umjerenih do visokih geografskih širina. Osim njih, na morskom dnu nastaju željezo-manganske nodule i kore, te metalonosni sedimenti. Ništa od ovih recentnih primjera nije geološki značajno, niti je usporedivo s većinom željezovitih sedimentnih stijena i željezovitih formacija iz geološke prošlosti.

2.3.10. Vulkanoklastični sedimenti

Vulkanoklastični sedimenti sastavljeni su isključivo od čestica vulkanskog porijekla, koje potječu od istovremenog vulkanizma. Tip vulkanoklastičnih naslaga određen je velikim dijelom tipom magme (kisela, neutralna ili bazična).

Naziv piroklast odnosi se na svaki materijal, bez obzira na veličinu, izbačen iz vulkana. Tefra je skupni naziv za piroklaste. Piroklasti najviše potječu od same magme, kada su obično građeni od vulkanskog stakla, ali to mogu biti i kristali ako je magma počela kristalizirati prije svoje eksplozivne erupcije. Tefra također sadrži i fragmente stijena, kako od lava prijašnjih erupcija tako i od okolnog stijenja. Prema veličini čestica tefra se dijeli u vulkanski pepeo, lapile i blokove (Tablica 9).

Veliki fragmenti magme izbačeni u fluidnom stanju su bombe, od kojih neke imaju izduljen elipsoidan oblik zbog rotacije za vrijeme leta. Mnogi piroklasti pojavljuju se kao plovuči, jako šupljikavo vulkansko staklo čija poroznost može biti veća od 50%. Ukoliko potječu od bazičnijih magmi, umjesto plovuča koristi se naziv scoria. Razlamanjem plovuča nastaju krhotine stakla, a to su fragmenti manji od prosječne veličine njegovih šupljina (mjehurića). Krhotine stakla su

VELIČINA FRAGMENTA I ČESTICA	VRSTA KLASTA	NAZIV TALOGA (TEFRE)	KONSOLIDIRANA STIJENA
>64 mm	blokovi, vulkanske bombe	aglomerat	aglomerat, vulkanska breča
2-64 mm	lapili	lapilna tefra	lapilni tuf (<i>lapilstone</i>)
0,063-2 mm	krupni vulkanski pepeo	krupnozrnasti vulkanski pepeo	krupnozrnasti tuf
<0,063	sitni vulkanski pepeo	sitnozrnasti vulkanski pepeo	sitnozrnasti tuf (pelitni tuf)

Tablica 9 Tipovi piroklastičnih čestica (tefre) i stijena s obzirom na veličinu čestica

česti sastojci mnogih vulkanoklastičnih sedimenata, a prepoznatljive su po svom srpastom obliku ili obliku slova Y, čije konkavne plohe predstavljaju stijenske zdrobljenih mjehurića stakla.

Kristali izbačeni iz vulkana obično su euhedralni ili razlomljenih euhedralnih oblika, a mogu biti i zonirani. Najčešći su kristali kvarca i feldspata, a u bazičnijim pepelima može biti i piroksena.

Poseban tip lapila su akrecijski lapili, nastali procesima slobodnog pada i tečenja; tijelo im je kuglastog do elipsoidnog oblika, čija jezgra može biti krhotina stakla, kristal ili fragment stijene, a obavijena je s jednom ili više lamina od vulkanskog pepela i prašine. Priroda vulkanskih eksplozija i erupcija ovisi o sadržaju volatila (osobito vode i CO₂) i viskoznosti magme. Na velikim dubinama, volatili su otopljeni u magmi, ali njezinim izdizanjem prema površini i smanjenjem tlaka dolazi do izdvajanja i ekspanzije plinova. Uslijed toga magma postaje šupljikava i slična pjeni, a njezinim izbacivanjem i skrućivanjem nastaje plovuac/scoria. Kisele magme sadrže veći postotak volatila i viskoznije su u odnosu na bazične magme, tako da piroklastične naslage kiselih magmi imaju veće prostiranje.

Tufovi su vulkanoklastični sedimenti sastavljeni od pepela; oni sastavljeni od lapila su lapiliti, a od bombi ili blokova su aglomerati i vulkanske breče (Tablica 9).

2.3.11. Sedimentni okoliši

Sedimentni okoliši variraju od onih u kojima prevladava erozija i transport, do onih gdje prevladava taloženje. Glavnina procesa trošenja i erozije, kojima se sedimentna zrna i ioni oslobađaju u otopinu, odvija se u kontinentalnim područjima, a klima, lokalna geologija i reljef određuju vrstu i količinu rastrošenog materijala. Glavni kontinentalni taložni okoliši su riječni, ledenjački i jezerski, te eolska pješčana mora u pustinjama. U rubnim marinskim okolišima,

taloženje se odvija u deltama, lagunama, na plimnim ravninama, sabkhama, plažama i barijernim otocima. Taloženje u marinskim okolišima odvija se na plitkim šelfovima i u epikontinentalnim morima, a u batijalnim područjima odvija se pelagička i turbiditna sedimentacija.

2.4. METAMORFNE STIJENE

2.4.1. Uvod

Metamorfne stijene nastaju metamorfozom, tj. preobrazbom teksture, strukture, mineralnog i/ili kemijskog sastava prije nastalih stijena magmatskoga, sedimentnog i metamorfnog postanka, tzv. protolita, usljed promjena tlaka i temperature i zapravo predstavlja prilagodbu protolita tim novim fizikalno-kemijskim uvjetima. Ponekad se mijenjaju sva svojstva stijene, a ponekad samo neka od njih i to u čvrstom stanju.

Metamorfoze se vrše u dubljim dijelovima kamene kore. Promjene u stijenama koje se zbivaju na površini litosfere djelovanjem egzogenih činilaca, insolacije, tekuće i stajaće vode, kao i atmosferilija, nazivamo trošenjem, a sve dijagenetske procese u kojima također dolazi do izvjesnih promjena strukture, mineralnog i kemijskog sastava nastajućih sedimenata ne smatra se metamorfozom u ovom užem smislu. Dijageneza također predstavlja promjene uzrokovane povećanjem tlaka i/ili temperature koje se dešavaju prilikom litifikacije sedimenata, međutim, u geologiji se dijageneza ograničava na one procese koji se dešavaju kod temperatura ispod 200°C i tlakova nižih od 300 Mpa, odnosno 3 kilobara. Prema tome, metamorfizam se dešava pri temperaturama i tlakovima višim od 200°C i 300 MPa-. Gornja granica metamorfizma definirana je tlakom i temperaturom kod kojih započinje taljenje stijene.. Kada jednom započne taljenje, prelazi se u magmatske procese.

2.4.2. Proces i čimbenici metamorfoze

Glavni procesi prilikom metamorfoze su rekristalizacija, metasomatoza i drobljenje.

Rekristalizacija je fizikalni proces promjene veličine i oblika minerala protolita pod utjecajem temperature i tlaka pri čemu njihov sastav najčešće ostaje jednak. Tako npr. iz monomineralnog vapnenca koji sadrži samo kalcit rekristalizacijom nastaje stijena koja također sadrži kalcit, ali je on krupnijega zrna. Prisutnost fluida utječe na pokretljivost iona i atoma te olakšava rekristalizaciju. Rekristalizacijom se razaraju primarne karakteristike protolita.

Metasomatoza je promjena kemijskog sastava protolita pri metamorfozi, a uzrokovana je unošenjem kemijskih elemenata iz susjednih stijena. Ti se elementi mogu transportirati u pornoj vodi, i to brzo i na velike udaljenosti. Zbog te uloge vode metamorfna stijena može sadržavati

elemente koji nisu bili sastavni dio protolita i koji se mogu inkorporirati u novonastale minerale mijenjajući pri tom ne samo mineralni, nego i kemijski sastav protolita.

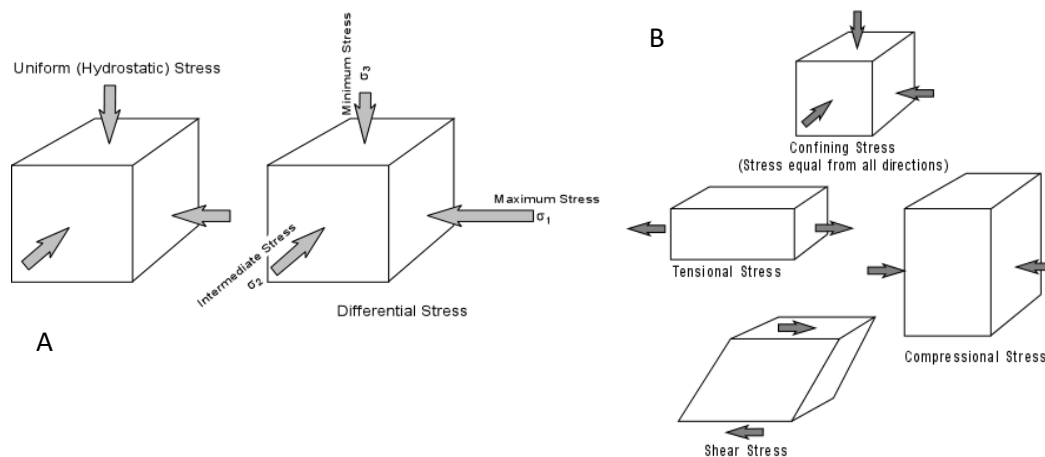
Drobljenje protolita je njegova mehanička dezintegracija u uvjetima povećanog tlaka.

Glavni čimbenici metamorfoze su **temperatura, tlak i kemijski aktivni fluid**.

Povećanje temperature proizlazi iz nekoliko izvora. Prvi je “geotermijski gradijent”, tj. postupno povećanje temperature litosfere idući od površine prema unutrašnjosti. Drugi izvor topline nastaje nakon intruzije, utiskivanja magme u okolne stijene prilikom njezina kretanja prema površini. Povišenje temperature može biti prouzrokovano i trenjem velikih masa stijena uzduž rasjednih linija, te udarom meteorite na Zemljinu površinu. U ekstremnom slučaju povećanje temperature može biti toliko da izazove djelomično taljenje stijena.

Ako neka stijena zbog određenih geoloških procesa dođe u dublje dijelove litosfere, dopijeva automatski pod povišeni tlak. U velikim dubinama kamene kore tlak djeluje jednakim intenzitetom sa svih strana, pa govorimo o **litostatskom tlaku**. Posljedica toga tlaka redovito je formiranje zrnate (granularne) strukture, tvorba dehidriranih minerala i minerala povećane gustoće. Zato npr. u dubljim dijelovima litosfere metamorfozom kaolinita (gustoća $2,6 \text{ g/cm}^3$) nastaje novi mineral, andaluzit, gustoće $3,15 \text{ g/cm}^3$, a u još dubljim dijelovima litosfere njegova polimorfna modifikacija kianit, gustoće $3,56 \text{ g/cm}^3$.

U višim, odnosno plićim dijelovima kamene kore djeluje **usmjereni tlak, stres**. Ako stres djeluje na stijenu, smjer djelovanja maksimalne komponente stresa označava se σ_1 , smjer minimalnog stresa σ_3 , a stres srednje veličine σ_2 (sl. 46A). Razlikujemo tri vrste diferencijalnog stresa: kompresija, tenzija, smicanje (shear stress) (sl. 46B). Tenzijski stres će djelovati duž pravca djelovanja minimalnog stresa σ_3 , koji će u tom slučaju biti negativan, što će imati za posljedicu razvlačenje (ekstenziju).



Sl. 46 A) Shematski prikaz litostatskog i usmjerenog tlaka - stresa i B) prikaz vrsta diferencijalnog tlaka (stresa) - kompresija, tenzija, smicanje (shear stress)

Stres može biti **statički**, pri kojem stijenska masa miruje ili **dinamički** (kinematički) pri kojem se stijenska masa pomiče. Djelovanje dinamičkog stresa često se očituje se u drobljenju minerala i stijena, pa nastaju kataklastične deformacije. U nešto dubljim dijelovima djelovanje stresa prouzrokuje snižavanje tališta minerala i time se povećava njegova topljivost. Tada nastupa prekrystalizacija po Rieckeovu načelu - mineral će se otapati na mjestu većeg tlaka i ponovo će se kristalizirati na mjestu manjeg tlaka. Nastaju štapićasti i listićavi minerali, koji se slažu u usporednim nizovima. Tako dolazi do karakteristične **škriljave teksture** jednog dijela metamorfnih stijena.

Promjena temperature uglavnom uzrokuje promjene mineralnog sastava, dok promjena tlaka djeluje na promjene struktura i tekstura stijena.

Kemijski aktivni fluid uglavnom je voda. Uz vodu važni metamorfni fluidi su CO_2 , CH_4 i H_2S . Kemijski aktivni fluid uglavnom omogućuje metasomatske procese, odnosno promjene kemijskog sastava pri metamorfozi. Voda može potjecati iz atmosfere, može biti sadržana u porama stijena, može biti sastavni dio strukture minerala (npr. kao OH-skupina u hidrosilikatnim mineralima). Količina vode u eruptivima iznosi oko 1%. U vapnencima je ima malo, najviše do 0,8%, pješčenjaci je imaju do 2%, glineni sedimenti i više od 5%. Minerali glina sadrže i do 14% molekularno vezane vode.

Ako ne dođe do priljeva novih mineralnih tvari, kemijski će sastav metamorfozirane stijene ostati uglavnom isti (izokemijski proces). Naravno, treba ipak uzeti u obzir da može doći do stanovitog

gubitka vode i ugljičnog dioksida. Naprotiv, mineralni sastav stijene mijenja se u većini slučajeva.

Osim tih čimbenika na karakteristike metamorfnih stijena, odnosno na to kakav će biti rezultat metamorfoze utječe i **kemijski i mineralni sastav protolita.**

Glineni sedimenti, sastavljeni od finih čestica glinene tvari, stabilni su samo pri niskoj temperaturi i niskom tlaku. Relativno su lako podložni različitim stupnjevima dinamotermalne metamorfoze. Zato nalazimo gotovo kontinuirane prijelaze od šejla preko stijena s različitim stupnjem metamorfoze do metamorfnih stijena najvišeg stupnja: šejl - slejt - filit - tinjčev škrljavec – gnajs.

Stijene koje su izgrađene od kvarca i feldspata, kisele eruptivne stijene i pješčenjaci, mnogo su stabilnije i njihove metamorfoze daju manji broj novih varijanti minerala i stijena.

Vapnenci, ako se sastoje isključivo od kalcita, pretrpe metamorfozom samo prekristalizaciju, pa tako nastaje mramor krupnijeg zrna. Nasuprot njima, dolomiti su nestabilni i mogu se raspasti u agregat kalcita i magnezijskog oksida, periklasa.

Ako spomenute karbonatne stijene, osim kalcita i dolomita, sadrže i druge minerale, npr. kvarca i gline, nastaju različiti silikati i alumosilikati. Suvišni ugljični dioksid izlazi tada van.

Minerali bazičnih eruptivnih stijena, bazični plagioklasi, pirokseni i olivin lako su podložni metamorfozama, pa te stijene prelaze u amfibolite i zelene škrljavce s ovim mineralima: hornblenda, coisit, epidot, kalcit, aktinolit, klorit, serpentin.

2.4.3. Strukture metamorfnih stijena

Strukture metamorfnih stijena posljedica su istodobne prekristalizacije minerala u čvrstom stanju (blastoza). Strukturu metamorfnih stijena nazivamo **kristaloblastičnom** strukturom. **Ksenoblasti** su ona mineralna zrna koja nemaju vlastite kristalne forme. **Idioblasti** su oni minerali koji imaju svoju karakterističnu kristalnu formu.

S obzirom na relativnu veličinu minerala, razlikujemo **homeoblastičnu strukturu** u kojoj su mineralni sastojci podjednake veličine i **heteroblastičnu strukturu** koju karakteriziraju veće razlike u veličini pojedinih mineralnih zrna.

Unutar homeoblastične strukture postoji **granoblastična** struktura ako se stijena sastoji od ekvidimenzionalnih zrnaca (ekvivalent zrnatoj strukturi magmatskih stijena). Takvi su mramor, kvarcit, eklogit. **Lepidoblastična** struktura predstavlja lističav agregat, stijena je uglavnom

izgrađena od listićavih minerala, npr. tinjčev škriljac. **Nematoblastična** struktura sastoji se od štipićastih, igličastih i vlasastih minerala, kao kod amfibolita i glaukofanskih škriljaca.

Među heteroblastične strukture ubrajamo **porfiroblastičnu i porfiroklastičnu** strukturu.

Porfiroblastična struktura je ona u kojoj su pojedini minerali mnogo veći od ostalih, obično su idioblastični i nastali su rekristalizacijom u čvrstom stanju. Takva mineralna zrna zovu se **porfiroblasti**. Porfiroblasti mogu nastati rekristalizacijom zbog povišene temperature iz mineralnog materijala same stijene ili mogu kristalizirati iz mineralnih komponenata koje su došle izvana putem cirkulirajućih otopina (kemijski aktivni fluid).

Porfiroklastičnu strukturu karakterizira prisutnost nezdobljenih većih zrna minerala ili fragmenata stijena zaostalih iz ishodne stijene (protolita) u sitnozdrobljenoj masi. Velike fragmente minerala nazivamo porfiroklasti, a sitnozrnastu zdrobljenu masu matriks.

Porfiroklasti mogu biti izgrađeni od pojedinačnih zrna minerala, najčešće feldspata, izgledaju lećasti poput oka, pa se takva struktura naziva **augen-struktura (okasta-struktura)** (sl. 47).

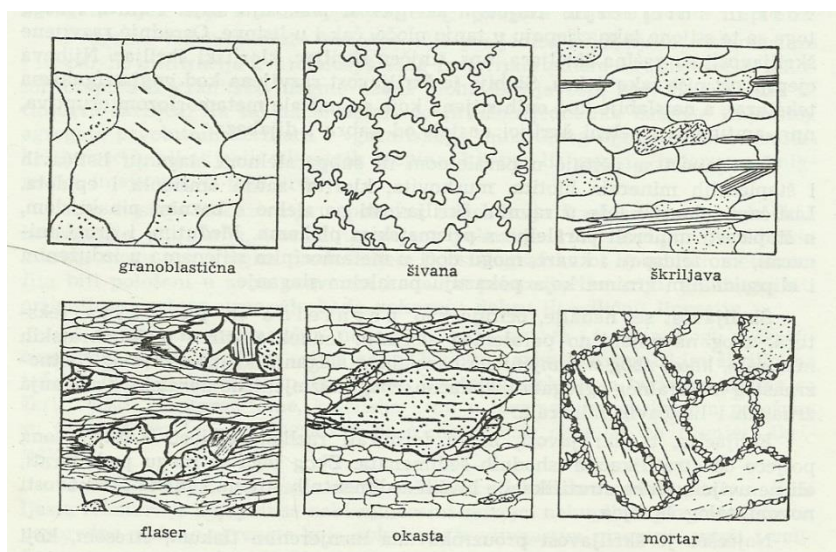
Porfiroklasti mogu biti i fragmenti nezdobljene stijene, dakle heterogeni agregat ishodne strukture. To je **flaser-struktura** (sl. 47).

Mortar-struktura (brečasta) (sl. 47) početni je stadij kataklastičnog djelovanja. Tu su pojedini minerali, najčešće kvarc, na rubovima zdrobljeni, pa su još sačuvane jezgre minerala ovijene vijencem zdrobljenoga sitnozrnastog agregata.

Šivana struktura (sl. 47) osobito je značajna za kvarcit u kojem su zrna kvarca zbog visokog tlaka tako zgnječena da zupčasto ulaze jedno u drugo.

Kataklastične strukture (okasta, flaser, mortar, šivana) rezultat su mehaničkog drobljenja prvobitnih stijena djelovanjem usmjerenog tlaka (stresa). Minerali se drobe, pucaju, puni su pukotina i sekundarnih sraslačkih lamela, a pokazuju i anomalna optička svojstva. U.

Kataklastične stijene i miloniti, zbog utjecaja **velikog tlaka, ostaju čvrste i kompaktne**.



Sl. 47 Strukture metamorfnih stijena

Reliktna struktura je ona u kojoj su vidljivi ostaci strukture ishodne stijene. Te su strukture značajne za rješavanje geneze metamorfnih stijena. Tako neki amfiboliti imaju izrazitu blastoporfirnu strukturu koja je zaostala od porfirne strukture ishodnog efuziva (npr. bazalta). Isto tako je blastoofitska struktura, reliktna struktura ishodnog dijabaza. Tako bi te stijene dobile nazive meta-bazalt, odnosno meta-dijabaz (ispred naziva ihodišne stijene dodaje se prefix *meta-*).

2.4.4. Teksture metamorfnih stijena

Teksturu metamorfnih stijena možemo opisati kao **homogenu i masivnu** kada nalikuje na teksturu intruziva. Takvu strukturu imaju kontaktno-metamorfni mramori i kvarciti, hornfelsi, kao i metamorfne stijene nastale pod visokim litostatskim tlakom. To su eklogiti i piroksenski granuliti.

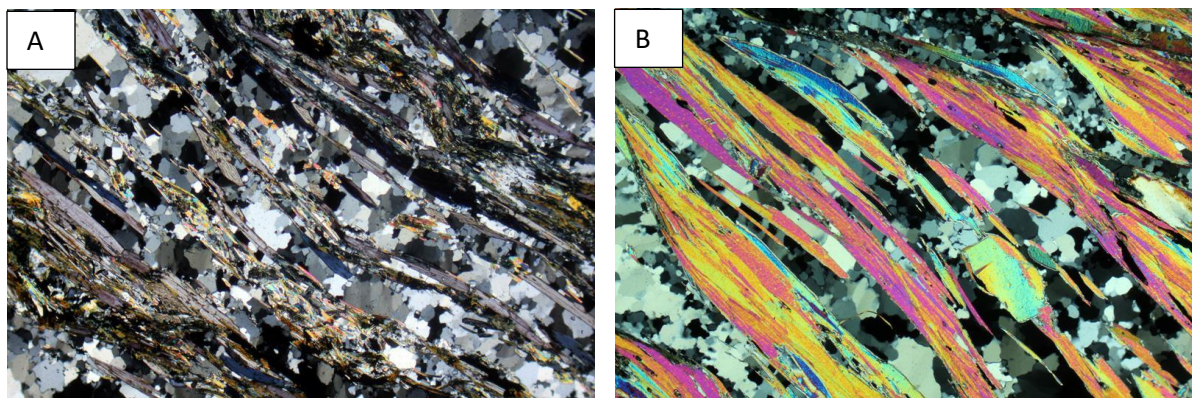
Većina metamorfnih stijena nastalih pod utjecajem usmjerenog tlaka, regionalnom ili dinamotermalnom metamorfozom, dobivaju karakterističnu **škrljavost, odnosno folijaciju** (pojam škrljavost obično koristimo za one stijene kod kojih su mineralna zrna vidljiva prostim okom, dok izrazom folijacija opisujemo teksturu sitnozrnatih stijena).

Najbolju škrljavost pokazuju slejti i filiti, i zbog toga se te stijene lako cijepaju u tanje ploče, čak i u listove. Osrednje razvijene škrljavosti su većina škrljavaca, npr. tinjčev škrljavac, kloritski škrljavac. Njihova cjepivost nije tako dobra. Slabije je škrljavost razvijena kod gnajsa

(gnajсна tekstura), a najslabije kod onih stijena koje su nastale metamorfozom eruptiva, npr. amfiboliti i zeleni škriljci nastali od gabra i dijabaza.

Škriljavost se očituje u paralelnom ili subparalelnom slaganju lističavih i štapičastih minerala biotita, muskovita, klorita, zatim amfibola i epidota. Lističavi minerali leže u ravnini škriljavosti paralelno s plohama baznog pinakoida, a štapičasti minerali paralelno s prizmatskim plohama. Međutim, i drugi minerali, kao feldspati i kvarc, mogu doći u metamorfnim stijenama u izduženim i elipsoidalnim zrnima koja pokazuju paralelno slaganje.

Škriljavost se, nadalje, očituje kao paralelna ili prugasta tekstura, zbog naizmjenično paralelnog slaganja leukokratskih i melanokratskih minerala (tipično za gnajs, sl. 51B), kao i zbog naizmjenično paralelnog slaganja krupnozrnatog i sitnozrnatog mineralnog agregata i, konačno, zbog naizmjeničnog paralelnog slaganja zrnatih i lističavih, te zrnatih i štapičastih mineral (sl. 48).



Sl. 48 A) Folijacija, odnosno škriljavost izražena izmjenom nematoblastičnih (štapičasta zrna glaukofana) i granoblastičnih dijelova (kvarc) u eklogitu. Duljina dužeg brida 7mm. B) Folijacija izražena izmjenom lepidoblastičnih (listići muskovita, žarke boje) i granoblastičnih dijelova (ekvidimenzionalni kvarc) u tinjčevom škriljavcu. Duljina dužeg brida 7mm.

Folijaciju, odnosno škriljavost, mogu formirati različiti činioci. Katkada ona potječe od stratifikacije ishodnih sedimenata. Zbog toga se mogu podudarati, ali ne uvijek, plohe stratifikacije bivših sedimentnih stijena i plohe škriljavosti novonastalog škriljca.

Najčešće je škriljavost prouzrokovana usmjerenim tlakom, stresom,

Paralelna (trakasta) tekstura nastala metamorfnom diferencijacijom manifestira se u lamelarnoj, trakastoj izmjeni leukokratskih i melanokratskih minerala, npr, zrnatog svjetlo obojenog kvarcfeldspatskog agregata i melanokratskog listićavoga agregata biotita (sl. 51B). Ako nastaje intenzivnija usporedna orijentacija štapićastih minerala, kao hornblende, silimanita, turmalina, stijena pokazuje **lineaciju**. Amfibolski kristali mogu npr. svojim izduženjem (kristalografska os c) unutar metamorfita biti položeni u svim pravcima u jednoj ravnini i tada ne pokazuju lineaciju, ali su sastavni elemenat škriljavosti. No, ako su svojim izduženjem orijentirani gotovo usporedno tada, uz to što sudjeluju u stvaranju škriljavosti, pokazuju i dobru lineaciju.

2.4.5. Vrste metamorfoza

Različite vrste metamorfoza definiraju se na temelju kriterija koji se uzima u obzir.

Prema prevladavajućem čimbenku u procesu metamorfoze, tlaku ili temperaturi, razlikuju se:

- **dinamska metamorfoza (ili kinematička metamorfoza)**, kod koje je dominantni čimbenik tlak (npr. kataklastična metamorfoza)
- **termalna metamorfoza**, kod koje dominantni čimbenik temperatura uključuje kontaktnu metamorfozu, hidrotermalnu metamorfozu i impaktnu metamorfozu
- **dinamotermalna metamorfoza**, kod koje kombinirano i uzajamno djeluju i tlak i temperatura (obično zahvaća velika područja, pa ujedno ima i regionalni karakter)

Prema veličini područja u kojem se zbivaju metamorfne promjene razlikuju se:

- **lokalna metamorfoza** (ograničena na manjem prostoru; prema tom kriteriju kontaktna, hidrotermalna, impaktna, odnosno kataklastična metamorfoza pripadaju lokalnoj metamorfozi, no, možemo ih istovremeno tretirati i kao termalne, odnosno dinamske)
- **regionalna metamorfoza** zauzima veći prostor, od nekoliko stotina do nekoliko tisuća četvornih kilometara, tu spadaju orogena metamorfoza, metamorfoza oceanskog dna i metamorfoza tonjenja

Prema tome dešavaju li se promjene povećanjem ili snižavanjem temperature i/ili tlaka razlikuju se:

- **progradna metamorfoza** (dešava se povećanjem temperature i tlaka, pri čemu mineralna asocijacija stabilna pri nižoj temperaturi i tlaku prelazi u mineralnu asocijaciju stabilnu pri višoj temperaturi i tlaku, npr. ilit i montmorilonit prelaze u sericit (sitno-listićavi muskovit) i klorit prilikom metamorfoze glinovitog sedimenta u slejt i filit.
- **retrogradna metamorfoza** (snižavanjem temperature i tlaka nastaju, iz minerala stabilnih pri višoj temperaturi i tlaku, minerali stabilni pri nižoj temperaturi i tlaku, npr. amfibolit (hornblenda, plagioklas) retrogradnom metamorfozom može prijeći u zeleni škriljavac (albit, klorit, epidot, aktinolit); procesi retrogradne metamorfoze vrlo su tromi i dugotrajni i manje su zastupljeni od procesa progradne metamorfoze.

Prema kemijskom sastavu metamorfne stijene u odnosu na protolit metamorfoza može biti:

- **izokemijska** (metamorfozom se ne mijenja kemijski sastav protolita, npr. djelovanjem povišene temperature (kontaktna metamorfoza) prijeći će šejl, koji je sastavljen od amorfnih aluminijskih silikata s vodom, od amorfnih željeznih hidroksida, kvarca, nešto sericita i klorita, u hornfels, koji je izgrađen od kvarca, andaluzita, kordijerita, biotita i kiselog plagioklasa. Ako je metamorfozu uvjetovao uz visoku temperaturu i mnogo viši tlak (dinamotermalna metamorfoza), nastat će granatski tinjčev škriljavac, koji se sastoji od kvarca, muskovita, biotita i granata. Mineralni sastav se promijenio, međutim, kemijski sastav šejla, hornfelsa i granatskog tinjčeva škriljca ostao je uglavnom isti.
- **alokemijska** (metamorfozom se mijenja kemijski sastav protolita - metasomatoza)

Kataklastična metamorfoza je kinematička (dinamska) metamorfoza ograničena na gornje dijelove litosfere u blizini rasjeda i tektonskih pokreta gdje djeluje snažni dinamički stres.

Temperatura je relativno niska. Pri malom povećanju usmjerenog tlaka pojedini se mineralni sastojci deformiraju. Pri većem usmjerenom tlaku minerali mijenjaju oblik zbog klizanja duž ploha kalavosti. Krti se minerali pčtinju drobiti kada usmjereni tlak prijede granicu njihove čvrstoće i elastičnosti. Prvi se drobe rubni dijelovi minerala. Daljim porastom usmjerenog tlaka stijena se potpuno mrví u sitne čestice te nastaje nova kataklastična stijena. Premda su

zdrobljene, ostaju zbog visokog tlaka kompaktne i čvrste. Stijene nastale kataklastičnom metamorfozom obično nemaju izraženu folijaciju.

Kontaktna metamorfoza nastaje u stijenama koje dođu u kontaktu s užarenim magmatskim tijelom. Pri toj metamorfozi glavni čimbenik promjena je temperatura, pa prema tome spada u termalne metamorfoze, često se naziva metamorfozom visoke temperature i niskog tlaka. Budući da to zagrijavanje magmom djeluje na usko područje oko magmatskog tijela, to ju karakterizira i kao lokalnu metamorfozu. Plinoviti sastojci magme pri toj metamorfozi obično su dosta aktivni. Glavna karakteristika kontaktne metamorfoze očituje se u cirkularnim metamorfnim zonama koje okružuju magmatsko tijelo. Zone u bližem kontaktu predstavljaju viši metamorfizam, a one udaljenije niži. Stijene izvan aureola nisu pod utjecajem magmatske intruzije. Kontaktna metamorfoza može biti kombinirana s manjim dovođenjem, zamjenom i odvođenjem nekih mineralnih komponenata koje potječu kao plinovite i likvidne emanacije iz magme, prouzrokujući tako poseban tip metasomatoze

Intenzitet tih metamorfoza ovisi o veličini intrudiranoga magmatskog tijela, o brzini hlađenja i o količini plinova i para koje izlaze iz magme. Stupanj i vrsta metamorfoze konačno ovise o strukturi i mineralnom sastavu stijene koja je podložna metamorfozi.

Iz glinenih sedimenata nastaju metamorfne stijene, **hornfelsi**, sastavljeni od minerala kvarca, korunda, rutila, andaluzita, silimanita, muskovita, rompskih piroksena, feldspata, kordijerita, granata, staurolita, diopsida i biotita. Koji će mineral nastati, ovisi o fizičko-kemijskim uvjetima pod kojima se vrši metamorfoza.

Karbonatne stijene, vapnenci i dolomiti, osobito su osjetljive na termalnu metamorfozu. S povećanjem temperature kalcit, odnosno dolomit se lakoćom prekrystalizira, pa nastaju stijene krupnijih zrna, koje zovemo kalcitnim, odnosno dolomitnim **mmamorima**. Akcesorni minerali u vapnencu ulaze pri povišenoj temperaturi s kalcijemskim karbonatom u kemijsku reakciju, i tako nastaju novi minerali, kao volastonit, tremolit, epidot, diopsid, anortit, granat (grosular) itd.:

Pješčenjaci se kontaktnom metamorfozom prekrystaliziraju u **kvarcit**, krupnozrnatu stijenu granoblastične i, vrlo često, šivane strukture.

Hidrotermalna (i pneumatolita) metamorfoza kao tip termalne i lokalne metamorfoze nastaje djelovanjem vrućih vodenih otopina ili hidroterma te plinova i para koji potječu iz magme, cirkuliraju pukotinama protolita i uzrokuju promjene njegova mineralnog i kemijskog

sastava. Hidroterme su često vezane uz magmatsku aktivnost, a ponekad dolaze i iz stijena koje su podvrgnute visokom stupnju metamorfoze.

Medusobno djelovanje mineralnih otopina ili plinova i čvrstih minerala u stijeni uzrokuje metasomatozu jer se zbog migracije iona mijenja kemijski sastav stijene.

Uz hidrotermalnu i pneumatolitu metamorfozu, koje se najčešće ne mogu odvojiti, vezana je autometamorfoza pri kojoj plinovi i pare, preostali nakon kristalizacije magme, djeluju na stijene nastale iz te iste magme.

Metamorfoza sudara ili impaktna metamorfoza nastaje pri udaru meteorita ili drugih svemirskih tijela o Zemljinu površinu te eksplozivnim erupcijama vulkana. Vrlo je kratkoga trajanja, samo nekoliko mikrosekunda, pri čemu djeluje vrlo visok tlak, a ponekad i temperatura, što izaziva taljenje na mjestu udara. Lokalnog je karaktera-

Orogena metamorfoza je dinamo-termalna i regionalna metamorfoza tipična za područja postanka planinskih lanaca duž konvergentnih rubova ploča na kojima stijene rekristaliziraju i strukturno se mijenjaju. Tipična je za veće dubine orogenih pojaseva. U tim su područjima litostatski tlak i stres znatno povišeni, a zbog magmatske aktivnosti temperatura je širokog raspona, između 150 i 1100°C. Često nastaju stijene različitoga stupnja metamorfoze s izraženom folijacijom i škriljavošću (**slejt – filit - tinjčev škriljavac - gnajs; zeleni škriljavac**) ili bez nje (**granulit, eklogit, amfibolit**), a moguće je i mjestimično taljenje (**migmatiti**).

Metamorfoza oceanskoga dna je tip regionalne metamorfoze koji se zbiva se u oceanskoj kori u blizini srednjooceanskih grebena gdje zbog izlivanja velikih količina lave bazičnog sastava nastaju bazalti. Zbog širenja oceanskoga dna stijene se pomiču bočno te prekrivaju područja oceanske kore velika i do nekoliko tisuća km². Temperatura je niska, približno od 150 do 500°C, a tlak je manji od 3 kbara. Nastale stijene ispresijecane su žilama zbog cirkulacije velike količine tople morske vode. Smatraju se metamorfnima iako su zapravo posljedica hidrotermalne izmjene, reakcije nastalih magmatskih stijena i morske vode pri čemu se intenzivno mijenja mineralni i kemijski sastav, ali strukturno-teksturna svojstva ostaju sačuvana.

Metamorfoza tonjenja je niskotemperaturna (do 450°C) regionalna metamorfoza debelih naslaga sedimenata i s njima asociranih interstratificiranih efuzivnih stijena u prostranim sedimentacijskim bazenima u kojima velike količine naslaga dopijevaju na veliku dubinu zbog taloženja novih stijena iznad njih. Nastale metamorfne stijene nemaju izraženu folijaciju i većinom su sačuvane strukture, kao i relikti protolita, jer izmjena mineralnog sastava nije

potpuna. Ovaj tip metamorfoze sličan je procesu dijageneze, pa se ponekad postanak stijene može utvrditi tek mikroskopskim istraživanjem.

2.4.6. Mineralni sastav

U metamorfnim stijenama pojavljuju se minerali koji su isto tako karakteristični i za magmatske stijene. To su npr. feldspati, kvarc, biotit, hornblende, turmalin. Drugi su karakterističniji za metamorfne stijene, iako se pojavljuju i u magmatskim stijenama, to su npr. granati, diopsid, grafit. Neki su pak tipični samo za metamorfne stijene. To su npr. volastonit, andaluzit, sillimanit, disten, kordijerit, talk.

U metamorfnim stijenama nastalim pod utjecajem intenzivnoga usmjerenog tlaka (stresa), stabilni su npr. staurolit, kloritoid, kjanit i granat (tzv. stres minerali). Ti su, dakle, minerali vezani za izrazito škriljave stijene. U stijenama nastalim termalnom metamorfozom, stabilni su andaluzit, kordijerit, augit, hipersten, olivin, kalijski feldspat i anortit (tzv. antistres minerali).

Forsterit - karakterističan je za kontaktnu metamorfozu dolomitnih vapnenaca i dolomita.

Granati - važni indikatori vrste i intenziteta metamorfizma. Grossular (kalcijsko-aluminijski granat) i andradit (kalcijsko-željezni granat) nastaju kontaktnom metamorfozom vapnenačkih sedimenata. Manganski granat, spessartin, jedini je granat koji nastaje najnižim stupnjem dinamotermalne metamorfoze. Almandin (željezno-aluminijski granat) formira se pri srednjem stupnju, a pirop (magnezijsko-aluminijski granat) isključivo pri najvišem stupnju regionalne metamorfoze.

Disten (kjanit), andaluzit i sillimanit, (polimorfne modifikacije Al_2SiO_5) - nastaju metamorfozom glinenih sedimenata u kojima postoji višak aluminija. Kjanit, mineral s najgušćim slaganjem u ovoj polimorfnoj skupini, nastaje pod uvjetima vrlo visokog tlaka; andaluzit nastaje termalnom metamorfozom; sillimanit ima široko polje stabiliteta, pa je među njima najčešći mineral. Vrlo je karakterističan za kontaktnu metamorfozu, a nastaje u neposrednom kontaktu pelitnih (sitnozrnatih) sedimenata s intruzivom.

Staurolit - karakterističan za regionalnom metamorfozom nastale tinjčeve škriljce u kojima se često pojavljuje u obliku velikih porfiroblasta.

Melilit, $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$ - nastaje u kontaktnometamorfnim mramorima.

Cordierit - naročito je značajan u hornfelsima kao kontaktni mineral. Sa sillimanitom i granatima nalazi se u mnogim metamorfnim stijenama. Makroskopski se poznaje po svojoj plavkastoj boji.

Turmalin - nastaje regionalnom metamorfozom pri niskoj temperaturi, npr. u filitima. Vrlo je čest kao pneumatolitski mineral kada bor potječe iz magmatske taljevine.

Wollastonit - nalazi se uglavnom u mramorima kao tipični kontaktni mineral. Kako temperatura njegova postanka ostaje gotovo ista i pri vrlo visokim tlakovima, on može poslužiti kao geološki termometar.

Neki pirokseni, kao **jadeit i omfacit** i neki amfiboli, kao **antofilit, cummingtonit, tremolit, aktinolit i glaukofan** tipični su minerali metamorfnih stijena. Općenito uzevši, amfiboli nastaju metamorfozama pri niskoj i umjereno visokoj temperaturi, a pirokseni pri srednjoj temperaturi. Nalaze se u kontaktnim i regionalno metamorfnim stijenama. Aktinolit, npr., nastaje kontaktnom i regionalnom metamorfozom niskog stupnja, a diopsid nastaje kao kontaktni mineral pri visokoj temperaturi, ali ga nalazimo u kalcijem i magnezijem bogatim škriljcima niskog stupnja metamorfoze. Hipersten je često kontaktni mineral, ali ga nalazimo i u regionalnometamorfnoj seriji.

Minerali s plošnim vezom, **muskovit, biotit, klorit i talk**, vrlo su rašireni u metamorfnim stijenama.

Kvarc – sveprisutni mineral, nalazimo ga u svim tipovima stijena, pa tako i u mnogim metamorfnim.

Plagioklasi - mogu biti indikator za stupanj metamorfoze. Albit se nalazi u metamorfnim stijenama niskog stupnja. S povećanjem stupnja metamorfoze povećava se količina kalcija u plagioklasima, pa su tako u stijenama nižeg stupnja metamorfoze plagioklasi kiseli, a u stijenama višeg stupnja metamorfoze bazičniji. Najbazičniji plagioklasi vezani su za metamorfozirane vapnenačke stijene.

Od kalijskih feldspata, **mikroclin** je češći od **ortoklasa**.

Kalcit i dolomit - nalaze se u mramorima i dolomitskim mramorima.

U manjim se količinama u metamorfnim stijenama javljaju **grafit, spinel, korund, magnetit, hematit, brucit i periklas**.

2.4.7. Metamorfni facijesi

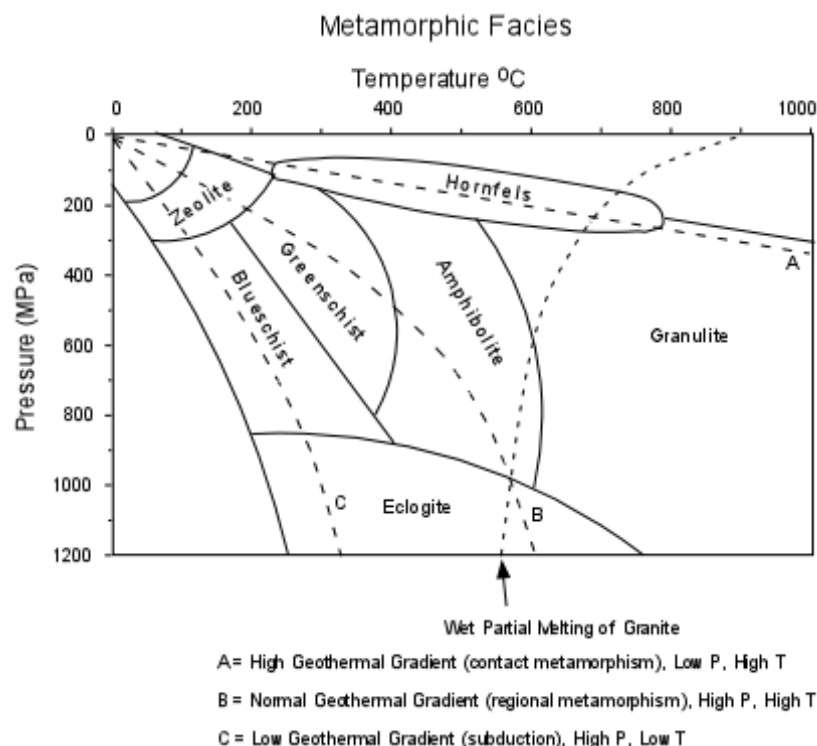
Općenito, metamorfne stijene ne mijenjaju značajno kemijski sastav tijekom metamorfizma, osim u specijalnim slučajevima kada su uključeni metasomatski procesi. Nasuprot tome, promjene mineralnog sastava usljed promjena temperature i tlaka dešavaju se gotovo u pravilu. Stoga, asocijacije minerala utvrđene u određenoj metamorfnoj stijeni predstavljaju jasan pokazatelj tlaka i temperature okoliša u kojoj je ta stijena nastajala. Taj raspon tlaka i temperature okoliša u kojem nastaju određene metamorfne stijene naziva se **metamorfni facijes**. To je slično konceptu sedimentnog facijesa, koji također predstavlja skup okolišnih uvjeta, ali prisutnih tijekom taloženja, a ne metamorfizma. Slijed metamorfnih facijesa, uočenih na bilo kojem metamorfnom terenu, ovisi o geotermalnom gradijentu koji je bio prisutan tijekom metamorfizma. **Zeolitni facijes, prehnit-pumpeleitni facijes, facijes zelenih škriljavaca, amfibolitni facijes, granulitni facijes, eklogitni facijes, facijes plavih škriljavaca** (tabela10) karakteristični su facijesi regionalnog metamorfizma.

FACIJES	PROTOLIT		
	šejl, pješčenjak	vapnenac	bazalt, andezit
Zeolitni facijes 100 - 200°C	smektit/klorit, kalcit	kalcit	zeoliti (laumontit, thomsonit), smektit/klorit, kalcit
Prehnit-pumpeleitni facijes 150 - 300°C	prehnit, pompeleit, kalcit, klorit, albit	kalcit	prehnit, pompeleit, kalcit, klorit, albit
Facijes zelenih škriljavaca 300 - 450°C	muskovit, klorit, kvarc, albit, biotit, granat	kalcit, dolomit, kvarc, epidot, tremolit	albit, klorit, kvarc, epidot, aktinolit, titanit
Epidot-amfibolitni facijes 450 - 550°C	muskovit, kvarc, albit, biotit, granat	kalcit, diopsid, kvarc, epidot, tremolit	albit, epidot, hornblenda, kvarc
Amfibolitni facijes 500 - 700°C	granat, biotit, muskovit, kvarc, plagioklas, staurolit, kijenit ili silimanit	kalcit, diopsid, kvarc, wolastonit	hornblenda, plagioklas, granat, kvarc, titanit, biotit
Granulitni facijes 700 - 900°C	granat, K-feldspat, silimanit ili kijenit, kvarc, plagioklas, hipersten	kalcit, kvarc, plagioklas, diopsid, hipersten	plagioklas, augit, hipersten, hornblenda, granat, olivin
Facijes plavih škriljavaca 150 - 350°C P>5-8 kb	jadeit, albit, kvarc, lawsonit*, paragonit	aragonit, bijeli tinjac	glaukofan, albit, lawsonit, titanit, ± granat
Eklogitni facijes 350 - 750°C P>8-10 kb	coesit, K-feldspat, silimanit, plagioklas	aragonit, kvarc, plagioklas, diopsid, hipersten	omfacit (piroksen), pirof (granat)

*lawsonit – kalcijsko-aluminijski sorosilikat s vodom, $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$

Tabela 10 Mineralni sastav ovisno o protolitu i tipu metamorfnog facijesa, odnosno stupnju metamorfizma

Geotermalni gradijent je stopa porasta temperature s povećanjem dubine ispod Zemljine površine. Normalni geotermalni gradijent iznosi 25-30°C/km. Visoki geotermalni gradijent (crtkana linija A na slici 49) prisutan npr. oko intruzija magme rezultira stvaranju metamorfnih stijena koje pripadaju **hornfels facijesima (albit-epidot hornfels, hornblenda hornfels, piroksen hornfels facijes)** koje karakterizira visoka temperatura i niski tlakovi. U uvjetima normalnog geotermalnog gradijenta (crtkana linija B, sl.49), stijene će progresivno napredovati od zeolitnog facijesa, facijesa zelenih škriljavaca, amfibolitnog facijesa do granulitnog facijesa kako raste stupanj metamorfizma. Facijes zelenih škriljavaca, amfibolitni i granulitni facijes se često razmatraju kao facijesi srednjih tlakova. U uvjetima niskog geotermalnog gradijenta (crtkana linija C, sl.49) te promjene će ići od zeolitnog facijesa, facijesa plavih škriljavaca do eklogitnog facijesa. Facijes plavih škriljavaca i eklogitni facijes nazivaju se još i facijesi visokih tlakova. To znači da, ako znamo facijes metamorfnih stijena u određenom području, možemo utvrditi kakav je morao biti geotermalni gradijent u vrijeme kada se metamorfizam dogodio.



Sl. 49 P-T dijagram koji pokazuje granice facijesa. A) crtkana linija A pokazuje visoki geotermalni gradijent, linija B normalni, a linija C niski geotermalni gradijent. Granice facijesa su približne i postupne.

2.4.8. Klasifikacija metamorfnih stijena

Metamorfne stijene su klasificirane prema strukturi, teksturi i sastavu (mineralnom ili kemijskom). Za razliku od klasifikacije magmatskih stijena razmjerno je malo naziva i strogih klasifikacijskih shema te je zato dozvoljena određena fleksibilnost.

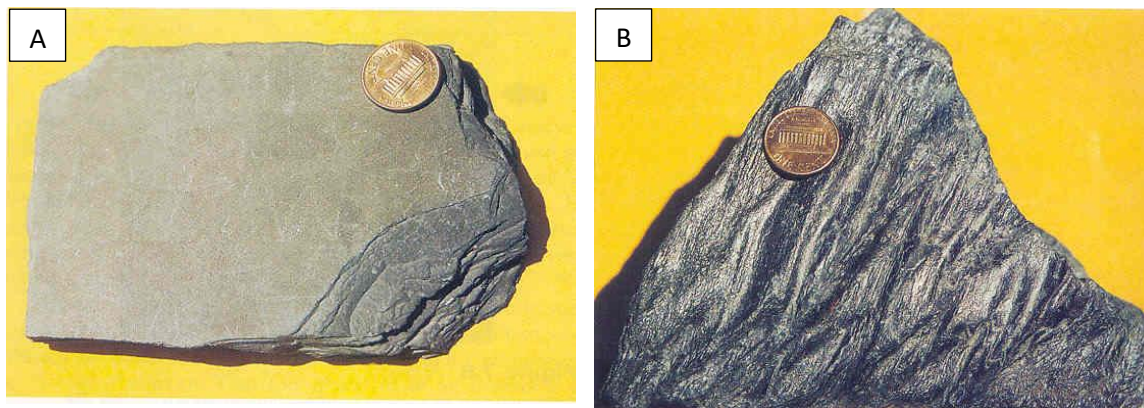
Naziv stijene mora sadržavati informaciju o stijeni i razlikovati je od ostalih stijena, a može obuhvatiti: protolit, strukturu/teksturu stijene, mineralnu zajednicu, vrstu metamorfizma.

Zapravo, naziv stijene ovisi o tome što želimo naglasiti, npr. hornblenda škriljavac (teksturni aspekt i dominantan mineral), amfibolit (metamorfni stupanj i mineralna zajednica), metabazalt (porijeklo stijene).

Stijene koje pokazuju škriljavost ili folijaciju:

Slejt je kompaktna, sitnozrnata metamorfna stijena s dobro razvijenom folijacijom. Svježe plohe folijacije su bez sjaja (sl. 50A)

Filit je škriljava metamorfna stijena u kojoj sitni filosilikati (sericit i/ili klorit) na svježe odkalanoj plohi daju svilenkast sjaj (sl. 50B). Pokazuju folijaciju.



Sl. 50 A) Slejt; B) filit

Škriljavci su metamorfne stijene koje pokazuju škriljavost. Ovdje je potrebno spomenuti da se pojam škriljavost u općoj upotrebi ograničava na one metamorfne stijene kod kojih su minerali vidljivi golim okom.

Gnajs je metamorfna stijena koja pokazuje specifičnu gnajnsnu teksturu. Ona se sastoji od "slojeva" izmjene leukokratskih i melanokratskih minerala, što stijeni daje vrpčast izgled.



Sl. 51 A) tinjčev škriljavec s granatima (kuglasta zrna); B) gnajs s jasno vidljivom trakastom teksturom koja se očituje u izmjeni leukokratskih i melanokratskih minerala

Stijene bez preferirane orijentacije minerala:

Granofels je zajednički termin za sve izotropne stijene odnosno stijene bez preferirane orijentacije. One se ne kalaju pri udarcu čekićem.

Hornfels je vrsta granofelsa koja je sitnozrnata i kompaktna, a javlja se u kontaktnim aureolama.

Mramor je metamorfna stijena koja u mineralnom sastavu ima pretežno kalcit i/ili dolomit, a čiji je protolit bila vapnenačka ili dolomitna sedimentna stijena (sl. 52A).

Kvarcit je metamorfna stijena u čijem mineralnom sastavu prevladava kvarc. Protolit je bio pješčenjak (sl. 52B).



Sl. 52 A) Mramor – stijena granoblastične strukture i homogene teksture; B) kvarcit, homogena stijena granoblastične strukture

Specifične metamorfne stijene:

Zeleni škrljavec je metamorfna stijena niskog stupnja koja sadrži klorit, aktinolit, epidot (ti minerali daju joj zelenu boju) i albit (sl. 53A). Protolit je mafitna magmatska stijena ili grauvaka.

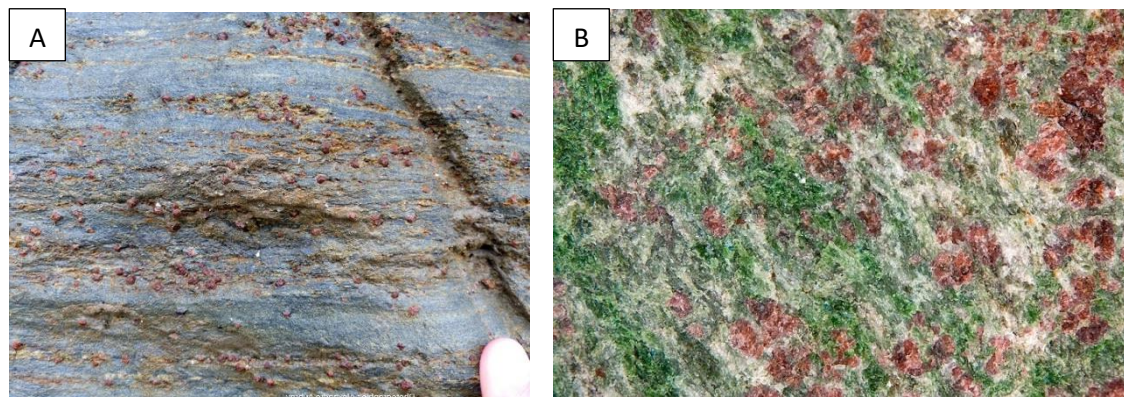
Amfibolit označava metamorfnu stijenu koja sadrži hornblendu i plagioklas (sl. 53B). Može i ne mora imati škrljavost, a prisutna je lineacija. Protolit je mafitna magmatska stijena ili grauvaka.



Sl. 53 A) Zeleni škrljavec; B) amfibolit (tamna zrna – hornblenda, bijela zrna – plagioklasi)

Plavi škrljavec sadrži plave amfibole, uglavnom glaukofan (sl. 54A). Nastao je iz mafitne magmatske stijene ili grauvake pod visokim tlakom. Njegova pojava karakteristična je za drevne subdukcijske zone.

Eklogit sadrži zeleni klinopiroksen (omfacit) i granat (crveno-smeđi pirop), često dolazi i plavkasti kjanit (disten)(sl. 54B). Ne pokazuje nužno uvijek jasnu škrljavost. Protolit je bio bazaltnog sastava.



Sl. 54 A) Plavi škrljavec (plavo - glaukofan, crveno – granat; B) eklogit (zeleno – omfacit, crveno – granat, bijelo - kvarc)

Serpentinit je ultramafitna stijena metamorfozirana u niskom stupnju metamorfizma, izgrađena uglavnom od serpentina (više varijeteta: krizotil, antigorit, lizardit).

Skarn je kontaktno metamorfozirana i Si-metasomatozirana karbonatna stijena koja sadrži Ca-Si minerale poput grosulara, epidota, tremolita, vezuvijanita...

Graizen je kontaktnometamorfozirana stijena nastala iz granita.

Granulit je metamorfna stijena visokog stupnja, čija ishodišna stijena može biti pelitni, mafitni ili kvarcnofeldspatski protolit, dominantno sastavljen od bezvodnih minerala, plagioklasa i ortopiroksena.

Migmatit je heterogena silikatna stijena (na 1-10 cm skali) koja sadrži tamni gnajnsni matriks (melanosom) i svijetli feldsični dio (leukosom).

3. Literatura

- Blatt, H. & Tracy, R.J. (1996): Petrology. Igneous, Sedimentary and Metamorphic.- W.H. Freeman and co., 529 str.
- Klein, C. & Hurlbut, C.S. (1999): Manual of mineralogy. John Wiley & Sons, Inc., New York, 596 str.
- Plummer, Ch. C., McGeary, D. & Carlson, D. H. (2001): Physical Geology. Mc Graw Hill, New York, San Francisco, 574 str.
- Tajder, M., Herak, M. (1972): Petrologija i geologija. Školska knjiga, Zagreb, 356 str.
- Thompson, G. R. & Turk, J. (1999): Earth Science and the Environment. Saunders College Publishing, Fort Worth, Philadelphia, San Diego, New York, 589 str.
- Tišljar, J. (2001): Sedimentologija karbonata i evaporita. Institut za geološka istraživanja, Zagreb, 375 str.
- Tišljar, J. (2004): Sedimentologija klastičnih i silicijskih taložina. Institut za geološka istraživanja, Zagreb, 426 str.
- Tucker, M.E. (2001): Sedimentary Petrology.-Blackwell Sci. Publ, Oxford, 261 str. prijevod Medunić, G. (2008): Petrologija sedimenata.-AZP Grafis, Samobor, 261 str.
- Vrkljan, M. (2012): Uvod u mineralogiju i petrologiju. Sveučilište u Zagrebu. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb, 201 str.

4. DODATAK

4.1. Pregled najvažnijih petrogenih minerala i njihovih svojstava

SILIKATI

Nezosilikati

✧ **olivin, $(\text{Mg, Fe})_2\text{SiO}_4$**

- **kristalizacija:** romp. (2/m 2/m 2/m); **K:** nema; **L:** školjkast; **T:** 6 ½ - 7; **G:** 3.27 - 4.37 (povećava se s povećanjem udjela Fe); **S:** staklast; **B:** svijetlo žuto-zelena do maslinastozelena (forsterit), tamnija, smeđe-zelena (fajalit)
- lako prelazi u serpentin $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
- svjetlija boja od magnezija, tamnija od željeza
- prvi mineral koji kristalizira u stijenama s relativno niskim udjelom silicija
- najčešće u mafitnim i ultramafitnim magmatskim stijenama kao što su bazalt i peridotit; vlastita stijena: dunit (>90% čistog olivina)
- forsterit - u okolišima siromašnim ili vrlo siromašnim silicijem, uključujući metamorfozirane vapnence i dolomite; fajalit - u silicijem bogatijim uvjetima
- niske temperature uz prisutnost vode - hidrotermalne alteracije u serpentin, talk, klorit ili magnetit
- često dolaze u asocijacijama s piroksenima, spinelima i granatima - tada se mogu koristiti kao geotermometri jer su raspodjele elemenata između dviju koegzistentnih faza ovisne o temperaturi kristalizacije
- česti u asocijaciji s primarnim sulfidima

✧ **granati**

- **kristalizacija:** kub. (4/m $\bar{3}$ 2/m); **K:** nema; **L:** školjkast; **T:** 6 ½ - 7 ½; **G:** 3.5 - 4.3; **S:** staklast, **B:** crvena, smeđa, žuta, bijela, zelena, crna, bijeli ogreb
- **pirop, $\text{Mg}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$** - tamno crven do crn, dolazi u ultrabazičnim stijenama (peridotit, kimberliti)
- **almandin, $\text{Fe}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$** - smeđe-crven, tipični granat srednjeg do visokog stupnja regionalnog metamorfizma, nalazi se u škriljavcima i gnajsima nastalim uglavnom iz pelitnih sedimenata; rijetko i u nekim granitima i riolitima
- **spessartin, $\text{Mn}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$** - smeđ do crven - dolazi u skarnovima (bogatim sa Mn), granitski pegmatiti, tinjčevi škriljavci
- **grossular, $\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$** - bijeli, zelen, žut, smeđ, svijetlo crven - dolazi u kontaktnim ili regionalnim metamorfozama nečistih vapnenaca
- **andradit, $\text{Ca}_3\text{Fe}_2(\text{SiO}_4)_3$** - žuta, zelena, smeđa, crna - dolazi u nečistim Si-vapnencima
- **uvarovit, $\text{Ca}_3\text{Cr}_2(\text{SiO}_4)_3$** - smaragdno zelen - dolazi u serpentinitima, s kloritoidima
- granati hidrotermalno alteriraju u klorite, epidot i tinjce
- produkti alteracije (kelfit) stvaraju često ovoje oko zrna granata - kelfitski ovoje

✧ **cirkon, ZrSiO_4**

- **kristalizacija:** tetr. (4/m2/m2/m); **K:** slaba po {010}; **T:** 7 ½; **G:** 4.68; **S:** dijamantan; **B:** obično neka od nijansi smeđe, bezbojan, siv, zelen, crven; bezbojan ogreb
- uobičajeni akcesorni mineral u kiselim i neutralnim eruptivnim stijinama tipa granita i sijenita - tu kristalizira među prvima i zato se često u obliku sitnih kristala nalazi kao uklopak u svim drugim mineralima u stijeni; vrlo čest u nefelinskim sijenitima
- relativno krupni kristali mogu se naći u pegmatitima
- cirkonija - kubično stabilizirani ZrO_2 , koristi se u draguljarstvu kao jedna od imitacija dijamanta

✧ **Grupa sillimanita-andaluzita-kianita**

- sillimanit nastaje pri visokim temperaturama, kjanit pri visokim tlakovima, a andaluzit pri niskim tlakovima i temperaturama
- trojna točka stabilnosti svih triju modifikacija: ~600°C i tlak 5,5 kbar
- tipični metamorfni minerali, pojavljuju se u karakterističnim uvjetima
- prijelaz andaluzita u sillimanit može poslužiti kao geotermometar tj. za određivanje temperature metamorfizma u uvjetima relativno niskog tlaka

✧ **sillimanit, Al_2SiO_5**

- **kristalizacija:** romp. (2/m 2/m 2/m); **K:** savršena po {010}; **T:** 6 - 7; **G:** 3.2; **S:** staklast; **B:** smeđa, svijetlo zelena, bijela
- dolazi u visokotemperaturnim metamorfozama glinovitih stijena, u regionalno metamorfnim stijinama može se naći u metapelitima

✧ **andaluzit, Al_2SiO_5**

- **kristalizacija:** romp. (2/m 2/m 2/m); **K:** dobra po {110}; **T:** 7 ½; **G:** 3.2; **S:** staklast; **B:** crvenkasta, smečkasta, maslinastozelena, varijetet ima u sebi tamne uklopke ugljika u formi križa
- tipična pojava u kontaktnim aureolama magmatskih intruzija u glinovite stijene, može doći i sa sillimanitom ili kjanitom u regionalnim metamorfozama, ponekad u granitima i pegmatitima

✧ **kjanit, Al_2SiO_5**

- **kristalizacija:** trikl. ($\bar{1}$); **K:** savršena po {100}; **T:** 5 - paralelno s izduženošću, 7 - okomito na izduženje; **G:** 3.5; **S:** staklast do biseran; **B:** obično plava, često tamnija prema središtu kristala
- tipičan mineral škriljavaca i gnajseva nastalih regionalnom metamorfozom glinovitih sedimenata, često s granatima, staurolitom, korundom, dolazi i u eklogitima i kimberlitima (s piroksenima), nađen i u pegmatitskim i kvarcnim žilama

✧ **topaz, $\text{Al}_2\text{SiO}_4(\text{F}, \text{OH})_2$**

- **kristalizacija:** romp. (2/m 2/m 2/m); **K:** savršena po {001}; **T:** 8; **G:** 3.5; **S:** staklast; **B:** karakterističan mineral pegmatita - nastaje iz para bogatih fluorom koje se oslobađaju u zadnjim stadijima očvršćivanja silicijem bogatih magmatskih stijena, nalazi se u šupljinama riolitnih lava i granita; asocijacije s turmalinom, kasiteritom, apatitom, fluoritom, berilom, kvarcom, tinjcima i feldspatima

- ✧ **staurolit, $\text{Fe}_2\text{Al}_9\text{O}_6(\text{SiO}_4)_4(\text{O}, \text{OH})_2$**
 - **kristalizacija:** monokl. (2/m); **T:** 7 - 7 ½; **G:** 3.65 - 3.75; **S:** staklast kad je svjež, bez sjaja ili zemljast kada je izmijenjen ili nečist; **B:** crveno-smeđ do smeđe-crno
 - produkt regionalnog metamorfizma
 - nalazi se kao porfiroblast u škriljavcima i gnajsima, često u asocijaciji s granatima i kijanitom
- ✧ **kloritoid, $(\text{Fe}, \text{Mg})_2\text{Al}_4\text{O}_2(\text{SiO}_4)_2(\text{OH})_4$**
 - **kristalizacija:** monokl. (2/m); **K:** dobra po {001}; **T:** 6 ½; **G:** 3.5 - 3.8; **S:** biseran; **B:** tamnozelen, zelenkasto-siv, često travnato zelen
 - obično nastaje u ranom stadiju regionalnog metamorfizma niskog do srednjeg stupnja iz sedimenata bogatih s Fe
 - obično dolazi kao porfiroblast u asocijacijama s muskovitom, kloritom, staurolitom, granatom i kijanitom

Sorosilikati

Grupa epidota

- serija kloritoid-epidot

- ✧ **epidot, $\text{Ca}_2(\text{Al}, \text{Fe})\text{Al}_2(\text{SiO}_4)(\text{Si}_2\text{O}_7)\text{O}(\text{OH})$**
 - **kristalizacija:** monokl. (2/m); **K:** savršena po {001} i nesavršena po {100}; **T:** 6 - 7; **G:** 3.3; **S:** staklast; **B:** pistacija-zelena do žuto-zelena, crna
 - dolazi u regionalno metamorfnim uvjetima epidot-amfibolskog facijesa; karakterističan u aktinolit-albit-epidot-kloritnoj asocijaciji facijesa zelenih škriljavaca; niskotemperaturne metasomatoze u nekim granitnim stijenama (epidotizacija)
 - nalazi se i u vezikulama i žilama u bazičnim lavama, često s kalcitom i kloritima
 - važan sastojak spilita
 - uobičajen je i u metamorfoziranim vapnencima gdje se nalazi s kalcijevim granatima, vezuvijanom i kalcitom
- ✧ **zoisit, $\text{Ca}_2\text{Al}_3(\text{SiO}_4)(\text{Si}_2\text{O}_7)\text{O}(\text{OH})$**
 - **kristalizacija:** romp. (2/m2/m2/m); **K:** savršena po {001} i slaba po {100}; **T:** 6; **G:** 3.35; **S:** staklast; **B:** zelena, zeleno-smeđa
 - uglavnom u metamorfnim stijenama, osobito u amfibolitima
 - u bazičnim eruptivima kao produkt alteracije Ca-silikata zajedno s epidotom, Ca-granatima, aktinolitom...
 - prozirni kristali nalaze se u hidrotermalnim žilama

Ciklosilikati

- ✧ **cordierit, $(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18} \times n\text{H}_2\text{O}$**
 - **kristalizacija:** romp. (2/m2/m2/m); **K:** slaba po {010}; **T:** 7 - 7 ½; **G:** 2.60 - 2.66; **S:** staklast; **B:** razne varijacije plave do plavo-sive
 - tipični metamorfn mineral
 - kontaktnometamorfne stijene (naročito hornfelsi), stijene visokog stupnja regionalnog metamorfizma (škriljavci, gnajsi, granuliti), mafitni eruptivi, graniti

- pojavljuje se zajedno sa silimanitom, muskovitom, biotitom, kalisjkim feldspatima, korundom, spinelima, granatima i andaluzitom

✧ **Grupa turmalina, $(\text{Na}, \text{Ca})(\text{Li}, \text{Mg}, \text{Al})_3(\text{Al}, \text{Fe}, \text{Mn})_6(\text{BO}_3)_3(\text{Si}_6\text{O}_{18})(\text{OH})_4$**

- dominantno pneumatolitski minerali
- nalaze se u granitima, grajzenima, granitskim pegmatitima i kvarcnim žilama asociranim s granatima
- kao akcesorni minerali nalaze se i u škriljavcima i gnajsima
- turmalinski granit - djelovanjem pneuma koje potječu iz granitske magme i koje uz ostale volatilne komponente sadrže bor, iz feldspata u granitu mogu nastati veće količine turmalina
- u granitima, škriljavcima i gnajsevima obično su zelenocrni do crni (schorl); u pegmatitima zeleni ili ružičasti (elbait)
- dolaze u zajednici s kvarcom, albitom, lepidolitom, mikroklinom, granatima, muskovitom, dolomitom, epidotom, fluoritom, titanitom, berilom, apatitima i spodumenom

✧ **turmalin, $(\text{Na}, \text{Ca})(\text{Li}, \text{Mg}, \text{Al})_3(\text{Al}, \text{Fe}, \text{Mn})_6(\text{BO}_3)_3(\text{Si}_6\text{O}_{18})(\text{OH})_4$**

- **kristalizacija:** hex. (3m); **K:** nema; **L:** školjkast; **T:** 7 - 7 ½; **G:** 3.1; **S:** staklast do smolast; **B:** tamna, zavisi o sastavu
- najčešće dolazi u granitnim pegmatitima, također i kao akcesorni mineral u magmatskim i metamorfnim stijenama; pegmatitske asocijacije: mikroklin, albit, kvarc, muskovit

Inosilikati

Pirokseni

- važni petrogeni minerali - u nizu stijena su glavni minerali, a pirokseniti su sastavljeni pretežno samo od piroksena
- prema sustavu u kojem kristaliziraju razlikuju se: ortopirokseni (rompski) i klinopirokseni (monokliniski)
- pirokseni pokazuju kuteve između ploha kalavosti pod ~93°

✧ **enstatit-ferosilitna serija, $(\text{Mg}, \text{Fe})\text{SiO}_3$**

- **kristalizacija:** romp. (2/m 2/m 2/m); **K:** dobra po {210}, često lučenja po {100}; **T:** 5 ½ - 6; **G:** 3.4; **S:** staklast do biseran na plohama kalavosti; **B:** sivkasta, žuta, zelenkasto-bijela, maslinasto zelena, smeđa
- Mg-bogati ortopirokseni česti su sastojci peridotita, gabra, norita i bazalta i često su u asocijaciji sa Ca-klinopiroksenima, olivinom, plagioklasima; često i u metamorfnim granulitnim facijesima (visoki P i T)
- ortopirokseni često pokazuju eksolucijske lamele Ca-bogatih piroksena
- grade i vlastite stijene - piroksenite
- ima ih u zajednicama s olivinima, flogopitom, klinopiroksenima, spinelima i granatima (pirop)
- uobičajene su korone oko olivina u kontaktu s plagioklasima u kojima nastaju srasli pirokseni i spineli u bazičnim i ultrabazičnim stijenama
- djelovanjem hidrotermalnih otopina ortopirokseni prelaze najčešće u serpentine
- ortopirokseni su obično češće alterirani od augita koji je s njima asociran

- ✧ **pigeonit, $\text{Ca}_{0.25}(\text{Mg, Fe})_{1.75}\text{Si}_2\text{O}_6$**
 - **kristalizacija:** monokl. (2/m); **K:** dobra po {110}, lučenje po {100} može biti prisutno; **T:** 6; **G:** 3.30 - 3.46; **B:** smeđa, zelenkasto-smeđa do crna
 - nalazi se u brzo hlađenim magmatskim stijenama, najčešće u andezitima i dacitima, rjeđe u bazaltima
 - u efuzivima je obično u malim fenokristalima ili u malim zrnima osnove
 - često dolaze kao korone oko zrna olivina i ortopiroksena
- ✧ **diopsid ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$) - hedenbergitna ($\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$) serija**
 - **kristalizacija:** monokl. (2/m); **K:** nesavršena po {110}, često lučenja po {001}; **T:** 5 - 6; **G:** 3.3; **S:** staklast; **B:** bijela do svijetlo zelena (ovisi o povećanju udjela Fe)
 - diopsid - karakterističan za termalno metamorfozirane, silicijem obogaćene dolomitične stijene; nalazi se i u škrljajcima bogatim kalcijem i magnezijem nastalima regionalnom metamorfozom ili eruptivnih ili sedimentnih stijena
 - hedenbergit - u metamorfoziranim sedimentima bogatim željezom i u skarnovima, nađen i u nekim kvarcisenitima i gabrima bogatim željezom
- ✧ **augit, $(\text{Ca, Na})(\text{Mg, Fe, Al})(\text{Si, Al})_2\text{O}_6$**
 - član diopsid - hedenbergitne serije → **kristalizacija:** monokl. (2/m); **K:** nesavršena po {110}, često lučenja po {001}; **T:** 5 - 6; **G:** 3.3; **S:** staklast; **B:** bijela do svijetlo zelena (ovisi o povećanju udjela Fe)
 - najčešći piroksen i važan petrogeni mineral - vjerojatno najrasprostranjeniji Mg-Fe mineral magmatskih stijena
 - uglavnom dolazi u tamnim magmatskim st. kao što su bazaltne lave i intruzivi, gabri, peridotiti i andeziti
 - kemijski zonirani augiti česti su u naglo hlađenim stijenama, tipa bazalta s Mjeseca
 - subkalcijski augiti karakteristični su za brzo hlađenje magme i nalaze se gotovo isključivo u bazaltima i andezitima
 - titanov augit - tipični klinopiroksen bazičnih alkalijskih stijena
 - u metamorfnim stijenama augit je manje čest, a nalazi se u nekim granulitima i čarnokitima i drugim stijenama visokog stupnja metamorfizma
 - u mnogim bazičnim stijenama augit je često pneumatolitskom aktivnošću djelomično ili potpuno alteriran u svijetlozeleni amfibol koji nazivaju uralit (obično aktinolitni amfibol)
 - uobičajeni produkt alteracije augita je i klorit, a manje česti produkti alteracija su i epidot i kalcit
- ✧ **jadeit, $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$**
 - **kristalizacija:** monokl. (2/m); **K:** {110}, vrlo čvrst, teško se lomi; **T:** $6\frac{1}{2}$ - 7; **G:** 3.4; **S:** staklast, biseran na pl. kalavosti; **B:** svijetlo do smaragdno zelena, bijela
 - pri povišenim tlakovima i temperaturama nastaje iz nefelina i albita:

$$\text{NaAlSiO}_4 + \text{NaAlSi}_3\text{O}_8 \leftrightarrow \text{NaAlSi}_2\text{O}_6$$
 - dolazi jedino u metamorfnim stijenama (visoki P i niska T) - takvi uvjeti postoje na rubovima kontinentske kore
- ✧ **spodumen, $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$**
 - **kristalizacija:** monokl. (2/m); **K:** {110}, obično dobro vidljivo lučenje po {100}; **T:** $6\frac{1}{2}$ - 7; **G:** 3.15 - 3.20; **S:** staklast; **B:** bijela, siva, ružičasta, žuta, zelena

- mineral granitskih pegmatita, bogat litijem, u kojima je asociran s lepidolitom, berilom, petalitom, turmalinima, albitom i kvarcom

Piroksenoidi

✧ wollastonit, CaSiO_3

- **kristalizacija:** trikl. ($\bar{1}$); **K:** savršena po $\{100\}$ i $\{001\}$, dobra po $\{\bar{1}01\}$; **T:** 5 - 5 ½; **G:** 2.8 - 2.9; **S:** staklast, biseran na pl. kalavosti, može biti svilenkast na fibroznom agregatu; **B:** bezbojan, bijel, siv
- uglavnom se pojavljuje u kontaktnim metamorfozama u vapnencima, gdje nastaje reakcijom kalcita i kvarca: $\text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{CaSiO}_3 + \text{CO}_2$
- asocijacije s kalcitom, diopsidom, andraditom, grosularom, tremolitom, plagioklasima, vezuvijanitom i epidotom
- progresivni metamorfizam Si-dolomita: talk $\rightarrow$ tremolit $\rightarrow$ diopsid $\rightarrow$ forsterit $\rightarrow$ wollastonit $\rightarrow$ periklas $\rightarrow$ monticelit

✧ rodonit, MnSiO_3

- **kristalizacija:** trikl. ($\bar{1}$); **K:** savršena po $\{110\}$ i $\{1\bar{1}0\}$; **T:** 5 ½ - 6; **G:** 3.5; **S:** staklast; **B:** rozo-crvena, ružičasta, smeđa, često prevučen tamnim Mn-oksidiom
- dolazi u manganskim naslagama i Mn-bogatim željeznim formacijama, a kao rezultat metamorfne i često metasomatske aktivnosti - može nastati reakcijom od rodokrozita:
$$\text{MnCO}_3 + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{MnSiO}_3 + \text{CO}_2$$
- nalazi se i u hidrotermalnim žilama

Amfiboli

- važni petrogeni minerali, glavni minerali brojnih stijena
- iza feldspata su, uz piroksene, najobilniji minerali u Zemljinoj kori
- također kristaliziraju u monoklinskom i rompskom sustavu
- razlika od piroksena - prema kutevima među plohama kalavosti koji iznose $\sim 124^\circ$

✧ antofilit, $(\text{Mg}, \text{Fe})_7\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$

- **kristalizacija:** romp. (2/m 2/m 2/m); **K:** savršena po $\{210\}$; **T:** 5 ½ - 6; **G:** 2.85 - 3.2; **S:** staklast; **B:** siva do zelena, smeđa i bež
- dolazi metamorfnim stijenama srednjeg stupnja metamorfizma bogatim magnezijem; čest i u kordieritnim škriljancima i gnajsevima

✧ cummingtonitna serija: **cummingtonit**, $\text{Fe}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ - **grunerit**, $\text{Fe}_7\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$

- **kristalizacija:** monokl. (2/m); **K:** savršena po $\{110\}$; **T:** 5 ½ - 6; **G:** 3.1 - 3.6; **S:** svilenkast (vlaknast); **B:** razne nijanse svijetlo smeđe
- cummingtonit - sastojak regionalno metamorfnih stijena, pojavljuje se i u amfibolitima, često dolazi uz hornblende i aktinolit
- grunerit - karakterističan za metamorfozirane željezne formacije
- pri progradnom metamorfizmu prelaze u ortopiroksene ili minerale olivinske serije

✧ tremolitna serija: **tremolit**, $\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ - **aktinolit**, $\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$

- **kristalizacija:** monokl. (2/m); **K:** savršena po {110}, kut = 56°; **T:** 5 - 6; **G:** 3.0 - 3.3; **S:** staklast, često sa svilenkastim presijavanjem na plohama prizme; **B:** bijela do zelena (aktinolit)
 - nižetemperaturni metamorfni minerali
 - važni su sastojci raznih škriljavaca (zeleni škriljavci, kloritni škriljavci, aktinolitni škriljavci), nalaze se u kontaktnim zonama eruptivnih i karbonatnih stijena (vapnenaca, dolomita), te u alteriranim ultrabazičnim stijenama zajedno s talkom
 - tremolit - dolazi najčešće u metamorfoziranom dolomitičnim vapnencima:

$$5 \text{ CaMg}(\text{CO}_3)_2 + 8 \text{ SiO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2 + 3 \text{ CaCO}_3 + 7 \text{ CO}_2,$$

pri višim temperaturama je nestabilan i prelazi u diopsid
 - aktinolit - karakterističan za facijes zelenih škriljavaca, dolazi i u glaukofanskim škriljancima gdje je u asocijacijama sa kvarcom, epidotom, glaukofanom...
 - minerali ovog niza mogu alterirati u klorit ili u karbonate, tremolit ponekad alterira u talk
- ✧ **hornblenda, $(\text{Ca}, \text{Na})_{2-3}(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})_5\text{Si}_6(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_{22}(\text{OH})_2$**
- **kristalizacija:** monokl. (2/m); **K:** savršena po {110}; **T:** 5 - 6; **G:** 3.0 - 3.4; **S:** staklast, fibrozni varijeteti svilenkasti; **B:** razne nijanse tamno zelene do crne
 - važan i vrlo raširen petrogeni mineral, dolazi i u magmatskim i u metamorfnim uvjetima, posebno je karakterističan za metamorfite srednjeg stupnja = amfiboliti → u asocijaciji s plagioklasima, hornblende su glavni konstituenti
 - važan sastojak u mnogim magmatskim intruzivima (naročito u kiselim i neutralnim stijenama, posebno u alkalijским granitima, sijenitima i dioritima)
 - u nizu eruptivnih stijena hornblende su sekundarnog postanka, a nastale su iz primarnih piroksena procesom uralitizacije
 - u eklogitima su hornblende uglavnom nastale retrogradnom metamorfozom iz omfacita
 - rjeđe dolaze u efuzivima
 - djelovanjem hidrotermalnih otopina hornblende alteriraju u klorit, epidot, kalcit i kvarc
- ✧ **glaukofan, $\text{Na}_2\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$**
- **kristalizacija:** monokl. (2/m); **K:** savršena po {110}; **T:** 6; **G:** 3.1 - 3.4; **S:** staklast; **B:** plava do boje lavande i crne, tamnija što je veći udio Fe; bijeli do svijetlo plavi ogreb
 - dolazi samo u metamorfnim stijenama kao što su škriljavci, eklogiti i mramori; glavni je konstituent glaukofanskih škriljavaca
 - pojava glaukofana odražava nisku temperaturu i relativno visok tlak pri metamorfozi
 - dolazi u asocijacijama sa jadeitom, aragonitom...
- ✧ **prehnit, $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$**
- **kristalizacija:** romp. (2mm); **T:** 6 - 6 ½; **G:** 2.8 - 2.95; **S:** staklast; **B:** obično svijetlo-zelena koja prelazi u bijelu
 - tipični hidrotermalni mineral koji uglavnom nastaje prilikom alteracije bazičnih plagioklasa, a nalazi se u žilicama, šupljinama i mandulama bazičnih eruptiva u asocijaciji sa zeolitima, pektolitom, datolitom, kalcitom i epidotom
 - mnogo rjeđe dolazi u granitskim gnajsevima i sijenitima
 - tipičan produkt metamorfoze niskog stupnja

Filosilikati

✧ **talk, $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$**

- **kristalizacija:** trikl. ($\bar{1}$); **K:** savršena po {001}, listići fleksibilni, ali ne elastični; **T:** 1; **G:** 2.7; **S:** biseran do mastan; **B:** zelenkasta, siva, bijela, srebrno bijela; mastan opip
- sekundarni mineral koji nastaje alteracijom Mg-silikata (olivina, piroksena i amfibola); karakterističan za niski stupanj metamorfoze, gdje može doći u obliku masivne stijene
- stvaranje talka (steatitizacija) u ultrabazičnim stijenama slijedi iza njihove serpentinizacije, a važnu ulogu ima ugljična kiselina
- gradi i vlastite škrljavce - talkove škrljavce

✧ **pirofilit, $\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$**

- **kristalizacija:** trikl. ($\bar{1}$); **T:** 1 - 2; **G:** 2.8; **S:** biseran do mastan; **B:** bijela, zelenkasta, siva, smeđa
- rijedak mineral u metamorfnim stijenama
- nastaje djelovanjem kiselih hidrotermalnih otopina na stijene bogate aluminijem
- dolazi u asocijaciji s kjanitom, andaluzitom ili silimanitom i to kao produkt njihovih alteracija

✧ **muskovit, $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$**

- **kristalizacija:** monokl. (2/m); **K:** savršena po {001}, elastični listići; **T:** 2 - 2 ½; **G:** 2.76 - 2.88; **S:** staklast do svilenkast ili biseran; **B:** bezbojan i proziran u tankim listićima, u agregatima ima svijetle tone žute, smeđe, zelene, crvene
- jako raširen i čest petrogeni mineral; čest je i u metamorfnim stijenama, kao glavni sastojak tinjčastih škrljaca; u kloritnim metamorfnim zonama karakterističan je sastojak albit-klorit-muskovitnih škrljaca
- nalazi se u granitima (kristalizira obično nakon biotita), pegmatitima, grajzenima hidrotermalnim žilama i u metamorfnim stijenama (škrljavci i gnajsevi) koje su nastale metamorfozom sedimentnih stijena
- sericit - petrografski naziv za vrlo sitnolistićavi bijeli tinjac (najčešće nastaje hidrotermalnom hidrotermalnom alteracijom feldspata)
paragonit $\text{NaAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ - mineral srodan muskovitu, karakterističan za metamorfne stijene iz facijesa plavih škrljavaca

✧ **biotit, $\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$**

- **kristalizacija:** monokl. (2/m); **K:** savršena po {001}, listići su elastični; **T:** 2 ½ - 3; **G:** 2.8 - 3.2; **S:** blistav, sličan dijamantnom; **B:** tamno zelena, smeđa, crna, vrlo rijetko svjetlije žut, tanki listići imaju boju dima
- nastaje u različitim geološkim sredinama
- uz muskovit su najrasprostranjeniji tinjci
- magmatskog, metamorfnog i metasomatskog postanka
- jedan glavnih minerala mnogih eruptivnih stijena i granita, metamorfnih stijena (škrljavci i gnajsevi), a nalaze se i u pegmatitima
- vermikulit - uobičajeni produkt površinskog trošenja biotita
- najčešći produkt hidrotermalne alteracije biotita je klorit

✧ **flogopit, $\text{KMg}_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$**

- **kristalizacija:** monokl. (2/m); **K:** savršena po {001}, listići su elastični; **T:** 2 ½ - 3; **G:** 2.86; **S:** staklast do biseran; **B:** žuto-smeđa, zelena, bijela, često s bakrenim odsjajem na pov. kalavosti
- dolazi u metamorfozama Mg-bogatih vapnenaca, dolomita i ultrabazičnih stijena; često i u kimberlitima
- flogopit se često nalazi i u metamorfoziranim karbonatnim stijenama i u ultrabazitima
-

✧ **lepidolit, $\text{K}(\text{Li, Al})_{2-3}(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{O, OH, F})_2$**

- **kristalizacija:** monokl. (2/m) i hex.; **K:** savršena po {001}; **T:** 2 ½ - 4; **G:** 2.8 - 2.9; **S:** biseran; **B:** ružičasta i ljubičasta do sivkasto-bijela
- tinjci ove serije najčešći su litijevi minerali
- dolaze uglavnom u litijevim pegmatitima, zatim u pneumatolitski izmijenjenim kiselim stijenama (grajzeni)

✧ **klorit, $(\text{Mg, Fe})_3(\text{Si, Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \times (\text{Mg, Fe})_3(\text{OH})_6$**

- **kristalizacija:** monokl. ili trikl.; **K:** savršena po {001}, listići savitljivi, ali ne elastični; **T:** 2 - 2½; **G:** 2.6 - 3.3; **S:** staklast do biseran; **B:** različite nijanse zelene; rjeđe žuta, bijela ili rozo-crvena
- čest mineral metamorfnih stijena, dijagnostički mineral facijesa zelenih škriljavaca; često dolazi uz aktinolit i epidot
- nalaze se kao sporedni ili akcesorni minerali u stijenama niskog do srednjeg stupnja regionalnog metamorfizma, a u nekim metamorfnim stijenama dominantni su minerali (kloritni škriljavci)
- u eruptivnim stijenama i stijenama višeg stupnja metamorfizma su sekundarni, a nastali su uglavnom hidrotermalnom alteracijom primarnih Fe-Mg minerala - tinjaca, piroksena, amfibola, granata i olivina
- česti su u alteriranim bazičnim stijenama i hidrotermalno alteriranim zonama oko rudnih tijela

✧ **serpentin: antigorit, lizardit, krizotil, $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$**

- **kristalizacija:** hex. i monokl., antigorit i lizardit su obično masivni i fino zrnati, a krizotil je fibrozni; **T:** 3 - 5; **G:** 2.5 - 2.6; **S:** mastan, voštan u masivnih varijeteta, svilenkast u fibrozni; **B:** svjetlije i tamnije nijanse zelene
- čest mineral, obično kao rezultat alteracije Mg-silikata, posebno olivina, piroksena i amfibola - npr. od forsterita:

$$2 \text{Mg}_2\text{SiO}_4 + 3 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + \text{Mg}(\text{OH})_2$$
- dolazi i u magmatskim i u metamorfnim stijenama
- lizardit - najčešći serpentinski mineral i najobilniji mineral stijena serpentinita
- serpentin općenito tvore velike stijenske mase koje su nastale hidrotermalnom alteracijom dunita i piroksenita
- asocirani su s talkom, magnezitom, dolomitom, kromitom i magnetitom
- serpentin zamjenjuju i olivine u bazaltima i gabrima

Tektosilikati

✧ **kvarc, SiO_2**

- **kristalizacija:** hex. (32); **K:** nema; **L:** školjkast; **T:** 7; **G:** 2.65; **S:** staklast, kod nekih primjeraka, baršunast, blistav; **B:** obično bezbojan ili bijel, no često obojen zbog nečistoća

Feldspati

✧ **sanidin, $(\text{K}, \text{Na})\text{AlSi}_3\text{O}_8$**

- **kristalizacija:** monokl. (2/m); **K:** savršena po {001}, po {010} dobra; **T:** 6; **S:** staklast; **B:** bezbojan, često proziran; bijeli crt
- dolazi u fenokristalima u eruptivnim stijenama tipa riolita i trahita, karakterističan za stijene hlađene izrazito brzo s početne temp. u trenutku erupcije

✧ **ortoklas, KAlSi_3O_8**

- **kristalizacija:** monokl. (2/m); **K:** savršena po {001}, dobra po {010}, nesavršena po {110}; **T:** 6; **G:** 2.57; **S:** staklast; **B:** bezbojan, bijel, siv, crven, rjeđe žut ili zelen; bijeli ogreb
- jedan od glavnih sastojaka granita i sijenita, koji su nastali hlađenjem na umjerenoj dubini i relativno brzo - za sporije hlađene granite i sijenite biti će mikroklin karakterističan K-feldspat; nalazi se i u pegmatitima

✧ **mikroklin, KAlSi_3O_8**

- **kristalizacija:** trikl. ($\bar{1}$); **K:** savršena po {001}, dobra po {010} pod kutom $89^\circ 30'$; **T:** 6; **G:** 2.54 - 2.57; **S:** staklast; **B:** bijela do svjetlo žuta, rjeđe crvena ili zelena (amazonit)
- istaknuti sastojak magmatskih stijena tipa granita i sijenita, koje su se hladile polako i na određenoj dubini, od metamorfita ga ima u gnajsevima, a vrlo je čest i u pegmatitima

Feldspati - plagioklasi

✧ **albit, $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ - anortit, $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$**

- **kristalizacija:** trikl. ($\bar{1}$); **K:** savršena {001}, dobra po {010}; **T:** 6; **G:** 2.62 - 2.67; **B:** bezbojna, bijela, siva, rjeđe zelenkasta, žućkasta, crvenkasta; **S:** staklast do biseran, koji puta se vidi prekrasna igra boja, posebno na labradoritu i andezinu
- kao petrogeni minerali šire su rasprostranjeni od kalijskih feldspata
- što je u stijeni više SiO_2 , manje je u njoj tamnih minerala, a veća količina Na-plagioklasa; i obrnuto, što je udio SiO_2 manji, veći je udio tamnih minerala i više Ca-plagioklasa
- prije kristaliziraju Ca-plagioklasi (An) u slijedu kristalizacije magme, jer imaju više talište od natrijskih (Ab)
- oligoklas - karakterističan za grandiorite i monzonite - ako u sebi ima uklopke hematita, naziva se aventurin
- andezin - relativno se rijetko nađe, osim kao zrnca u andezitima i dioritima
- labradorit - česti feldspat u gabrima i bazaltima, a u anortitima je jedan od glavnih konstituenata
- bitovnit - samo u zncima u gabru
- anortit - rjeđi od većine Na-plagioklasa, dolazi u stijenama bogatim tamnim mineralima

- Ca-plagioklasi jako su podložni izmjenama - česta je hidrotermalna do pneumatolitska albitizacija bazičnih plagioklasa
- niskotemperaturnom hidrotermalnom aktivnošću, a i procesima površinskog trošenja, plagioklasi prelaze u kaolinske minerale i sericit (ilit)

Feldspatoidi

✧ **leucit, KAlSi_2O_6**

- **kristalizacija:** tetragonski (4/m) ispod 605°C , kubični ($4/m\bar{3}2/m$) iznad 605°C ; **K:** nema; **T:** $5\frac{1}{2} - 6$; **S:** staklast do zagasit; **B:** bijela do siva
- nalazi se u mladim alkalijskim vulkanskim stijenama bogatim kalcijem a siromašnim SiO_2
- dosta rijedak mineral, dolazi uglavnom u stijenama koje nastaju u većim dubinama, nikada ne dolazi u stijenama koje sadrže kvarc
- obično je u asocijaciji s alkalijskim feldspatima, nefelinom, analcimom, natrolitom, kalsilitom, piroksenima i magnetitom

✧ **nefelin, $(\text{Na}, \text{K})\text{AlSiO}_4$**

- **kristalizacija:** hex. (6); **K:** uočljiva po {1010}; **T:** $5\frac{1}{2} - 6$; **G:** 2.60 - 2.65; **S:** staklast u kristalima, baršunast u masivnim varijetetima; **B:** bezbojan, bijel, žućkast, u masivnim varijetetima siv, zelenkast, crvenkast
- petrogeni mineral u magmatskim stijenama s manjkom silicija
- nalazi se u eruptivima siromašnim silicijem i bogatim alkalijama - nefelinskim sijenitima, pegmatitima, gnajsevima i fonolitima, u kojima je bitan konstituent, često nastao natrijskom metasomatozom
- pojavljuje se i u zajednicama s K-feldspatima, plagioklasima, Na-piroksenima i amfibolima, leucitom, olivinima, augitom i diopsidom

✧ **sodalit, $\text{Na}_8(\text{AlSiO}_4)_6\text{Cl}_2$**

- **kristalizacija:** kubični ($\bar{4}3m$); **K:** slaba po {011}; **T:** $5\frac{1}{2} - 6$; **G:** 2.15-2.3; **S:** staklast; **B:** obično plava, također bijela, siva, zelena
- relativno rijetki petrogeni mineral
- dolazi s drugim feldspatoidima uglavnom u neutralnim magmatskim stijenama bogatim alkalijama

✧ **zeoliti**

- u vulkanskim stijenama (brzo hlađenim, a sadržavale su i znatnu količinu lako hlapivih komponenata) javljaju se gotovo redovito u šupljinama i mandulama, gdje su kristalizirali iz vrućih rezidualnih vodenih otopina ili para, a asociirani su s kalcitom, dolomitom, tinjcima i kvarcom
- produkti su i hidrotermalne alteracije drugih tektosilikata

NESILIKATI

✧ aragonit, CaCO_3

- **kristalizacija:** rompski (2/m 2/m 2/m); **K:** po {010}, slaba po {110}; **T:** 3 ½ - 4; **G:** 2.94; **S:** staklast; **B:** bezbojan, bijela, svijetložuta
- manje je stabilan od kalcita u atmosferskim uvjetima i rjeđi
- može se naći u fibroznim korama na serpentinu i amigdaloidnim šupljinama u bazaltu, a pojave su zabilježene i u nekim metamorfnim stijenama

✧ kalcit, CaCO_3

- **kristalizacija:** heksagonski ($\bar{3}2/m$); **K:** savršena po $\{10\bar{1}1\}$; **T:** 2 ½; **G:** 2.71; **S:** staklast do zemljast; **B:** bezbojan, bijela, svijetložuta, siva, crvenkasta, kad je nečist smeđ do crn
- jedan od najraširenijih nesilikatnih petrogenih minerala (ima ga u sedimentnim stijenama, vapnencima, mramorima...)
- kao primarni mineral javlja se i u nekim magmatskim stijenama (karbonatiti, nefelinski sijeniti), dolazi i u šupljinama u lavi kao produkt kasne kristalizacije, te u hidrotermalnim žilama (sa sulfidnim rudama)

✧ dolomit, $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$

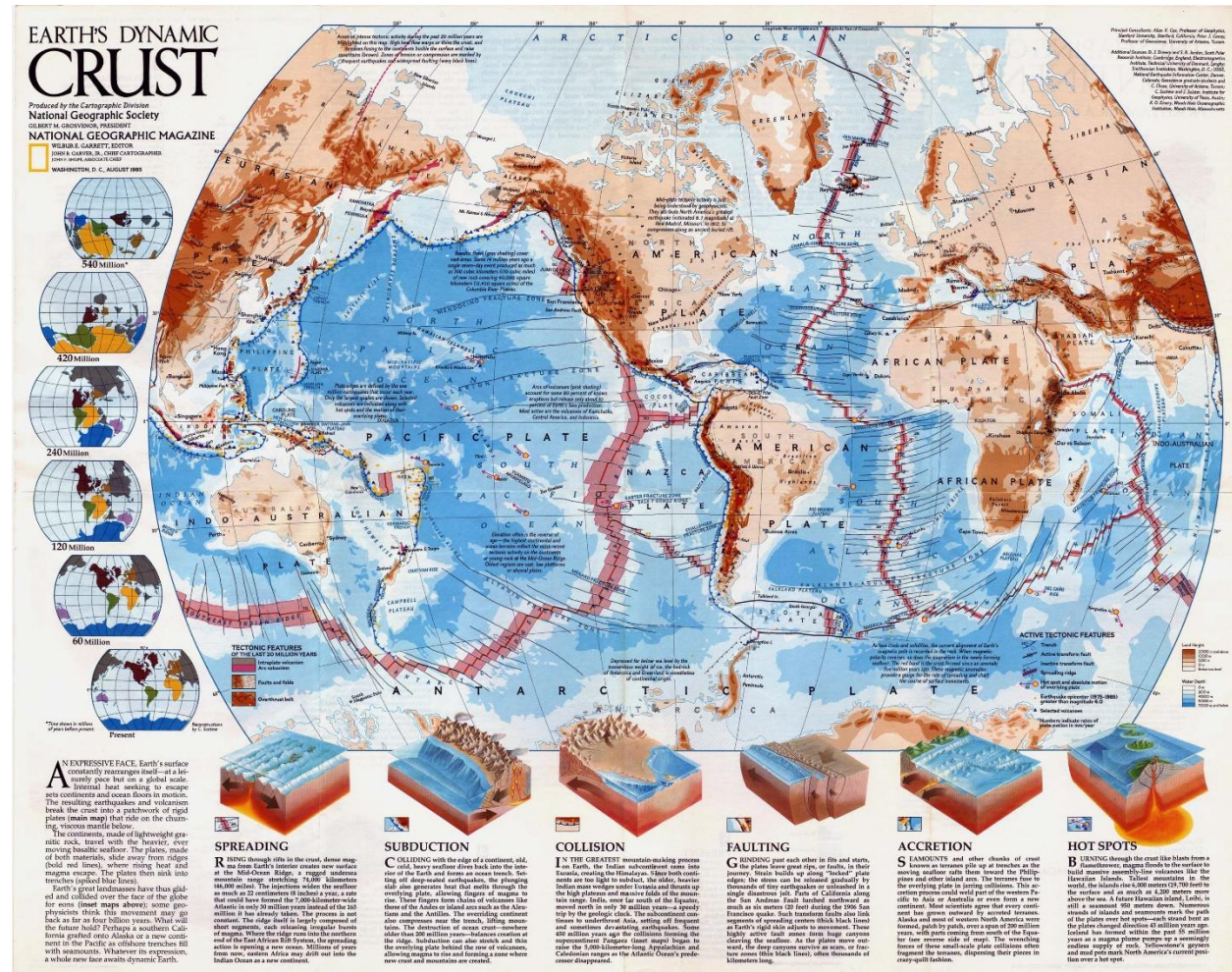
- **kristalizacija:** heksagonski ($\bar{3}$); **K:** savršena po $\{10\bar{1}1\}$; **T:** 3 ½ - 4; **G:** 2.85; **S:** staklast, u nekim varijetetima biseran; **B:** najčešće nijanse ružičaste, "boje mesa"; može biti i bezbojan, bijel, siv, zelen, smeđ ili crn
- u najvećim se masama pojavljuje u sedimentnim stijenama i u dolomitičnim mramorima
- javlja se i u hidrotermalnim žilama (sa olovom i cinkom, fluoritom, kalcitom, baritom i sideritom)

✧ gips, $\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$

- **kristalizacija:** monoklinski (2/m); **K:** savršena po {010}, po {100} pokazuje školjkastu površinu, a po {011} vlaknastu površinu loma; **T:** 2; **G:** 2.32; **S:** uglavnom staklast, može biti i biseran do svilenkast; **B:** bezbojan, bijela, siva; različite nijanse žute, crvene i smeđe zbog nečistoća
- čest mineral u sedimentnim stijenama; kao evaporitni mineral pojavljuje se obično u većim masama

✧ halit, NaCl

- **kristalizacija:** kubičan (4/m $\bar{3}2/m$); **K:** savršena po {001}; **T:** 2 ½; **G:** 2.16; **S:** uglavnom staklast, može biti i biseran do svilenkast; **B:** bezbojan; bijela, siva; različite nijanse žute, crvene, plave i ljubičaste zbog nečistoća
- čest evaporitni mineral



4.3. Poveznice na video zapise

Mineralogija:

<https://www.youtube.com/watch?v=7MvXv66b5h4>
<https://www.youtube.com/watch?v=J-jBtqhsPEU>
<https://www.youtube.com/watch?v=8a7p1NFn64s>
<https://www.youtube.com/watch?v=QTqpiqu23EE>
<https://www.youtube.com/watch?v=EZMBoXQbA6k>

Magmatske stijene:

<https://www.youtube.com/watch?v=PVF9jeH2-8U>
<https://www.youtube.com/watch?v=AoXU2sSrK9Q>
<https://www.youtube.com/watch?v=cjyF-te4lQI>
<https://www.youtube.com/watch?v=A6lHoITs3vE>

Sedimentne stijene:

<https://www.youtube.com/watch?v=U3eR19ZfBqE>
<https://www.youtube.com/watch?v=-MNvf5LBx4s>
<https://www.youtube.com/watch?v=VQIf74J6ChA>
<https://www.youtube.com/watch?v=biN200uXmkk>
<https://www.youtube.com/watch?v=6XbXM5y1110>
<https://www.youtube.com/watch?v=uozyWZ6XQzM>
<https://www.youtube.com/watch?v=zVbuA3Zevlw>
<https://www.youtube.com/watch?v=1JLa392qA-k>
<https://www.youtube.com/watch?v=xoEia9arfus>

Metamorfne stijene

<https://www.youtube.com/watch?v=YBLOcdTC7DA>

<https://www.youtube.com/watch?v=MeAz8An80ro>

<https://www.youtube.com/watch?v=HUydPhlaQQU>

<https://www.youtube.com/watch?v=Ncr-46YX-N0>

<https://www.youtube.com/watch?v=UzOYa-qfLE>

<https://www.youtube.com/watch?v=Rt1LSslitsc>

Tektonika ploča:

https://www.youtube.com/watch?v=z58vSr_VTvk