

## KOMPLEKSNA GEOLOŠKA ISTRAŽIVANJA ZA PROJEKTOVANJE HIDROTEHNIČKIH OBJEKATA

Dr Vladimir BELIČEVIĆ, dipl.inž.geol.  
Energoprojekt – Hidroinženjering a.d.

### REZIME

Za pravilno određivanje uslova gradnje i korišćenja elektroenergetskih hidrotehničkih objekata, potrebno je sprovesti sistematska istraživanja geoloških karakteristika terena na kojem se objekat postavlja. Ova istraživanja obuhvataju raznovrsne aspekte, uključujući geomorfologiju, litostratigrafiju, strukturnu geologiju, seizmologiju, hidrogeologiju, fizičko-mehanička svojstva i drugo, kao i matematičko modeliranje interakcije objekta sa geološkim okruženjem. Glavni cilj ovih istraživanja je prikupljanje svih relevantnih podataka o svojstvima geološkog medija, koji su ključni za odabir optimalnih tehničkih rešenja.

S obzirom na složenost ove teme, uputstva ovog rada ne teže da pruže precizna rešenja za svaki pojedinačni slučaj, već su usmerena na davanje dodatnih informacija i iskustava za Naručioca, Projektanta i Izvođača istražnih radova.

Uzimajući u obzir sve aspekte i kompleksnost problematike, koja zavisi od geoloških uslova, karakteristika objekta i faze projektovanja, svaki konkretan slučaj rešava se izradom i kontrolom Projekta istraživanja, koji prethodi svim fazama istraživanja i projektovanja. Rezultati geoloških istraživanja i zaključci proizašli iz njih predstavljaju se u jedinstvenom Elaboratu o rezultatima istraživanja, koji, u skladu sa zakonskim propisima, čini deo projektne dokumentacije objekta.

---

Podaci o prihvatanju članka

Primljen: 21.10.2024.

Ispravljen: -

Prihvaćen: 30.10.2024.

Kontakt: vbelicevic@ephydro.com

Pod "geološkim istraživanjima za potrebe projektovanja hidrotehničkih objekata", koja su tema ovog rada, podrazumevaju se složena istraživanja sastava, svojstava i stanja geološke sredine pre, tokom i nakon izgradnje hidrotehničkog objekta, uključujući prognozu i kontrolu njenog ponašanja u interakciji sa objektom.

Ovo je konkretan doprinos sistematizaciji geoloških istraživanja za potrebe inženjerskih odnosno hidrotehničkih objekata što u ovom slučaju konkretno znači brana, akumulacija i pratećih objekata.

**Ključne reči:** brana, akumulacija, tunel, geološka istraživanja, istražna bušotina,

### UVOD

Tokom devedesetih godina prošlog veka, tim stručnjaka iz geoloških disciplina kompanije Energoprojekt-Hidroinženjering, u saradnji s eminentnim profesorima Rudarsko-geološkog fakulteta u Beogradu, dobio je zadatak da izradi Uputstvo za projektovanje i izvođenje geoloških istraživanja u okviru projektovanja hidrotehničkih objekata za potrebe Elektroprivrede Srbije (1992). Ova dokumentacija je rezultat bogatog iskustva stečenog na projektovanju brojnih brana u tadašnjoj Jugoslaviji, kao i u Severnoj Africi, Aziji i Južnoj Americi, što je omogućilo razvoj sadržajno i metodološki rigoroznog pristupa.

Nakon objavljivanja ovog dokumenta, usvojena metodologija je bila predmet primene i kontinuiranog unapređenja kroz nova saznanja i iskustva. U svetlu sve većih zahteva za energijom iz obnovljivih izvora, smatramo da je od izuzetne važnosti predstaviti široj stručnoj javnosti rezultate našeg rada, kao i sistematizaciju znanja i metodologije složenih geoloških istraživanja u kontekstu projektovanja i izvođenja hidrotehničkih objekata.

## CILJEVI I ZADACI GEOLOŠKIH ISTRAŽIVANJA ZA HIDROTEHNIČKE OBJEKTE

Ciljevi istraživanja obuhvataju specifične namene za projektovanje objekata koje istraživač želi postići tokom istraživanja. Pod ciljevima istraživanja podrazumevamo optimalni izbor onih tehničkih rešenja za pojedine objekte koji zavise od svojstava geološke sredine koja je predmet tih istraživanja. Drugim rečima, ciljevi istraživanja obuhvataju definisanje i regulisanje svih vidova interakcije planiranog objekta i geološke sredine. U procesu projektovanja hidrotehničkih objekata ciljevi geoloških istraživanja se definišu u skladu sa vrstom i tipom objekta.

Pod zadacima istraživanja podrazumevamo definisanje sastava, svojstava i stanja stenskih masa i terena koja su relevantna za razrešenje ciljeva istraživanja. Pet osnovnih zadataka ispitivanja su:

- a. karakteristike reljefa terena,
- b. geološka građa terena,
- c. aktivnost savremenih geoloških procesa,
- d. filtraciona svojstva stenskih masa, stanja i karakteristike podzemnih voda,
- e. fizičko-mehanička svojstva stenskih masa i naponska stanja.

Ciljevi i zadaci geoloških istraživanja u svakoj fazi projektovanja logički slede iz ciljeva i zadataka, odnosno problematike koja se rešava tom fazom projektovanja. Pojedini ciljevi se realizuju u jednoj ili više faza, a neki od njih su predmet analiza tokom celokupnog procesa istraživanja i projektovanja. Tako se na primer izbor

makrolokacije objekta kao jedan od ciljeva istraživanja, mora se izvršiti u fazi generalnog projekta ili čak i pre toga u vodoprivrednoj Studiji. U ovoj fazi se moraju istaći eliminišući uslovi ako ih ima i definisati ograničavajući uslovi, koje treba rešavati u narednim fazama. Izbor mikrolokacije morao bi biti definisan u investicionom programu izgradnje čiji su sastavni deo najčešće idejna rešenja objekta. Problematika izbora i eksploatacije lokalnih geoloških građevinskih materijala je međutim, predmet odgovarajućih razmatranja od samog početka projektovanja pa do završetka izgradnje, dok se pitanje mogućnosti gubljenja vode ispod i oko brane razmatra čak i po završenoj izgradnji tokom eksploatacije objekta. Podrazumeva se da se jedan isti cilj, ukoliko se razmatra u više faza, razmatra sa različitim stepenom detaljnosti, odnosno sa onom detaljnošću koliko to zahteva odgovarajuća faza projekta.

Na sličan način, pojedini zadaci istraživanja, kao što je izučavanje specifičnih svojstava stenskih masa i terena, prolaze kroz različite faze projektovanja, ali sa različitom detaljnošću. Princip potpunosti istraživanja podrazumeva da se u svakoj fazi i na svakom nivou istraživanja odgovarajući ciljevi i zadaci u potpunosti reše, uz neophodnu pouzdanost podataka. Ne sme se desiti da bitni rezultati istraživanja iz jedne faze budu demantovani u narednoj. Oni mogu biti dopunjeni do potrebnog stepena detaljnosti i pouzdanosti, ali nikako ne smeju biti suštinski opovrgnuti.

U tabelama od 1 do 4 dat je prikaz osnovnih ciljeva istraživanja, povezanih zadataka istraživanja kao i prostor istraživanja i to za pojedine delove hidrotehničkih objekata.

Tabela 1. Geološka istraživanja za branu

Ciljevi istraživanja	Zadaci istraživanja	Prostor istraživanja
1. Izbor mikrolokacije i tipa brane	Lokalne morfološke, geološke, inženjerskogeološke i hidro-geološke karakteristike, raspoloživi građevinski materijali i dr.	Šira zona pregradnog mesta
2. Uslovi fundiranja brane	Dozvoljeno opterećenje podloge, dubina i način fundiranja, potrebe konsolidacionog poboljšanja podloge, zaštita temelja i dr.	Pregradno mesto
3. Stabilnost brane i njene podloge	Stabilnost dolinskih strana pre izgradnje brane, formiranje brane na nestabilnim i labilnim terenima; mogućnost smicanja u podlozi brane i njenim bokovima - za lučne; mogućnost smicanja po kontaktu brana-stenska masa; uticaj filtracije podzemnih voda na stabilnost brane, stabilnost brane u uslovima dinamičkih opterećenja - zemljotres, prelivnog talasa i sl.	Pregradno mesto, zona seizmičkih uticaja na objekat

Tabela 1. Geološka istraživanja za branu (nastavak tabele)

Ciljevi istraživanja	Zadaci istraživanja	Prostor istraživanja
4. Mogućnost gubljenja vode ispod i oko brane	Vodopropustljivost stenskih masa u podlozi i bokovima brane, vodopropustljivost u uslovima funkcionisanja akumulacije, uslovi zaptivanja, kriterijumi gubitaka vode i zaptivanja	Pregradno mesto, deo sliva nizvodno od brane
5. Uslovi iskopa temeljnih jama	Otpornost stenskih masa na iskopavanje, izbor tehnologije kopanja, zaštita temeljne jame od površinskih i podzemnih voda, stabilnost kosina temeljnog iskopa	Pregradno mesto
6. Obezbeđenje građevinskih materijala za branu	Agregat za beton, kamen, glina za jezgro, materijal za filterske slojeve, rezerve, kvalitet materijala, uslovi eksploatacije u ležištu, uslovi transporta i ugradnje, kontrola kvaliteta	Šira zona pregradnog mesta uzvodno

Tabela 2. Geološka istraživanja za akumulaciju

Ciljevi istraživanja	Zadaci istraživanja	Prostor istraživanja
1. Obezbeđenje vododrživosti akumulacionog bazena	Definisanje hidrogeoloških uslova u području akumulacije i susednih slivova, hidrogeoloških vododelnica, lokalnih hidrogeoloških kolektora, proslojaka jako poroznih stena, rasednih zona, promena hidrodinamičkih uslova po stvaranju akumulacije, uslovi zaptivanja, kriterijumi dozvoljenih gubitaka,	Šira zona akumulacionog bazena, eventualnoi susedni slivovi
2. Stabilnost dolinskih padina po obodu akumulacije	Stabilnost u prirodnim uslovima - klizišta, labilne padine sa potencijalnim klizištima i odronima, jaružanja i drugi vidovi padinskih procesa, stabilnost u uslovima formirane akumulacije - promene stanja stabilnosti, kritični uslovi za aktiviranje klizišta i odrona - naglo pražnjenje akumulacije, dinamički uticaji, uticaj pojava nestabilnosti na akumulaciju - zasipanje, mogućnost formiranja poplavnog talasa, uticaj pojava nestabilnosti na druge objekte oko akumulacije,	Dolinske strane do lokalne vododelnice
3. Uslovi izmeštanja objekata	Objekti koji se plave, objekti koji su ugroženi formiranjem akumulacije, izbor lokacija za izmeštanje, gološki uslovi izgradnje na novim lokacijama	Područje izmeštanja objekta
4. Zaštita od uspora nivoa podzemnih voda u priobalju ravničarskih akumulacija	Hidrogeološke karakteristike priobalja (tipovi izdani, nivoi podzemnih voda, vodopropusnost), kriterijumi zaštite, hidrodinamički uslovi u prirodnom stanju i u uslovima formirane akumulacije, hidrodinamički uslovi zaštite priobalja,	Zona ugroženosti usporom
5. Zaštita od zasipanja akumulacionog basena	Klimatski geološki, geodinamički uslovi u području sliva, procena količine i vrste vučenog nanosa, povećanje zasipanja podinskim procesima,	Šira zona akumulacije eventualno sliv
6. Budući uticaji akumulacije i uslovi zaštite okolina	Uticaji na okolni teren: na stabilnost po obodu akumulacije, promena režima erozije, promena hidrogeoloških uslova, na dolinskim stranama, u priobalju, u susednim dolinama, uticaji na izvorišta vodosnabdevanja, indukovana seizmičnost, uticaji na okolne objekte - smanjena nosivost i stabilnost podloge pojedinih objekata, promena režima vlage i mikroklima,	Basen i šira zona sve dokle ima promena klime, režima podzemnih voda, indukovane seizmičnosti

Tabela 3. Geološka istraživanja za podzemne objekte

<b>Ciljevi istraživanja</b>	<b>Zadaci istraživanja</b>	<b>Prostor istraživanja</b>
1. Izbor lokacije podzemnog objekta	Prilagođavanje trase i nivelete podzemnog objekta prema lokalnim geotehničkim uslovima, kada za to ima uslova, izbor mesta i dubine ukopavanja	Uticaojna okolina po horizontali i vertikalni
2. Uslovi i način iskopa stenskih masa	Otpor stenskih masa na kopanje, izbor tehnologije iskopa, izbor opreme i sredstava za iskop-mašine za iskop, mašine i alati za bušenje, vrste eksploziva, procena učinaka i cene iskopa	Objekat (gabarit) i širi prostor
3. Stabilnost u uslovima izvođenja iskopa	Uticaojni faktori - pukotine i naponi u čvrstim stenama, svojstva koherentnih i nekoherentnih stena, uticaoju podzemnih voda na stabilnost, uticaoju veličine profila na stabilnost, izbor tehnologije iskopa u vezi stabilnosti, razrada profila, dužina nepodgrađenog dela objekta i vreme koje može biti nepodgrađeno, lokalna nestabilnost - labilni blokovi, podzemni pritisci, višak profila, zona plastifikacije oko tunela, mere osiguranja, kontrola ponašanja stenske mase posle iskopa	Zona oko objekta – do površine
4. Stabilnost podzemnih objekata u uslovima eksploatacije	Nnaponi i deformacije stenske mase posle iskopa, pritisci na oblogu, unutrašnji pritisci kod tunela pod pritiskom,	Zona do površine
5. Pojave podzemnih voda	Pojave i provale velikih količina voda, uticaoju voda na fizičko-mehanička svojstva stena, posebno osetljivih na dejstvo vode - les, lapori, gline koji bubre i sl., mogućni pritisci podzemnih voda na oblogu podzemnog objekta, agresivno dejstvo podzemne vode na ugrađene materijale, zaštita od podzemnih voda - drenaže i hidroizolacija, metod prognoze pojava podzemnih voda	Sira zona oko objekta (zavisno od sklopa i hg.uslova)
6. Uslovi izgradnje portalnih delova	Stabilnost padine pre iskopa i kosina po izvedenom iskopu portala i način obezbeđenja stabilnosti	Uža zona oko ulaza
7. Uticaoju izgradnje podzemnih objekata na okolni teren i objekte	Dinamički uticaoju pri iskopu, sleganje površine terena i objekata iznad iskopa, promena režima podzemnih voda, prognoza uticaja i predlog mera zaštite od štetnih uticaja	Sira zona objekta do površine, dokle dopire promena režima podz. voda, dinamički uticaji i sleganja

Tabela 4. Geološka istraživanja za nadzemne objekte

Ciljevi istraživanja	Zadaci istraživanja	Prostor istraživanja
1. Izbor lokacije	Morfološki, inženjerskogeološki i hidrogeološki kriterijumi izbora lokacije	Šira zona objekta
2. Uslovi fundiranja	dozvoljeno opterećenje, prognoza sleganja, izbor dubine i vrste temelja, zaštita temelja	Uža zona objekta
3. Uslovi iskopa temeljnih jama	otpor stena prema iskopu, izbor načina iskopa, stabilnost kosina iskopa, zaštita od površinskih i podzemnih voda	Uža zona temeljne jame
4. Stabilnost terena i objekta	(stanje stabilnosti u prirodnim uslovima, uslovima građenja i uslovima opterećenja od objekta, dinamički uticaji na stabilnost, način obezbeđenja privremene ili trajne stabilnosti	Šira zona objekata po dužini i do zone uticaja po širini
5. Promena režima podzemnih i površinskih voda	površinsko odvodnjavanje i regulacija vodotoka, promena režima podzemnih voda u zoni kanala	Dužinom kanala ili vodotoka i do vododelnice po širini
6. Analiziranje uticaja izgradnje na okolni teren i druge objekte	Geološke, inženjerskogeološke i hidrogeološke karakteristike terena u zoni izgradnje nadzemnih objekata	Šira zona objekata do zone uticaja promene režima

## OPŠTI METODOLOŠKI PRISTUP ISTRAŽIVANJU

Kako bismo uspešno rešili određene ciljeve i zadatke istraživanja, koje smo prethodno definisali, koristimo razne metode i pristupe. Izbor ovih metoda zavisi od karakteristika geološke sredine, objekta i faze istraživanja. Svaka faza počinje izradom *Projekta istraživanja*, koji se mora uskladiti sa Zakonom o rudarstvu i geološkim istraživanjima i Pravilnikom o uslovima i sadržini projekata. Ovaj projekat je ključan jer, na osnovu analize dostupnih podataka i rekognosciranja terena, definiše kako ćemo istraživanje sprovesti, koje metode ćemo koristiti, koji će biti obim radova, tehnički uslovi i dinamika izvođenja.

Radovi koji se obavljaju pre izrade projekta, a završavaju se njegovim usvajanjem, nazivaju se *Predhodni radovi*. Njihova svrha je da se ciljevi istraživanja razumeju dovoljno dobro kako bismo mogli da precizno odredimo sledeće korake. Ovi radovi obuhvataju prikupljanje postojeće dokumentacije, kao što su fondovi, bibliografski podaci, topografske karte, satelitski i avio snimci, kao i sistematizaciju i analizu tih podataka.

U prvim fazama istraživanja, u okviru prethodnih radova, vrši se rekognosciranje terena. Ovo nije samo brzinski pregled terena, već obuhvata niz procedura čiji je cilj da

se upoznamo sa svojstvima terena, što nam pomaže da planiramo dalja istraživanja. Osim pregleda terena, rekognosciranje može uključivati i neka geofizička ispitivanja ili čak izradu istražne bušotine, iako se to retko dešava.

Nakon što je Projekat istraživanja usvojen, prelazimo na izvođenje raznih radova, koji uključuju kabinetska, terenska istraživanja i laboratorijska ispitivanja. Na kraju, analiziramo i sintetizujemo rezultate, a zatim ih prikazujemo u elaboratu, što predstavlja završni deo istraživačkog ciklusa za svaku fazu projekta.

## FAZNOST U PROJEKTOVANJU I GEOLOŠKIM ISTRAŽIVANJIMA

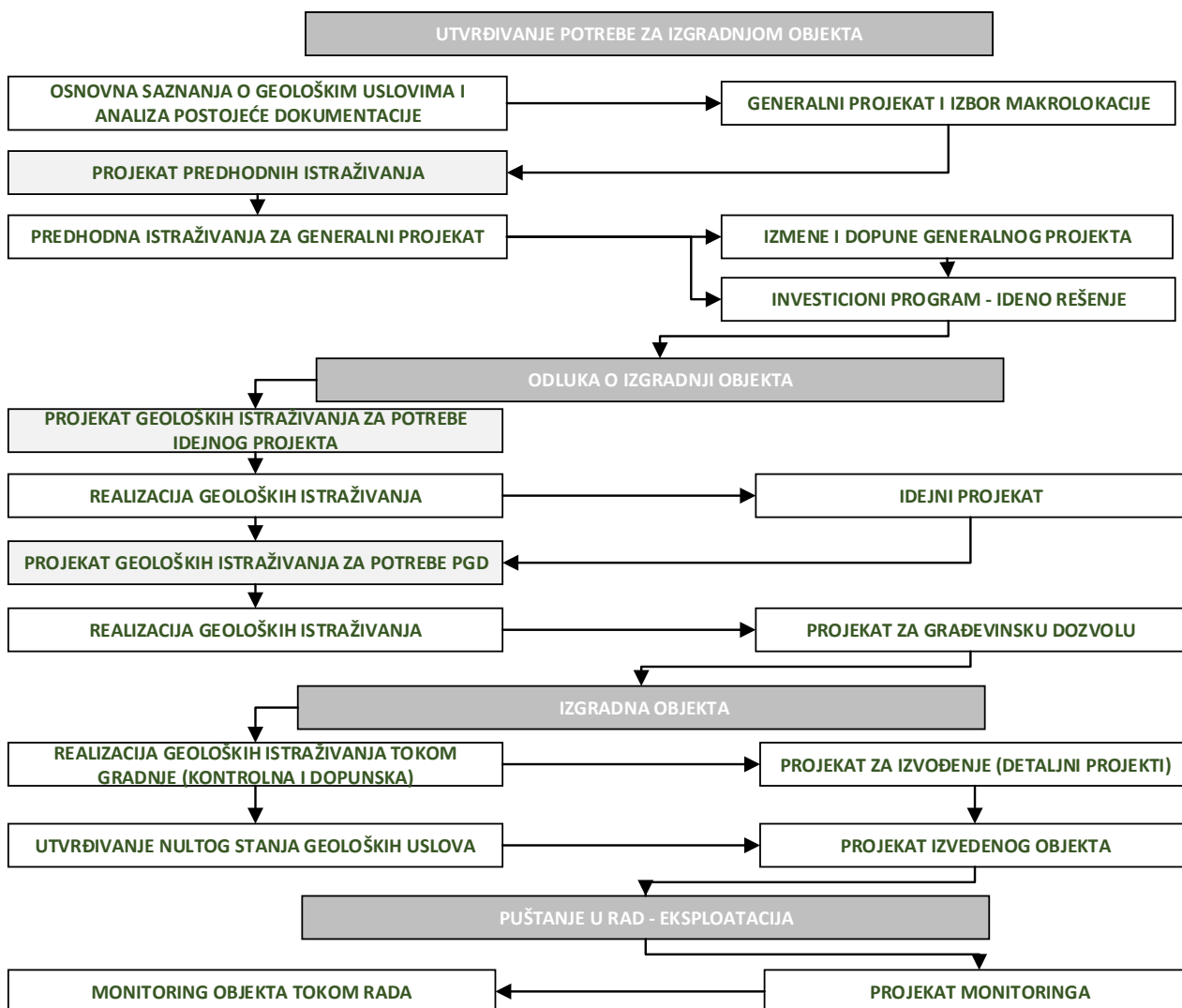
Faze u projektovanju građevinskih, pa time i hidrotehničkih objekata, regulisane su Zakonom o planiranju i izgradnji objekata. U praksi projektovanja pojedinih vrsta objekata sreću se međutim brojne specifičnosti uslovljene karakteristikama objekata. Za brane i akumulacije sa pratećim objektima karakteristično je da su to grupe funkcionalno povezanih, ali konstruktivno vrlo različitih objekata. Uz to, to su skupi objekti velikog ekonomskog značaja, ali i velikog rizika u slučaju havarije. Zato se i u svetu i kod nas, projektovanju i građenju ovih objekata posvećuje vrlo velika pažnja, primenom mnogih dopunskih faza

projektovanja i primenom kompleksnih istraživanja geološke sredine radi bezbedne i ekonomične gradnje i eksploatacije objekata.

U skladu sa tehničkim iskustvima i praksom, svakoj fazi projektovanja prethodi odgovarajuća faza istraživanja geološke sredine a rezultati tih istraživanja smatraju se integralnim delom planske i projektne dokumentacije. Ovo podrazumeva da određenu fazu istraživanja može da predstavlja i sama analiza i reinterpretacija postojećih podataka. Projektovanje se obavlja u više faza pri čemu

se u svakoj njih rešava određena problematika vezana za gradnju ili funkciju budućeg objekta. U skladu sa tim u svakoj fazi projektovanja vrše se i odgovarajuća geološka istraživanja jer je veći deo procesa projektovanja vezan za interakciju hidrotehničkog objekta i geološke sredine.

Odnos istraživačkih i projektantskih aktivnosti, kao i procesa odlučivanja koji iz njih proizilazi prikazan je na slici 1 sa naglaskom na princip postupnosti u istraživanju.



Slika 1. Odnos i dinamika realizacije faza u projektovanju i geoloških istraživanja za projektovanje hidrotehničkih objekata

Izbor vrsta i obima istražnih radova, u svakom konkretnom slučaju, zavisi od: karakteristika i geološke složenosti terena; karakteristika (vrste i veličine) objekta i faze istraživanja.

Obzirom na činjenicu da karakteristike terena mogu biti vrlo različite, da je praktično svaka pojedinačna lokacija slučaj za sebe, kao i na činjenicu da objekti mogu biti sa vrlo različitim konstruktivnim rešenjima i različitim dimenzijama, to je praktično nemoguće utvrditi detaljne kriterijume na osnovu kojih bi se u svakom slučaju precizno odredila vrsta i količina istražnih radova. U svakoj od faza istraživanja postoje određene specifičnosti u odnosu na vrstu i obim pojedinih istražnih radova - istražni prostor, a što je u funkciji cilja istraživanja i potrebnog stepena poznavanja određenih svojstava terena i stenskih masa.

Naime, u prvim fazama istraživanja (generalni projekat i idejno rešenje) kad se sagledava generalna mogućnost hidroenergetskog iskorišćenja vodnih potencijala, istražni prostor je znatno širi (širi region, područje susednih slivova i dr.) istraživanja se svode uglavnom na izučavanje geološke građe, rupturnog sklopa, opšteg poznavanja seizmotektonskih karakteristika, hidrogeoloških i inženjerskogeoloških uslova. U fazama detaljnih istraživanja, ona su znatno kompleksnija po nameni i obimu, a što je u zavisnosti od geološke složenosti terena i karakteristike objekata.

#### **VRSTE I OBIM GEOLOŠKIH ISTRAŽIVANJA U POJEDINIM FAZAMA PROJEKTOVANJA**

**Generalni projekat** - U okviru generalnog projekta, istražuju se potencijalne mogućnosti hidroenergetskog iskorišćenja pojedinih vodnih tokova kroz analizu više alternativnih lokacija za pregradna mesta. Ova analiza obuhvata šire istražne prostore, uključujući regije susednih slivova i slivna područja. U tom kontekstu, identifikacija i evaluacija različitih alternativnih lokacija za pregradna mesta omogućava detaljno razmatranje potencijalnih područja za akumulaciju, čime se doprinosi sveobuhvatnijem razumevanju hidroener-getskih resursa i njihovog održivog korišćenja.

U ovoj fazi realizuju se regionalna istraživanja i to geomorfološka analiza i daljinska detekcija, seizmološke analize, geološko, hidrogeološko i inženjerskogeološko kartiranje, geofizička i traserska ispitivanja. Nije isključeno ali u praksi se retko u ovoj fazi izvode istražna bušenja i izrada istražnih iskopa.

**Idejno rešenje** - Istraživanja geološke sredine u okviru faze Idejnog rešenja obuhvataju značajniji obim i raznovrsnost metoda u odnosu na prethodne faze, s obzirom na to da ova dokumentacija igra ključnu ulogu u proceni opravdanosti izgradnje investicionog objekta. U tom smislu, neophodno je precizno prognozirati geološke uslove koji mogu uticati na proces izgradnje i eksploatacije objekta.

Pored korišćenja svih podataka prikupljenih u prethodnim fazama, sprovode se dopunska terenska istraživanja koja uključuju geološko, hidrogeološko i inženjerskogeološko kartiranje na kartama krupnijih razmera. Ova istraživanja takođe obuhvataju geofizička ispitivanja, kao i obiman program istražnog bušenja na alternativnim pregradnim mestima, istražne raskope i ispitivanja VDP-a, uz dodatna ispitivanja. Svi ovi postupci imaju za cilj razrešenje ključnih problema koji značajno utiču na izbor tipa objekta i procenu troškova njegove izgradnje.

**Idejni projekat** - ima za cilj identifikaciju optimalnih tehničkih rešenja. Ovaj projekat uključuje sve ključne proračune neophodne za definisanje koncepcije objekata, kao i analize značajnih delova objekata. Uključeni su potrebni dispozicioni crteži i preseci za konačno usvojen tip objekta, analize opterećenja i stabilnosti, dimenzionisanje najvažnijih elemenata objekta, kao i procene načina rada i očekivanih efekata.

S obzirom na to da je idejni projekat ključna faza u hidrograđevinskom projektovanju, on takođe predstavlja značajnu tačku u okviru geoloških istraživanja. Tokom ove faze, sprovodi se najveći obim istražnog bušenja, istražnih iskopa, "in situ" ispitivanja i laboratorijskih analiza. Ova istraživanja su posebno važna za pregradna mesta i prateće pribranske objekte. Na primer, okvirni obim bušenja u idejnom projektu čini između 65% i 75% ukupnog obima koji je potreban do faze Glavnog projekta, uključujući prethodne faze istraživanja.

**Projekat za građevinsku dozvolu** - sadrži detaljne analize rezultata svih istraživanja, detaljne proračune svih vrsta i za sve delove objekta, detaljna dimenzionisanja, potrebne crteže, tehničke uslove izvršenja svih radova, detaljan predmer i predračun radova. U ovoj fazi projektovanja geološka istraživanja se nastavljaju i to na osnovu projekta geoloških istraživanja izrađenog u prethodnoj fazi. Ona se realizuju kako bi se detaljnije proučile karakteristike terena i prikupili podaci neophodni za tačno projektovanje i konstrukciju objekata.

U ovoj fazi vrše se detaljna istraživanja čiji je zadatak dobijanje pouzdanih podataka o geološkoj građi terena, hidrogeološkim i inženjerskogeološkim uslovima terena potrebnim za detaljna dimenzionisanja pojedinih objekata i za sve delove objekata. Pre svega, u ovoj fazi se sva kartiranja dopunjuju i izvode kao detaljna na topografskim kartama krupnije razmere. Radovi koji se najvećim delom izvode u fazi Projekta za građevinsku dozvolu su istražni radovi na pregradnim mestima i radovi na pozajmištima građevinskih materijala. Kod radova na podzemnim objektima, obzirom na njihovu specifičnost, ovakva detaljnost dobijanja pojedinih podataka biće obezbeđena tek u fazi Projekta za izvođenje odnosno detaljnih projekata pojedinačnih objekata.

**Projekat za izvođenje** - Detaljni projekti imaju za cilj da se izvrše sve dopune i izmene projekta za izvođenje koje su posledica prilagođavanja konkretnim geološkim uslovima ili drugim okolnostima. Za tu svrhu planiraju se i izvode ciljana raznovrsna i kompleksna dopunska geološka istraživanja za rešavanje postojećih nejasnoća i problema u fazi izgradnje.

Naime, jedan deo radova čini kontinuitet radova iz prethodnih faza i to su pre svega dopune za detaljno sagledavanje pojedinih stanja i svojstava geoloških sredina. Drugi deo radova, koji se u ovoj fazi prvi put izvode i čine njihov osnovni obim u ovoj fazi izdvajaju se kao: a) probna i kontrolna ispitivanja (injektiranja, sidrenja, fizičko-mehaničkih svojstava i dr.), i b) registrovanje stvarnih geotehničkih uslova sa detaljnim kartiranjem svih iskopa a koje pored ostalog služi i kao podloga za Projekat izvedenog stanja.

Kod istraživanja vezano za podzemne radove, mnogi od ovih radova se prvi put izvode a rezultati dobijeni ovim istraživanjima služe za detaljno i optimalno dimenzionisanje objekata, rešenje stabilnosti objekata (privremene i trajne) i mera ojačanja, obzirom da su prethodna rešenja rađena sa znatno manje podataka i na bazi prognoziranih uslova.

**Projekat izvedenog objekta** - U projektu izvedenog objekta prikazuju se svi objekti i svi njihovi detalji onako kako su stvarno izvedeni sa posebno obrađenim izmenama i dopunama u odnosu na glavni projekat i objašnjenjem uzroka koji su do tih dopuna i izmena doveli. U ovim projektima se često daju i detalji vezani za geološka svojstva i odnos sredine sa objektom (kartiranje temeljnih jama, geološki i hidrogeološki profile, nivoi podzemnih voda).

**Projekat osmatranja objekata** - i određenih procesa u geološkoj sredini kod brana i akumulacija redovno se sprovodi sa nekoliko ključnih ciljeva: osiguranje bezbednosti, održavanje objekata, prikupljanje podataka za sanacione radove, kao i za revitalizaciju celokupnog sistema ili pojedinih objekata.

U ovom radu se ukratko razmatra problematika osmatranja, fokusirajući se na interakciju između objekata i geoloških sredina. Ova interakcija manifestuje se kroz određene procese, stanja i pojave na objektima, kao i u geološkim sredinama i njihovim podlogama. Osmatranje ovih dinamičnih odnosa je od suštinskog značaja za razumevanje složenih mehanizama koji utiču na stabilnost i funkcionalnost brana i akumulacija, čime se doprinosi unapređenju strategija za upravljanje i održavanje ovih ključnih infrastrukturnih objekata.

U procese, stanja i pojave koje se osmatraju kod visokih brana spadaju:

- a. Hidrogeološke pojave,
- b. Stanje uzgona ispod objekata,
- c. Sleganje i pomeranje objekata i podloge,
- d. Klizišta i odroni i
- e. Seizmičke pojave.

U okviru osmatranja podzemnih objekata (tuneli i podzemne mašinske hale) obavljaju se razna merenja u toku njihove eksploatacije. Može reći da se u okviru osmatranja najčešće obavljaju sva ili neka od sledećih merenja, kartiranja i opservacija i to:

- a. merenje konvergencije profila
- b. merenje pomeranja unutar brdskog masiva (na pr. višestruki ekstenzometri)
- c. merenje pritisaka na oblogu
- d. merenje sila u stenskim ankerima
- e. osmatranje pijezometarskih nivoa u područjima objekata
- f. osmatranje procurivanja i gubitaka voda iz hidrotehničkih tunela
- g. pregled, kartiranje i opservacija stanja podzemnih objekata pri periodičnim remontima (na pr. hidrotehnički tuneli).

Na sledećoj slici dat je se opšti prikaz, vrsta i relativnog obima istražnih radova u različitim fazama, sa sagledavanjem relativnog obima i relativnog značaja pojedinih istražnih metoda i postupaka.



Metode i istražni postupci		Generalni projekat	Idejno rešenje	Idejni projekat	PZGD / GP	Projekat za izvođenje	Projekat osmatranja	
Prethodni radovi	Analiza raspoložive dokumentacije	Predhodi svim fazama istraživanja i projektovanja.						
	Rekognoširanje terena							
	Projekat istraživanja							
Kabinetske metode	Daljinska detekcija							
	Geomorfološka analiza							
	Inženjerska seizmologija							
	Računska analiza/matematički modeli							
Terenske metode istraživanja	Geološko kartiranje							
	IG i HG kartiranje							
	Geofizička ispitivanja							
	Istražmp bušenje i prateća ispitivanja							
	Istražno bušenje i prateća ispitivanja	pitki						
		duboki						
	Hidrogeološka osmatranja							
	Ispitivanja fizičko mehaničkih svojstava							
	Merenje napona i deformabilnosti u stanskoj masi i konstrukciji							
	Probna i kontrolna ispitivanja (injektiranja, sidrenja)							
Laboratorijske metode	Mineraloške, petrološke, paleontološke metode							
	Fizičko mehanička svojstva stena							
	Hemijska ispitivanja stena i podzemnih voda							
	Ispitivanja na fizičkim modelima							
Izrada izveštaja								

Relativan značaj	Relativan obim		
	Veliki	Srednji	Mali
Neophodan			
Poželjan			
Po potrebi			

Slika 2. Opšti prikaz vrsta i relativnog obima istražnih radova u različitim fazama projektovanja

### KRITERIJUMI ZA UTVRĐIVANJE BROJA I DUBINE ISTRAŽNIH BUŠOTINA

Broj i dubina bušotina, koji se ovde predlažu, predstavljaju usmeravajuće pokazatelje za relativno objektivnije sagledavanje obima istražnih bušotina na pregradnim mestima. Kriterijumi koji se u daljem tekstu navode zasnivaju se u odgovarajućoj meri na teorijskim osnovama sagledavanja potrebnog neophodnog stepena istraženosti geološke sredine za odgovarajući nivo projekta, a većim delom na pozitivnim iskustvima iz naše

i inostrane inženjerske prakse. Isti su bili i kriterijumi za izbor broja i dubina istražnog bušenja.

Prilikom sagledavanja relativnog obima istražnog bušenja i ostalih istražnih radova u pojedinim fazama projektovanja procenjen je procentualni obim za svaku od projektnih faza.

Konkretniji obim istražnih radova zavisi od brojnih tehnoeekonomskih faktora koji su specifični za svaki tip objekta, njegovu složenost i složenost geoloških uslova terena kao i njegovu investicionu vrednost.

Tabela 5. Procenjeni obim bušenja i ostalih istražnih radova za odgovarajući nivo projekta

Projektna faza	Obim bušenja i istražnih radova
Generalni projekat i Idejno rešenje	uvodni obim bušenja 25 – 35%
Idejni projekat	osnovni obim bušenja 40 – 55%
Projekat za građevinsku dozvolu	dopunski obim bušenja 20 – 25%
Projekat za izvođenje	eventualno dodatni obim bušenja do 5%

### Preporučeni broj i dubine istražnih bušotina na pregradnim mestima brana

Obim i dubina istražnog bušenja i pratećih ispitivanja zavise pre svega od složenosti geološke sredine. U tu svrhu izvršena je kategorizacija na tri nivoa složenosti kako je to prikazano u tabeli 6.

Promenom visine brane povećava se i veličina gabarita a time i istražni prostor. Osim toga veći je i rizik od takvog objekta što iziskuje i veći stepen pouzdanosti istraživanja. Iz ovih razloga se za ocenu broja bušotina uvode i relativni koeficijenti (K) kojima se broj bušotina date geološke složenosti množe sa preporučenim koeficijentom za određenu visinu betonske brane i to:

K=1,0 - za brane visine do 50 m

K=1,25 - za brane visine 50-100 m

K=1,50 - za brane 100-150 m,

K=1,75 - za brane visine preko 150 m.

Za nasute brane se ocenjuje da je potrebno za oko 20 do 30% manje bušotina nego za betonske u slučaju podjednakih ostalih uslova.

U skladu sa ovim kriterijumima definisan je potreban istražnih bušotina za definisanje geoloških karakteristika na pregradnim mestima (tabela 7).

Dubine bušotina koje se izvode na pregradnim mestima brana uopšte uzevši zavise uglavnom od pet kriterijuma i to:

- geološke složenosti terena (rasedi, reporni slojevi, odnosno, karstifikacija i sl.)
- faze istraživanja
- visine brane
- vodopropustljivosti stenskih masa (kriterijum projekta)
- vrste i namene pratećih objekata.

Tabela 6. Kategorizacija složenosti geološke sredine

I	II	III
<b>Najjednostavniji geološki uslovi</b>	<b>Srednje složeni geološki uslovi</b>	<b>Vrlo složeni geološki uslovi</b>
- teren otkriven - litološki homogen - bez izrazite tektonike - bez karstifikacije	- delimično pokriven teren - sa više litoloških članova - sa ili bez izražene tektonike - sa slabo izraženom ili bez karstifikacije - sa visokim NPV	- izrazito pokriveni tereni i sa većom debljinom pokrivača - sa znatno složenom geološkom građom (po sastavu, starosti i tektonskom sklopu) - izrazito karstifikovani teren

Tabela 7. Preporučeni broj istražnih bušotina za betonske gravitacione i lučne brane

Visina brane (m)		Geološka složenost terena					
		I		II		III	
≤ 50	K=1	8	10	10	15	15	20
50 - 100	K=1.25	10	12	13	19	19	25
100 - 150	K=1.5	12	15	15	23	23	30
≥ 150	K=1.75	14	18	18	26	26	35

Obzirom na ovako veliku kompleksnost i uslovljenost pojedinih kriterijuma, praktično je nemoguće na nivou opštih kriterijuma dati određenije dubine bušotina. U svakom konkretnom slučaju se Projektom istraživanja definišu pored ostalih zahteva i dubine svake od traženih bušotina.

### Preporučeni broj i dubine istražnih bušotina na trasi tunela i cevovoda pod pritiskom

I u ovom slučaju obim i dubina istražnog bušenja i pratećih ispitivanja zavise pre svega od složenosti geološke sredine. U tu svrhu primenjuje se kategorizacija na tri nivoa složenosti kako je to prikazano u tabeli 6.

U zavisnosti od dužine objekta povećava se istražni prostor tako da se u ovom slučaju za korekciju broja bušotina koriste sledeći kriterijumi dužine tunela/cevovoda:

K = 1,0 za tunele dužine do 1 km  
 K = 1,5 za tunele dužine 1-5 km  
 K = 2,0 za tunele dužine 5-10 km  
 K = 2,5 za tunele dužine preko 10 km

Dubina istražnog bušenja obično iznosi minimum 5 m ispod nivoa tunela, dok u specifičnim uslovima može biti i dublja. U slučajevima kada se u tunel ili njegovi delovi nalaze na velikoj dubini, odnosno kada postoji visoki nadsloj, postavlja se pitanje racionalnosti bušenja kao istražnog metoda, s obzirom na obim neproduktivnog bušenja. U takvim situacijama često se odstupa od predstavljenih kriterijuma, što može dovesti do smanjenja obima bušenja na račun pouzdanosti rezultata istraživanja. Alternativno, bušenje se može zameniti ili nadograditi drugim istražnim postupcima, pre svega geofizičkim metodama.

Tabela 8. Preporučeni broj istražnih bušotina za tunele i cevovode pod pritiskom

Dužina tunela (km)		Geološka složenost terena					
		I		II		III	
≤ 1	K=1	5	5	8	6	10	
1 do 5	K=1.5	8	7	12	9	15	
5 do 10	K=2	10	10	16	12	20	
≥ 10	K=2.5	13	13	20	15	25	

### Preporučeni broj i dubine istražnih bušotina na trasi kanala

Broj bušotina zavisi prvenstveno od otkrivenosti terena i složenosti geoloških uslova (geološka građa, hidrogeološki uslovi, i stabilnosti padina i kosina) kao i karakteristika objekta (dubina i širina kanala).

- I Za najjednostavnije uslove tj. za plitke kanale (do 3 m) na potpuno otkrivenim terenima, jednostavnije geološke građe i hidrogeoloških uslova u čvrstim stenskim masama, istražno bušenje može biti potpuno izostavljeno i nadoknađeno detaljnim inženjerskogeološkim kartiranjem i geofizičkim ispitivanjima.
- II Za srednje složene geološke uslove odnosno delimično pokriven teren sa više litoloških članova sa ili bez izražene tektonike i sa mogućim nivoom podzemne vode iznad nivelete kanala treba izvršiti minimum 1 do 2 bušotine u svakoj zoni sa približno sličnim inženjerskogeološkim i hidrogeološkim uslovima.

III Za vrlo složene geološke uslove što podrazumeva izrazito pokrivene terene i terene sa znatno složenom geološkom građom kao i nestabilne ili potencijalno nestabilne terene bušenje se izvodi sa po 2-3 bušotine u svakoj zoni sličnih inženjerskogeoloških uslova. Na deonicama u labilnim ili nestabilnim terenima ili većom dubinom iskopavanja, bušenje se izvodi duž poprečnih profila sa min.3 bušotine u profilu i min. 1 profil na svakoj takvoj deonici.

Istražno bušenje se izvodi u principu min.5 m' ispod nivelete, a u specifičnim uslovima i dublje.

### Preporučeni broj i dubine istražnih bušotina na trasi nasipa

Prilikom definisanja obima istraživanja za projektovanja i izgradnju nasipa primenjuju se tri osnovna kriterijuma i to: geološka složenost terena i njegova pokrivenost, dužina nasipa i visina nasipa.

Imajući u vidu ova tri kriterijuma preporučeno istražno bušenje za nasipe se definiše:

- I Za najjednostavnije geološke uslove - litološki homogen, dobro nosiv teren, uglavnom otkriven, sa vodonepropusnim stenskim masama u podlozi nasipa,  
1 bušotina/km', za visinu nasipa do 3 m'
- II Srednje složeni geološki uslovi - litološki homogeni ili delimično heterogeni, dobro nosivi tereni, pokriveni, sa nivoom podzemne vode do površine terena,  
1 do 3 bušotine/km'
- III Vrlo složeni geološki uslovi, sa izraženim jednim od sledećih svojstava: litološki heterogeni stišljivi tereni pokriveni, sa nivoom podzemne vode do površine terena ili uslovno stabilni, odnosno nestabilni padinski tereni,  
3 do 5 bušotina/km'

Relativni koeficijent (K) kojim se broj bušotina umnožava u zavisnosti od visine nasipa, daje se prema sledećim visinama:

- K = 1 - za nasipe do 3 m visine
- K = 1,25 - za nasipe 3 do 6 m visine
- K = 1,5 - za nasipe preko 6 m visine

Dubina bušotina je minimalno 5 m ispod nivelete nasipa, a u posebnim slučajevima i dublje.

## ZAKLJUČAK

Projektovanje složenih hidrotehničkih objekata je kompleksna multidisciplinarna aktivnost za koju je potreban čitav spektar inženjerskih nauka. Učešće geološke struke je nezamenljivo u suštinskim procesima

definisanja karakteristika geološke sredine. Geološka istraživanja omogućavaju bolje razumevanje geoloških formacija, prikupljanje ključnih podataka o interakciji geološka sredina - objekat, kao i identifikaciju potencijalnih izazova ili rizika tokom projektovanja, izgradnje i eksploatacije. Na temelju detaljnih geoloških podataka, projektanti mogu doneti argumentovane odluke o lokaciji, dizajnu i konstrukciji hidrotehničkih objekata kako bi se osigurala sigurnost, funkcionalnost i održivost tih objekata dugoročno. Odnos sredine i objekta kroz projektovanje, izgradnju i eksploataciju bitno utiče na tehnička rešenja i ekonomsku opravdanost izgradnje ovih objekata.

S obzirom na sve veće izazove u oblasti upravljanja vodnim resursima, neophodno je integrisati najnovije geološke metode i tehnologije u fazama istraživanja i projektovanja. Takođe, kontinuirano praćenje i evaluacija geoloških uslova tokom životnog ciklusa hidrotehničkih objekata može značajno doprineti njihovoj održivosti i sigurnosti. Stoga, saradnja između geologa, projektanata i drugih stručnjaka je ključna za uspeh ovih složenih projekata.

## LITERATURA

- [1] GRUPA AUTORA: Uputstvo za izvođenje i projektovanje geoloških istraživanja za potrebe projektovanja hidrotehničkih objekata, ENERGO-PROJEKT - Hidroinženjering a.d., Beograd, 1992
- [2] GRUPA AUTORA: Arhiva projektne dokumentacije ENERGOPROJEKT - Hidroinženjering a.d., Beograd 1982-2024

## COMPLEX GEOLOGICAL INVESTIGATIONS FOR THE DESIGN OF HYDRAULIC ENGINEERING FACILITIES

by

Dr Vladimir BELIČEVIĆ, dipl.inž.geol.  
Energoprojekt – Hidroinženjering a.d.

### Summary

To accurately determine the construction and operational conditions of electro-energy hydrotechnical facilities, systematic research of the geological characteristics of the terrain on which the structures is to be placed is necessary. This research encompasses various aspects, including geomorphology, lithostratigraphy, structural geology, seismology, hydrogeology, physical-mechanical properties, and more, as well as mathematical modeling of the interaction between the structure and the geological environment. The primary goal of this research is to gather all relevant data on the properties of the geological medium, which are crucial for selecting optimal technical solutions.

Given the complexity of this topic, the guidelines of this work do not aim to provide precise solutions for every individual case; rather, they are directed towards providing additional information and experiences for the Client, Designer, and Contractor of the research works.

Considering all aspects and the complexity of the issues, which depend on geological conditions, the characteristics of the structure, and the design phase, each specific case is addressed through the development and

control of the Research Project, which precedes all phases of research and design. The results of the geological investigations and the conclusions drawn from them are presented in a comprehensive Report on the research results, which, in accordance with legal regulations, forms part of the Project Documentation of the structure.

By "geological investigations for the design of hydrotechnical structures", which is the subject of this work, we refer to complex studies of the composition, properties, and condition of the geological environment before, during, and after the construction of the hydrotechnical structure, including the prediction and monitoring of its behavior in interaction with the structure.

This represents a specific contribution to the systematization of geological research for engineering and hydrotechnical structures, specifically referring to dams, reservoirs, and associated facilities.

Key words: dam, reservoir, tunnel, geological investigations, borehole