

višu temperaturu od kritične temperature vode. U tom stadiju Zemljina atmosfera nije sadržavala kisik. Stvaranje kisika vezano je za termalnu disocijaciju vodene pare, fotokemijsku disocijaciju vodene pare, a najvažniji izvor je vezan za fotosintezu biljaka. Pojavom organizama na Zemlji uspostavlja se geokemijska ravnoteža  $O_2$ ,  $CO_2$  i  $N_2$  u atmosferi.

Stvaranje hidrosfere počinje kondenzacijom vodene pare. O veličini i sastavu prvobitnih oceanata postoje različita suprotna mišljenja. Dok neki autori vjeruju da se volumen oceana mijenja od paleozoika do danas, drugi smatraju da je bio konstantan. O volumenu oceana pojedinih geoloških razdoblja sudi se na osnovi geoloških činjenica, kao što su debljina sedimenta i fosilnih ostataka. I kemijski sastav znatno se mijenja. Prvobitno je ocean sadržavao one komponente kojih je bilo u tadašnjoj atmosferi.

Biosfera se razvila kao posljednja, jer su za nju potrebni određeni uvjeti. Prvi fosili potječu iz kambrija, ali su primitivni organizmi morali proći dug evolucijski ciklus do tog stadija. Organske susstancije su sintetizirane iz prvobitne atmosfere koja je sadržavala biofilne elemente, dušik i ugljik, te amonijak. Vjeruje se da su prvi organizmi bili amonijski. Biljke su se razvile tek kad se pojavio slobodni kisik. Razvitak biosfere bio je veoma bitan u egzogenom geokemijskom ciklusu tvari. Shematski prikaz egzogenog i endogenog geokemijskog ciklusa vidi se na sl. 2.

**Geokemijska prospekcija.** Geokemijskom se prospekcijom traže i pronalaze ležišta mineralnih sirovina u Zemljinoj kori, a ona se osniva na sustavnom određivanju kemijskih svojstava prirodnih materijala nekog određenog područja. Studiraju se svi prirodni materijali, kao što su stijene, vegetacija, rijeke, jezera, jezerski sedimenti i tla. U prvom redu potrebno je odrediti normalan sadržaj nekog elementa u sterilnoj stijeni koji se obično naziva *fon*. Vrijednost je fona promjenljiva i ovisi o prirodi materijala i raspodjeli elemenata u pojedinim sredinama. Odstupanje koncentracije nekog elementa od vrijednosti fona u nekom području naziva se *geokemijska anomalija*. Anomalije mogu biti u vezi s orudnjenjem, to su onda tzv. perspektivne anomalije, ali sva područja s visokim sadržajem metala nisu automatski i rudna tijela. Da bi se utvrdilo postojanje anomalije, potrebno je prije svega odrediti prag ili gornju granicu promjene normalnog fona. Sve vrijednosti iznad utvrđenog praga predstavljaju anomalije kojih se maksimalne vrijednosti koncentriraju u blizini rudnog tijela. Postoje primarne i sekundarne anomalije. Primarne geokemijske anomalije vezane su za magmatske i metamorfne procese, a mogu biti singenetske i epigenetske. Singenetski oblici rasijavanja ili disperzije nastaju istodobno sa stijenama u kojima se nalaze, dok epigenetski oblici nastaju dovodom materijala u već formirane stijene. U primarne geokemijske anomalije spadaju i geokemijske provincije, odnosno područja koja imaju veći sadržaj nekog elementa od prosječnog. Kad se radi o sadržaju metala ili ruda određenog tipa, govoriti se o metalogenim provincijama.

Tablica 8  
NAČINI TVORBE SEKUNDARNIH ANOMALIJA

	Singenetske anomalije			Epigenetske anomalije	
	Klasični	Hidromorfnii	Biomorfnii	Hidromorfnii	Biomorfnii
Način prijenosa	gravimetrijski led voda vjetar	podzemne vode površinske vode	adsorpcija	podzemne vode površinske vode	hranjive otopine i zemljinska vлага
Način pojавljivanja rasjednih elemenata	stabilni primarni i sekundarni minerali	kompleksne soli i koloidi	metalno-organski spojevi	ioni apsorbirani u glijama, hidroksidi, metalno-organski spojevi	

Sekundarne anomalije nastaju pod utjecajem trošenja, prijenosa i sedimentacije. Pri tom djeluju mehanički ili kemijski faktori. Izgled anomalija je različit, pa postoje lepezaste, krovinske, lateralne, pukotinske i asimetrične anomalije. Najvažniji načini prijenosa i stvaranja sekundarnih anomalija prikazani su u tabl. 8.

Koristeći se spoznajama moderne geokemije, regionalno geokemijsko kartiranje može usmjeriti pažnju na područja koja se inače možda ne bi ni istraživala. Primjena geokemijskih postupaka postaje sve važnija u istraživanjima nafta, zatim na području agronomije gdje se ispituje utjecaj pojedinih mikro i makro-elemenata na plodnost biljaka, a u najnovije se vrijeme geokemijski postupci s uspjehom uvode i pri istraživanju rezervi oceana.

LIT.: K. Rankama, Th. G. Sahama, Geochemistry. University of Chicago Press, Chicago 1950. — V. M. Goldschmidt, Geochemistry. Clarendon Press, Oxford 1954. — B. Mason, Principles of geochemistry. J. Wiley and Sons, New York 1958. — H. Hawkes, J. S. Webb, Geohemija i istraživanje mineralnih sirovina (prijevod s engleskog). Izdanje Zajednice jugoslovenskih univerziteta, „Savremena administracija“, Beograd 1968. — K. Wedepohl, Geochemistry. Holt, Rinehart and Winston, New York 1970.

V. Marci

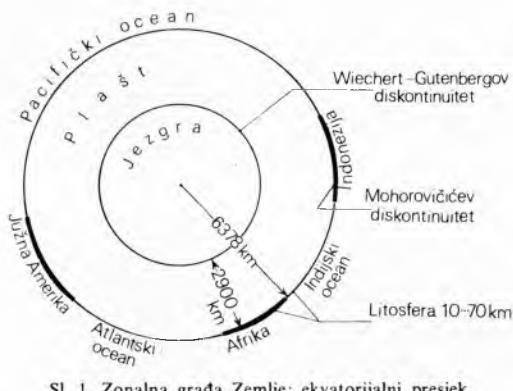
**GEOLOGIJA**, znanost o Zemlji, o njenoj građi i o njenoj prostornoj i vremenskoj dinamici. U širim okvirima geologije postoje posebne discipline, koje su međusobno usko povezane: geodinamika, geotektonika, stratigrafija (v. *Stratigrafija*), paleontologija (v. *Paleontologija*), petrologija (v. *Petrologija*), mineralogija (v. *Mineralogija*), geokemija (v. *Geokemija*), hidrogeologija i dr. Uže shvaćeno, geologija je znanost o razvoju, strukturi i dinamici litosfere ili Zemljine kore. S obzirom na cjelebitost određene tematike geologija se najčešće dijeli na opću geologiju (dinamika i tektonika), stratigrafiku ili historijsku geologiju (kronološki prikaz promjena Zemlje) i regionalnu geologiju (regionalni prikaz većih cjelina). Naziv je stvoren prema grč. γῆ ge zemlja i λόγος logos riječ, govor.

Geološke pojave i procesi na površini Zemlje poticali su već u dalekoj prošlosti na pokušaje znanstvene interpretacije. Tales od Mileta ( $\sim 640 - 547$ ) objašnjava deltu Nila kao kopno nastalo iz vode. O promjenama u rasporedu kopna i mora govore još egipatski svećenici, zatim Pitagora ( $\sim 580 - 500$ ), Ksenofan ( $\sim 570 - 480$ ), Herodot ( $\sim 484 - 425$ ), Aristotel ( $\sim 384 - 322$ ) i Strabon ( $\sim 63 - 20$  n.e.). Prema Aristotelu, voda koja izlazi na izvorma nastala je u podzemlju kondenzacijom ili spajanjem kapljica. Lukrecije ( $\sim 97 - 55$ ) opisuje vrulju, a smatra da se morska voda, ušavši u kopno, filtrira i da se oslađena ponovno vraća u more. Pitagora, Platon ( $\sim 427 - 347$ ), Strabon i drugi pišu o vulkanima, a Plinius Mladi ( $63 - 113$ ) opisuje erupciju Vezuva 79. god. Pitagora također spominje i potres. Nalazi fosila dokazuju promjene u rasporedu kopna i mora (Pitagora, Herodot, Aristotel i drugi). O razvoju života na Zemlji valju istaći Aristotelovo shvaćanje o utjecaju sredine na rast biljaka i životinja.

Širenjem kršćanstva potisnut je interes za objašnjanje prirodnih procesa. Već poznate činjenice i novootkrivene pojave nastoje se sveti u biblijske okvire. Tako se, npr., želi protumačiti da su fosili nastali »igrrom prirode«, da su ostaci općeg potopa, da su nastali djelovanjem neodređene sile »vis plastica« itd. Usprkos takvim okolnostima bilo je i izvanrednih zapažanja i objašnjenja prirodnih pojava, od kojih neka vrijede i danas. Tako Leonardo da Vinci (1452–1519) smatra da se jednim potopom ne može objasniti pojava ostataka prirobnih školjkaša na različitim visinama. Da Vinci nadalje opisuje prvi geokemijski ciklus: voda s kopna odnosi sol u more, dizanjem dna mora stvaraju se lagune u kojima se sol taloži u slojeve, koji se opet mogu optopiti. Već je tada smatrao da erozija remeti izostatsku ravnatelju, što dovodi do izdizanja kopna. Naziv fosil spominje se prvi put 1530. god. (Agricola). N. Steno (Niels Stensen, 1638–1687) postavlja osnove zakona o superpoziciji slojeva. Nešto kasnije nastaje sukob neptunista (A. G. Werner, 1749–1817), koji su smatrali da su sve stijene osim amorfne lave nastale iz vode, te plutonista (J. Hutton, 1726–1797), koji su priznavali sedimentno podrijetlo dijelu stijena i smatrali da vulkansko podrijetlo imaju i mnoge druge stijene litosfere. G. C. Füchsel (1722–1773) zagovara je, a Ch. Lyell (1797–1875) uveo aktualistički pristup u rekonstrukciji geoloških zbivanja, po kojem je sadašnjost ključ za razumijevanje prošlosti. I niz drugih znanstvenika zasluzni su što je geologija postala istaknuta prirodnja znanost. Tako su i naši znanstvenici u svjetskim razmjerima sudjelovali u raspravama o različitim problemima. R. Bošković (1711–1787) razmatrao je izostazu i poremećaje sile teže zbog različitih gustoća gornjih i donjih masa Zemljine kore. D. Pilar (1846–1893) raspravlja je o uzrocima ledenog doba i o potresima. A. Mohorovičić (1857–1936) dokazao je da postoji jak diskontinuitet u širenju potresnih valova (Mohorovičićev diskontinuitet, Moho-diskontinuitet), a A. Milanković (1879–1958) proučavao je uzroke glacijacija u kvartaru.

Na osnovi mjerenja brzine širenja, refleksije i refrakcije potresnih valova ustanovljeno je da je Zemlja *zonalno* (lupinasto) građena. Na prijelazu iz jedne zone u drugu mijenja se brzina širenja potresnih valova, pa se zbog toga ta područja nazivaju *diskontinuitetima*. Razlikuju se tri glavne zone: *jezgra*, *plašt i litosfera* (sl. 1). Na prijelazu iz jezgre u plašt nalazi se Wiechert-Gutenbergov, a iz plašta u litosferu Mohorovičićev diskontinuitet.

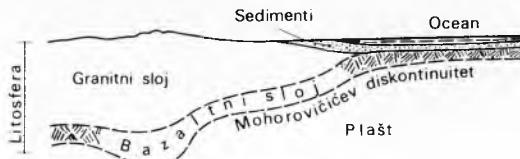
Smatra se da je jezgra sastavljena pretežno od željeza, nikla i silikata. Velike je gustoće (do  $11 \text{ g cm}^{-3}$ ), središnji dio joj je čvrst, a periferne dijelove čini gusti pokretni fluid. Plašt počinje na dubini oko 2900 km. Izgrađen je vjerojatno od stijena tipa peridotita, dunita ili eklogita (v. *Petrologija*) gustoće  $3,3 \dots 6,5 \text{ g cm}^{-3}$ . Plići dijelovi plašta (astenosfera), koji se nalaze ispod litosfere, podatni su plastičnim deformacijama.



### Sl. 1. Zonalna građa Zemlje; ekvatorijalni presjek

LITOSFERA

Litosfera ili kamena kora je u usporedbi s polumjerom Zemlje veoma tanka, od 5...10km pod oceanima, oko 70km u području planinskih masiva. Sastoji se od *bazaltnog sloja* gustoće do  $2,95\text{ g cm}^{-3}$ , u kojem prevladavaju silicij i magnezij, i koji obuhvaća čitavu Zemlju, te *granitnog sloja* gustoće do  $2,7\text{ g cm}^{-3}$ , u kojem prevladavaju silicij i aluminij. Granitni sloj leži na bazaltnom sloju i izgrađuje samo kontinentalne blokove (sl. 2). Dosadašnja neposredna opažanja i ispitivanja pružila su saznanja o karakteristikama granitnog sloja, doprlo se bušotinama do bazaltnog sloja, ali ne i do astenosfere.



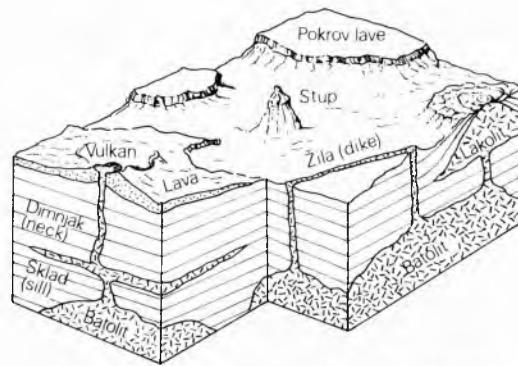
Sl. 2. Kontinentalna (lijevo) i oceanska (desno) litosfera

## **Stijene litosfere**

Stijena je agregat (nakupina) istovrsnih ili raznovrsnih minerala. Prema načinu postanka, stijene litosfere su magmatske (eruptivne), sedimentne (taložne) i metamorfne.

**Magnatske stijene** nastaju iz mineralne taljevine (magme). *Intruzivne ili dubinske stijene* stvaraju se polaganim hlađenjem taljevine i potpunom kristalizacijom u unutrašnjosti litosfere pa imaju zrnatu strukturu (granit, granodiorit, diorit, sijenit, gabro). *Efuzivne ili izljevne stijene* nastaju izljevanjem magme na površinu litosfere i naglim hlađenjem, zbog kojeg minerali nisu u potpunosti kristalizirani. Takve stijene (riolit, dacit, andezit, trahit, bazalt) imaju tzv. porfirnu strukturu (v. Petrologija).

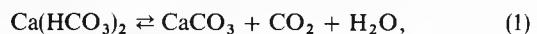
Magmatske stijene pojavljuju se u različitim oblicima i mogu zauzimati različite primarne položaje u litosferi (sl. 3). To može biti *batolit*, magmatsko tijelo velikih dimenzija nastalo u velikim dubinama, *lakolit*, gljivasta masa dubinskih stijena koje su prilikom utiskivanja viskozne magme svodasto izdigle krovinske stijene, *sklad* (*sill*), relativno tanki i prostrani ulošci fluidne magme među slojevima, *žila* (*dike*), nastala utiskivanjem magme u pukotine, *dimnjak* (*neck*), cjevasti otvor kojim je magma prolazila do lakoleta, sklada ili do površine gdje se izlijevala putem vulkana. Pored tih dubinskih formi, koje se danas zbog djelovanja erozije u geološkoj prošlosti često nalaze na površini, postoje i *izljevi* ili *pokrovi lava*. Oni nastaju na velikim pukotinama kroz koje se magma izlijeva relativno mirno i u velikim količinama.



Sl. 3. Primarni položaj magmatskih stijena u litosferi

**Sedimentne stijene** nastaju nagomilavanjem čestica nastalih razaranjem već postojećih stijena (klastične ili detritične stijene, klastiti), zatim posredstvom organizama (organogene stijene), te kristalizacijom iz otopina (kemogene stijene).

*Klastične stijene* dijele se prema veličini fragmenata u rudite (kršje i šljunci s vezanim ekvivalentima breče, odnosno konglomerati s promjerom zrna >2 mm), arenite (pijesak i vezani ekvivalent pješčenjak, promjera zrna 0,06–2 mm) i lutite (mulj i vezani ekvivalent gline, promjera zrna <0,06 mm). Gline imaju specifične karakteristike važne u građevinarstvu. Gubitkom vode smanjuju volumen, a u doticaju s vodom bubre, stvarajući nestabilne padine i klizišta (v. *Klizišta*). U *organogene stijene* ubrajaju se većinom vapnenci i djelomično dolomiti nastali nagomilavanjem i kasnijom cementacijom vapnenačkih ljuštura ili skeleta uginulih organizama, zatim treset i uglen nastali karbonizacijom biljaka u reduktivnoj sredini, te nafta i asfalt. *Kemogeni sedimenti* su različiti sulfati, karbonati, kloridi i dr. Karakterističan je postanak vapnenaca u procesu:



kojom prilikom nastaju sige i sedra.



Sl. 4. Horizontalni slojevi u području kanjona Colorado (SAD)

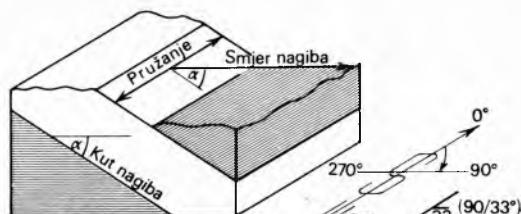
Sedimentne stijene nastaju u vodenoj sredini ili na kopnju nagomilavanjem sedimenata. Njihov je primarni položaj u obliku pravilnih, najčešće horizontalnih slojeva (sl. 4). *Sloj* je, prema tome, mineralna masa omeđena dvjema plohama i predstavlja kontinuiranu fazu sedimentacije. Kontinuitet sedimentacije prekinut je najčešće zbog promjene egzogenih utjecaja a očituje se promjenom vrste sedimentiranog materijala, veličine zrna ili boje. Zato slojevi debljinom variraju od  $< 1\text{ mm}$  do  $> 1\text{ m}$ . Budući da je područje sedimentacije nekog sloja uvijek ograničeno, svaki je sloj, u stvari, leća male debljine i velikog promjera. Slojevi ponekad i u primarnom položaju mogu biti kosi, npr. u deltama, u sipinama i dr. (sl. 5). Sve sedimentne stijene u svojem primarnom položaju imaju točno određenu *superpoziciju*, tj.

najstariji su slojevi najprije taloženi i u normalnom slijedu nalaze se u najnižem položaju. S obzirom na neki odabrani sloj, stariji slojevi čine *podinu*, a mladi *krovinu*, bez obzira da li su slojevi horizontalni ili naknadno nagnuti.



Sl. 5. Nagnuti slojevi u području rijeke Korane (Hrvatska)

**Metamorfne stijene** nastaju pretvorbom magmatskih ili sedimentnih stijena pod utjecajem visokih tlakova i temperatura, ili djelovanjem različitih otopina ili para. Tom prilikom može doći do prekristalizacije i do rasta novih minerala okomito na smjer najvećeg tlaka. Na taj način nastaje škriljavost, tj. listanje stijene u slojeve, ponekad tanje od 1 mm. Tako npr. metamorfozom od vapnenca nastaje mramor, od pješčenjaka kvarcit, od gline glineni škriljavci itd.



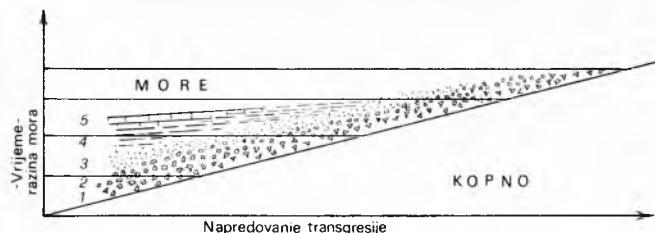
Sl. 6. Elementi položaja plohe

Za određivanje prostornog položaja slojeva i drugih linearnih i planarnih elemenata služi geološki kompas. To je običan kompas, u kojem su istočna i zapadna strana zamijenjene, pa azimut od  $0\cdots 360^\circ$  raste obrnuto od smjera kazaljke na satu. Postavi li se kompas u horizontalan položaj, sa sjevernom stranom kompasa u smjeru nagiba plohe koju treba mjeriti, sjeverni krak magnetske igle pokazivat će smjer nagiba (azimut nagiba) plohe. Nakon toga kompas se zaokrene oko osi sjever-jug za  $90^\circ$ , njegov se brid prisloni uz nagnutu plohu i na klinometru se očita kut nagiba plohe. Izmjerene vrijednosti smjera nagiba i kuta nagiba pišu se u obliku razlomaka. Tako npr.  $90/33^\circ$  znači da je mjerena ploha nagnuta prema istoku pod kutom od  $33^\circ$  (sl. 6).

#### Poremećaji litosfere

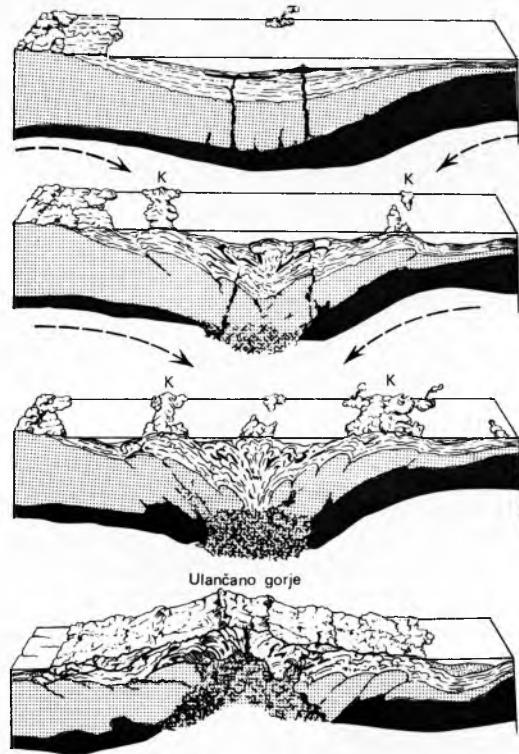
Zemlja je u svom razvoju prošla, a i danas prolazi, kroz veoma dinamične procese. Ti se procesi zbivaju u unutrašnjosti Zemlje (*endodinamika*) ili na njenoj površini (*egzodinamika*). Primarni položaji eruptivnih i sedimentnih stijena mogu zbog tih procesa biti višestruko poremećeni, što se danas ogleda u veoma različitim položajima slojeva. Uzroci poremećaja potječu prije svega iz unutrašnjosti Zemlje, a objašnjavaju se gibanjem magme u gornjim dijelovima plasti. To je tzv. konvektivno strujanje magme, pri čemu se radioaktivnim procesima zagrijani dijelovi magme dižu pod litosferu, gdje se hlade i opet spuštaju u veće dubine. Zbog kretanja magme (oko 1 cm godišnje) nastaju pokreti u litosferi obuhvaćeni nazivom *dijastrofizam*. Razlikuju se dva tipa pokreta: *epirogenetski* i *orogenetski pokreti*.

**Epirogenetske pokrete** predstavlja izdizanje ili spuštanje kopna s obzirom na razinu mora, pri čemu ne dolazi do znatnijih poremećaja primarnog položaja stijena. Ove je pokrete teško razlikovati od *eustatičkih pokreta*, tj. kolebanja razine mora zbog promjene količine vode, jer je krajnji efekt sličan, tj. dovodi do preplavljanja kopna (*transgresija*) ili povlačenja mora (*regresija*). Znajući da sedimentima u moru krupnoča zrna opada s udaljenošću od obale (breča, konglomerat, pješčenjak, glina, vapnenac), može se na temelju redoslijeda sedimenata rekonstruirati napredovanje transgresije ili regresije (sl. 7). Ako zbog konvektivnog gibanja magme spuštanje nekog područja dobije veće razmjere, u litosferi će se formirati velika koritasta depresija pokrivena morem, *geosinklinala*, dugačka tisućama i široka stotinama kilometara, koja predstavlja ogroman sedimentacijski prostor nestabilnog dna.



Sl. 7. Transgresija. Slijed sedimenata od starijih prema mlađima i od obale prema dubljim dijelovima mora: 1 i 2 rudit, 3 arenit, 4 lithit, 5 vapnenac

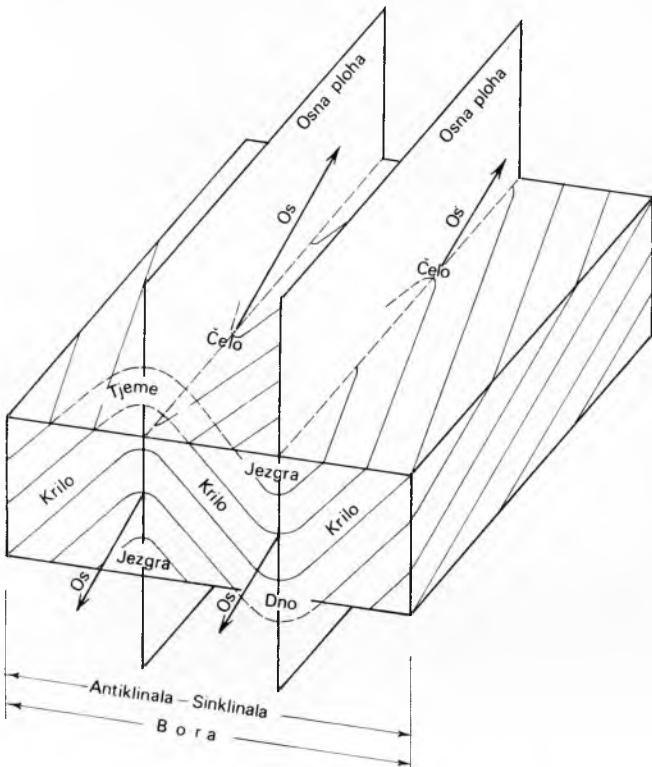
**Orogenetski pokreti** započinju nakon spuštanja dna geosinklinale pod djelovanjem bočnih pritisaka prouzročenih konvektivnim strujanjem magme. Na dnu se nagomilavaju sedimenti i sužava se prostor, pa se središnji dijelovi počinju borati i izdizati. Donji dijelovi geosinklinale dopiru do velikih dubina. Litosfera postaje nehomogena, pa dolazi do prodora magme (*inicijalni magmatizam*). Dalje sužavanje prostora i izdizanje debelih naslaga sedimenata dovodi najprije do stvaranja nizova otoka nazvanih *kordiljeri*, a zatim i do postanka *ulančanog gorja* (sl. 8). Prilikom izdizanja more preplavljuje okolno kopno,



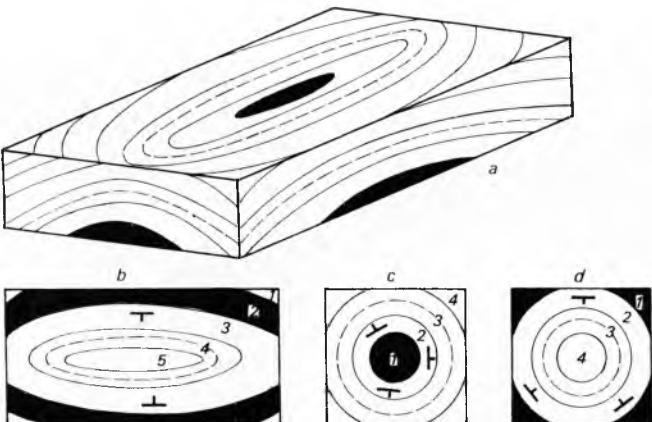
Sl. 8. Orogenetski pokreti i stvaranje ulančanog gorja izdizanjem iz geosinklinale. K kordiljeri

a u koritima između kordiljera nastaju velike količine klastičnih sedimenata poznatih pod nazivom *fliš* (konglomerati, pješčenjaci, lapori, vaspenci u međusobnoj vertikalnoj izmjeni) i *molasu* (krupnoklastični nesortirani sedimenti). Takvim pokretima, koji su počeli izdizanjem dna geosinklinale a završili stvaranjem ulančanog gorja, nastali su vijenci planina, npr. Pireneji, Alpe, Dinaridi, Helenidi, Tauridi, Iranidi i dr.

**Sekundarne tektonske pojave u litosferi.** Zbog spomenutih velikih pokreta, koji u vertikali dosežu i do nekoliko tisuća metara, primarno horizontalni slojevi sedimenata i primarni oblici magmatskih stijena boraju se, lome, prebacuju i navlače jedni na druge. Takvim poremećajima nastaju tri glavne strukturne jedinice litosfere: bore, rasjedi i navlake.



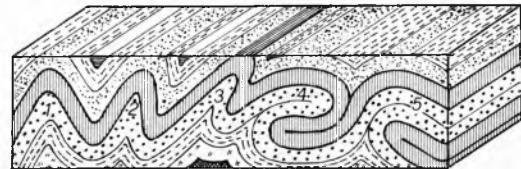
Sl. 9. Elementi bore



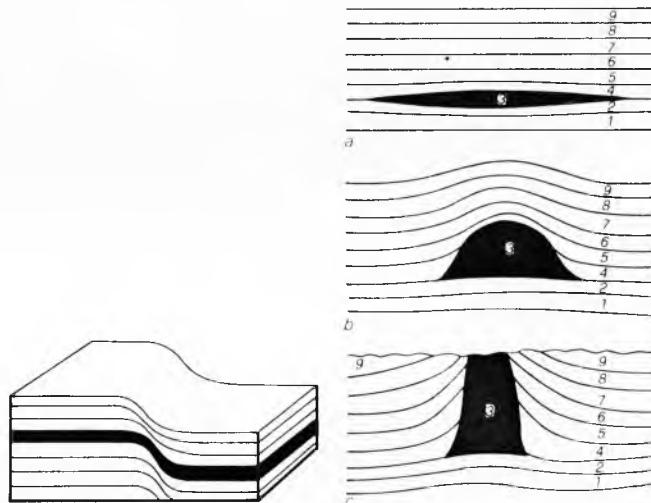
Sl. 10. Blok-dijagram brabiantiklinale (a) i geološka karta brahisinklinale (b), dome (c) i basena (d). 1 najstariji sloj, ..., 5 najmlađi sloj

Bore su nastale savijanjem slojeva, koji se pri tome nisu kidali, pa su to tzv. kontinuirane deformacije. Elementi bore jesu: *antiklinala*, *sinklinala*, *jezgra antiklinale*, *jezgra sinklinale*, *tjeme antiklinale*, *dno sinklinale*, *krilo bore*, *čelo bore*, *osna ploha* i *os bore* (sl. 9). Zbog naknadnih poremećaja i erozije ponakod su sačuvani samo dijelovi bore, pa ih je teško rekonstruirati. Redovito je, međutim, erodirano tjeme antiklinale, a

sačuvane su jezgre antiklinale (najstariji slojevi) i sinklinale (najmlađi slojevi). Bora ima od centimetarskih do kilometarskih, a duljina im većinom mnogostruko premašuje širinu. *Brahiantiklinala* i *brahisinklinala* su bore kojima je duljina svega nekoliko puta veća od širine, a *dome* i *baseni* imaju podjednaku širinu i duljinu (sl. 10). Ovisno o jačini bočnih pritisaka, osna ploha prema horizontali može biti različito nagnuta, pa se razlikuju: *uspravne*, *kose*, *prebačene*, *polegle* i *utorulne bore* (sl. 11). U *normalnoj bori* krila divergiraju od osne plohe, *izoklinalna bora* ima krila paralelna s osnom plohom, a *fleksura* (koljenasta bora) nastaje zbog vertikalnih pokreta (sl. 12). Poseban tip bore je *dijapirska bora* koja nastaje izdizanjem soli. Sol ima manju gustoću od okolišnih stijena, plastična je, pa se pod pritiskom krovinskih naslaga od prvobitne leće formira stupasto tijelo, ponekad velikih dimenzija, koje podiže krovinske naslage stvarajući bore (sl. 13). Izrazito je lijep primjer terena s borama područje Ravnih kotara, gdje su bore relativno dugačke i uske. S druge strane, čitava je zapadna Istra jedna blaga i široka bora. S obzirom na pružanje gorskih lanaca bore mogu biti *transverzalne*, *longitudinalne* i *dijagonalne*. Gotovo su sve bore, što izgrađuju naše Dinaride, longitudinalne (pružaju se paralelno s gorskim vijencima).



Sl. 11. Tipovi bore s obzirom na položaj osne plohe prema horizontali: 1 uspravna, 2 kosa, 3 prebačena, 4 polegla, 5 utorulna bore



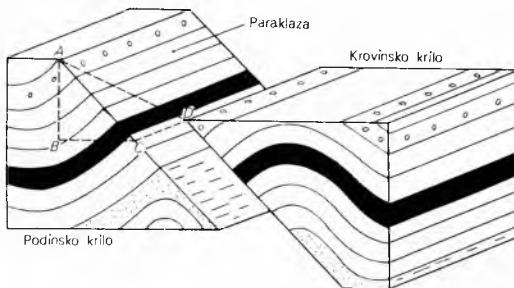
Sl. 12. Koljenasta bora (fleksura)

Sl. 13. Postanak dijapirske bore

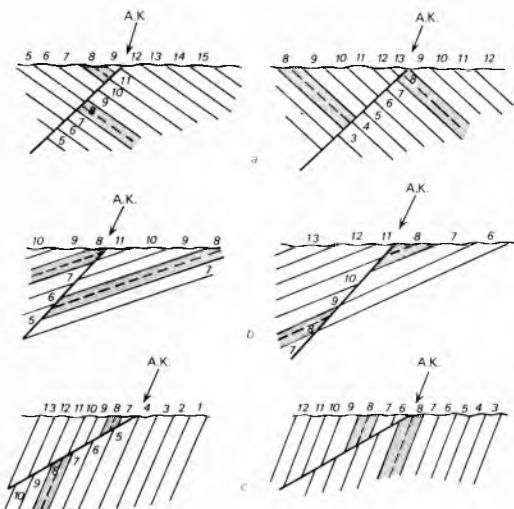
**Rasjedi.** U dinamici poremećaja rasjedi obično slijede nakon stvaranja bore. To su strukturne jedinice nastale pomicanjem litosfere uzduž neke pukotine, pa su to diskontinuirane deformacije. Elementi su rasjedi: *paraklaza* (pukotina uzduž koje je došlo do pomicanja), *krila rasjeda* (krovinsko krilo iznad paraklaze i podinsko krilo ispod paraklaze ako je paraklaza kosa, odnosno orientacija prema stranama svijeta ako je paraklaza vertikalna), *skok rasjeda* (vertikalni razmak krila) i *hod rasjeda* (horizontalni razmak krila rasjeda) i *ukupni pomak* (sl. 14). Osnovni je kriterij za podjelu rasjeda dinamički efekt izražen kretanjem krila po paraklazi. Tako se kao posljedica kompresije u litosferi javljaju *reverzni rasjedi* (krovinsko je krilo u odnosu na podinsko relativno pokrenuto naviše), a relaksaciju u litosferi označavaju *normalni rasjedi* (krovinsko je krilo relativno spušteno). Presjecajući već postojeće, ranije stvorene strukture, rasjedi veoma komplikiraju i otežavaju rekonstrukciju strukture litosfere. Dimenzijsama, kao i bore, rasjedi variraju od milimetarskih do kilometarskih. U pružanju mogu se protezati

i po nekoliko stotina kilometara, a skok im može biti i nekoliko tisuća metara. U prirodi se rasjedi otkrivaju na osnovi tzv. *anormalnog kontakta*, što znači da su na površini jedan uz drugi oni slojevi, koji prema svom primarnom položaju (superpoziciji) to nikako ne bi smjeli biti. Tako se pojavljuju različiti odnosi među slojevima, već prema tome da li je rasjed *istosmjeren* (slojevi i paraklaza nagnuti su u istom smjeru) ili *protusmjeren* (paraklaza ima suprotan nagib od slojeva), zatim da li je reverzan ili normalan (sl. 15). Pri znatnijim poreme-

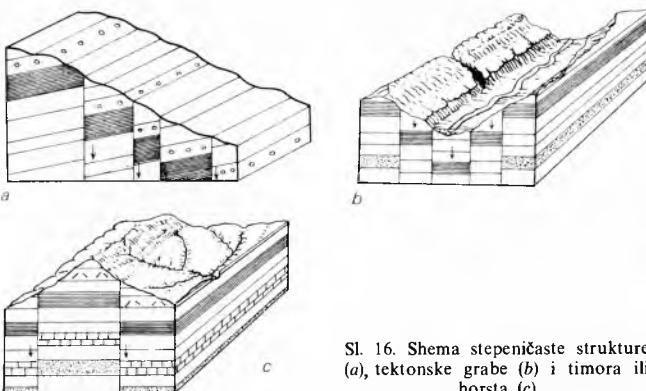
poleg ili utečne bore velikih dimenzija (prekrilne bore), kao reverzni rasjedi malog kuta nagiba, zatim kombinacijom prebačenih bora i reverznih rasjeda i gravitacijskim klizanjem (sl. 18). Elementi su navlake: *autohton* (nepokrenuti dio terena), *alohton* (dio terena koji je pomaknut preko autohtonog), *čelo navlake* (najperiferniji dio alohtonog), *tektonsko okno* (mjesto na kojem kroz eroziju razoreni alohton proviruje autohton) i *navlačak*, izolirani erozijski ostatak alohtonog na autohtonu (sl. 19). Iako je primarno dosezanje alohtonog bilo daleko veće nego što se danas nakon erozije može rekonstruirati, ipak su veličine horizontalnog pomaka (ekvivalent hodu reverznog rasjeda) impozantne, kao npr. u Alpama gdje iznose i više od 50 km.



Sl. 14. Elementi rasjeda: paraklaza, krovinsko krilo i podinsko krilo; A-B skok rasjeda, B-C hod rasjeda, A-D ukupni pomak

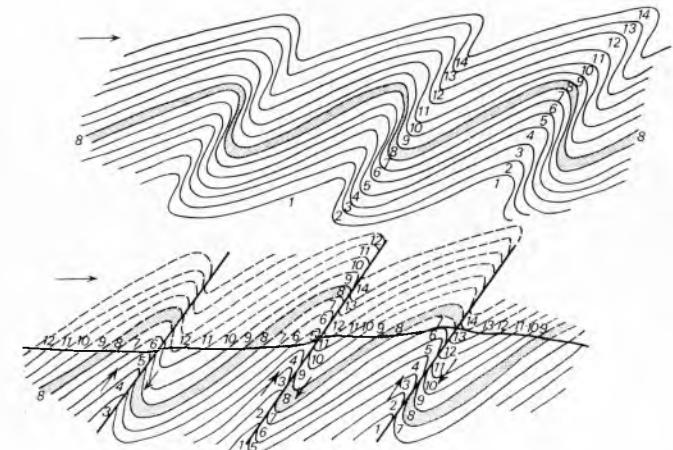


Sl. 15. Reverzni rasjedi (lijevo) i normalni rasjedi (desno); a protusmjerni, b istosmjerni s paraklazom strnjom od nagiba slojeva, c istosmjerni s paraklazom blažom od nagiba slojeva. A. K. anomalni kontakt nasлага na površini, 1...13 superpozicijski slijed slojeva

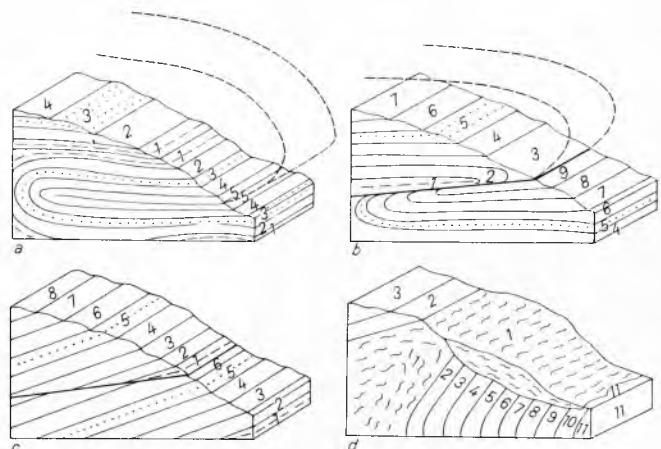


čajima litosfere obično se pojavljuje više paralelnih rasjeda tvoreći sustave rasjeda: *stepeničaste strukture*, *tektonske grabe*, *timore* ili *horstove* (sl. 16) i *ljuskave strukture* (sl. 17).

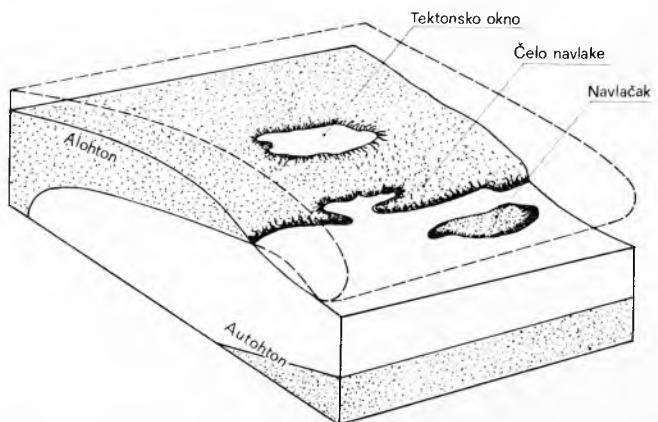
*Navlaka* je strukturalna jedinica litosfere u koje tereni, koji su ranije ležali jedan do drugog, leže jedan na drugom. Mogu nastati kontinuiranim ili diskontinuiranim deformacijama kao



Sl. 17. Shema ljuskave strukture nastale putem reverznih rasjeda iz prebačenih bora



Sl. 18. Shema postanka navlaka putem prekrilnih bora (a), kombinacijom prebačenih bora i reverznih rasjeda blago položene paraklaze (b), putem reverznih rasjeda (c) i gravitacijskim klizanjem (d), 1...11 superpozicijski slijed nasлага

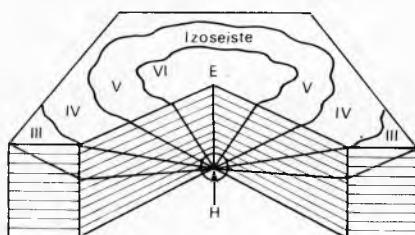


Sl. 19. Elementi navlake

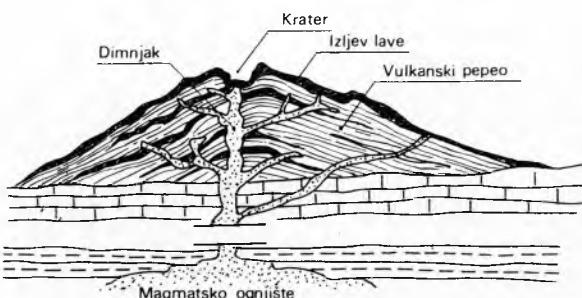
**Tektonske pukotine** su redoviti pratićici tektonskih poremećaja. Najčešće ih se naziva *dijaklazama*; uzduž njih nije došlo do pomicanja stijena. Važne su, jer u mehaničkom smislu degradiraju stijenu, pa je često potrebitno njihovo detaljnije proučavanje kako bi se dobio uvid u intenzitet i orientaciju oštećenosti. Budući da su nastale u nazujoj vezi s borama, rasjedima i navlakama, njihovom analizom mogu se rekonstruirati makrostrukture litosfere.

**Ostale endodinamske pojave u litosferi.** Osim pokreta što zahvaćaju velika prostranstva (epirogenetski pokreti) ili onih što rezultiraju stvaranjem ulančanog gorja (ogenetski pokreti), endodinamika Zemlje manifestira se i u obliku potresa i vulkanizma.

Potresi su brzoizmjenjive vibracije litosfere. Lokalno i rijedko, potresi su vezani s urušavanjem u podzemlju ili s vulkanizmom. Najveći broj i najsnazniji potresi potječu od recentnih gibanja u litosferi uzduž tektonski predisponiranih pukotina. Energija postepeno akumulirana endodinamskim procesima oslobođa se u jednom trenutku na najslabijem mjestu u litosferi, pokrene najneotporniji blok stvarajući u dubini *hipocentar* (žarište, fokus potresa), odakle se u svim smjerovima šire *potresni valovi* (sl. 20). *Epicentar* je mjesto najjačeg intenziteta potresa na površini, a nalazi se neposredno iznad hipocentra. *Izoseiste* su linije koje spajaju mjesta iste jačine potresa. Potresni valovi šire se različitom brzinom kroz različite vrste stijena, i to longitudinalni u prosjeku dvostruko brže od transverzalnih. Na kontaktu dviju različitih sredina dolazi do *refleksije* i *refrakcije* valova, što je iskoristeno u praksi tako da se umjetno izazvanim potresima putem eksplozije mogu odrediti položaji ploha promjena brzine u unutrašnjosti litosfere.



Sl. 20. Širenje potresnih valova. H hipocentar, E epicentar, izoseiste, III–VI područja različitog intenziteta potresa



Sl. 21. Zamišljeni presjek vulkanskog čunja. Magmatsko ognjište je, npr., kod Vezuva na dubini od oko 5 km

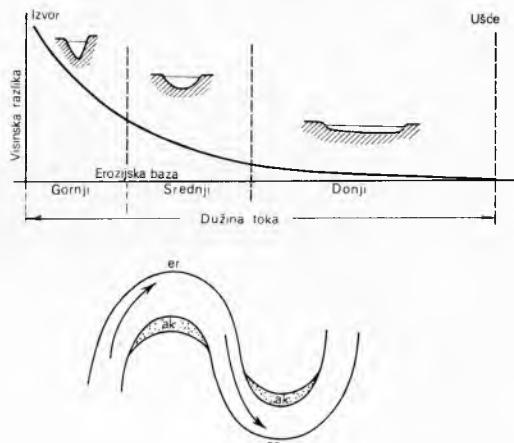
**Vulkanizam** obuhvaća pojavu izbijanja i izljevanja mineralne taljevine (magme) iz magmatskog ognjišta putem dimnjaka na površinu. *Lava* (magma nakon izbijanja na površinu), vulkanski pepeo, lapili (komadi stvrđnute lave veličine šake) i vulkanske bombe nagomilavaju se i tako stvaraju vulkanski čunj, koji na vrhu završava *kraterom* (sl. 21). Postvulkanske pojave obilježene su izbijanjem plinova, pa u *fumarolama* prevladava vodena para, u *solfatarama* sumporovodik, a u *moftama* ugljik-dioksid. *Gejziri* izbacuju vrelu vodu i paru periodički, a topli izvori daju toplu vodu kontinuirano.

Mjesta potresa i vulkana na Zemlji danas se podudaraju sa zonama najveće dinamike Zemlje, posebno litosfere. Te se zone nalaze na obodima Pacifika, gdje se kontinentalna kora navlači na oceansku koru, u području srednjoatlanskog gre-

bena, gdje se inkorporiranjem materijala iz dubljih dijelova stvara nova oceanska kora pa se Atlantik širi (sl. 22), zatim u području Sredozemlja, gdje Evropa i Azija kreću prema Africi, u Crvenom moru itd.

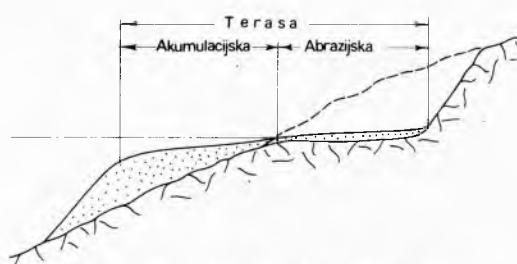


Sl. 22. Shema današnje dinamike Zemlje u području Pacifickog i Atlantskog oceana



Sl. 23. Uzdužni riječni profil i raspored erozije (er) i akumulacije (ak) u meandrima

**Egzodinamika.** Vanjska dinamika Zemlje (egzodinamika) očituje se u dvije međusobno usko povezane pojave: u razaranju (eroziji) površinskih stijena, kojom prilikom nastaje materijal za stvaranje sedimenata, te u morfološkom oblikovanju površine. Faktori vanjske dinamike jesu: temperatura, voda (tekućice, mora, jezera), vjetar, led i organizmi. Erozija i morfologija ovise o litološkim karakteristikama stijena, te vrsti i jakosti tektonskih poremećaja. Doline su na kopnu najmarkantniji morfološki oblici. *Riječne doline* (sl. 23) u gornjem toku imaju poprečni profil sličan slovu »V«, pružaju se uglavnom u ravnoj liniji, i dubinska je erozija tu snažnija od bočne erozije. Donji tok ima prošireno korito, bočna erozija je jača, pa rijeka stvara nizove okuka zvanih meandri. Na konveksnoj strani meandra odvija se akumulacija, a konkavna strana je podložna eroziji. *Ledenjačke doline* su u poprečnom profilu slične slovu »U«, manje su vijugave od riječnih, a završavaju morenskim nanosom. Za razliku od riječnog nanosa koji je sedimentiran prema veličini ili težini, a ponekad i prema vrsti fragmenata (zlatno, npr.), u morenskom materijalu fragmenti su raspoređeni anarhično. *Obale mora i jezera* izložene su eroziji zbog valova (abrazijska), pri čemu se stvaraju akumulacijske i abrazijske terase (sl. 24). *Insolacija i hladjenje* mijenjaju obujam stijena u aridnim područjima, pa se površinski dijelovi stijena raspadaju. Djejanjem vjetra nastaje korozija, brušenje i smanjivanje promjera zrna, nastaju pijesci koje vjetar prenosi formirajući pri tom sipine ili dine. Ako je vjetar jak, može potpuno ogoliti stijene; to je kamenita pustinja. Šljunčane pustinje nastaju kada vjetar otpuše pijesak s površine,



Sl. 24. Akumulacijska i abrazijska terasa

a veći fragmenti šljunka prekriju preostali pjesak. Organizmi također oblikuju Zemljinu površinu. Svojim životnim aktivnostima oni razgradaju površinske dijelove litosfere i omogućavaju da se tako stvoreni materijal transportira na drugo mjesto djelovanjem ostalih egzogenih procesa.



Sl. 25. Ponikve u području Gračaca u Lici (Hrvatska)

Krš (kras, karst) čini posebnu značajku naše domovine. U nas je razvijen u neprekidnom pojusu od Istre do Albanije i čini gotovo trećinu čitave površine Jugoslavije. Naša krška područja navedena su u svjetskoj literaturi kao *locus typicus* krša, zahvaljujući ponajprije pojavi da je velik dio Jugoslavije izgrađen od debelih naslaga karbonatnih stijena, prvenstveno vapnenaca. U vapnencima, ranije tektonski oštećenim, zbog korozije vapnenaca u reakciji s ugljik-dioksidom, površina i podzemlje vapnenackih terena zadobilo je ekstremno bizarnu morfologiju. Škrape, žljebasta udubljenja od nekoliko milimetara do desetak centimetara, nastale su korozijom prilikom slijevanja vode površinom vapnenaca. Ponikve (vrtače) su ljevkasta udubljenja s promjerom od nekoliko metara do nekoliko stotina metara i s dubinom koja obično iznosi jednu trećinu promjera (sl. 25). Dno im je često pokriveno crvenicom. Smatra se da su nastale kao rezultat korozivnog širenja i udubljavanja u sredini koja je prije toga bila okršena i na površini i u podzemlju, pa su zbog snižavanja reljefa otvorene podzemne šupljine. Tako su stvorena inicijalna udubljenja koja su dalje korozijom zadobila ljevkaste oblike. Jame (sl. 26) su vertikalni otvori duboki ponekad i nekoliko stotina metara i često s vodom na dnu. Nastale su u ranijoj fazi okršavanja kao nastavci ponora kojima su površinske vode otjecale u niže predjele. Spilje su nastale kao kosi podzemni nastavak površinskog toka. Ima ih impozantnih dimenzija, s brojnim dvoranama i izvanredno lijepim spiljskim ukrasima (Postojnska jama, Škocjanska jama, Cerovačke pećine itd.). Krška polja (sl. 27) su zaravnjena velika udubljenja unutar vapnenackog područja, obično nekoliko puta veće duljine od širine. U našoj zemlji dulja osim leži na pravcu pružanja osnovnih geoloških struktura (sjeverozapad-jugoistok). Zaravnjena su neogenskim ili kvartarnim naslagama.



Sl. 26. Jama (ponor) Bunovac na Velebitu (Hrvatska)

Na jednom su im kraju izvori ili povremeni izvori, iz kojih nastaju stalni ili povremeni tokovi, koji na suprotnoj strani polja poniru (rijekе ponornice). Neka od polja su povremeno poplavljena. Svoj osnovni oblik krška polja su bila su djelovanjem tektonskih, u prvom redu zasjednih poremećaja. Konačno su oblikovana korozivnim i biokemijskim procesima i mehaničkom aktivnošću.

#### HIDROGEOLOGIJA

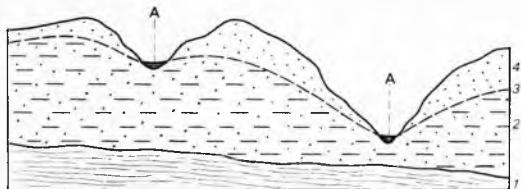
Hidrogeologija je geološka disciplina koja proučava područje podzemnih voda, zakonitosti njihova položaja i kretanja u ovisnosti o geološkim uvjetima i mogućnosti njihovog iskoristavanja. Prema načinu postanka, u podzemlju postoje: *juvenilna voda* nastala kondenzacijom vodenih para u unutrašnjosti Zemlje, *konatna voda* zaostala u stijenama iz vremena njihova stvaranja i *meteorska voda* (vodozna, oborinska, atmosferska voda) koja je u podzemlje došla s površine. Najčešće se susreće meteorska voda. Nakon što padne na površinu, meteorska voda dijelom ispari, jedan dio oteče površinski, a ostatak ponire. Na kretanje onog dijela što ponire u podzemlje utječe poroznost i propusnost stijena. *Poroznost* ( $n$ , u %) je udjel obujma svih pora u ukupnom obujmu stijene. Uzima se da je poroznost mala ako je  $n < 5\%$ , srednja ako je  $n = 5\dots 20\%$ , a velika kada je  $n > 20\%$ .

**Područja s primarnom poroznošću** građena su od klastičnih stijena, u kojima je između nakupljenih zrnaca i fragmenata primarno ostao međuprostor. To je međuzrnska ili intergranularna poroznost. Vrsta stijene i raspored čestica u stijeni određuju stupanj poroznosti, a s time i ukupnu količinu vode u stijeni. U hidrogeologiji je, međutim, češće važnija *propusnost stijena*, koju u stijenama primarne poroznosti ne određuje ukupni obujam šupljina u stijeni već veličina pora. Tako su npr. neke gline, usprkos tome što im poroznost iznosi i više od 50%, praktički nepropusne. Općenito su klastične stijene iz grupe lutita vodonepropusne, a nevezani su areniti i ruditni to propusniji što su im zrna većeg promjera. Propusnost se izražava jedinicom darcy (darsi), a to je propusnost stijene

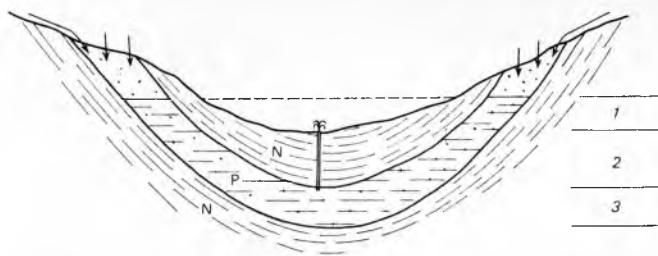


Sl. 27. Krško polje. Panorama Lipovog polja s humcima i tokom ponornice Like (Hrvatska)

kroz čiji presjek od  $1\text{cm}^2$  na putu od 1 cm protječe  $1\text{cm}^3$  tekućine u 1 s, uz pad tlaka od 1 atm ( $\sim 10^5\text{ Pa}$ ) i viskoznost od  $1\text{cP}$  ( $10^{-3}\text{ Nsm}^{-2}$ ). U praksi se za izražavanje propusnosti češće upotrebljava *koefficijent filtracije*,  $k$ , koji se izračunava formulom:  $k = I \cdot Q/F$ , gdje je  $Q$  količina vode koja protječe kroz stijenu,  $F$  površina presjeka stijene, a  $I$  hidraulički gradijent (visinska razlika između dviju točaka vodnog lica podijeljena s njihovom udaljenošću). Pri ovim proračunima valja paziti na ukupnu debljinu vodonosne stijene o kojoj ovisi propusna moć (transmisivnost). S obzirom na hidrodinamske karakteristike u podzemlju razlikuju se: vode prozračne zone, voda temeljnica i uklještene vode. *Vode prozračne zone* (zone aeracije) ne čine povezano vodeno tijelo i ispunjenost šupljina ovisi o dotoku meteorske vode. Dio vode je ovdje fizički vezan, a dio pod djelovanjem gravitacije otjeće u niže predjele, zaustavlja se na nepropusnom sloju tvoreći masu vode slobodne površine. To je *voda temeljnica* koja potpuno ispunjava šupljine i pore u podzemlju, a prema zoni aeracije odijeljena je vodnim licem, odnosno kapilarnim obrubom (sl. 28). Izmjenjuju li se propusni i nepropusni sedimenti, može se formirati nekoliko odvojenih horizontata vode temeljnice. *Uklještene vode* nalaze se u propusnim naslagama ograničenim nepropusnim stijenama, tako da geološki položaj omogućava nakupljanje vode u propusnim naslagama i stvaranje hidrostatskog tlaka (sl. 29). Zbog toga se vode uzdižu uzduž pukotina, pod tlakom izlaze na površinu (*arteške vode*) ili se izdižu samo do površine (*subarteške vode*).

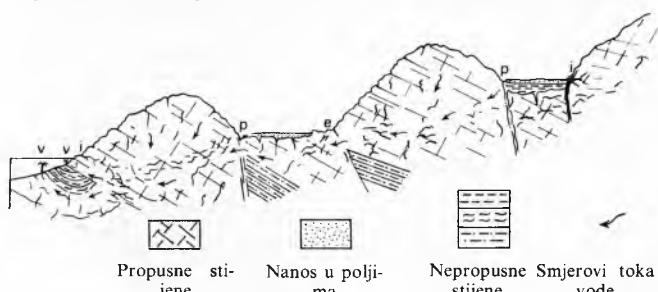


Sl. 28. Podzemne vode u područjima s primarnom poroznošću stijena. 1 nepropusna podloga, 2 voda temeljnica, 3 vodno lice, 4 zona aeracije, A površinski tokovi



Sl. 29. Uklještene vode. N nepropusne stijene, P propusne stijene; 1 arteške vode, 2 subarteške vode, 3 vode slobodne površine

**Područja sa sekundarnom poroznošću** građena su od stijena, koje su svoju poroznost zadobile tek nakon svog postanka (npr. eruptivi, vapnenci, dolomiti). Poroznost se očituje u šupljinama i pukotinama, koje su brojnije i veće u zonama tektonskih poremećaja, posebno rasjeda. Tipično područje sekundarne (pukotinske) poroznosti je područje našeg krša. Tu su hidrogeološke specifičnosti izražene u omjeru između količine vode i propusne moći krškog podzemlja, što je osobito izraženo u vrijeme oborinskog razdoblja (sl. 30). U krškom se podzemlju

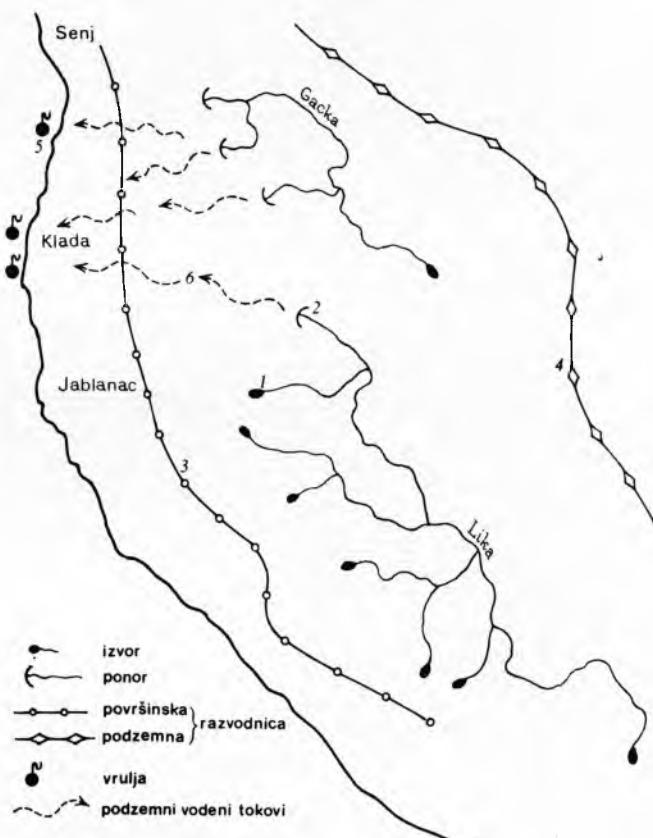


Sl. 30. Shema kretanja podzemnih voda u našem kršu iz unutrašnjosti prema moru. i izvor, p ponor, e estavela, v vrulja

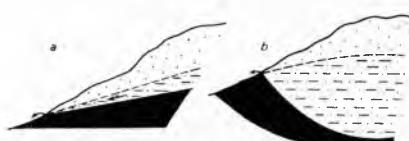
ne može očekivati pravilan raspored poroznosti i propusnosti, pa prema tome niti povezana vodena tijela slična vodi temeljnici u primarno poroznim terenima. Zbog toga je prije bilo kakvih zahvata potrebno dobro upoznati prostorni raspored propusnih područja i barijera (sl. 31). Primjer specifičnosti krške hidrogeologije i neočekivanosti hidroloških pojava jest nesklad površinskih i podzemnih razvodnica, kao što je to na području Velebita (sl. 32).



Sl. 31. Različite vrste barijera podzemnim vodama: 1 potpuna, 2 podzemna, 3 viseca, 4 nepotpuna



Sl. 32. Nesklad površinske i podzemne razvodnice u području Velebita i Like. 1 izvor, 2 ponor, 3 površinska razvodnica, 4 podzemna razvodnica, 5 vrulja, 6 podzemni vodeni tokovi



Sl. 33. Silazni izvor (a) i preljevni izvor (b)

**Izvori** su mesta koncentriranog istjecanja podzemnih voda na površinu, koja se redovito nalaze na dodiru propusnih i nepropusnih stijena, odnosno jače i slabije propusnih sredina. Često masa morske vode ili jezerske vode i riječni vodenih tokova čine barijeru koja usporava podzemne vode, pa se tada radi o priobalnim izvorima. Od gravitacijskih izvora najčešći su silazni i preljevni (sl. 33). Izvori pod pritiskom obuhvaćeni su pod nazivom arteški izvori (sl. 29). Posebno se moraju tretirati

krški izvori (sl. 34), jer je zbog specifičnosti krškog podzemlja hidrodinamika sabirnog područja neposrednog zaleda izvora veoma komplikirana i teško objašnjiva. Kapacitet (izdašnost) izvora izražava se u litrama na sekundu. Stalniji i manje izdašni su izvori u stijenama primarne poroznosti. Krški su izvori promjenljive izdašnosti, pa omjer između malih i velikih voda iznosi ponekad 1 : 100. Estavle su otvoru u krškim poljima koji u vrijeme velikih voda, kada krškim podzemljem ne mogu proteći sve vode s višim stepenica, djeluju kao izvori, a u vrijeme povlačenja voda kao ponori. Vrulje su podmorski izvori bočate vode, a smatra se da se nalaze na mjestima nekadašnjih ponikava koje su podizanjem razine mora nakon diluvija potopljene.



Sl. 34. Krški izvor Tounjčice (Hrvatska)

Vode se troše izravno, npr. u vodoopskrbi i industriji, ili se akumuliraju za hidroenergetske potrebe, za navodnjavanje i u novije vrijeme za piće. U područjima građenim od stijene primarne poroznosti podzemne vode nalaze se relativno plitko i do njih se dolazi vertikalnim kaptažama (bunarima ili bušotinama), iz kojih se crpenjem dovode do površine. Iz većih dubina vode ponekad pod tlakom same izlaze na površinu. Pri rasporedu bunara treba voditi računa o njihovom razmaku, o propusnosti vodonosnog sloja, te o trajanju i intenzitetu crpenja kako ne bi došlo do općeg sniženja razine vode temeljnica. Stoga se moraju razlikovati rezerve podzemnih voda. U prirodnim uvjetima dinamičke rezerve čine one vode koje otječu, a statičke rezerve ostaju u podzemlju. Statičke rezerve mogu biti stalne (ispod zone kolebanja) i promjenljive (u zoni kolebanja razine podzemnih voda). Prilikom eksploracije ne bi se smjele trošiti stalne statičke rezerve, jer bi se poremetilo prirodno stanje podzemnih voda. Stoga prije većih eksploracijskih zahvata treba provesti višegodišnje istraživanje i izračunati bilancu voda.

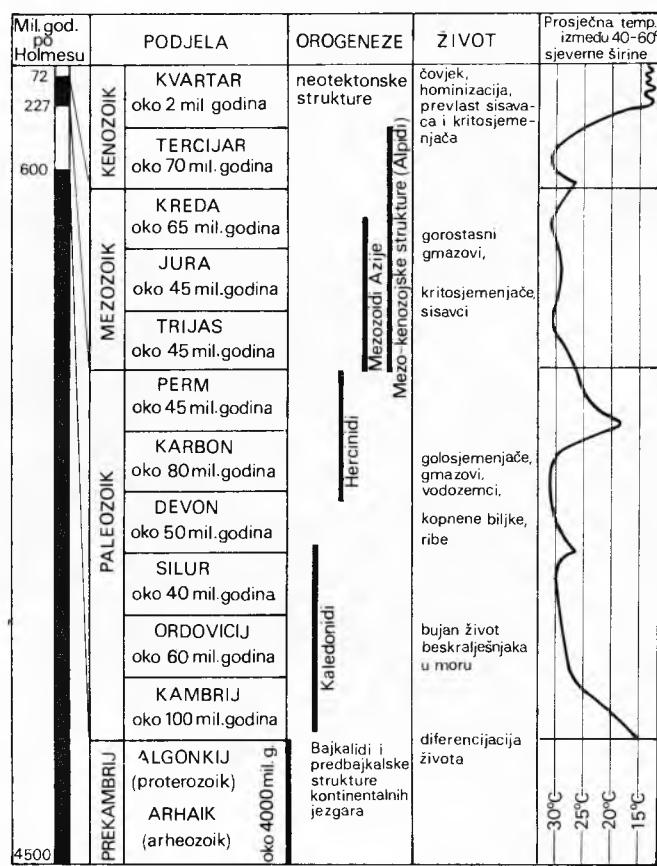
Pored kaptiranja i povećavanja kapaciteta postojećih izvora u kršu se podzemni vodenim putovima buše ili presjecaju galerijama. U novije vrijeme na obalnom se području putem injekcijskih zavjesa u zaledu priobalnih izvora stvaraju uspori slatke vode, a uz to se sprečava zasljanjivanje izvořista morskom vodom. Pronalaženje dovoljnih količina voda u kršu redovito je komplikiran, neizvještan i skup zahvat. Zbog toga je novija vodoprivredna politika orijentirana na vodoopskrbu regionalnim vodovodima iz postojećih ili budućih akumulacija u hidroenergetskim sustavima. U Jugoslaviji je zbog izuzetno povoljnog reljefa moguće akumulirati vode u unutrašnjosti (Lokvarsко jezero, Kruščica, Peruća, Buško Blato, Trebišnjica, Bileća itd.) i dovesti ih na relativno visokoj koti do pred obalu mora. Te se vode osim za proizvodnju električne energije mogu upotrijebiti za vodoopskrbu velikih područja uz obalu i na otocima.

## STRATIGRAFSKA GEOLOGIJA

Stratigrafska geologija geološka je disciplina koja proučava razvojni put Zemlje, prilike okoline u vrijeme stvaranja stijena, paleogeografske prilike pomoću rekonstrukcije fizičko-geografskih slika pojedinih razdoblja u razvoju Zemlje, klimatska kolebanja u geološkoj prošlosti (paleoklimatologija), vremenski slijed magmatske aktivnosti i vremenski slijed života na Zemlji (biostratigrafija). Osnova za bilo kakvu stratigrafsku rekonstrukciju je već spomenuti zakon o superpoziciji slojeva, prema kojem je u neporemećenom slijedu slojeva donji sloj najstariji, a zatim redom slijede sve mlađi slojevi. Starost stijene može se utvrditi uz pomoć fosilnih ostataka biljaka i životinja koji su dospjeli u sedimente u vrijeme njihova stvaranja (v. Paleontologija). Radi toga se proučavaju tzv. provodni fosili koji su u određenoj geološkoj etapi živjeli na širokom arealu ali kratko vrijeme. Starost slojeva određena pomoću fosila je relativna starost jer daje samo relativno vremenske odnose među slojevima u smislu starije-mlađe, ne ulazeći u točniju odredbu stvarne starosti stijena. Određivanje približno stvarne starosti stijena osniva se na saznanju o stalnosti brzine raspadanja radioaktivnih elemenata i inaktivnosti krajnjeg produkta njihova raspadanja. Ako se poznata brzina raspada radioaktivnog izotopa, može se na temelju količina preostalog radioaktivnog izotopa i produkata nastalih njegovim raspadanjem izračunati trajanje radioaktivnog procesa, a tako i starost materijala koji sadrži taj radioaktivni element. Na taj je način u Južnoj Africi u Transvalu procijenjena starost prekambrijskih naslaga na 3,5 milijarde godina, pa su to zasad najstariji poznati sedimenti u svijetu. Za rekonstrukciju većine geoloških zbivanja dovoljno je poznavanje relativne starosti stijena.

Geološka prošlost Zemlje ima četiri glavna razdoblja: prekambrij, paleozoik, mezozoik i kenozoik (sl. 35).

**Prekambrij.** Dosadašnji proračuni pokazuju da je od početka formiranja Zemlje kao samostalnog svemirskog tijela pa do paleozoika prošlo 4 milijarde godina. Kroz to se vrijeme stvorila primarna litosfera, hidrosfera i atmosfera, a započeo je i život i njegov razvoj u životinjskom i biljnog smjeru. Tada postoje



Sl. 35. Podjela geološke prošlosti

već i morski sedimentacijski prostori, formiraju se geosinklinalne i sigurno je da je bilo i orogeneze. Prekambrijskih stijena nalazi se na Zemlji na području tzv. štitova, tj. najstarijih stabilnih masa litosfere. Na tlu Jugoslavije u prekambriju je nastala srpsko-makedonska masa.

**Paleozoik** ima šest razdoblja: kambrij, ordovicij, silur, devon, karbon i perm. Život se u moru snažno razvija i prelazi i na kopno. Nastavlja se orogenetska aktivnost započeta u prekambriju (Bajkalska orogeneza). Kaledonska orogeneza odigrala se u starijem, a hercinska orogeneza u mlađem paleozoiku. Tim su orogenetizama prošireni postojeći kontinenti tako da se tragovi hercinske orogeneze nalaze u gorskim lancima svih kontinenata. Paleozojske stijene razvijene su u različitim područjima Jugoslavije. U manjoj mjeri dokazane su stijene *kambrija* (istočna Srbija) i *ordovicija* (pješčenjaci i škriljavci u istočnoj Srbiji i Makedoniji). Stijena iz *silura* i *devona* ima nešto više (posavske bore u Sloveniji, u Bosni između Sane i Une, u Hrvatskoj na Zagrebačkoj gori i Trgovskoj gori, u istočnoj i zapadnoj Srbiji). Naslage stijena iz *karbona* i *perma* javljaju se na širem prostoru kao vapnenci i klastiti (Jezersko, Zagrebačka gora, Kordun i Banija, Gorski kotar, Velebit, Lika, istočna Bosna, Srbija). Osim marinskih naslaga ustanovljeni su u istočnoj Srbiji sedimenti kopnenog porijekla s ostacima kopnenog bilja (dolina Mlave i Peka).

**Mezozoik** ima tri razdoblja: *trijas*, *juru* i *kredu*. U mezozoiku su se dogodile mnoge biološke promjene, a promjenjeno se i raspored kopna i mora. Znatni orogenetski pokreti na prijelazu iz paleozoika u trijas poznati su kao pfalačka orogenetska faza. Manjih nemira bilo je u trijasu u rano-karnijskoj fazi i u kredi (austrijska orogenetska faza). Mezozojske naslage izgrađuju gotovo trećinu Jugoslavije: gotovo čitavu Sloveniju, velike dijelove Hrvatske te Bosne i Hercegovine južno od Save, Crnu Goru i zapadnu Srbiju. Stijena iz mezozoika nadalje ima u srednjoj i istočnoj Srbiji i nešto manje u Makedoniji. U zapadnom dijelu Jugoslavije prevladavaju karbonatni sedimenti (vapnenci i dolomit), a u istočnom klastične stijene (gline, lapori, pješčenjaci). Gotovo čitavo obalno područje naše zemlje u prosječnoj širini oko 50–70 km izgrađeno je od vapneničkih naslaga iz krede, samo djelomično iz jure i trijasu. Ukupna primarna debljina naslaga mezozoika, više od 3000 m bez znatnijih prekida u sedimentaciji, dokaz je stabilnosti geosinklinalnih odnosa tokom mezozoika na ovim područjima.

**Kenozoik** čine tercijar i kvartar. Stijene *tercijara* u našim su krajevima transgresivne na krednim naslagama. Posljedice kopnene faze prouzrokovane laramijskim izdizanjem, koje je prethodilo transgresiji, ležišta su ugljena (Raša, Labin) i boksita. Stijene iz ranijeg razdoblja tercijara, *paleogen*, znatnije su rasprostranjene u Sloveniji, Istri i Ravnim kotarima a nalaze se i na čitavom obalnom području i većini otoka kao jezgra sinklinala. Važnije od ostalih je srednje razdoblje paleogen, *eocen*, u kojem nastaje fliš (lapori, konglomerati, pješčenjaci, vapnenci u vertikalnoj izmjeni). To su vodom bogatija i plodna područja u našem kršu. Najmlade razdoblje paleogen, *oligoцен*, obilježeno je bazenskim prostorima i stoga sedimentima,

kao što su glina, breča, pješčenjaci i ponegdje ugljen (npr. Golubovec u Hrvatskoj, Bogovina u Srbiji). Naslage iz neogena, kasnjeg razdoblja tercijara (lapori, pješčenjaci, vapnenci), nalaze se u povezanom pojusu od sjeveroistočne Slovenije, preko sjeverne Hrvatske i sjeverne Bosne do sjeverne Srbije. Manji bazeni vezani su za krška polja ili druge depresije. Pored glina, pjesaka i laporanog pjeska.

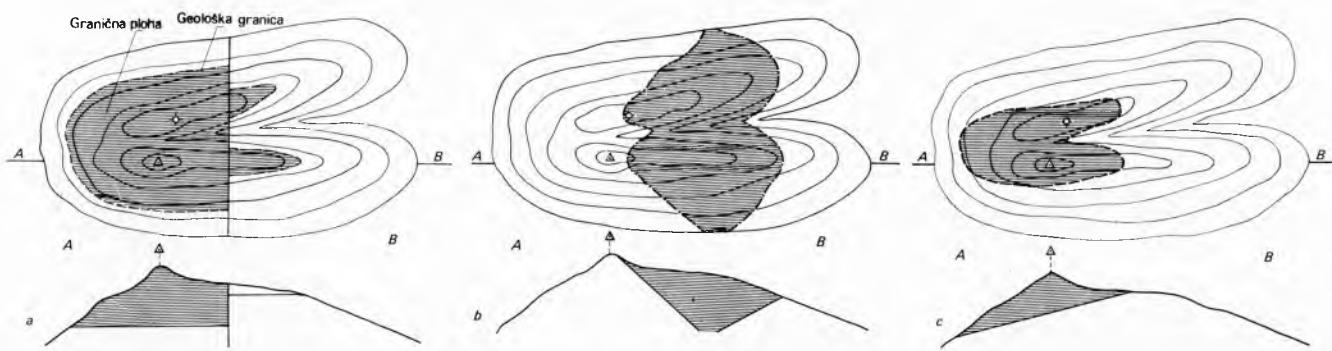
**Kvartar** čine *pleistocen* (diluvij) i *holocen*. Pleistocenska oledba spustila je snježnu granicu 1000 m niže od današnje, a ledeni pokrivač je u Evropi sezao sve do četrdesetog stupnja sjeverne širine. Za čitavog pleistocena izmjenjivala su se ledena doba (glacijali) i toplija doba (interglacijali). Takva klimatska kolebanja odrazila su se u formiranju rijeka i njihovom pojačanom erozivnom djelovanju. To je dovelo do taloženja debelih nanosa na nižim područjima. Holocen obuhvaća posljednjih 15–20 tisuća godina. Najveća promjena u našim krajevima zbila se podizanjem razine mora zbog otapanja leda oko 96 m. Od sedimenta iz tog doba treba spomenuti pjeske, šljunke i gline u dolinama i zavalama.

### GEOLOŠKE KARTE

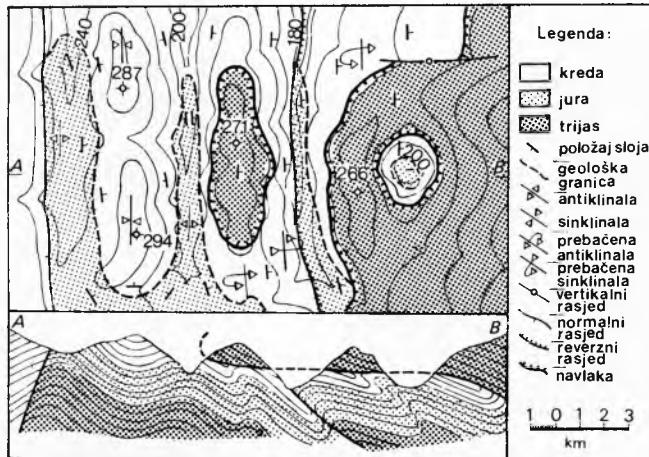
Geološka istraživanja, čiji je cilj rekonstruiranje geoloških zbivanja i dobivanje predodžbe o današnjem prostornom položaju geoloških tijela (stijena sličnih karakteristika), mogu se grafički predočiti pomoću geoloških karata. To je grafička sinteza saznanja o geološkim odnosima nekog područja. S geometrijskog stanovišta, geološka karta je ortogonalna projekcija geoloških struktura s reljefom. Budući da je današnji položaj izdvojenih lithostratigrafskih članova samo posljedica točno određenih i nema poznatih činilaca u geološkoj prošlosti (superpozicija, tektonski poremećaji), presjecanje površina, koje omeđuju neko geološko tijelo, i reljefa rezultirat će uvijek točno određenim efektima na površini. Pri tome se redovito upotrebljavaju dva pojma: *granična ploha* i *geološka granica*. Granična ploha razdvaja dva različita geološka tijela. Geološka granica je linija na geološkoj karti, koja označava presjek reljefa s graničnom plohom (sl. 36).

Prema sadržaju, geološke su karte osnovne ili klasične i specijalne geološke karte.

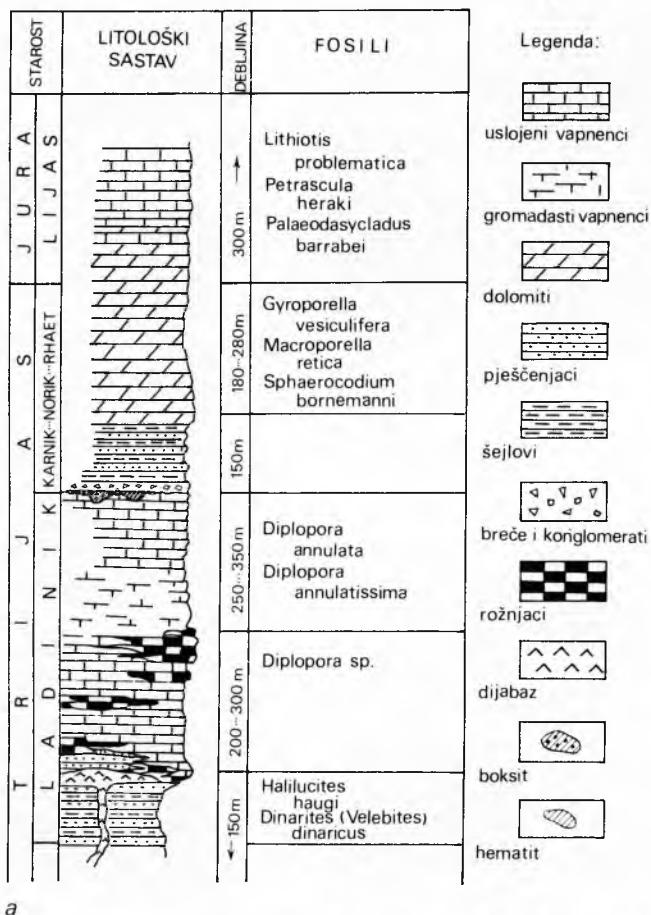
**Osnovne geološke karte** sadrže standardne oznake pomoću kojih se opisuju geološke karakteristike prikazanog terena (sl. 37). Starost članova izdvojenih na karti opisuje se simbolom i bojom: paleozoik – sivo, smeđe, sivomaslinasto, trijas – ljubičasto, jura – plavo, kreda – zeleno, tercijar – žuto, kvartar – bez boje. Tamniji ton iste boje označava starije a svjetlij ton mlade stijene. Geološka granica označena je crnom crtom ako je kontakt dvaju geoloških tijela superpozicijски normalan. Crna crta s točkama u mlađem članu označava transgresivan kontakt, a deblja crvena crta anormalan kontakt (rasjed ili navlaku). Ako su karakter i mjesto kontakta sigurno određeni, crta je neprekinuta, a ako se prepostavljaju, crta je isprekidana. **Položaj slojeva** prikazan je znakom u kojem dulja crta označuje pružanje sloja (presjek sloja s horizontalnom ravninom), a kraća crta smjer nagiba sloja (presjek sloja s vertikalnom ravninom). Broj uz oznaku položaja je kut nagiba sloja.



Sl. 36. Odnos geološke granice i izohipsa: a horizontalna granična ploha (isprekidana linija) i vertikalna granična ploha (puna linija); b granična ploha nagnuta u smjeru nagiba terena strmije od terena (lijevo) i granična ploha nagnuta suprotno od nagiba terena (desno); c granična ploha nagnuta u smjeru nagiba terena blaže od terena



Sl. 37. Geološka karta (gore) i geološki profil (dolje) s važnjim geološkim znakovima



Sl. 38. Geološki stup (a) i geološki profil (b) trijaskih naslagi u području Donjeg Pazarista u Lici

Geološki stup, koji se obično prilaže uz geološku kartu, prikazuje slijed stvaranja stijena u području koje obuhvaća karta, zatim litološki sastav stijena, debeljinu pojedinih izdvojenih članova i karakteristični fosilni sadržaj. Sve se to prikazuje u primarnim odnosima, bez promjena uzrokovanih naknadnim tektonskim poremećajima (sl. 38 a).

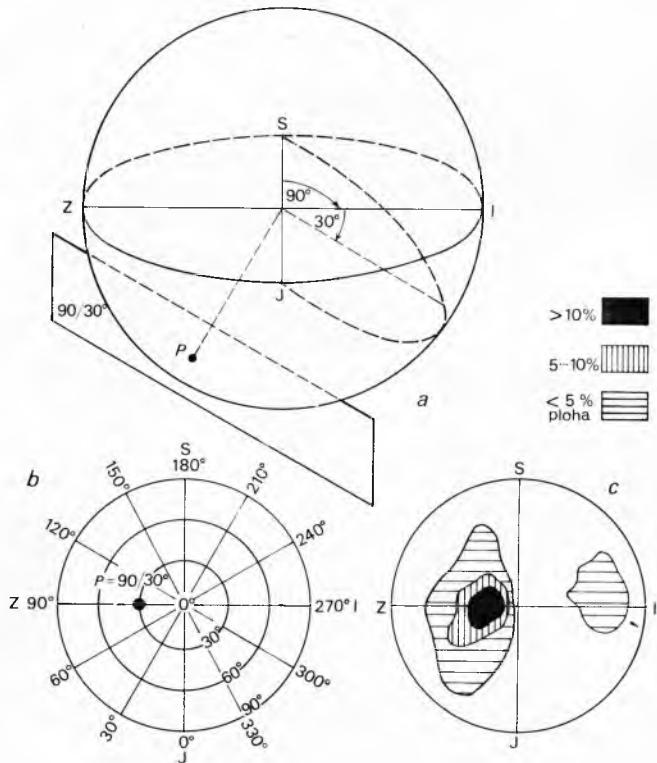
Geološki profili prikazuju presjek terena, obično u području vrlo karakterističnih tektonskih struktura. U njima su prikazani stvarni nalazi na terenu, ali su rekonstruirani erodirani dijelovi i nedostupni dubliji dijelovi litosfere (sl. 38 b).

Specijalne geološke karte vezane su uz određenu užu problematiku. To su hidrogeološke, inženjerskogeološke, tektonske, strukturne, fotogeološke karte i druge.

Hidrogeološke karte izrađuju se na osnovi geoloških podataka, a interpretacija i grafički prikaz orientirani su na odnos terena i voda. Zbog toga je najčešće više stratigrafskih članova spojeno u jedan hidrogeološki član, a prema hidrogeološkoj funkciji izdvajaju se područja barijera (potpune, viseće, podzemne, ne-potpune itd.) i propusna područja (s visokim podzemnim vodom, s primarnom poroznošću i dr.). Takva karta mora sadržavati podatke o površinskoj hidrografiji, rasporedu i kretanju podzemnih voda (hidroizohipse, izobate), fizičke i kemijske karakteristike voda itd.

Inženjerskogeološke karte ističu prvenstveno geomehaničke osobine stijena i njihovu stabilnost. Osim prikaza vrsta stijena prema litološkom sastavu i položaju, izdvojena su područja koja su potencijalna klizišta, labilne padine, nehomogene stijene, područja ubrzanog spiranja, jaružanja itd. Prikazane su i mogućnosti eksploatacije građevnog materijala. Za izradbu takvih karta upotrijebljeni su podaci dobiveni plitkim bušenjem, raskopima i sl. Inženjerskogeološke karte izrađuju se osobito detaljno za mjesto budućih velikih objekata, kao što su brane, tuneli, mostovi, kamenolomi itd. Svrha im je da omoguće građevinskom inženjeru ocjenu i prognoziranje ponašanja stijena nakon izvedbe objekta. Posebni je aspekt inženjerskogeoloških karata seismološka rajonizacija, o kojoj mnogo ovisi planiranje i projektiranje budućih objekata.

Tektonske karte prikazuju karakteristične strukturne jedinice i njihove komplekse kao posljedicu orogenetskih pokreta na Zemlji. Neotektonske karte prikazuju rezultate tektonskih gibanja u neogenu i kvartaru, a plod su mnogostranih studija današnjeg reljefa i geofizičkih rezultata. Komparativni studij inženjerskogeoloških elemenata i neotektonike u novije vrijeme dao je vrijednih rezultata prilikom određivanja mikrolokacija velikih objekata (brana, strojarnica i sl.).



Sl. 39. Konturni dijagram. a položaj mjerene plohe 90/30° u središtu zamišljene lopte i probodište normale P na plaštu lopte, b azimutna projekcija polulopte s nanesenim probodištem plohe 90/30°, c primjer konturnog dijagrama s koncentracijom ploha diskontinuiteta oko položaja 90/30°

*Strukturne karte* izrađuju se radi upoznavanja prostornog položaja nekog za privredu zanimljivog horizonta u podzemlju. Krovinske ili podinske plohe traženog geološkog tijela prikazuju se stratoizohipsama, tj. linijama koje spajaju točke istih absolutnih visina, odnosno dubina.

*Fotogeološke karte* izrađuju se pomoću aerosnimaka na načelu stereofotografije. Mogućnosti fotogeoloških obradbi veoma su velike, jer vrlo povećane i kvalitetne fotografije prikazuju i najsitnije detalje. U veoma kratkom roku može se dobiti pregled nad velikim prostranstvima, što je za projektiranje, npr. cesta ili pruga vrlo podesno. Pomoću fotografije u boji ili u infracrvenoj tehnici, mogu se otkriti nepredvidive teškoće (močvarni ili podvodni tereni i sl.).

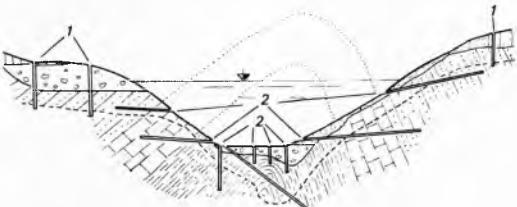
*Dijagrami* prikazuju rezultate statističke obrade geoloških podataka. Izrađuju se radi strukturnih, tektonskih, hidrogeoloških i drugih interpretacija, a osnivaju na mnogobrojnim mjerljima, prvenstveno planarnih elemenata (slojevi, škriljavost, putotine, rasjedi), ali i linearne (npr. osi bora). Od nekoliko postojećih vrsta dijagrama najupotrebljiviji je tzv. *konturni dijagram* (sl. 39). On se temelji na predodžbi da svaka od mjerljenih ploha prolazi kroz središte zamišljene lopte, a prodor normale te plohe kroz plašt lopte daje probodište  $P$ , točku koja predstavlja položaj plohe. Tako dobivena točka nanosi se na azimutnu projekciju polulopte, čime je položaj plohe potpuno određen. Koncentracija točaka na pojedinim mjestima na azimutnoj projekciji označava prevladavajuće položaje mjerljenih ploha, pa se pomoću posebne mreže-brojača izolinijama izdvajaju polja s jednakim brojem točaka, što na kraju daje konturni dijagram. Više mjerljenja daje i veću vjerojatnost približavanja stvarnom stanju diskontinuiteta u stijeni. Konturne dijagrame s manje od 50 mjerljenih ploha ne bi trebalo izradivati.

S. Bahun

## INŽENJERSKA GEOLOGIJA

Pod inženjerskom geologijom podrazumijeva se grupa znanstvenih disciplina koje se bave istraživanjem terena za potrebe prostornog planiranja, projektiranja i gradnje u oblasti građevinarstva, rудarstva, energetike, poljoprivrede, šumarstva i dr. Osnovni su objekti ispitivanja u inženjerskoj geologiji stijene, geološki procesi i inženjerskogeološke pojave. Pri ispitivanju stijena proučavaju se ovi elementi: stijena kao prirodna podloga objektima, tj. kao sredina na kojoj se gradi, stijena kao sredina u kojoj se izvode inženjerski radovi (podzemni objekti), stijena kao prirodni građevni materijal. Svrha je proučavanja geoloških procesa, ocjena stupnja njihove opasnosti za objekte, njihov utjecaj na stabilnost i sigurnost objekta i na izvođenje radova, te prognoziranje promjena geodinamičkih uvjeta u toku građenja i pod djelovanjem inženjerskih zahvata. U inženjerskogeološkom pogledu važni su osobito oni geološki procesi koji uzrok uju intenzivne deformacije terena. To su npr. erozija, abrazija, bujice, klizanje, krške deformacije terena, seizmički procesi i dr. Svi su ti procesi egzogeni i endogeni, tj. procesi koji su vanjskog podrijetla, odnosno koji nastaju u unutrašnjosti Zemlje. Egzogeni geološki procesi mogu se mijenjati inženjerskim radovima, ali se na endogene procese ne može utjecati, pa im se praksa građenja i eksploatacije objekata mora prilagoditi.

Zadaci su inženjerske geologije raznovrsni. Rezultati ispitivanja primjenjuju se u planiranju i projektiranju hidroenergetskih objekata (brana, akumulacija, tunela, strojarnica, injekcijskih radova), cesta, željeznica, tunela, mostova, za sprečavanje klizanja i erozijskih procesa, za izradbu urbanističkih planova gradskih

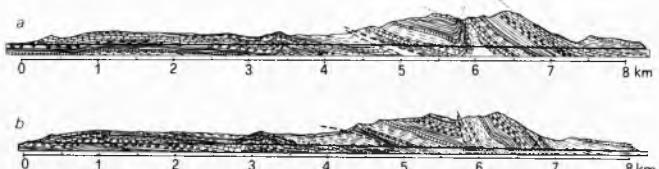


Sl. 40. Istražni radovi na pregradnom profilu. 1 istražne bušotine, 2 istražni potkop

područja, u seizmičkoj mikrorajonizaciji i dr. Svi ti radovi iziskuju uskladen rad stručnjaka raznih profila.

*Inženjerskogeološka istraživanja tla* za hidroenergetske objekte ubrajuju se među najsloženije radeove u inženjerskoj geologiji. Geološkim istražnim radovima treba odrediti najpovoljnije pregradne profile za lociranje brane (sl. 40), način i dubinu temeljenja, predviđeti slijeganje tla ispod brane, te veličinu procjeđivanja i način sprečavanja procjeđivanja ispod i oko brane. U planiranju akumulacijskih bazena mora se odrediti vodonepropusnost i postojanost bokova dolina. Na ostalim objektima treba odrediti fizičko-mehanička svojstva svih stijena. Pogrešna ocjena inženjerskogeoloških odnosa može prouzrokovati katastrofu.

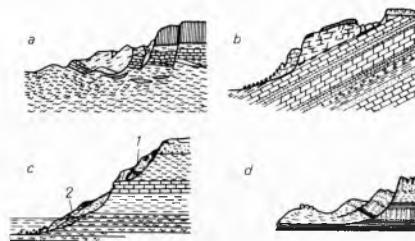
Inženjerska geologija vrlo je važna u *gradnji tunela*. Tu su bitni mnogi inženjerskogeološki činioци: otpor stijenskih masa pri radu (bušenje, miniranje), ovodnjenošnost terena, povišena temperatura, pojava podzemnih tlakova, štetnih plinova i kemijski agresivnih voda. Ti činioци ovise posredno ili neposredno o čitavom nizu drugih faktora kao što su npr. litološki sastav stijena i njihova fizička svojstva, način pojavljivanja i prostorni položaj stijenskih masa, tektonska oštećenost, morfološka i hidrogeološka svojstva terena, geološki procesi. Svaki od ovih činilaca u specifičnim terenskim uvjetima može biti presudan za trajanje građenja, cijenu i opće uvjete izvođenja radova. Na sl. 41 prikazan je profil tunela. Profil a, tzv. prognozni profil izrađen je na temelju geološke studije prije probijanja tunela, a profil b konstruiran je nakon probijanja tunela. Vidi se da je prognozni profil vrlo blizak stvarnom. Veće razlike postoje samo uzduž rasjednih linija.



Sl. 41. Prognostni profil (a) i profil nakon izgradnje tunela (b) (tunel Hauenstein, Švicarska, 1916)

*Izbor pravca puta ili željeznice* i način njegova građenja određen je ne samo tehničko-ekonomskim uvjetima već i nizom prirodnih faktora: karakterom reljefa, inženjerskogeološkim karakteristikama terena, tektonskom strukturonom, hidrogeološkim prilikama, klimom i dr. Inženjerskogeološkim radovima određuju se fizičko-mehanička svojstva stijena, utjecaj geoloških procesa na formiranje klizišta, jaruga, na ubrzane erozije i druge pojave koje mogu utjecati na gradnju i sigurnost objekata.

*Klizišta* su fizičko-geološke pojave polaganog, ponekad i brzog kretanja zemljanih masa po padini. Do kretanja dolazi zbog promjena napona smicanja u stijenama. Najvažniji faktori koji mogu poremetiti stabilnost padina jesu promjene nagiba reljefa (erozija, ustrmljivanje pokosa), opterećivanje padine (diluvijalne i aluvijalne nakupine, gradnja nasipa, opterećenje materijalom iz zasjeka i usjeka), vibracije, udari, potresi, promjene režima podzemnih i površinskih voda (promjena hidrauličkog gradijenta, povećanje brzine, naglo opadanje ili podizanje razine vode), raspadanje stijena, vegetacija, koja mehanički stabilizira padine, apsorbira dio vode i smanjuje strujni tlak itd. Klizišta se mogu pojavitи gotovo u svim vrstama stijena (sl. 42).



Sl. 42. Različiti tipovi klizišta: a klizište preko plastične glinene podloge, b otkidanje po slojnim ploham, c shema padine s dva klizna horizonta (1, 2), d schematski presjek kliznog cirka

Najčešća su klizanja površinskog raspadnutog materijala, te klizanja u lutitskim sedimentima (glina, lapori, škriljavci). Nestabilnosti čvrstih stijena pojavljuje se uzduž slojnih ploha, pukotina ili pri nepovoljno položenim slojevima s ulošcima glina ili lapora.

Veliko značenje imaju inženjerskogeološki radovi u *gradnji naselja i većih industrijskih objekata*. Tu su važni prirodni uvjeti mesta i reljef, inženjerskogeološke i hidrogeološke karakteristike tla, eventualna aktivnost fizičko-geoloških procesa. Područje s pogodnim prirodnim uvjetima ne zahtijeva velike pripremne radove. Nepovoljni prirodni uvjeti (klizišta, jaruge, brežuljkasti reljef, visoka razina podzemne vode, mogućnost plavljenja površinskim vodama) znatno otežavaju inženjersku pripremu terena za gradnju, a mogu je i potpuno onemogućiti.

Jugoslavija se ubraja u seizmički najaktivniji područja u Evropi, pa zato pri projektiranju objekata valja paziti na moguće djelovanje potresa. Na područjima istog predvidivog stupnja intenziteta potresa često postoje tla, koja se međusobno bitno razlikuju po svojim inženjerskogeološkim, hidrogeološkim, morfološkim i geomehaničkim svojstvima. Lokalne inženjerskogeološke, hidrogeološke i morfološke prilike mnogo utječu na veličinu seizmičkih opterećenja, pa su inženjersko-geološka istraživanja nužna u racionalnom projektiranju i građenju građevinskih objekata.

A. Magdalenić

LIT.: D. P. Krynine, W. R. Judd, Principles of engineering geology and geotechnics, McGraw-Hill Comp. Inc., New York-Toronto-London 1957. — P. C. Badgley, Structural methods for the exploration geologist, Harper & Brothers, Publishers, New York 1959. — A. Holmes, Principles of geology, Thomas Nelson, London 1965. — S. V. Medvedev, Inženjerska seismologija (prijevod), Građevinska knjiga, Beograd 1965. — P. N. Panjukov, Inženjerska geologija, Građevinska knjiga, Beograd 1965. — N. Milojević, Hidrogeologija, Zavod za izdavanje udžbenika SR Srbije, Beograd 1968. — T. W. Lambe, R. V. Whitman, Soil mechanics, John Wiley Comp. Sons, New York-London-Sidney-Toronto 1969. — M. Herak, V. T. Stringfield, Karst, karst regions of the northern hemisphere, Elsevier Publishing Company, Amsterdam-London-New York 1972. — M. Tajder, M. Herak, Petrologija i geologija, Školska knjiga, Zagreb 1972. — A. Cox, Plate tectonics and geomagnetic reversals, W. T. Freeman Comp., San Francisco 1973. — M. Herak, Geologija, struktura, dinamika i razvoj Zemlje, Školska knjiga, Zagreb 1973. — C. K. Seifert, L. A. Sirciu, Earth history and plate tectonics, Harper & Row Publishers, New York 1973. — E. E. Wahlstrom, Dams fundation and reservoir sites, Elsevier Publishing Company, Amsterdam-Oxford-New York 1974. — A. Zaruba, V. Mencí, Engineering geology, Elsevier Publishing Company, Amsterdam-New York 1976.

S. Bahun A. Magdalenić

**GEOMETRIJA**, dio matematike u kojem su prvo bitno bila proučavana svojstva prostora i objekata u prostoru. Nastala je iz problema u praksi kao što su npr. mjerjenje zemljista i izračunavanje oplošja i obujma različitih tijela. U daljem razviku, geometrija je obuhvatila mnogo šire područje problema, praktičnih i apstraktnih, koji mogu, ali ne moraju uvijek, imati praktičnu primjenu. Prvobitno se geometrija dijelila na planimetriju (geometriju ravnine) i stereometriju (geometriju prostora).

Najjednostavniji pojmovi i činjenice iz geometrije bili su poznati već u starom Egiptu i Babilonu oko -2000. god. Te su činjenice bile formulirane u obliku pravila, čiji dokazi nisu dani. Od -VII st. geometrija se razvija uglavnom u staroj Grčkoj. Različiti pojmovi i činjenice postepeno se povezuju u sustavnu cjelinu i počinje njihova sistematizacija. U to su vrijeme načinjeni i prvi, relativno strogi dokazi geometrijskih tvrdnji. Geometrija postaje znanost.

Euklid ( $\leftarrow 365?$  do  $\leftarrow 300?$ ) u djelu *Elementi* povezao je gotovo sve dodatačne znanje iz geometrije u logičnu cjelinu i postavio znanstvene temelje razvijajući geometrije. U tom je djelu geometrija zasnovana kao deduktivna znanost. Euklid je najprije opisao osnovne pojmove, definirao izvedene pojmove, formulirao osnovne pretpostavke (postulati i aksiome), a zatim redom dokazao tvrdnje (poučke), kojima se opisuju svojstva geometrijskih pojmove (pravac, poligon, kružnica, geometrijska tijela).

Rješavajući neke konstruktivne probleme, stari su Grci pronašli krivulje 2. stupnja (elipsa, parabola i hiperbola), čija je svojstva vrlo podrobno istražio Apolonije ( $\leftarrow 262?$  do  $\leftarrow 190?$ ), koristeći se pri tom i metodom koordinata, iz koje se kasnije razvila analitička geometrija. Arhimed ( $\leftarrow 287?$  do  $\leftarrow 212$ ) postavio je temelje infinitesimalnog računa. U radovima Grka nalaze se i počeci trigonometrije. Njihova je matematika došla u Evropu posredstvom arapskih srednjovjekovnih matematičara.

U XVII st. radovima R. Descartesa (1596—1650) i P. Fermata (1601—1665) nastaje *analitička geometrija* ravnine i prostora, a radovima L. Eulera (1707—1783), G. Mongea (1746—1818) i K. F. Gaussa (1777—1855) *diferencijalna geometrija*. U tim se granama geometrije svojstva geometrijskih objekata istražuju metodom koordinata i primjenom algebri, odnosno diferencijalnog računa.

G. Monge je postavio i temelje za *deskriptivnu geometriju*, u kojoj se svojstva geometrijskih objekata proučavaju metodom projiciranja i grafičkim metodama. Polazeći od metoda projiciranja, razvili su J. V. Poncelet (1788—1867), J. Steiner (1796—1863), a zatim i C. H. von Staudt (1798—1867), *projektivnu geometriju*, kojoj se za razliku od tzv. metričkih svojstava proučavaju samo tzv. projektivna svojstva, služeći se pri tom i radovima G. Desarguesa (1593—1662) i B. Pascala (1623—1662).

Još od Euklida pokušavalo se njegov 5. postulat dokazati uz pomoć preostalih postulata i aksiona, jer se zbog složenosti 5. postulata opravdano očekivala mogućnost tog dokaza. Dovoljno je reći da je Euklidov 5. postulat u biti ekvivalentan s Hilbertovim aksiomom o postulatima. Međutim su, u prvoj polovini XIX st., N. I. Lobačevski (1792—1856), J. Bolyai (1802—1860) i K. F. Gauss pokazali da se 5. postulat ne može dokazati, jer se zamjenom tog postulata suprotnom tvrdnjom dobiva nova, tzv. *neeuklidska* ili *hiperbolička geometrija*, koja je isto tako neprutorječna kao do tada jedina poznata *euklidska geometrija*. Ta spoznaja imala je veliki utjecaj na budući razvitak ne samo geometrije nego i cijele matematike, pa i fizike. Pokazalo se da pojam prostora nije aprioran, nego da su logički mogući različiti pojmovi prostora. Odgovor na pitanje, koja geometrija bolje predočuje svojstva fizičkog prostora, ne može dati matematika, nego eventualno samo fizički pokus. H. Grassmann (1809—1877) i L. Schläfli (1814—1894) zasnivaju *višedimenzionalnu geometriju*, u kojoj se algebarske jednadžbe tumače kao predstavni geometrijskih objekata u višedimenzionalnom prostoru, analogno kao što se to čini u analitičkoj geometriji ravnine i prostora. Grassmannov rad potiče razvijati *vektorskog računa*, za koji je zaslужan i W. R. Hamilton (1805—1865). B. Riemann (1826—1866) popočuje ideje Gaussa, Lobačevskog i Grassmanna i izgrađuje pojam *n-dimenzionalnog analitičkog prostora*, kojem su do tada poznati prostori posebni slučajevi. B. Riemann pretpostavlja da je metrika fizičkog prostora ovisna o rasporedu materije u njemu, pa je po tome preteča Einsteinove opće teorije relativnosti. Osim toga, Riemannov rad je potakao razvijati *tenzorskog računa* i tzv. *Riemannove* i mnogih drugih još općenitijih geometrija.

Radovi E. Beltramija (1835—1900), a osobito A. Cayleya (1821—1895) i F. Kleina (1849—1925), pokazali su da se hiperebolička geometrija mogu naći modeli unutar euklidske, odnosno projektivne geometrije. Osim toga su J. V. Poncelet, A. Cayley i F. Klein pokazali da se i euklidska i različite druge geometrije koje su se u to vrijeme razvile, kao što su afina, eukliformna, eliptička i druge, mogu izvesti kao posebni slučajevi projektivne geometrije. Polazeći od te činjenice, F. Klein je formulirao princip, tzv. *Erlangenski program*, po kojem se mogu razvrstati različite geometrije.

Pitanje potpunog aksiomskog zasnivanja geometrije, a osobito euklidske geometrije, ostalo je otvoreno i nakon Euklidovih Elementa. Pokazalo se, naime, da se i Euklid pri dokazivanju nekih poučaka služi činjenicama, koje smatra očiglednim, pa se na njih niti ne poziva. To su uglavnom činjenice koje se odnose na pojam poretka, neprekidnosti i sukladnosti. Tijekom XIX st. pojam neprekidnosti logički su zasnovali K. Weierstrass (1815—1897), J. R. W. Dedekind (1831—1916) i G. Cantor (1829—1920), a pojam poretka i sukladnosti M. Pasch (1843—1930). Napokon D. Hilbert (1862—1943) svojim djelom *Osnove geometrije* daje potpuno aksiomski zasnivanu euklidsku i hipereboličku geometriju.

Tijekom XX st. razvile su se i druge nove grane geometrije, kao npr. *algebraška geometrija* kao nadgradnja analitičke geometrije, *integralna geometrija*, teorija *konveksnih tijela*, teorija *konačnih geometrija* i dr. Geometrija se tjesno prepišće s drugim područjima matematike, a iz nje se izdvajaju samostalne discipline kao npr. *topologija*.

Novi pristup problemu zasnivanja različitih geometrija dao je H. Bachmann (1909—). On zasniva geometriju na osnovnom pojmu simetrije.

Na kraju treba navesti i najvažnije doprinose jugoslavenskih matematičara razvijuću geometrije. V. Varićak (1865—1942) dao je značne priloge hipereboličkoj geometriji, a D. Blanuša (1903—) priloge teoriji smještavanja različitih prostora određenih dimenzija u prostore viših dimenzija.

**Aksiomsko zasnivanje euklidske i hipereboličke geometrije.** Već je na početku rečeno da je Euklid prvi pokušao dati aksiomske temelje geometrije, ali mu to nije u potpunosti uspjelo. Prvo potpuno aksiomsko zasnivanje geometrije dao je D. Hilbert. Na taj je način geometrija postala strogo deduktivna znanost, kod koje su jasno istaknute osnovne pretpostavke (aksiomi), a sve se ostale tvrdnje onda dokazuju kao stavci. Promatralju se tri vrste osnovnih elemenata: *točke, pravci i ravnine*. Uobičajeno je da se točke označavaju velikim, pravci malim latiničkim i ravnine malim grčkim slovima. Promatralju se tri osnovne relacije: *pripadanje*, biti između, sukladnost. Relacija *pripadanja* povezuje točke s pravcima i ravninama. Kaže se da točka  $A$  pripada pravcu  $a$ , odnosno ravnini  $\alpha$ , a osim toga uobičajeno je reći da pravac  $a$ , odnosno ravnina  $\alpha$  prolazi kroz točku  $A$ . Definira se i pojam *pripadanja* za pravce i ravnine. Kaže se da pravac  $a$  pripada ravnini  $\alpha$  ili da ravnina  $\alpha$  prolazi kroz pravac  $a$ , ako svaka točka koja pripada pravcu  $a$ , pripada i ravnini  $\alpha$ . Relacija *biti između* povezuje po tri različite točke, koje pripadaju istom pravcu. Ako su točke  $A, B, C$  u toj relaciji, tada se kaže da je točka  $B$  između točaka  $A$  i  $C$ . Relacija *sukladnosti* povezuje izvedene pojmove, koji će biti kasnije definirani: po dvije dužine ili po dva kuta. Aksiomi se mogu