

REPUBLIKA SRBIJA
PROJEKAT REHABILITACIJE TRANSPORTA

**PRIRUČNIK ZA PROJEKTOVANJE
PUTEVA U REPUBLICI SRBIJI**

**2 GEOTEHNIČKA I HIDROLOŠKA ISTRAŽIVANJA I
ISPITIVANJA**

2.1 GEOTEHNIČKA ISTRAŽIVANJA I ISPITIVANJA

2.2 HIDROLOŠKE ANALIZE

Izdavač: Javno preduzeće Putevi Srbije, Bulevar kralja Aleksandra 282, Beograd

Izdanja:

Br.	Datum	Opis dopuna i promena
1	30.04.2012	Početno izdanje

SADRŽAJ

2.1	GEOTEHNIČKA ISTRAŽIVANJA I ISPITIVANJA.....	1
2.1.1	UVODNI DEO	1
2.1.1.1	Opis i namena priručnika	1
2.1.1.2	Tehnička regulativa	1
2.1.1.3	Terminologija	1
2.1.1.4	Upotrebijene skraćenice.....	2
2.1.1.5	Upotrebijene oznake.....	3
2.1.2	FAZNOST GEOTEHNIČKIH ISPITIVANJA I STEPEN OBRADJE TEHNIČKE DOKUMENTACIJE	3
2.1.3	PRISTUP IZVOĐENJU GEOTEHNIČKIH ISTRAŽIVANJA	5
2.1.3.1	Opšte	5
2.1.3.2	Prikupljanje postojećih podataka – kabinetni rad	6
2.1.3.3	Terenski istraživački rad.....	6
2.1.3.4	Laboratorijska ispitivanja	7
2.1.3.5	Računske analize	8
2.1.4	REDOSLED GEOTEHNIČKIH ISTRAŽIVANJA	8
2.1.5	SADRŽAJ GEOTEHNIČKIH ELABORATA	11
2.1.5.1	Elaborat o rezultatima geotehničkih istraživanja.....	11
2.1.5.2	Geotehnički elaborat o uslovima izgradnje puta ili objekta	12
2.1.6	VRSTE I OPISI ISTRAŽIVANJA	13
2.1.6.1	Predviđeni obim glavnih geotehničkih istraživanja.....	13
2.1.6.2	Geomehanička ispitivanja	15
2.1.6.3	Kvalitet izvođenja geotehničkih istraživanja	18
2.1.7	DODATAK.....	19
2.1.7.1	Standardi za terenske istražne radove	19
2.1.7.2	Standardi za laboratorijske istražne radove	20
2.1.7.3	Standardi za kabinetni rad i projektovanje.....	23
2.1.7.4	Sadržaj izveštaja	24
2.1.7.5	Informativni obim terenskih istražnih radova – sažetak iz EN 1997-2 (dodatak B)	31
2.2	HIDROLOŠKE ANALIZE	34
2.2.1	UVODNI DEO	34
2.2.1.1	Opšte	34
2.2.1.2	Vrste hidroloških analiza	34
2.2.1.3	Merodavne veličine kao predmet hidroloških analiza	35
2.2.1.4	Verovatnoća i povratni period velikih voda.....	35
2.2.2	MAKSIMALNI PROTOCI NA IZUČENIM SLIVOVIMA.....	36
2.2.3	KIŠE KAO ULAZ ZA PRORAČUN OTICAJA	37
2.2.3.1	Opšta razmatranja	37
2.2.3.2	Zavisnosti visine i intenziteta kiša od trajanja i povratnog perioda (HTP i ITP).....	37
2.2.3.3	Preporuke za izbor računski kiše	38
2.2.3.4	Računska kiša konstantnog intenziteta ("blok kiša")	39
2.2.3.5	Računska kiša neravnomernog intenziteta	39
2.2.4	PRORAČUN OTICAJA NA OSNOVU RAČUNSKIH KIŠA.....	41
2.2.4.1	Oticaj od kišnih voda.....	42
2.2.4.2	Vreme koncentracije	43
2.2.4.3	Racionalna metoda.....	46
2.2.4.4	Metode za proračun oticaja sa slivnih površina do ukrštanja sa putevima	49
2.2.4.5	Matematički modeli za proces padavine-oticaaj	54
2.2.5	RETENZIRANJE VODA.....	55
2.2.5.1	Opšta razmatranja	55
2.2.5.2	Hidrološki proračuni za dimenzionisanje retenzionih prostora	56
2.2.6	REFERENCE	59

2.1 GEOTEHNIČKA ISTRAŽIVANJA I ISPITIVANJA

2.1.1 UVODNI DEO

2.1.1.1 Opis i namena priručnika

Preduslov za izradu dobre tehničke dokumentacije su uz precizan geodetski snimak terena kvalitetno i pravovremeno izvedena geotehnička istraživanja koja odgovaraju zahvatu, tlu i fazi projektovanja. Ovaj priručnik obezbeđuje osnovne kriterijume za planiranje i izvođenje geotehničkih istraživanja i ispitivanja za vreme različitih faza projektovanja puteva kao i za praćenje stanja puta i objekata nakon izgradnje.

Preporuke su namenjene da posluže kao pomoć i usmerenje onome ko priprema program geotehničkih istražnih radova, a kasnije su namenjene kao pomoć i usmerenje izvođaču pomenutih istraživanja.

Vrsta, obim i način izvođenja pojedinih istražnih radova zavise od:

- geotehničkih uslova terena na kome će se izvoditi trasa puta sa pripadajućim objektima,
- projektovanog zahvata ili objekta i očekivanih opterećenja tla,
- faze geotehničkih istraživanja odnosno nivoa tehničke dokumentacije.

Priručnik je izrađen u skladu sa preporukama Evrokoda 7-2. U skladu sa time je određena „inženjerska odluka“ u pogledu vrste i količine istraživanja kao pravo i obaveza odgovornog geotehničara. Inženjerska presuda ne sme da odstupa od bitnih zahteva i preporuka koji su postavljeni kako u ovom priručniku tako i ostalim sličnim važećim dokumentima.

Sadržajni deo ovog priručnika je predstavljen u šest glavnih poglavlja koja određuju sledeće pojmove:

- osnovnu svrhu pripreme dokumenata
- faznost geotehničkih istraživanja i nivoa tehničke dokumentacije
- pristup izvođenju geotehničkih istraživanja, koji obuhvata početni kabinetski rad, terenski istraživački rad, laboratorijska ispitivanja i računске analize
- redosled geotehničkih istraživanja
- sadržaj geotehničkih elaborata

- vrste i primenljivost pojedinih metoda istraživanja tla.

2.1.1.2 Tehnička regulativa

Sledeći evropski standardi predstavljaju osnovu za izradu ovog priručnika:

- EN 1997-1, Eurocode 7: Geotechnical design - Part 1: General rules
- EN 1997-2, Eurocode 7: Geotechnical design - Part 2: Ground investigation and testing
- EN 1998-1 do 5, Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance;

i zajedno sa njima EN i ISO standardi za izvođenje i interpretaciju pojedinih ispitivanja iz sledećih grupa (detaljni spisak standarda nalazi se u tački 2.1.7):

- ISO 710: Graphical symbols for use on detailed maps, plans and geological cross-sections
- EN 932: Tests for general properties of aggregates
- EN 933: Tests for geometrical properties of aggregates
- EN 1097: Tests for mechanical and physical properties of aggregates
- EN 1367: Tests for thermal and weathering properties of aggregates
- EN 13286: Unbound and hydraulically bound mixtures
- EN 14157: Natural stones – Determination of abrasion resistance
- EN ISO 14688: Geotechnical investigation and testing - Identification and classification of soil
- EN ISO 14689: Geotechnical investigation and testing - Identification and classification of rock
- EN 15935: Soil, sludge, waste, and treated biowaste
- EN ISO 17892: Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil
- EN ISO 22282: Geotechnical investigation and testing - Geohydraulic testing
- EN ISO 22475: Geotechnical investigation and testing - Sampling methods and groundwater measurements
- EN ISO 22476: Geotechnical investigation and testing - Field testing
- EN ISO 22477: Geotechnical investigation and testing - Testing of geotechnical structures.

2.1.1.3 Terminologija

Evrokod (Eurocode) je sistem evropskih standarda za građevinarstvo.

Geološka sredina je onaj deo litosfere koji ulazi u integraciju sa ljudskom delatnošću i predstavlja materijalnu sredinu za direktnu razmenu materije i energije između čoveka i prirode.

Inženjerska geologija (nauka o geološkoj sredini) izučava stenske mase, geološke procese i geološke osobine prostora sa ciljem racionalnog korišćenja i zaštite geološke sredine.

Geotecnika je multidisciplinarna naučna i stručna oblast koja objedinjuje više naučnih oblasti, u smislu izučavanja i kvantitativnog procenjivanja i vrednovanja interaktivnih delovanja između objekta (građevina) i tla (terena).

Geotehnička istraživanja predstavljaju kompleksna istraživanja sastava, svojstava i dinamike geološke sredine, pre, za vreme i posle izgradnje objekata podrazumevajući prognozu i kontrolu njenog ponašanja u sadejstvu sa objektom. Praktično, to su inženjerski istražni radovi na terenu i u laboratorijama, neophodni za dobijanje svih potrebnih podataka o tlu (terenu) i podzemnoj vodi sa ciljem racionalnog planiranja, projektovanja, izgradnje i korišćenja različitih objekata.

Teren (sa gledišta geotehnike) predstavlja površinski deo litosfere koji utiče na uslove gradnje, a u kome se manifestuju uticaji gradnje i eksploatacije objekata pa je isti i predmet istraživanja radi definisanja navedenih uticaja.

Tlo je višefazna tvorevina od čvrstih čestica, gasova i tečnosti, nastala procesima raspadanja stena, sedimentacijom ili veštačkim putem.

Interakcija objekta i geološke sredine je skup uzajamnih uticaja veštačkog objekta i geološke sredine u svim fazama izgradnje i eksploatacije objekata.

Odgovorni geotehničar je stručno lice istraživačke institucije sa odgovarajućim referencama iz područja geotehničkih istraživanja koji vodi geotehnička istraživanja.

Iskustvo (experience) je dokumentovana, pouzdana informacija koja obuhvata slično tlo, tehnologije i ponašanje konstrukcija. Od posebne važnosti su lokalno stečena iskustva.

Poremećeni uzorak (disturbed sample) je uzorak kod koga je u odnosu na prirodno tlo promenjena vlažnost, struktura i fizička, mehanička svojstva prilikom uzimanja.

Neporemećeni uzorak (undisturbed sample) je uzorak kod koga u odnosu na prirodno tlo nisu bitno promenjena fizička i mehanička svojstva.

Krutost (stiffness) je otpornost materijala prema deformisanju.

Čvrstoća (strength) je otpornost materijala prema lomu.

2.1.1.4 Upotrebljene skraćenice

RQD	klasifikacija stena na osnovu jezgra (Rock Quality Designation)
SPT	standardni penetracioni opit (Standard Penetration Test)
FVT	krilna sonda (Field Vane Test)
CPT	opit statičke penetracije (Cone Penetration Test)
CPTU	opit statičke penetracije sa merenjem pornog pritiska
SCPT	opit statičke penetracije sa merenjem brzine seizmičkih talasa
PMT	presiometarski opit (Pressuremeter Test)
DMT	dilatometarski opit – Marketi (Flat Dilatometer Test)
SDMT	dilatometarski opit sa merenjem brzine seizmičkih talasa (Seismic DMT)
FDT	dilatometarski opit u bušotini (Flexible Dilatometer Test)
RDT	dilatometarski opit u bušotini u stenama (Rock Dilatometer Test)
SDT	dilatometarski opit u bušotini u tlu (Soil Dilatometer Test)
DP	opit dinamičke penetracije (Dynamic Probing)
DPL	opit dinamičke penetracije – laki (Dynamic Probing – Light)
DPM	opit dinamičke penetracije – srednji (Dynamic Probing – Medium)
DPH	opit dinamičke penetracije – teški (Dynamic Probing – Heavy)

DPSH opit dinamičke penetracije – veoma teški (Dynamic Probing – Super Heavy).

2.1.1.5 Upotrebljene oznake

E_{oed}	edometerski modul (kN/m^2)
C_c	indeks stišljivosti
E	modul elastičnosti (kN/m^2)
G	modul smicanja (kN/m^2)
c', φ'	parametri drenirane (efektivne) smičuće čvrstoće: kohezija (kN/m^2) i ugao smičuće otpornosti ($^\circ$)
c'_R, φ'_R	parametri rezidualne smičuće čvrstoće: kohezija (kN/m^2) i ugao smičuće otpornosti ($^\circ$)
c_u	nedrenirana smičuća čvrstoća (kN/m^2)
ρ	zapreminska masa (kN/m^3)
c_v	koeficijent konsolidacije (m^2/s)
k	vodopropusnost (m/s)

2.1.2 FAZNOST GEOTEHNIČKIH ISPITIVANJA I STEPEN OBRADJE TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

Ciljevi geotehničkih istraživanja u načelu treba da obezbede uslove za optimalni izbor svih planskih i projektnih rešenja putne saobraćajnice, koja zavise od svojstava geološke sredine, a koja slede iz problematike koja se rešava odgovarajućom fazom (nivoom) plana ili projekta. Kako su ciljevi istraživanja specifični za različite objekte, mogu razlikovati oni koji su opšti – za celu trasu ili deonicu i posebni – za pojedine objekte.

Opšti ciljevi istraživanja koji se odnose na trasu ili pojedine deonice su:

- izbor koridora i trase puta;
- izbor načina iskopa i opreme za iskope, u odnosu na iskop stenskih masa prema otkopavanju;
- izbor stabilnih nagiba kosina useka i zaseka i mera zaštite kosina, radi očuvanja stabilnosti;
- uslovi prevođenja trase preko klizišta i drugih nestabilnih padina i izbor mera njihove sanacije;
- način ugradnje nasipa, nagibi i stabilnost kosina, mere zaštite;
- nosivost podloge puta u slučaju izgradnje na slabonosivom tlu, posebno ako je deonica u nasipu ili na objektima;

- zaštita puta od površinskih i podzemnih voda, uslovi odvodnjavanja i dreniranja;
- izbor materijala i načina gradnje podloge i kolovozne konstrukcije u odnosu na svojstva tla;
- izbor materijala za nasipe, za betonski i asfaltni agregat, u odnosu na postojeća ili potencijalna lokalna nalazišta, izbor drobiljnih postrojenja i druge opreme, u odnosu na svojstva lokalnih materijala;
- izbor mesta i načina deponovanja viška materijala iz iskopa;
- uticaj gradnje i korišćenja puta na okolinu i uslovi zaštite od eventualnih štetnih uticaja, posebno zaštita tla i podzemnih voda kao dela životne sredine.

Posebni ciljevi istraživanja koji se odnose na pojedine objekte su:

a) za tunele

- izbor mikrolokacije (trase i nivelete) tunela;
- uslovi i način iskopa, izbor tehnologije iskopa;
- privremena stabilnost iskopa, izrada profila, dužina i vreme trajanja iskopa bez podgrade, rešenje privremene podgrade i sl.
- trajna stabilnost tunela, naponi i deformacije stenske mase posle iskopa, pritisci na oblogu;
- pojava podzemnih voda i njihov uticaj na uslove gradnje i eksploatacije tunela, rešenje hidroizolacije i drenaže;
- pojava štetnih gasova, mere zaštite i kontrole, tehnologija rada u prisustvu gasova, kriterijum uvođenja i ukidanja gasnog režima;
- uslovi gradnje portalnih delova tunela, stabilnost padine i kosina po iskopu i obezbeđenje stabilnosti;
- mogućnost korišćenja materijala iz iskopa za gradnju tunela i drugih objekata na putu;
- uslovi deponovanja viška materijala iz iskopa;
- uticaj izgradnje i korišćenja tunela na okolni teren i objekte, prognoza uticaja, mere zaštite i osmatranja.

b) za mostove

- izbor mikrolokacije mosta;
- uslovi fundiranja, dubina i vrste temelja, dozvoljeno opterećenje i sleganje podloge;
- način iskopa i zaštita temeljnih jama;
- stabilnost stubova i konstrukcije u celini;
- mogućnost korišćenja lokalnih materijala za gradnju, materijala iz iskopa i uslovi

deponovanja viška materijala. Ovaj cilj može biti rešavan i kroz opšte ciljeve koji se odnose na trasu.

- izvođenje poziva za ponude,
- izvođenje istraživanja,
- nadzor istraživanja i recenziju izveštaja o izvedenim istraživanjima.

U opštem slučaju geološka i geotehnička istraživanja vrše se u tri faze: prethodna istraživanja, glavna istraživanja i dopunska istraživanja (tabela 2.1.1).

Pri njihovom redosledu izvođenja treba da se obezbedi dosledno poštovanje osnovnih principa geotehničkih istraživanja. To su: princip postupnosti, potpunosti, ravnomernosti i ekonomičnosti.

Svaka od predviđenih faza zahteva:

- izradu programa istraživanja (izvodi stručna služba investitora),

Tabela 2.1.1: Faze istraživanja

Faza istraživanja	Svrha
Prethodna istraživanja	Generalno upoznavanje geološke građe terena sa ciljem: <ul style="list-style-type: none"> – izbora najadekvatnije vrste gradnje – donošenja odluke o adekvatnosti lokacije planirane gradnje – određivanja prethodnog plana za temeljenje objekta odnosno načina izgradnje geotehničkih zahvata – određivanja vrste i obima istraživanja u sledećoj fazi uz poštovanje generalnog projekta
Glavna istraživanja	Dobijanje svih potrebnih geotehničkih podataka za celovito projektovanje trase puta i temeljenja objekata na trasi
Dopunska istraživanja	Dopuna fonda podataka iz prethodnih faza istraživanja, npr. u sledećim slučajevima: <ul style="list-style-type: none"> – analiza do tada pribavljenih podataka ukazuje na njihovu nepouzdanosti ili nedostatke – promena plana ili lokacije puta ili objekta – promena uslova i odnosa na terenu – druge bitne promene u projektu (opterećenja, tehnološki postupci, faznost izvođenja radova, ...), koje zahtevaju dodatne geotehničke podatke – nepristupačnost terena na mikrolokaciji planiranih istražnih radova

Uz navedene tri faze istražnih radova postoje faze koje se javljaju u toku izgradnje. To su:

- tekuća istraživanja koja se vrše za vreme izvođenja geotehničkih radova i kojima potvrđujemo projektne pretpostavke (primenjuje se za tunele i druge duboke iskope, a uslovno za izvođenje iskopa za temelje i slično). Tekuća istraživanja su u slučaju potrebe određena u tehničkoj dokumentaciji i nisu predmet ovih smernica;
- kontrolna istraživanja pomoću kojih kontrolišemo kvalitet izvršenih radova. Kontrolna istraživanja su u slučaju potrebe određena u tehničkoj

dokumentaciji i nisu predmet ovih smernica.

Interpretacija svake naredne faze istraživanja mora da uključuje sva saznanja koja su dobijena u prethodnim fazama.

Projektovanje saobraćajnica odvija se u više faza. Načelno su to sledeće faze: generalni projekat, prethodna studija opravdanosti, idejni projekat, studija opravdanosti, glavni projekat, izvođački projekat, projekat izvedenog objekta (tabela 2.1.2). Pri projektovanju saobraćajnica, povezanost faza projektovanja sa fazama geotehničkih istraživanja jeste sledeća:

Tabela 2.1.2. Faze projektovanja i odgovarajuće faze istraživanja

Faza projektovanja	Faza geotehničkih istraživanja
generalni projekat, prethodna studija opravdanosti	prethodna istraživanja
idejni projekat, studija opravdanosti	glavna istraživanja
glavni projekat, izvođački projekat	glavna (i dopunska) istraživanja
projekat izvedenog objekta	tekuća i kontrolna istraživanja

2.1.3 PRISTUP IZVOĐENJU GEOTEHNIČKIH ISTRAŽIVANJA

2.1.3.1 Opšte

Osnovne pretpostavke za smernice za pripremu i izvođenje geotehničkih istraživanja su sledeće:

- geotehnička istraživanja planira, izvodi i interpretira stručno lice istraživačke institucije sa odgovarajućim referencama iz područja geotehničkih istraživanja,
- oprema koja se upotrebljava za istraživanje redovno je održavana i važeće kalibrisana,
- geotehnička istraživanja prate postupci koji garantuju kvalitet izvedenih radova,
- na lokaciji istraživanja se pored geološke strukture, geomorfologije i geotehničkih podataka takođe pažljivo proučava seizmičnost, hidrologija i prethodna upotreba (istorijat) prostora,
- istraživanja moraju da omoguće pregled promenljivosti sastava tla i karakteristika u prostoru,
- istraživanja takođe uključuju pregled i sakupljanje relevantnih informacija o projektovanju, izgradnji i stanju susednih objekata,
- o svakom izvedenom istraživanju vodi se odgovarajući zapisnik,
- geotehnička istraživanja se projektuju na osnovu predviđenog načina gradnje puta i/ili objekta, njegovih osobina i njegovog predviđenog ponašanja u toku gradnje i eksploatacije,
- za pripremu programa istraživanja je potrebno izvršiti analize svih postojećih informacija o lokaciji zahvata u kabinetu, kao i terensko rekognosciranje,
- program geotehničkih istraživanja je potrebno prilagođavati na osnovu

izvedenih zaključaka iz prethodno izvedenih radova,

- sva terenska i laboratorijska istraživanja se izvode i interpretiraju u skladu sa važećim propisima i standardima,
- geotehnička istraživanja moraju u svakoj fazi u vezi sa projektovanim putem i/ili objektom pružiti odgovarajuće informacije o tlu i podzemnoj vodi u uticajnoj zoni gradnje i omogućiti interpretaciju sastava tla kao i izbor karakterističnih vrednosti materijalnih parametara, koji su osnova za geotehničke proračune. Svrha geotehničkog projektovanja je identifikovanje i upravljanje geotehničkim rizikom. Tom cilju je podređen izbor konkretnih metoda i oblika kabinetskog rada, terenskih i laboratorijskih istraživanja i merenja, kao i njihov obim,
- potrebno je da se za kompleksne objekte ili za trase saobraćajnica koje prolaze kroz kompleksne geološke uslove od samog početka istraživanja tla vrši praćenje relevantnih geotehničkih pojava, kao što su to pomeranja tla, varijacije nivoa podzemne vode, varijacije pornih pritisaka ili drugo,
- predložen obim radova u ovom dokumentu je u skladu sa Evrokodom 7-2, što znači da je u većini slučajeva primenljiv za obične objekte. Za kompleksne objekte i kompleksne geotehničke uslove, neuobičajeno velika opterećenja kao i za objekte koji predstavljaju velik rizik za okruženje je potrebno povećati obim istražnih radova na odgovarajući način,
- klasifikacija projekata u geotehničke kategorije, kao što ih određuje Evrokod 7-1, dobra je osnova za razumevanje stepena kompleksnosti zahvata i potrebnog obima istraživanja,
- za uvršćenje projektovanog zahvata u jednu od geotehničkih kategorija potrebno je na osnovu primerenih metoda utvrditi

glavne geotehnički uslovljene rizike, i to već u početnoj fazi projektovanja.

Geotehnička istraživanja svake faze je preporučljivo izvoditi u navedenom redosledu i sa sadržajem koji je prikazan u sledećim poglavljima.

2.1.3.2 Prikupljanje postojećih podataka – kabinetski rad

Karakteristični postupci i metode kabinetskog rada kod prikupljanja i analize postojećih podataka su sledeći:

- kabinetski pregled područja uzduž trase puta ili/i objekta
- pregled postojećih geoloških i morfoloških karata i geodetskih snimaka
- pregled celokupne već postojeće geotehničke dokumentacije (npr. izveštaja o prethodnim fazama istraživanja)
- pribavljanje i analiza dokumentacije o mogućim proteklim radovima u blizini
- pregled podataka o ponašanju postojećih relevantnih zahvata ili objekata u blizini
- pribavljanje i analiza stereoskopskih parova aero foto snimaka i ostalih na daljinu pribavljenih podataka
- pribavljanje i analiza geotehničkih podataka iz postojećih digitalnih baza podataka
- izrada detaljnog plana terenskih istražnih radova
- shodno napredovanju terenskih istražnih radova priprema se detaljni program laboratorijskih istraživanja.

2.1.3.3 Terenski istraživački rad

Karakteristični postupci i metode terenskog istraživačkog rada su sledeći:

- pregled i rekognosciranje terena (celoviti terenski pregled uticajnog područja uzduž trase u odgovarajućoj širini; detekcija karakterističnih morfoloških, geoloških, inženjersko geoloških, hidrogeoloških i ostalih relevantnih pojava);
- geološko kartiranje u uticajnom području uzduž trase (strukturno-geološko, hidrogeološko i inženjersko-geološko kartiranje);
- detaljno geološko kartiranje užeg područja trase (strukturno-geološko, hidrogeološko i inženjersko-geološko kartiranje);
- istražni iskopi (iskop, popis, uzimanje uzoraka, izvođenje geotehničkih merenja u iskopima);
- istražno bušenje (izvođenje bušenja, praćenje parametara bušenja, popis jezgra, određivanje RQD, uzimanje

uzoraka zahtevanog kvaliteta, izvođenje geotehničkih istraživanja u bušotinama: standardni penetracioni opit, krilna sonda, presiometar, karotaž, geofizička merenja i drugo; opremanje bušotine za nastavljanje praćenja pokazatelja stanja: pijezometar, inklinometar i drugo);

- geomehanička ispitivanja (izvođenje merenja, obrada podataka i analiza rezultata):
 - standardni penetracioni opit - SPT
 - Terenski opit krilnom sondom - FVT
 - opit dinamičke penetracije – DPL, DPM, DPH, DPSH
 - opit statičke penetracije – CPT (CPTU, SCPT)
 - presiometar – PMT
 - dilatometar – DMT, SDMT, RDT
 - merenja stišljivosti i čvrstoće sa kružnom pločom – PLT;
- hidrogeološka ispitivanja (izvođenje merenja, obrada podataka i analiza rezultata):
 - merenja pijezometričkih nivoa i određivanja profila površinskih pritiska u tlu
 - merenja i proračun vodopropusnosti pomoću testova pumpanja i nalivanja
 - uzimanje uzoraka podzemne vode za hemijske i bakteriološke analize
 - hidrogeološka kategorizacija u odnosu na tip vodonosnog sloja i na potrebe zaštite podzemne vode
 - geofizička ispitivanja (izvođenje merenja, obrada podataka i analiza rezultata):
 - izvođenje i obrada rezultata merenja na terenu (geoelektrika, geoseizmika, georadar i ostale prema)
 - izvođenje i obrada merenja u bušotinama (karotaž, merenje brzine posmičnih talasa između bušotina i/ili između površine i bušotine);
- druga terenska ispitivanja (izvođenje merenja, obrada podataka i analiza rezultata):
 - geodetska merenja
 - inklinometarska merenja
 - ekstenziometarska merenja
 - statička i dinamička probna opterećenja šipova, probno pobijanje šipova
 - ispitivanja geotehničkih ankera (test delimičnog i potpunog opterećenja ankera, određivanje električnog otpora u ankerima)
 - izvođenje iskopa za sonde i testnih polja neposredno pre izgradnje nasipa (potreba za poboljšanjem osnovnih

- materijala, upotreba specifičnih materijala, upotreba novih tehnologija)
- druga posebna geotehnička merenja (merenja napona u tlu, merenja napredovanja pukotina, merenja vibracija i drugo);
- terenska istraživanja parametara tla u okviru zaštite životne sredine:
 - prisustvo otpadnih materija u tlu

- merenja profila PH, temperature i drugo.

2.1.3.4 Laboratorijska ispitivanja

Za laboratorijska ispitivanja treba upotrebiti uzorke koji su dobijeni odgovarajućim postupcima bušenja prema tabeli 2.1.3. Kategorije uzimanja uzoraka A, B i C su detaljno definisane u ISO 22475-1, tačka 6.

Tabela 2.1.3: Odgovarajući kvalitet uzoraka potreban za pojedina laboratorijska ispitivanja (prema Evrokodu 7-2)

Karakteristika tla / klasa kvaliteta uzorka	Neporemećeni	Poremećeni			
	1	2	3	4	5
Nepromenjene karakteristike zemljanih materijala					
Veličina zrna	+	+	+	+	
Vlažnost	+	+	+		
Zapreminska težina, relativna zbijenost, vodopropusnost	+	+			
Stišljivost, smičuća čvrstoća	+				
Karakteristike koje možemo odrediti					
Redosled slojeva	+	+	+	+	+
Granice između slojeva, grubo	+	+	+	+	
Granice između slojeva, detaljno	+	+			
Atterberg. gran., spec.težina zrna, sadr. organskih mat.	+	+	+	+	
Vlažnost	+	+	+		
Zapreminska težina, relativna zbijenost, vodopropusnost	+	+			
Stišljivost, smičuća čvrstoća	+				
Kategorija uzimanja uzoraka (bušenja) prema EN ISO 22475-1*	A				
				B	
					C

* Za geotehničke analize bitni su uzorci klase kvaliteta 1 i 2 (kategorija uzimanja A). U sitnozrnatom tlu (glina, prašina, organska tla) a izuzetno u peskovitom tlu, odgovarajući kvalitet uzorka može se dobiti postupcima bušenja sa alatima za vađenje jezgra sa dve ili tri stene uz upotrebu isplake. Primeri odgovarajućih alata su:

- tankozidni uzorkivači,
- alat za vađenje jezgra Denisom,
- alat za vađenje jezgra sa unutrašnjom cevi za dodavanje i
- alat za vađenje jezgra Laskay.

Isti kvalitet uzorka može se dobiti i u istražnim iskopima uzimanjem većih blokova tla.

Kategorija uzimanja uzoraka B odnosi se na uzorke uzete metodom sržnih cevi.

Kategorija uzimanja uzoraka C odnosi se na uzorke dobijene bušenjem sa ispiranjem.

Karakteristični postupci i metode laboratorijskih ispitivanja (u tački 2.1.7.2 su definisani standardi za pojedina laboratorijska ispitivanja) su sledeći:

- pregled dostavljenih uzoraka i izrada detaljnog programa geomehaničkih laboratorijskih ispitivanja;
- ispitivanja zemljanih materijala
 - identifikaciona ispitivanja (klasifikacija)
 - određivanje zapremine težine
 - ispitivanja parametara čvrstoće
 - ispitivanja krutosti
 - ispitivanja vodopropusnosti
 - ispitivanja upotrebljivosti za nasipe
 - osnovna hemijska ispitivanja zemljanih materijala;
- ispitivanja stena
 - priprema uzoraka za ispitivanje
 - klasifikacija i identifikacija stena (petrografska i mineraloška ispitivanja)
 - ispitivanja parametara čvrstoće
 - ispitivanja sposobnosti bubrenja
 - ispitivanja krutosti
 - ispitivanja upotrebljivosti stenovitih materijala za preradu u kameni agregat
 - ispitivanja upotrebljivosti za nasipe;
- Laboratorijska geološka ispitivanja
 - paleontološka
 - stratigrafska
 - sedimentološka
 - rendgenska
 - druga;
- laboratorijska istraživanja hemijskih parametara i drugih parametara koji utiču na životnu sredinu
 - prisustvo organskih materija
 - pH vrednost
 - prisustvo sulfata u zemlji i podzemnoj vodi
 - prisustvo hlorida
 - prisustvo karbonata
 - prisustvo teških metala.

2.1.3.5 Računske analize

U ovim smernicama koje se odnose na istražne radove, računске analize navedene su samo u smislu pomoći pri interpretaciji rezultata geomehaničkih istraživanja:

- povratne analize za verifikaciju dobijenih karakteristika

- povratne analize stabilnosti na nestabilnim područjima
- povratne analize dokumentovanog ponašanja relevantnih zahvata ili objekata u blizini lokacije planirane gradnje;
- računске analize za povratne analize su najčešće:
 - analize globalne stabilnosti
 - proračun sleganja i njihov vremenski razvoj
 - numeričko modeliranje (metod konačnih elemenata, metod ivičnih elemenata, metod konačnih razlika, ...)
 - proračun nosivosti tla.

Povratne analize omogućavaju kalibraciju ulaznih podataka koje smo prethodno dobili istražnim radovima.

2.1.4 REDOSLED GEOTEHNIČKIH ISTRAŽIVANJA

Za geotehnička istraživanja je potrebno izvršiti poziv za ponude a samo izvođenje radova treba da bude obavljeno u odgovarajućem razdoblju pre početka projektovanja kako bi projektanti pravovremeno dobili i raspolagali odgovarajućim geotehničkim podacima. U tom kontekstu je dobrodošla podela izveštaja kao što je predviđa Evrokod 7, i to na:

- elaborat o rezultatima geotehničkih istraživanja i
- geotehnički elaborat o uslovima izgradnje trase puta ili objekta.

Prvi izveštaj mora da bude predat projektantu odmah nakon izvođenja istraživanja, a drugi izveštaj se sačinjava istovremeno sa ostalim segmentima tehničke dokumentacije. U svakom slučaju, elaborat o rezultatima geotehničkih istraživanja je sastavni deo geotehničkog elaborata o uslovima izgradnje puta ili objekta, pa je čest slučaj da umesto dva elaborata izvođač istražnih radova naručiocu preda kompletan rad zajedno. I u takvim slučajevima treba razdvojiti faktualni deo (rezultate istražnih radova) od interpretativnog dela (uslovi gradnje).

U tabeli 2.1.4 opisan je niz faza geotehničkih istraživanja.

Tabela 2.1.4: Faze istraživanja: svrha, izvođač, podloge, metode rada, završni dokument, tehnička kontrola

Faza	Svrha	Izvođač	Potrebne podloge	Metode istraživanja	Završni dokument	Tehnička kontrola
Prepriprema istraživanja	<p>Prethodna analiza tehničke dokumentacije i geotehničkih uslova sa stajališta planiranih istraživanja.</p> <p>Cilj ove faze je priprema poziva za ponude za prethodna geotehnička istraživanja.</p>	Stručna služba naručioca ili na njegov poziv određena konsultantska firma.	<p>Poslednja verzija tehničke dokumentacije (situacija, uzdužni presek, poprečni preseki).</p> <p>Arhivski geotehnički podaci (ako postoje).</p>	<p>Izbor metoda kabinetskog rada (vidi 2.1.3.2).</p> <p>Pregled i rekognosciranje terena (vidi 2.1.3.3)</p>	Program geotehničkih istraživanja.	Preporučljivo kod kompleksnih geotehničkih uslova trase.
Prethodna istraživanja	<p>Dobijanje osnovnih podataka o sastavu i karakteristika ma tla (vidi tabelu 2.1.1).</p> <p>Dobijanje odgovarajućih podataka za izradu programa glavnih istraživanja.</p>	Istraživačka institucija sa odgovarajućim referencama iz oblasti geotehničkih istraživanja.	<p>Poslednja verzija tehničke dokumentacije (situacija, uzdužni presek).</p> <p>Arhivski geotehnički podaci (ako postoje)</p>	<p>Izbor metoda kabinetskog rada (vidi 2.1.3.2).</p> <p>Geološko kartiranje (vidi 2.1.3.3).</p> <p>[Izbor ostalih terenskih istraživačkih radova, laboratorijskih ispitivanja i računskih analiza].</p>	Elaborat o rezultatima prethodnih geotehničkih istraživanja za trasu ili objekte i geotehnički elaborat o uslovima izgradnje trase puta ili objekta.	<p>Završni izveštaj je predmet interne tehničke kontrole.</p> <p>Način kontrole određuje stručna služba naručioca.</p>
Glavna istraživanja (za detaljni opis vidi 2.1.4.3)	Dobijanje svih potrebnih podataka o karakteristika ma tla na trasi puta i na lokacijama mostova, tunela (vidi tabelu 2.1.1).	Istraživačka institucija sa potvrđenim referencama u pozivu za ponudu.	<p>Poslednja verzija tehničke dokumentacije (situacija, uzdužni presek, poprečni preseki, puta i/ili objekta).</p> <p>Prethodni elaborati o rezultatima geotehničkih istraživanja.</p> <p>Drugi relevantni podaci (opterećenja temelja, raspoloživo vreme za konsolidaciju, ...)</p>	<p>Izbor metoda kabinetskog rada (vidi 2.1.3.2), detaljno geološko kartiranje (vidi 2.1.3.3), izbor ostalih terenskih istraživačkih radova, laboratorijskih ispitivanja (vidi 2.1.3.4), računске analize (vidi 2.1.3.5).</p>	Elaborat o rezultatima glavnih geotehničkih istraživanja za trasu ili objekte i geotehnički elaborat o uslovima izgradnje trase puta ili objekta.	<p>Završni elaborati su predmet interne tehničke kontrole.</p> <p>Način kontrole određuje stručna služba naručioca.</p>

Faza	Svrha	Izvođač	Potrebne podloge	Metode istraživanja	Završni dokument	Tehnička kontrola
Dopunska istraživanja	Dopuniti fond podataka iz prethodnih faza istraživanja (vidi tabelu 2.1.1).	Istraživačka institucija sa odgovarajućim referencama (prema mogućnosti ista institucija koja je vršila glavna istraživanja).	Poslednja verzija tehničke dokumentacije (situacija, uzdužni i poprečni presek), elaborati o rezultatima prethodnih i glavnih geotehničkih istraživanja, geotehnički elaborat o uslovima izgradnje trase puta ili objekta. Podaci o promenama tehničke dokumentacije i ostali razlozi zbog kojih se izvode dopunska istraživanja. Posebni zahtevi odgovornog projektanta.	Izbor metoda kabinetskog rada (vidi 2.1.3.2), detaljno geološko kartiranje (vidi 2.1.3.3), izbor ostalih terenskih istraživačkih radova, laboratorijskih ispitivanja (vidi 2.1.3.4), računске analize (vidi 2.1.3.5).	Elaborat o rezultatima dopunskih geotehničkih istraživanja. Geotehnički elaborat o uslovima izgradnje trase puta ili objekta.	Završni elaborati su predmet interne tehničke kontrole. Način kontrole određuje stručna služba naručioca.
Geotehničko praćenje stanja puta ili objekta nakon izgradnje	Osnovna svrha geotehničkog praćenja je proveravanje funkcionalnih sposobnosti trase puta i/ili pojedinih objekta i proveravanje saglasnosti sa projektovanim ponašanjem. Rezultati praćenja omogućavaju racionalan pristup sanaciji, u slučaju da je to potrebno.	Izvođač sa referencama u oblasti geotehničkih, geodetskih i/ili ostalih potrebnih vrsta merenja i interpretacije geotehničkog praćenja.	Glavni i izvođački projekat, projekat izvedenog objekta. Elaborati o rezultatima glavnih (i dopunskih) geotehničkih istraživanja. Geotehnički elaborat o uslovima izgradnje trase puta ili objekta. Projektni zadatak za izvođenje geotehničkog praćenja.	Pregled postojeće tehničke dokumentacije. Projektovanje i uspostavljanje sistema tehničkog praćenja. Periodično izvođenje merenja na objektu. Interpretacija rezultata merenja. Izrada izveštaja sa predlogom mera i/ili nastavljanja praćenja.	Periodični izveštaj o rezultatima geotehničkog praćenja trase puta i/ili objekta. Završni izveštaj o geotehničkom praćenju objekta u periodu (od ... do...) sa predlogom mera i nastavljanjem merenja.	Završni izveštaj o geotehničkom praćenju stanja puta i objekata nakon izgradnje predmet je interne tehničke kontrole. Način pregleda određuje stručna služba naručioca.

2.1.5 SADRŽAJ GEOTEHNIČKIH ELABORATA

S obzirom na to da je geotehnički elaborat završni čin celokupnog istraživačkog rada, njegov sadržaj je važan za sve sledeće korisnike elaborata (projektante, naručioce, nadzorne inženjere i izvođače). U tu svrhu su u nastavku navedene preporuke o sadržajnom delu geotehničkog elaborata.

Načelno, izveštaje delimo na dva dela da bismo omogućili praćenje faznosti projektovanja, kao što to predviđa Evrokod 7, i to na:

- elaborat o rezultatima geotehničkih istraživanja
- geotehnički elaborat o uslovima izgradnje trase puta ili objekta.

Elaborat o rezultatima geotehničkih istraživanja je obavezni sastavni deo geotehničkog elaborata o uslovima izgradnje puta ili objekta.

Pri izradi geotehničkih elaborata treba imati u vidu da su oni namenjeni projektantu puta ili objekta. Zato je potrebno da, pogotovo pri obimnim i geotehničko kompleksnim zahvatima, budu izvedeni kraći ekstrakti iz elaborata za projektanta, u kojima su prikazane samo suštinske informacije za projektovanje. Interpretacija rezultata mora biti prikazana građevinskom projektantu na jasan i razumljiv način.

2.1.5.1 Elaborat o rezultatima geotehničkih istraživanja

Generalno uzevši, geotehnički elaborati će biti rađeni za različite zahvate:

- trasu puta,
- mostove,
- tunele,
- pozajmišta lokalnih materijala, deponije suvišnog materijala,
- izuzetno kompleksne delove trase (odseci sa dubokim usecima, visokim nasipima, klizištima i slično).

U načelu elaborat o rezultatima geotehničkih istraživanja sadrži:

- prikaz svih raspoloživih geotehničkih podataka zajedno sa geološkim karakteristikama i merodavnim podacima;
- geotehničke analize i ocene vrednosti podataka uz navođenje pretpostavki koje su bile upotrebljene pri interpretaciji rezultata istraživanja.

Informacije mogu da budu sabrane u jednom izveštaju ili u više odvojenih celina.

2.1.5.1.1 Prikaz geotehničkih podataka

Prikaz geotehničkih podataka mora da sadrži:

- faktografski izveštaj o svim terenskim i laboratorijskim istraživanjima;
- dokumentaciju o metodama upotrebljenim pri terenskim i laboratorijskim istraživanjima.

Elaborat mora biti zasnovan na izveštajima o pojedinim istraživanjima, kao što to preporučuje standard EN 1997-2.

Pored toga, faktografski deo izveštaja mora da sadrži sledeće podatke (tamo gde je to potrebno):

- imena svih konsultanta i podizvođača;
- namenu i obim geotehničkih istraživanja;
- vremenski interval u kojem su se izvodila terenska i laboratorijska istraživanja;
- rezultate terenskog rekognosciranja šireg područja zahvata sa posebnom pažnjom na prisustvo podzemne vode, ponašanje susednih objekata, izdanaka (ogoljenih delova) u kamenolomima i drugim mestima uzimanja materijala, nestabilna područja, probleme za vreme iskopa i drugo;
- istorijat lokacije;
- geološku strukturu prostora zajedno sa prelomnim linijama;
- geodetske podatke;
- informacije iz dostupnih aero foto snimaka;
- lokalna iskustva na području;
- informacije o seizmičnosti područja;
- postupke uzimanja, transporta i čuvanja uzoraka;
- vrste upotrebljene terenske opreme;
- tabelarni prikaz količina izvedenih terenskih i laboratorijskih istraživanja kao i zapise o terenskim opažanjima nadzornog osoblja na terenu u vremenu istraživanja tla;
- podatke o oscilacijama nivoa podzemne vode u bušotinama sa vremenom u toku izvođenja terenskih istraživačkih radova i u pijezometrima nakon završenih terenskih istraživanja;
- prikaz profila bušotina zajedno sa fotografijama jezgra, sa opisima slojeva tla, koji su zasnovani na opisima sa terena i rezultatima laboratorijskih istraživanja;
- pojave ili mogućnosti pojave radona;
- podatke o osetljivosti tla na smrzavanje;

- u prilogima elaborata se sakupljaju i prikazuju rezultati laboratorijskih i terenskih istraživanja.

2.1.5.1.2 Analiza i ocena vrednosti geotehničkih podataka

Analiza i ocena vrednosti geotehničkih podataka mora da sadrži:

- pregled terenskog i laboratorijskog rada. Na bilo koje nedostatke u podacima (npr. pogrešni, nevažni, nedovoljni ili neprecizni podaci) je potrebno upozoriti i dati odgovarajuće komentare. Pri interpretaciji rezultata istraživanja je potrebno uzeti u obzir način uzimanja uzoraka, postupke transporta i čuvanja uzoraka. Bilo koje nedoslednosti rezultata istraživanja je potrebno pažljivo proveriti i ustanoviti da li je u pitanju podatak koji dovodi u zabludu ili predstavlja realno ponašanje materijala, koga je potrebno uzeti u obzir pri projektovanju;
- pregled dobijenih vrednosti geotehničkih parametara;
- predloge za potrebne dalje terenske i laboratorijske aktivnosti u datoj ili u višim fazama projektovanja zajedno sa objašnjenjem potrebe za dodatnim radovima. Takav predlog mora da sadrži detaljan program potrebnih dodatnih istraživanja sa jasnim naznakama na koja otvorena pitanja je potrebno odgovoriti pomoću dodatnih istraživanja.

Pored ovoga, analiza i ocena vrednosti geotehničkih podataka mora da sadrži i:

- tabelarne i grafičke prikaze rezultata terenskih i laboratorijskih istraživanja;
- histograme koji prikazuju područja vrednosti najvažnijih podataka i njihovu raspodelu;
- dubinu nivoa podzemne vode i njene sezonske fluktuacije;
- profil(profile) temeljnog tla, iz koga su jasno vidljivi pojedinačni slojevi tla;
- detaljan opis pojedinačnih slojeva tla sa klasifikacijom, pripadajućim fizičkim osobinama, njihovim karakteristikama krutosti, čvrstoće, vodopropusnosti;
- komentare o nepravilnostima kao što su npr. prisutnost sočiva drugačijih materijala i kaverne.

2.1.5.2 Geotehnički elaborat o uslovima izgradnje puta ili objekta

Geotehnički elaborat o uslovima izgradnje puta ili objekta mora da sadrži pretpostavke, podatke, računске metode i rezultate provere sigurnosti i upotrebljivosti.

Nivo preciznosti obrade podataka u geotehničkom elaboratu može biti veoma različit u zavisnosti od vrste zahvata. Za jednostavne zahvate može da bude dovoljan samo jedan list.

Geotehnički elaborat o uslovima izgradnje načelno sadrži sledeće tačke i poziva se na elaborat o rezultatima geotehničkih istraživanja (vidi 2.1.5.1) i na druge dokumente, koji sadrže dodatne detalje:

- opis lokacije i njenog okruženja;
- opis uslova tla;
- opis projektovane konstrukcije, zajedno sa opterećenjima;
- projektne vrednosti osobina tla i stenske mase, zajedno sa pojašnjenjima, gde je to potrebno;
- izjavu o upotrebljenim propisima i standardima;
- komentar o pogodnosti lokacije u odnosu na predlaganu konstrukciju i nivo prihvatljivog rizika;
- geotehničke proračune i crteže;
- preporuke za projektovanje fundiranja objekata;
- zapis postavki i objekata, koje treba nadzirati za vreme gradnje ili koji zahtevaju održavanje ili tehničko praćenje.

Geotehnički elaborat o uslovima izgradnje mora da sadrži program nadzora i tehničkog praćenja, tamo gde je to potrebno. Stvari, koje zahtevaju nadzor za vreme izgradnje ili održavanje nakon izgradnje, moraju biti jasno navedene u elaboratu. Kada su zahtevane kontrole za vreme izgradnje izvedene, one moraju biti dokumentovane.

U vezi sa nadzorom i tehničkim praćenjem Geotehnički elaborat o uslovima izgradnje mora da odredi sledeće:

- namenu svakog niza praćenja i merenja;
- delove konstrukcije koje treba pratiti, kao i lokacije na kojima je potrebno izvršiti merenja;
- frekvenciju merenja;
- načine analize i ocene vrednosti rezultata;
- obim vrednosti unutar kojih očekujemo rezultate;
- trajanje tehničkog praćenja nakon završene izgradnje puta ili objekta;
- osobe koje su odgovorne za izvođenje merenja i praćenja, za interpretaciju dobijenih rezultata kao i za održavanje instrumenata.

Sažetak geotehničkog elaborata o uslovima izgradnje, koji sadrži zahteve u vezi sa nadzorom, tehničkim praćenjem i

održavanjem izgrađene konstrukcije, potrebno je uručiti investitoru/naručiocu.

2.1.6 VRSTE I OPISI ISTRAŽIVANJA

2.1.6.1 Predviđeni obim glavnih geotehničkih istraživanja

2.1.6.1.1 Terenska istraživanja

Na osnovu saznanja dobijenih iz prethodnih istraživanja treba pripremiti program glavnih istraživanja.

Obim istraživanja zavisi od:

- stepena prethodne istraženosti terena,
- vrste tla,
- plana, veličine i važnosti zahvata,
- predviđenih opterećenja tla.

Kod planiranja istraživanja treba uzeti u obzir važeće tehničke standarde i sopstvenu stručnu ocenu i iskustva.

Obim istraživanja treba prilagoditi tekućim saznanjima.

Predlog za obim terenskih istraživanja je definisan u EN 1997-2 (dodatak B). Sažetak navedenog nalazi se u dodatku 2.1.7.5.

Praksa je pokazala da je na geološko i morfološko kompleksnim područjima već u ranim fazama istraživanja racionalno izvesti više dubokih bušotina i opremiti ih sa

inklinometrima i pijezometrima za dugoročna praćenja (pre, za vreme i nakon gradnje) pomeranja tla i pritiska podzemne vode.

2.1.6.1.2 Laboratorijska ispitivanja

Kod planiranja laboratorijskih ispitivanja treba uzeti u obzir vrstu konstrukcije, opterećenje tla, stratigrafiju osnovnog tla i karakteristike zemljanog materijala i stenskih masa.

Vrsta i obim ispitivanja moraju uvek da se prilagođavaju zaključcima terenskih istraživanja i to tako da je moguća njihova nadgradnja i dopuna. Pre nego što se započne sa izvođenjem laboratorijskih istraživanja neophodno je okvirno poznavanje karakterističnog profila tla - stratigrafije terena i posebno onih slojeva koji su relevantni za datu konstrukciju.

Ispitivanja moraju da budu planirana u obimu koji omogućuje pouzdano određivanje karakteristika svih karakterističnih slojeva koji nastupaju u tlu.

Laboratorijska ispitivanja se moraju sadržajno i količinski prilagođavati rezultatima već izvedenih ispitivanja, i to u toku vršenja ispitivanja.

Preporučeni obim laboratorijskih ispitivanja je definisan u EN 1997-2 (dodaci L do W). Sažetak tih preporuka nalazi se u tabeli 2.1.5.

Tabela 2.1.5: Preporuke o obimu laboratorijskih ispitivanja za svaki sloj tla

Vrste ispitivanja Tlo	Postoji iskustvo o materijalu	
	ne	da
Granulometrija	4-6	2-4
Vlažnost	na svim uzorcima klase 1 do 3	
Indeks čvrstoće	na svim uzorcima klase 1	
Atterbergove granice	3-5	1-3
Sadržaj organskih materijala	3-5	1-3
Zapreminska težina	kod svakog testa	
Relativna zbijenost	prema potrebi	
Specifična težina zrna	2	1
Stišljivost	2-4	1-3
Smičuća čvrstoća	2-4	1-3
Nedrenirana čvrstoća	3-6	1-4
Proctor	3	
CBR	3	
Vodopropusnost	3-5	1-4

Vrste ispitivanja Stena	Postoji iskustvo o materijalu	
	ne	da
Vlažnost	1 test/metar bušotine	
Zapreminska težina i poroznost	1 test/2 m bušotine, barem 1 test za svaki tip stene	
Bubrenje	3	
Monoaksijalna čvrstoća	2-6	1-4
Indeks tačkastog opterećenja	5-10	
Opit direktnog smicanja	5	

2.1.6.1.3 Geološka istraživanja

2.1.6.1.3.1 Strukturna geološka istraživanja

Zadatak strukturno geoloških istraživanja je rešavanje i definisanje geološke strukture terena preko kojeg prelazi put sa pripadajućim objektima. U tu svrhu utvrđene litološke jedinice treba uvrstiti u grupe prema njihovim osnovnim pokazateljima i utvrditi odnose između različitih litoloških jedinica/grupa (normalne, tektonske,...). Ti podaci služe za hidrogeološku i inženjersko geološku interpretaciju proučavanog terena.

Završni cilj strukturno geoloških istraživanja jeste da se naznače mogući uticaji strukturnih uslova i procesa na težinu ili ugroženost gradnje (npr. mogućnost globalne nestabilnosti na tektonskom kontaktu i slično).

2.1.6.1.3.2 Inženjersko-geološka (IG) istraživanja

Osnovna svrha IG istraživanja jeste:

- interpretacija utvrđene geološke strukture (sastava tla) za određivanje uslova izgradnje puta ili objekata u različitim fazama istraživanja, i
- interpretacija (u laboratoriji ili na terenu) utvrđenih geomehaničkih karakteristika, geofizičkih i ostalih podataka iz lokalnih vrednosti i njihova ekstrapolacija u celokupni istraživački prostor odnosno u pojedine litološke jedinice.

Podaci koji treba da budu obuhvaćeni IG istraživanjima:

- IG karakteristike:
 - oblik terena
 - morfološka karakterističnost pokrajine
 - nagib prirodnih padina
 - vegetacija (obraslost terena)
 - osetljivost na delovanje egzogenih pojava:
 - raspadanje

- prosečna ispucalost
- erozija
- klizanje
- karakter pukotina
- prosečne debljine degradiranog sloja degradiranog materijala i
- vrste degradiranih slojeva degradiranih materijala
- načini raspadanja i degradiranja
- ocena stabilnosti terena
- vrste pojava narušavanja prirodne ravnoteže;
- Ocene geotehničkih karakteristika inženjersko-geoloških jedinica:
 - klasifikovanje stenskih masa (opisno i u jednom od numeričkih oblika, npr. RMR, GSI,...);
 - Seizmičke karakteristike:
 - kategorizacija tla prema Evrokodu 8.

2.1.6.1.4 Hidrogeološka istraživanja

2.1.6.1.4.1 Svrha hidrogeoloških istraživanja

je usmerena na problematiku dva područja i to:

- zaštita puta od podzemne vode: pravovremena i kvalitetna prognoza hidrogeoloških uslova je potrebna za ispravna tehnička rešenja pri gradnji u uslovima u kojima uticaj podzemnih voda bitno utiče na kolovoznu konstrukciju;
- zaštita podzemne vode od uticaja sa kolovoza: podzemna voda je bitna komponenta životne sredine, koju je potrebno kvalitetno obezbediti pre svega na onim područjima gde put indirektno ili direktno utiče na njen kvalitet. Ova područja su određena propisima kao posebni bezbednosni pojasevi i kao potencijalni izvori vode. Hidrogeološka istraživanja moraju da budu izvršena i interpretirana tako da za potrebe odgovornog projektanta i/ili geomehaničara jasno, razumljivo i nesumnjivo prikažu kvalitativno stanje izdani, nivoa podzemne vode u dužem

hidrološkom periodu, pravac i brzinu toka podzemne vode, ranjivost, osetljivost i izloženost izdani kao i ostale hidrogeološke karakteristike koje utiču na odnos između podzemne vode i puta kao građevinskog zahvata i kao stalnog potencijalnog izvora zagađenja podzemne vode.

2.1.6.1.4.2 *Predloženi program hidrogeoloških istraživanja i sadržaj elaborata o HG ispitivanjima sadrži:*

- regionalni pregled geoloških uslova: izvodi se kratak pregled geoloških uslova koji se odnose pre svega na hidrogeološku problematiku;
- regionalni hidrogeološki pregled: u toj fazi istraživanja se proveravaju regionalni hidrogeološki uslovi, kao što su pravac strujanja podzemne vode ili debljina zasićenog i nezasićenog sloja u podzemnom prostoru. Zatim se pregledaju rasprostiranja hidrogeoloških karakteristika tla (koeficijent propusnosti, transmisije, poroznost) i određuju se osnovne karakteristike bilansa izdani;
- hidrogeološka merenja: hidrogeološka merenja se izvode u skladu sa odredbama projektnog zadatka i u zavisnosti od hidrogeoloških činjenica (propusnost, transmisija). Merenja obuhvataju pre svega:
 - merenja vodopropusnosti crpljenjem,
 - merenja vodopropusnosti nalivanjem,
 - merenja nivoa podzemne vode u piježometrima;
- pregled sigurnosnih pojaseva i drugih vodozahvata iz podzemne vode: u okviru ove faze istraživanja izvodi se pregled svih odlukama prihvaćenih sigurnosnih pojaseva i ostalih nezaštićenih izvora vode. Uz to se proučavaju i hidrogeološke činjenice koje određuju pojedini izvori vode (izdašnost bunara, zaliha podzemne vode itd.). Sa hidrogeološkog stajališta se upozorava i na problematiku zaštite izdani ukoliko je ona ugrožena zbog pojedinačnih projektantskih rešenja i odluka;
- pregledni opis / prognoza hidrogeoloških uslova uzduž trase: u elaboratu o hidrogeološkim ispitivanjima se prikazuju hidrogeološki odnosi koji će biti dominantni uzduž trase. Pregled se podnosi na pripadajućim intervalima stacionaže puta;
- klasifikovanje hidrogeoloških prilika uzduž trase: pregledan opis hidrogeoloških uslova je važan kod projektovanja tehničkih mera

za zaštitu podzemne vode i ostalih tehničkih rešenja za zaštitu od podzemne vode. Klasifikovanja se izvode na osnovu smernica i uputstava koje su u upotrebi za tu svrhu.

Detalje o metodama hidrogeoloških istraživanja utvrđuju standardi grupe ISO 22282.

2.1.6.1.5 Geofizička ispitivanja

2.1.6.1.5.1 *Svrha geofizičkih ispitivanja*

Osnovna svrha geofizičkih ispitivanja za potrebe geotehničkih elaborata i ostale tehničke dokumentacije je sledeća:

- sticanje osnovnih informacija o geološkom prostoru na kome će se graditi put
- konstruisanje geoloških profila zajedno sa podacima iz bušotina/raskopa
- dobijanje kvantitativnih podataka o krutosti stenske mase i zemljanih materijala pri malim deformacijama (geoseizmička istraživanja)
- određivanje optimalnih mesta bušotina za dobijanje ostalih reprezentativnih podataka (inženjersko-geoloških, geotehničkih i sl.)
- određivanje mesta bušotina za proveravanje određenih anomalija.

2.1.6.1.5.2 *Izbor geofizičkih metoda:*

- geoelektrične metode
- seizmičke metode
- elektromagnetske metode - georadar
- karotažna merenja
- utvrđivanje tehničkog stanja bušotina.

2.1.6.2 Geomehanička ispitivanja

2.1.6.2.1 Terenska ispitivanja

Pregled terenskih opita za određivanje bitnih karakteristika tla nalazi se u tabeli 2.1.6. Tabela 2.1.6 daje informacije o pogodnosti pojedinog opita u odnosu na vrstu tla (krupnozrna tla, sitnozrna tla, stena). U tački 2.1.7.1 navedeni su standardi za izvođenje i interpretaciju pojedinih opita.

2.1.6.2.2 Laboratorijska ispitivanja

Pregled laboratorijskih opita za klasifikaciju tla nalazi se u tabeli 2.1.7.

Tabela 2.1.8 daje pregled laboratorijskih metoda za ispitivanje fizičkih i mehaničkih svojstava uzoraka.

U tački 2.1.7.2 navedeni su standardi za izvođenje i interpretaciju pojedinih laboratorijskih opita.

Tabela 2.1.6: Pregled terenskih ispitivanja

Metod terenskog istraživanja ^{a)}	Mogućnost dobijanja kvalitetnih rezultata														
	Uzimanje uzoraka														
	Tlo i stena														
	Kategorija A	Kategorija B	Kategorija C	CPT i CPTU	PMT ^{c)}	RDT	Dilatometar	SPT ^{d)}	DPL/DPM	DPH/DPSH	FVT	DMT	PLT	Otvoren sistem	Zatvoren sistem
Osnovne informacije															
Vrsta tla	K1 S1	K1 S1	K2 S2	K2 S2	K3 S3	-	K3 S3	K2 S1	K3 S3	K3 S3	-	K2 S2	-	-	-
Vrsta stene	R1	R1	R2	R3 ^{e)}	R3	R2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pozicija slojeva ^{b)}	K1 S1 R1	K1 S1 R1	K3 S3 R2	K1 S1	K3 S3 R3	R3	K3 S3	K2 S2	K1 S2	K1 S2	-	K2 S1	-	-	-
Nivo podzemne vode	-	-	-	K2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	K1 S2 R2	K1 S1 R1
Porni pritisak	-	-	-	K2 S2	S3	-	-	-	-	-	-	-	-	K1 S2 R2	K1 S1 R1
Karakteristike tla															
Veličina zrna	K1 S1 R1	K1 S1 R1	R2	-	-	-	-	K2 S1	-	-	-	-	-	-	-
Vlažnost	K1 S1 R1	K2 S1 R1	K3 S3	-	-	-	-	K2 S2	-	-	-	-	-	-	-
Atterbergove granice	S1	S1	-	-	-	-	-	S2	-	-	-	-	-	-	-
Zapreminska masa	K2 S1 R1	K3 S3 R1	-	K2 S2	-	-	-	K2 S2	K2	K2	-	K2 S2	-	-	-
Čvrstoća na smicanje	K2 S1 R1	-	-	K2 S1	K1 S1	-	-	K2 S3	K2 S3	K2 S3	S1	K2 S1	K1 S1 R2	-	-
Deformabilnost	K2 S1 R1	-	-	K1 S2	K1 S1	R1	S1	K2 S2	K2 S2	K2 S2	-	K2 S1	K1 S1	-	-
Propusnost	K2 S1 R1	-	-	K3 S2	S3	-	-	-	-	-	-	-	-	K2 S3	K2 S2
Hemijska ispitivanja	K1 S1 R1	K1 S1 R1	-	-	-	-	-	K2 S2	-	-	-	-	-	-	-
^{a)} Terminologija i skraćenice: vidi 2.1.1	<p>Oznake za upotrebljivost pojedinih metoda:</p> <p>R1 visoka za stenu (R=rock) K1 visoka za krupnozrna tla</p> <p>R2 srednja za stenu K2 srednja za krupnozrna tla</p> <p>R3 niska za stenu K3 niska za krupnozrna tla</p> <p>S1 visoka za sitnozrna tla</p> <p>S2 srednja za sitnozrna tla</p> <p>S3 niska za sitnozrna tla</p> <p>1) Važi za definiciju krupnozrnih i sitnozrnih tla prema ISO 14688-1.</p> <p>2) U zavisnosti od uslova tla (vrsta tla, uslovi podzemne vode) i planiranog zahvata izbor metoda istraživanja će varirati i može da bude drugačiji od predloga u datoj tabeli.</p>														
^{b)} U horizontalnom i vertikalnom smeru															
^{c)} Zavisi od tipa presiometra															
^{d)} Uz pretpostavku da se izvadi uzorak															
^{e)} Samo za meku stenu															

Tabela 2.1.7: Laboratorijska ispitivanja za klasifikaciju tla (prema EN 1997-2:2007)

Parametar	Vrsta tla							
	Glina			Prašina			Pesak, šljunak	
	Vrsta uzorka			Vrsta uzorka			Vrsta uzorka	
	Neporemećen	Poremećen	Pregnećen	Neporemećen	Poremećen	Pregnećen	Poremećen	Pregnećen
Geološki opis i klasifikacija tla	+	+	+	+	+	+	+	+
Vlažnost	+		o	+	o	o	o	o
Zapreminska masa	+	o		+	o	—	—	—
Minimalna i maksimalna zapreminska masa	—	—	—	o	o	o	+	+
Atterbergove granice	+	+	+	+	+	+	—	—
Granulometrijski sastav	+	+	+	+	+	+	+	+
Nedrenirana čvrstoća	+	—	—	o	—	—	—	
Vodopropusnost	+	—	—	+	o	o	o	o
Osetljivost	+	—	—	—	—	—	—	—

+ normalno se upotrebljava
 o može da se upotrebli ali ne mora da bude reprezentativno
 — nije upotrebljivo

NAPOMENA: za pojedine vrste tla biće potrebni i drugi opiti kao na primer određivanje organskih svojstava, specifične težine i aktivnosti.

Tabela 2.1.8: Laboratorijska ispitivanja za određivanje fizičkih i mehaničkih svojstva tla (prema EN 1997-2:2007)

Geotehnički parametar	Vrsta tla					
	Šljunak	Pesak	Prašina	Norm. kons. glina	Prekons. glina	Treset, organska tla
Edometarski modul (E_{oed}), indeks stišljivosti (C_c) (jednodimenzion. kompresija)	(OED) (TX)	(OED) (TX)	OED (TX)	OED (TX)	OED (TX)	OED (TX)
Modul elastičnosti (E), modul smicanja (G)	TX	TX	TX	TX	TX	TX
Drenirana (efektivna) čvrstoća na smicanje (c' , ϕ')	TX SB	TX SB	TX SB	TX SB	TX SB	TX SB
Rezidualna čvrstoća na smicanje (c'_R , ϕ'_R)	RS (SB)	RS (SB)	RS (SB)	RS (SB)	RS (SB)	RS (SB)
Nedrenirana čvrstoća na smicanje (c_u)	—	—	TX DSS SIT	TX DSS (SB) SIT	TX DSS (SB) SIT	TX DSS (SB) SIT
Zapreminska masa (ρ)	BDD	BDD	BDD	BDD	BDD	BDD
Koeficijent konsolidacije (c_v)			OED TX	OED TX	OED TX	OED TX
Vodopropusnost (k)	TXCH PSA	TXCH PSA	PTC TXCH (PTF)	TXCH (PTF) (OED)	TXCH (PTF) (OED)	TXCH (PTF) (OED)

— ne određuje se
 () ograničeno upotrebljivo

Skraćenice:

- BDD ... određivanje zapreminske mase (Bulk density determination)
 DSS ... opit čistog direktnog smicanja (Direct simple shear test)
 OED ... edometarski opit (Oedometer test)
 PTF ... vodopropusnost u permeamtru sa opadajućim pritiskom (Permeability test in the falling head permeameter)
 PTC ... vodopropusnost u permeamtru sa konstantnim pritiskom (Permeability test in the constant head permeameter)
 RS ... opit rotacionog smicanja (Ring shear)
 SB ... opit direktnog smicanja (Translational shear box test)
 SIT ... merenje indeksa čvrstoće (Strength index tests) (samo u preliminarnoj fazi)
 PSA ... određivanje granulometrijskog sastava (Particle size analysis)
 TX ... triaksijalni opit (Triaxial test)
 TXCH ... vodopropusnost u triaksijalnom aparatu sa konstantnim pritiskom (Permeability constant head test in the triaxial cell)

2.1.6.3 Kvalitet izvođenja geotehničkih istraživanja

Kod izvođenja terenskih i laboratorijskih istraživanja/ispitivanja moraju da budu ispunjeni osnovni zahtevi obezbeđivanja i kontrole kvaliteta, kao i ponovljivosti izvođenja. Osnovni kriterijumi u sistemu kvaliteta koje izvođač terenskih i laboratorijskih ispitivanja mora da ispuni su sledeći:

1. mora jasno da bude određena linija vođenja geotehničkih istraživanja i odgovornosti svih izvođača pojedinih istraživanja;
2. istraživanja mogu izvoditi samo odgovarajuće osposobljeni kadrovi;
3. kod izvođenja istraživanja može se koristiti samo tehnički besprekorna oprema koja ispunjava zahteve referentnih standarda i propisa;
4. sva merna oprema mora da bude kalibrisana i redovno kontrolisana od strane ovlašćene ustanove;
5. podaci o opremi, tehničkim karakteristikama opreme, potvrde o kalibraciji i uputstva za rad sa opremom moraju biti dostupni i na raspolaganju naručiocu, ako on to zatraži;
6. za sva istraživanja, kako terenska tako i laboratorijska, treba voditi zapisnike o istraživanju. Obavezan sadržaj zapisnika po pravilu je određen relevantnim standardima, odn. uputstvima za rad. Svi zapisnici moraju redovno da se popunjavaju i čuvaju u originalnom obliku u okviru dokumentacije o istraživanjima;
7. svi zapisi moraju da se vode i čuvaju tako da je iz njih moguće bez sumnje preuzeti podatke o izvođaču istraživanja, o celokupnom toku istraživanja, o mogućim smetnjama i spoljašnjim faktorima koji mogu uticati na rezultat, kao i podatke o tome da li se istraživanje

spvodilo u skladu sa zahtevima standarda;

8. istraživanje može da se izvodi samo u vremenskih uslovima, odn. laboratorijskim uslovima koji ne utiču na rezultat istraživanja. Podaci o vremenskim uslovima i temperaturi prilikom izvođenja terenskih istraživanja, odn. podaci o mikroklimi u laboratoriji prilikom izvođenja laboratorijskih ispitivanja, moraju da budu jasno vidljivi iz radnih zapisnika;
9. svako terensko ili laboratorijsko istraživanje mora da ima tačan identifikacioni broj, koji omogućava praćenje celokupnog radnog postupka od početka do kraja;
10. svi uzorci moraju da budu odgovarajuće označeni i šifrovani;
11. naručilac može da imenuje nadzornog inženjera, koji ima zadatak da prati izvođenje geotehničkih istraživanja.

2.1.7 DODATAK

2.1.7.1 Standardi za terenske istražne radove

Identifikacija i klasifikacija tla i stena	
ISO 14688-1	Geotechnical investigation and testing - Identification and classification of soil - Part 1: Identification and description
ISO 14688-2	Geotechnical investigation and testing - Identification and classification of soil - Part 2: Principles for a classification
ISO 14689-1	Geotechnical investigation and testing - Identification and classification of rock - Part 1: Identification and description

Hidrogeološka istraživanja	
ISO 22282-1	Geotechnical investigation and testing - Geohydraulic testing - Part 1: General rules
ISO 22282-2	Geotechnical investigation and testing - Geohydraulic testing - Part 2: Water permeability tests in a borehole without packer
ISO 22282-3	Geotechnical investigation and testing - Geohydraulic testing - Part 3: Water pressure test in rock
ISO 22282-4	Geotechnical investigation and testing - Geohydraulic testing - Part 4: Pumping test
ISO 22282-5	Geotechnical investigation and testing - Geohydraulic testing - Part 5: Infiltrometer test
ISO 22282-6	Geotechnical investigation and testing - Geohydraulic testing - Part 6: Water permeability tests in a borehole with packer and pulse-litre stimulation

Uzimanje uzoraka tla i podzemne vode	
ISO 22475-1	Geotechnical investigation and testing - Sampling methods and groundwater measurements - Part 1: Technical principles for execution
ISO 22475-2	Geotechnical investigation and testing - Sampling methods and groundwater measurements - Part 2: Qualification criteria for enterprises and personnel
ISO 22475-3	Geotechnical investigation and testing - Sampling methods and groundwater measurements - Part 3: Conformity assessment of enterprises and personnel by third party

Izvođenje terenskih ispitivanja	
ISO 22476-1	Geotechnical investigation and testing - Field testing - Part 1: Electrical cone and piezocone penetration tests
ISO 22476-2	Geotechnical investigation and testing - Field testing - Part 2: Dynamic probing
ISO 22476-3	Geotechnical investigation and testing - Field testing - Part 3: Standard penetration test
ISO 22476-4	Geotechnical investigation and testing - Field testing - Part 4: Ménard pressuremeter test
ISO 22476-9	Geotechnical investigation and testing - Field testing - Part 9: Field vane test
ISO 22476-10	Geotechnical investigation and testing - Field testing - Part 10: Weight sounding test

ISO 22476-11	Geotechnical investigation and testing - Field testing - Part 11: Flat dilatometer test
ISO 22476-12	Geotechnical investigation and testing - Field testing - Part 12: Mechanical cone penetration test (CPTM)

Testiranje elemenata geotehničkih konstrukcija	
ISO 22477-1	Geotechnical investigation and testing - Testing of geotechnical structures - Part 1: Pile load test by static axially loaded compression
ISO 22477-5	Geotechnical investigation and testing - Testing of geotechnical structures - Part 5: Testing of anchorages

2.1.7.2 Standardi za laboratorijske istražne radove

Izvođenje laboratorijskih ispitivanja	
ISO 17892-1	Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 1: Determination of water content
ISO 17892-2	Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 2: Determination of density of fine grained soil
ISO 17892-3	Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 3: Determination of particle density - Pycnometer method
ISO 17892-4	Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 4: Determination of particle size distribution
ISO 17892-5	Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 5: Incremental loading oedometer test
ISO 17892-6	Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 6: Fall cone test
ISO 17892-7	Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 7: Unconfined compression test on fine-grained soil
ISO 17892-8	Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 8: Unconsolidated undrained triaxial test
ISO 17892-9	Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 9: Consolidated triaxial compression tests on water saturated soil
ISO 17892-10	Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 10: Direct shear tests
ISO 17892-11	Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 11: Determination of permeability by constant and falling head
ISO 17892-12	Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 12: Determination of Atterberg limits

Ispitivanja agregata	
EN 932-1	Tests for general properties of aggregates - Part 1: Methods for sampling
EN 932-2	Tests for general properties of aggregates - Part 2: Methods for reducing laboratory samples
EN 932-3	Tests for general properties of aggregates - Part 3: Procedure and terminology for simplified petrographic description
EN 932-5	Tests for general properties of aggregates - Part 5: Common equipment and calibration

EN 932-6	Tests for general properties of aggregates - Part 6: Definitions of repeatability and reproducibility
EN 933-1	Tests for geometrical properties of aggregates - Part 1: Determination of particle size distribution - Sieving method
EN 933-2	Tests for geometrical properties of aggregates - Part 2: Determination of particle size distribution - Test sieves, nominal size of apertures
EN 933-3	Tests for geometrical properties of aggregates - Part 3: Determination of particle shape - Flakiness index
EN 933-4	Tests for geometrical properties of aggregates - Part 4: Determination of particle shape - Shape index
EN 933-5	Tests for geometrical properties of aggregates - Part 5: Determination of percentage of crushed and broken surfaces in coarse aggregate particles
EN 933-6	Tests for geometrical properties of aggregates - Part 6: Assessment of surface characteristics - Flow coefficient of aggregates
EN 933-7	Tests for geometrical properties of aggregates - Part 7: Determination of shell content - Percentage of shells in coarse aggregates
EN 933-8	Test for geometrical properties of aggregates - Part 8: Assessment of fines - Sand equivalent test
EN 933-9	Tests for geometrical properties of aggregates - Part 9: Assessment of fines - Methylene blue test
prEN 933-10	Tests for geometrical properties of aggregates - Part 10: Assessment of fines - Grading of filler aggregates (air jet sieving)
prEN 933-11	Tests for geometrical properties of aggregates - Part 11: Classification test for the constituents of coarse recycled aggregate
prEN 933-11	Tests for geometrical properties of aggregates - Part 11: Classification test for the constituents of coarse recycled aggregate
EN 1097-1	Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 1: Determination of the resistance to wear (micro-Deval)
EN 1097-2	Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 2: Methods for the determination of resistance to fragmentation
EN 1097-3	Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 3: Determination of loose bulk density and voids
EN 1097-4	Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 4: Determination of the voids of dry compacted filler
EN 1097-5	Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 5: Determination of the water content by drying in a ventilated oven
EN 1097-6	Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 6: Determination of particle density and water absorption
EN 1097-7	Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 7: Determination of the particle density of filler - Pycnometer method
EN 1097-8	Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 8: Determination of the polished stone value
EN 1097-9	Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 9: Determination of the resistance to wear by abrasion from studded tyres – Nordic test
EN 1097-10	Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 10: Determination of water suction height

EN 1367-1	Tests for thermal and weathering properties of aggregates - Part 1: Determination of resistance to freezing and thawing
EN 1367-2	Tests for thermal and weathering properties of aggregates - Part 2: Magnesium sulfate test
EN 1367-3	Tests for thermal and weathering properties of aggregates - Part 3: Boiling test for "Sonnenbrand basalt"
EN 1367-4	Tests for thermal and weathering properties of aggregates - Part 4: Determination of drying shrinkage
EN 1367-5	Tests for thermal and weathering properties of aggregates - Part 5: Determination of resistance to thermal shock
EN 1367-6	Tests for thermal and weathering properties of aggregates - Part 6: Determination of resistance to freezing and thawing in the presence of salt (NaCl)

Istraživanja nevezanih i hidraulično vezanih mešavina	
EN 13286-1	Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 1: Test methods for laboratory reference density and water content - Introduction, general requirements and sampling
EN 13286-2	Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 2: Test methods for laboratory dry density and water content - Proctor compaction
EN 13286-2	Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 2: Test methods for the determination of the laboratory reference density and water content - Proctor compaction
EN 13286-3	Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 3: Test methods for laboratory reference density and water content - Vibrocompression with controlled parameters
EN 13286-4	Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 4: Test methods for laboratory reference density and water content - Vibrating hammer
EN 13286-5	Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 5: Test methods for laboratory reference density and water content - Vibrating table
EN 13286-7	Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 7: Cyclic load triaxial test for unbound mixtures
EN 13286-40	Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 40: Test method for the determination of the direct tensile strength of hydraulically bound mixtures
EN 13286-41	Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 41: Test method for the determination of the compressive strength of hydraulically bound mixtures
EN 13286-42	Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 42: Test method for the determination of the indirect tensile strength of hydraulically bound mixtures
EN 13286-43	Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 43: Test method for the determination of the modulus of elasticity of hydraulically bound mixtures
EN 13286-44	Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 44: Test method for the determination of the alpha coefficient of vitrified blast furnace slag
EN 13286-45	Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 45: Test method for the determination of the workability period of hydraulically bound mixtures
EN 13286-46	Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 46: Test method for the determination of the moisture condition value
EN 13286-47	Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 47: Test method for the determination of California bearing ratio, immediate bearing index and linear swelling

EN 13286-48	Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 48: Test method for the determination of degree of pulverisation
EN 13286-49	Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 49: Accelerated swelling test for soil treated by lime and/or hydraulic binder
EN 13286-50	Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 50: Method for the manufacture of test specimens of hydraulically bound mixtures using Proctor equipment or vibrating table compaction
EN 13286-51	Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 51: Method for the manufacture of test specimens of hydraulically bound mixtures using vibrating hammer compaction
EN 13286-52	Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 52: Method for the manufacture of test specimens of hydraulically bound mixtures using vibrocompression
EN 13286-53	Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 53: Methods for the manufacture of test specimens of hydraulically bound mixtures using axial compression

Abrazivnost prirodne stene

EN 14157	Natural stones - Determination of abrasion resistance
----------	---

Određivanje vrednosti pH i gubitka zapaljivosti

prEN 15933	Soil, sludge, and treated biowaste - Determination of pH
prEN 15935	Soil, sludge, waste, and treated biowaste - Determination of loss on ignition

2.1.7.3 Standardi za kabinetski rad i projektovanje

Grafički simboli na geološkim kartama i profilima

ISO 710-1	Graphical symbols for use on detailed maps, plans and geological cross-sections -- Part 1: General rules of representation
ISO 710-2	Graphical symbols for use on detailed maps, plans and geological cross-sections -- Part 2: Representation of sedimentary rocks
ISO 710-3	Graphical symbols for use on detailed maps, plans and geological cross-sections -- Part 3: Representation of magmatic rocks
ISO 710-4	Graphical symbols for use on detailed maps, plans and geological cross-sections -- Part 4: Representation of metamorphic rocks
ISO 710-5	Graphical symbols for use on detailed maps, plans and geological cross-sections -- Part 5: Representation of minerals
ISO 710-6	Graphical symbols for use on detailed maps, plans and geological cross-sections -- Part 6: Representation of contact rocks and rocks which have undergone metasomatic, pneumatolytic or hydrothermal transformation or transformation by weathering
ISO 710-7	Graphical symbols for use on detailed maps, plans and geological cross-sections -- Part 7: Tectonic symbols

2.1.7.4 Sadržaj izveštaja

Generalni zahtevi u pogledu sadržaja pojedinih elaborata definisani su u tačkama 2.1.5.1 i 2.1.5.2. U nastavku su prikazani primeri sadržaja pojedinih elaborata:

- geotehnički elaborat za trasu (2.1.7.4.1):
 - elaborat o rezultatima geotehničkih istraživanja za trasu
 - geotehnički elaborat o uslovima izgradnje trase
- geotehnički elaborat za objekat (most) (2.1.7.4.2):
 - elaborat o rezultatima geotehničkih istraživanja za most
 - geotehnički elaborat o uslovima izgradnje mosta
- geotehnički elaborat za tunel (2.1.7.4.3):
 - elaborat o rezultatima geotehničkih istraživanja za tunel
 - geotehnički elaborat o uslovima izgradnje tunela.

2.1.7.4.1 Geotehnički elaborat za trasu

Sveska 1: Elaborat o rezultatima geotehničkih istraživanja

1. UVOD
 - 1.1 Svrha i obim istraživanja
 - 1.2 Vremenski period izvođenja istraživanja
 - 1.3 Stručni saradnici
 - 1.4 Važeći standardi i propisi
2. VRSTE I OBIM ISTRAŽNIH RADOVA
 - 2.1 Pregled ranije izvedenih istraživanja
 - 2.2 Generalna geotehnička iskustva sa lokacije
 - 2.3 Istraživanja za projekat puta
 - 2.1.1 Terenski istražni radovi
 - 2.1.2 Laboratorijska ispitivanja
3. PRIKAZ OSNOVNIH REZULTATA ISTRAŽIVANJA
 - 3.1 Geomorfološke karakteristike terena
 - 3.2 Geološka građa terena
 - 3.2.1 Litostratigrafski sastav
 - 3.2.2 Tektonski sklop
 - 3.3 Hidrogeološke karakteristike terena
 - 3.4 Savremeni geološki procesi i pojave (klizišta, odroni, erozija i dr.)
 - 3.5 Seizmičnost terena
4. OCENJIVANJE GEOTEHNIČKIH PARAMETARA NA OSNOVU REZULTATA ISTRAŽIVANJA
 - 4.1 Pregled rezultata laboratorijskih i terenskih ispitivanja sa komentarima
 - 4.2 Analiza rezultata ispitivanja fizičko-mehaničkih karakteristika tla i stena sa predlogom karakterističnih vrednosti
- 5 ZAKLJUČCI
- 6 OSNOVNI GRAFIČKI PRILOZI
 - 6.1 Geološka i inženjersko-geološka karta
 - 6.2 Uzdužni inženjersko-geološki profil duž trase
 - 6.3 Karakteristični poprečni profili (obavezno na lokacijama svih useka i nasipa, svih klizišta i slabo nosivih tla)
- 7 OSTALI PRILOZI
 - 7.1 Izveštaji o pojedinim istražnim radovima (bušenje, laboratorijska ispitivanja, terenska merenja, geofizička merenja, ...)

Sveska 2: Elaborat o uslovima izgradnje trase puta

- 1 UVOD
- 2 ANALIZA GEOTEHNIČKIH PARAMETARA
 - 2.1 Rejoniranje trase
 - 2.2 Geotehnički model za svaki rejon sa izborom karakterističnih i projektnih vrednosti parametara za geotehničke proračune
- 3 GEOTEHNIČKE ANALIZE I PRORAČUNI
 - 3.1 Proračuni sleganja i konsolidacije
 - 3.2 Analize stabilnosti nasipa
 - 3.3 Analize stabilnosti useka
- 4 GEOTEHNIČKI USLOVI I PREPORUKE ZA IZVOĐENJE RADOVA
 - 4.1 Uslovi izvođenja useka i zaseka
 - 4.2 Uslovi izvođenja nasipa

- 4.3 Specifični problemi trase (zaštita od površinske i podzemne vode, odseci na slabo nosivom tlu, odseci na nestabilnom terenu)
- 4.4 Upotrebljivost lokalnih materijala
- 5 PREPORUKE ZA NADZOR, MONITORING I ODRŽAVANJE
 - 5.1 Identifikacija geotehničkih rizika i rizičnih lokacija
 - 5.2 Projekat geotehničkog praćenja
 - 5.3 Preporuke za nadzornog inženjera
 - 5.4 Preporuke za održavanje
- 6 PREDLOG PROGRAMA ISTRAŽIVANJA U SLEDEĆOJ FAZI
- 7 ZAKLJUČCI
- 8 OSNOVNI GRAFIČKI PRILOZI
 - 8.1 Situacija trase na inženjersko-geološkoj karti
 - 8.2 Uzdužni geotehnički profil duž trase
 - 8.3 Karakteristični geotehnički poprečni profili
- 9 OSTALI PRILOZI
 - 9.1 Rezultati računskih analiza (stabilnost kosina, proračuni sleganja, konsolidacije, ...)
 - 9.2 Sažetak geotehničkog projekta za naručioca (vidi tačku 2.1.5.2)

2.1.7.4.2 Geotehnički elaborat za objekat

Sveska 1: Elaborat o rezultatima geotehničkih istraživanja

- 1 UVOD
 - 1.1 Svrha i obim istraživanja
 - 1.2 Vremenski period izvođenja istraživanja
 - 1.3 Stručni saradnici
 - 1.4 Važeći standardi i propisi
- 2 VRSTE I OBIM ISTRAŽNIH RADOVA
 - 2.1 Pregled ranije izvedenih istraživanja
 - 2.2 Generalna geotehnička iskustva sa lokacije
 - 2.3 Istraživanja za projekat objekta
 - 2.3.1 Terenski istražni radovi
 - 2.3.2 Laboratorijska ispitivanja
- 3 PRIKAZ OSNOVNIH REZULTATA ISTRAŽIVANJA
 - 3.1 Geomorfološke karakteristike terena
 - 3.2 Geološka građa terena
 - 3.3 Hidrogeološke karakteristike terena
 - 3.4 Savremeni geološki procesi i pojave (klizišta, odroni, erozija i dr.)
 - 3.5 Seizmičnost terena
- 4 OCENJIVANJE GEOTEHNIČKIH PARAMETARA NA OSNOVU REZULTATA ISTRAŽIVANJA
 - 4.1 Pregled rezultata laboratorijskih i terenskih ispitivanja sa komentarima
 - 4.2 Analiza rezultata ispitivanja fizičko-mehaničkih karakteristika tla i stena sa predlogom karakterističnih vrednosti
- 5 ZAKLJUČCI
- 6 OSNOVNI GRAFIČKI PRILOZI
 - 6.1 Geološka i inženjersko-geološka karta
 - 6.2 Uzdužni i poprečni inženjersko-geološki profil(i) tla na lokaciji objekta
- 7 OSTALI PRILOZI
 - 7.1 Izveštaji o pojedinim istražnim radovima (bušenje, laboratorijska ispitivanja, terenska merenja, geofizička merenja, izveštaj o probnom opterećenju šipova, ...)

Sveska 2: Elaborat o uslovima izgradnje objekta

- 1 UVOD
- 2 ANALIZA GEOTEHNIČKIH PARAMETARA
 - 2.1 Geotehnički model tla na lokaciji objekta
 - 2.2 Izbor karakterističnih i projektnih vrednosti fizičkih i mehaničkih parametara za geotehničke proračune
- 3 GEOTEHNIČKE ANALIZE I PRORAČUNI
 - 3.1 Proračuni sleganja i konsolidacije objekta
 - 3.2 Proračuni nosivosti temelja (šipova)
 - 3.3 Proračuni sleganja i konsolidacije priključnog nasipa
 - 3.4 Analize stabilnosti nasipa
 - 3.5 Analiza interakcije objekta i tla (primer: uticaj redosleda izvođenja radova – nasip, objekat)
- 4 GEOTEHNIČKI USLOVI I PREPORUKE ZA IZVOĐENJE RADOVA
 - 4.1 Predlog temeljenja objekta
 - 4.2 Uslovi izvođenja radova
- 5 PREPORUKE ZA NADZOR, MONITORING I ODRŽAVANJE

- 5.1 Identifikacija geotehničkih rizika i rizičnih lokacija, faza
 - 5.2 Projekat geotehničkog praćenja
 - 5.3 Preporuke za nadzornog inženjera
 - 5.4 Preporuke za održavanje
- 6 PREDLOG PROGRAMA ISTRAŽIVANJA U SLEDEĆOJ FAZI
- 7 ZAKLJUČCI
- 8 OSNOVNI GRAFIČKI PRILOZI
- 8.1 Situacija objekta na inženjersko-geološkoj karti
 - 8.2 Uzdužni i poprečni geotehnički profil tla na lokaciji objekta
- 9 OSTALI PRILOZI
- 9.1 Rezultati računskih analiza (nosivost, sleganje, konsolidacija, generalna stabilnost)
 - 9.2 Sažetak geotehničkog projekta za naručioca (vidi tačku 2.1.5.2)

2.1.7.4.3 Geotehnički elaborat za tunel

Sveska 1: Elaborat o rezultatima geotehničkih istraživanja

- 1 UVOD
 - 1.1 Svrha i obim istraživanja
 - 1.2 Vremenski period izvođenja istraživanja
 - 1.3 Stručni saradnici
 - 1.4 Važeći standardi i propisi
- 2 VRSTE I OBIM ISTRAŽNIH RADOVA
 - 2.1 Pregled ranije izvedenih istraživanja
 - 2.2 Generalna geotehnička iskustva sa lokacije
 - 2.3 Istraživanja za projekat tunela
 - 2.4 Terenski istražni radovi
 - 2.5 Laboratorijska ispitivanja
- 3 PRIKAZ OSNOVNIH REZULTATA ISTRAŽIVANJA
 - 3.1 Geomorfološke karakteristike terena
 - 3.2 Osnovne geološke karakteristike terena
 - 3.3 Tektonski sklop, ispucalost, parametri ispucalosti
 - 3.4 Hidrogeološke karakteristike terena
 - 3.5 Savremeni geološki procesi - stabilnost terena
 - 3.6 Parametri seizmičnosti na lokaciji tunela
- 4 GEOTEHNIČKI PARAMETRI NA OSNOVU REZULTATA ISTRAŽIVANJA
 - 4.1 Pregled rezultata laboratorijskih i terenskih ispitivanja sa komentarima
 - 4.2 Analiza rezultata ispitivanja fizičko-mehaničkih karakteristika tla i stena sa predlogom karakterističnih vrednosti
- 5 ZAKLJUČCI
- 6 OSNOVNI GRAFIČKI PRILOZI
 - 6.1 Geološka i inženjersko-geološka karta
 - 6.2 Uzdužni i poprečni inženjersko-geološki profil(i) tla na lokaciji tunela
- 7 OSTALI PRILOZI
 - 7.1 Izveštaji o pojedinim istražnim radovima (bušenje, laboratorijska ispitivanja, terenska merenja, geofizička merenja, izveštaj o probnom opterećenju ankera, ...)

Sveska 2: Elaborat o uslovima izgradnje tunela

- 1 UVOD
- 2 ANALIZA GEOTEHNIČKIH PARAMETARA
 - 2.1 Geotehnički model tla na lokaciji objekta
 - 2.2 Izbor karakterističnih i projektnih vrednosti fizičkih i mehaničkih parametara za geotehničke proračune
- 3 GEOTEHNIČKI USLOVI IZGRADNJE TUNELA
 - 3.1 Prognozni profil terena duž trase sa geotehničkim zoniranjem
 - 3.2 Geotehnička klasifikacija stenskih masa
 - 3.3 Analiza uslova gradnje po geotehničkim zonama
 - 3.3.1 Uslovi iskopa
 - 3.3.2 Razrada profila - fazni iskop tunela
 - 3.3.3 Privremena stabilnost iskopa
 - 3.3.4 Trajna stabilnost tunela
 - 3.3.5 Prognoza dotoka podzemnih voda i predlog načina zaštite

- 3.3.6 Prognoza pojave štetnih gasova i predlog načina zaštite
- 3.3.7 Analiza uslova gradnje portala i preduseka
- 3.4 Preporuke za izbor metode iskopa tunela
- 3.5 Mogućnost korišćenja materijala iz iskopa i deponiranje viška materijala
- 3.6 Uticaj izgradnje tunela na okolni teren i objekte
 - 3.6.1 Mehanički uticaj – pomaci terena
 - 3.6.2 Uticaji na izvore vode i vodu u tlu

- 4 PREPORUKE ZA NADZOR, MONITORING I ODRŽAVANJE
 - 4.1 Identifikacija geotehničkih rizika i rizičnih lokacija, faza izgradnje
 - 4.2 Projekat geotehničkog praćenja
 - 4.3 Preporuke za nadzornog inženjera
 - 4.4 Preporuke za održavanje tunela

- 5 PREDLOG PROGRAMA ISTRAŽIVANJA U SLEDEĆOJ FAZI

- 6 ZAKLJUČCI

- 7 OSNOVNI GRAFIČKI PRILOZI
 - 7.1 Situacija objekta na inženjersko-geološkoj karti
 - 7.2 Uzdužni i poprečni geotehnički profil tla na lokaciji objekta

- 8 OSTALI PRILOZI
 - 8.1 Rezultati računskih analiza
 - 8.2 Sažetak geotehničkog projekta za naručioca (vidi tačku 2.1.5.2)

2.1.7.5 Informativni obim terenskih istražnih radova – sažetak iz EN 1997-2 (dodatak B)

Za geotehničke istražne radove na putevima i objektima na njima (mostovi, tuneli) Evrokod 7-2 u svom dodatku B predlaže sledeći obim istraživanja:

2.1.7.5.1 Razmak između istražnih radova

Međusobni razmak istražnih bušotina ili drugih adekvatnih metoda istražnih radova:

- duž linijskih objekata (putevi, cevovodi, kanali, tuneli, potporne konstrukcije) na svakih 20 do 200 m,
- mostovi: od 2 do 6 na svakom temelju,
- objekti velike osnove: na razmaku koji nije veći od 60 m.

2.1.7.5.2 Dubina istražnih radova

Za pojedine vrste zahvata predlažu se sledeće dubine istraživanja z_a (mereno od najniže tačke temelja ili od dna iskopa). U slučajevima sa više kriterijuma primenjuje se kriterijum koji daje najveću dubinu.

Za izuzetno visoke ili kompleksne konstrukcije barem nekoliko istražnih radova treba izvesti do većih dubina. Isto važi za slučajeve nepovoljnih geotehničkih uslova (primer: sloj niske krutosti i čvrstoće ispod dobro nosivog sloja tla).

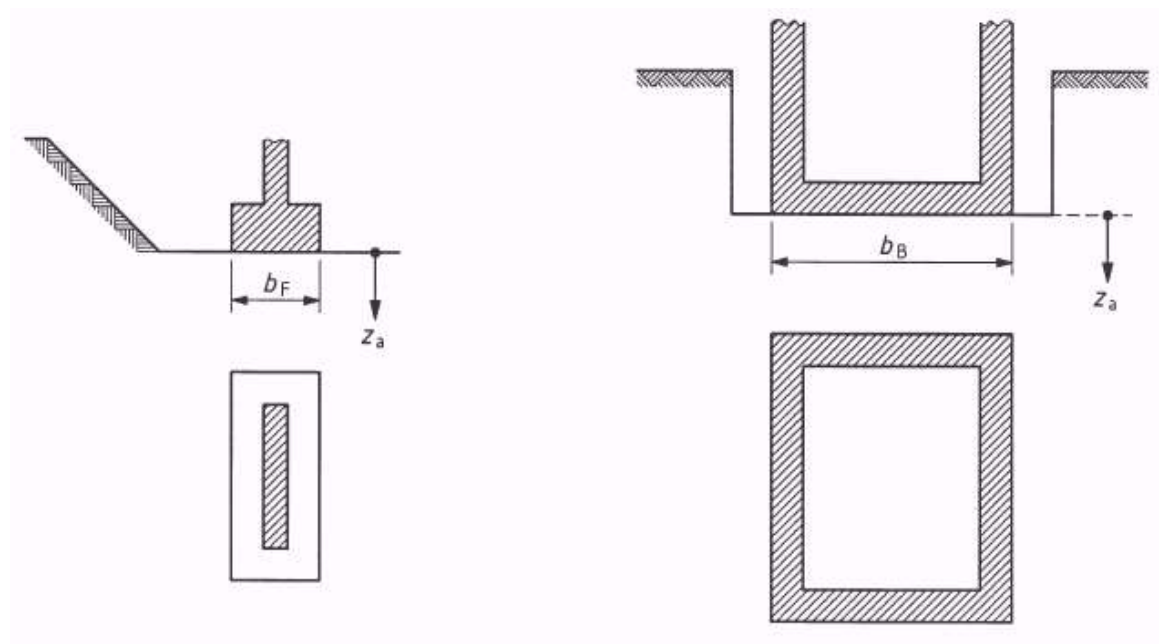
Za zahvate na dobro nosivom i krutom tlu dubina istražnih radova može da se redukuje na $z_a=2$ m, ali za određeni broj istraživanja treba dostići dubinu $z_a=5$ m.

Za temelje konstrukcija:

$$\begin{aligned} z_a &\geq 6 \text{ m} \\ z_a &\geq 3,0 b_F \quad (b_F \text{ je kraća dimenzija temelja}). \end{aligned}$$

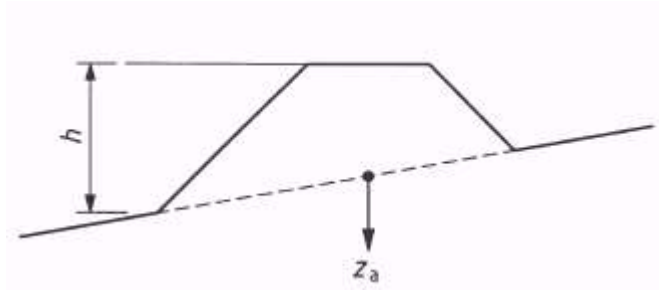
Za temeljne ploče i za konstrukcije sa više temelja kod kojih dolazi do međusobnih uticaja u većim dubinama:

$$z_a \geq 1,5 b_B \quad (b_B \text{ je kraća dimenzija temeljne ploče})$$



Za nasipe:

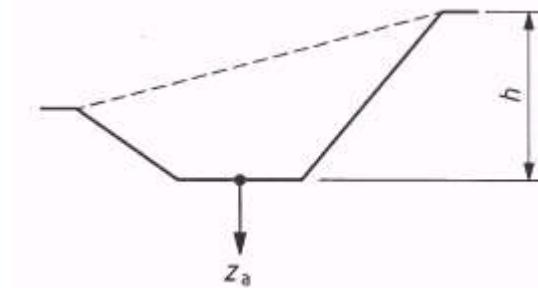
$$0,8 h < z_a < 1,2 h \quad (h \text{ je visina nasipa})$$



Za iskope:

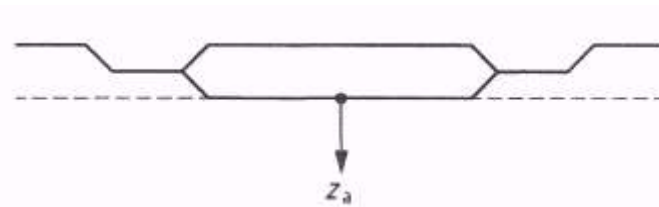
$$z_a \geq 0,4 h \quad (h \text{ je dubina iskopa})$$

$$z_a \geq 2 \text{ m}$$



Za puteve:

$$z_a \geq 2 \text{ m}$$



Za iskope sa potpornim konstrukcijama kod kojih je podzemna voda ispod dna iskopa:

$$z_a \geq 0,4 h \quad (h \text{ je dubina iskopa, } t \text{ dubina potporene konstrukcije ispod iskopa})$$

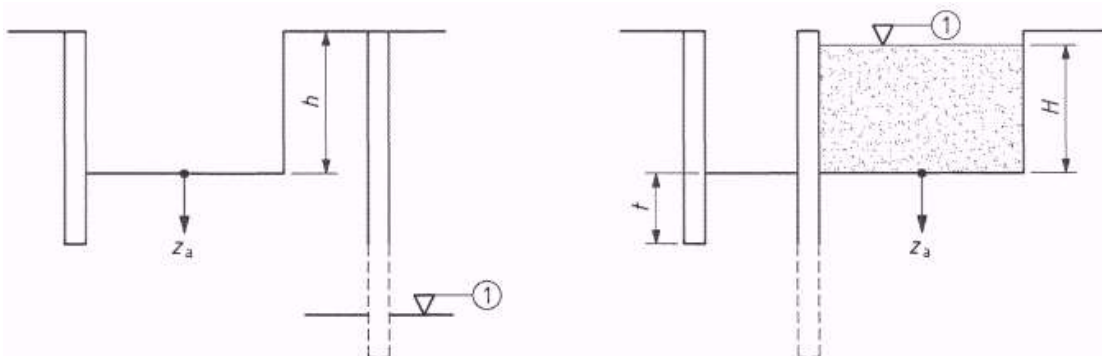
$$z_a \geq (t+2,0) \text{ m.}$$

Za iskope sa potpornim konstrukcijama kod kojih je podzemna voda iznad dna iskopa:

$$z_a \geq (H+2,0) \quad (h \text{ je dubina iskopa, } t \text{ dubina potporene konstrukcije ispod iskopa})$$

$$z_a \geq (t+2,0) \text{ m} \quad (\text{ako su do dubine zahvata prisutni propusni slojevi})$$

$$z_a \geq (t+5,0) \text{ m} \quad (\text{ako do dubine zahvata nema propusnih slojeva}).$$



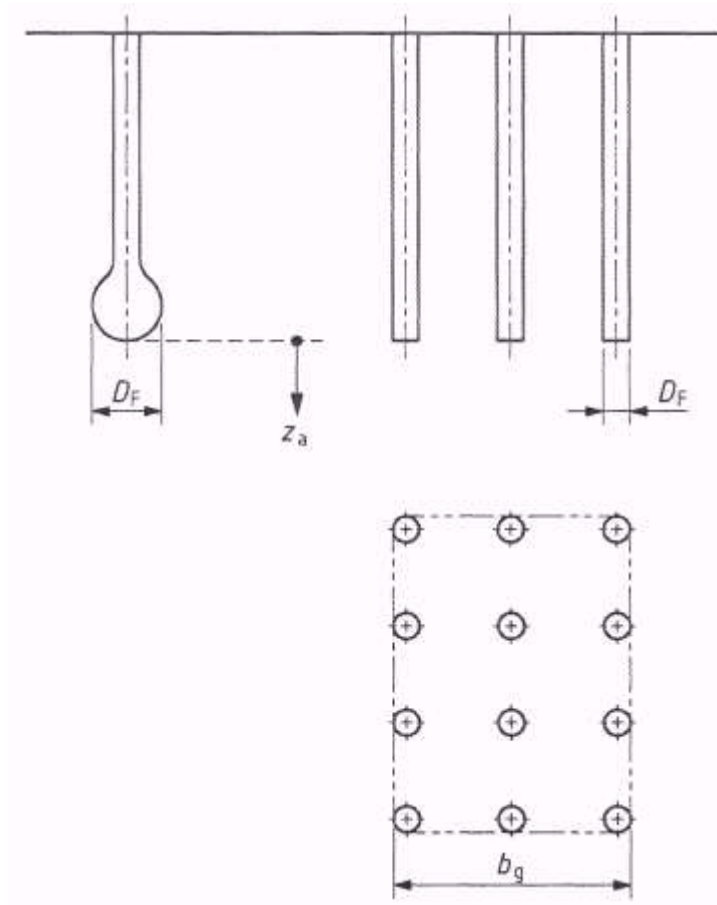
Za šipove:

$$z_a \geq 5 \text{ m}$$

$$z_a \geq 1,0 b_g$$

$$z_a \geq 3,0 D_F$$

(b_g je kraća dimenzija osnove temelja na šipovima)
(D_F dimenzija noge šipa).



2.2 HIDROLOŠKE ANALIZE

2.2.1 UVODNI DEO

2.2.1.1 Opšte

Hidrološke analize i proračuni u okviru planiranja i projektovanja puteva služe za određivanje oticaja kišnih voda koje objekti za odvodnjavanje treba da odvedu ili da kontrolišu.

Objekti odvodnjavanja se projektuju tako da odvedu merodavne količine kišnog oticaja i na taj način smanje opasnost od plavljenja. Projektna rešenja se proveravaju i za uslove oticaja većeg od merodavnog kako bi se postiglo da štete od plavljenja i opasnost po saobraćaj u tim uslovima budu što manji.

Merodavne količine kišnog oticaja za projektovanje određene su željenim (optimalnim) stepenom zaštite putnog objekta. Apsolutna zaštita nije moguća, jer se pojava ekstremnih kiša i velikih voda koje prevazilaze osmotrene vrednosti ne može sa sigurnošću isključiti. Takođe, dimenzionisanje sistema za odvodnjavanje za najnepovoljnije uslove bi bilo veoma skupo i moglo bi da bude opravdano samo kada bi posledice otkazivanja sistema bile veoma teške.

Stepen zaštite puta od oticaja kišnih voda posredno se opisuje verovatnoćom odnosno učestalošću prevazilaženja kapaciteta objekta za odvodnjavanje. U poglavlju 2.2.1.4 definišu se osnovne veličine i pojmovi vezani za probablističku interpretaciju merodavnih veličina.

Izbor optimalnog stepena zaštite zavisi od velikog broja faktora, o čemu se govori u poglavlju 8.3 o projektovanju sistema za odvodnjavanje (poglavljje 8.3.2 o kriterijumima za projektovanje). U okviru razmatranja hidroloških analiza smatraće se da je ovaj izbor napravljen.

Hidrološke analize o kojima se govori u ovom poglavlju odnose se na:

- projektovanje odvodnjavanja kolovoza, i
- hidrotehničko projektovanje objekata na ukrštanju puteva sa vodotocima.

Između ova dva zadatka postoje i sličnosti i razlike u pogledu hidroloških analiza. U oba slučaja potrebno je odrediti količine oticaja od kiša koje treba odvesti sa kolovoza ili sprovesti kroz npr. propust. Osnovna razlika

je u tome što se u slučaju kolovoza radi o izrazito malim slivnim površinama (npr. deo kolovoza između dva slivnika), dok slivovi vodotoka do ukrštanja sa putem mogu imati površine od malih do veoma velikih. Veličina slivnih površina utiče na izbor metode za proračun oticaja.

Predmet projektovanja odvodnjavanja kolovoza su sistemi za odvođenje kišnih voda koji prikupljaju, prenose i ispuštaju kišnu vodu koja teče po kolovozu ili duž puta. Zadatak hidroloških analiza u okviru projektovanja odvodnjavanja kolovoza je da se procene količine kiše i oticaja sa kolovoza, na osnovu kojih se dimenzionišu rigole, slivnici, kolektori kišnog oticaja, putni kanali i retenzije i drugi hidrotehnički objekti.

U okviru hidroloških analiza za potrebe projektovanja objekata na ukrštanju puteva sa vodotocima zadatak projektanta je da odredi količinu i vremensku raspodelu oticaja za slivnu površinu do tačke ukrštanja puta sa vodotokom.

2.2.1.2 Vrste hidroloških analiza

Sa metodološke tačke gledišta, proračun oticaja za potrebe projektovanja odvodnjavanja puteva spada u analize velikih voda.

Način proračuna oticaja velikih voda pre svega zavisi od raspoloživosti podataka osmatranja protoka na razmatranom profilu. U hidrološkoj terminologiji slivovi na kojima postoje osmatranja proticaja nazivaju se izučenim, slivovi na kojima ne postoje osmatranja se nazivaju neizučenim, dok se slivovi na kojima postoje kratkoročna osmatranja nazivaju nedovoljno izučenim. Gradski slivovi, kao i slivne površine vezane za saobraćajnice, po pravilu su neizučeni slivovi jer se merenja u sistemima opšte ili kišne kanalizacije kod nas ne sprovode sistematski.

2.2.1.2.1 Izučeni slivovi

Proračun merodavnih oticaja na izučenim slivovima podrazumeva statističku analizu osmotrenih maksimuma protoka. Takvi podaci su na raspolaganju za lokacije hidroloških stanica u nadležnosti Republičkog hidrometeorološkog zavoda. Kao rezultat statističke analize dobija se raspodela verovatnoće maksimalnih protoka na razmatranom profilu.

Kod nedovoljno izučenih slivova na kojima postoje makar i kratkoročna osmatranja protoka, nekad je moguće uspostaviti regresione zavisnosti sa proticajima na okolnim stanicama i tako produžiti niz sa kojim će se obaviti statistička analiza.

Primena ovog pristupa u projektovanju odvodnjavanja puteva se može očekivati samo u slučajevima kada se put ukršta sa većim vodotocima na kojima postoje hidrološka osmatranja. Iz tog razloga, u poglavlju 2.2.2 dat je samo najkraći opis postupka, dok se detaljnija uputstva mogu naći u stručnoj hidrološkoj literaturi.

2.2.1.2.2 Neizučeni slivovi

U mnogo češćim slučajevima neizučenih slivova (slivova bez hidroloških osmatranja) merodavni oticaj se određuje na osnovu računskih kiša. Transformacija računskih kiša u računске proticaje sprovodi se pomoću različitih metoda pod zajedničkim nazivom modeli padavine-oticaaj. Ovi modeli mogu imati različit stepen složenosti: od veoma jednostavnih sa visokim stepenom pojednostavljenja stvarnih uslova tečenja, do složenih koji objedinjuju više faza hidrološkog ciklusa i mogu koristiti i hidrodinamičke zakone.

U praksi se uglavnom koriste metode proračuna oticaja koje nisu egzaktne, već uključuju različita pojednostavljenja neophodna za rešavanje inženjerskih zadataka. Izbor metode se najčešće zasniva na raspoloživim podacima, ali je neophodno da se pri primeni metode poštuju pretpostavke o uslovima pod kojima je metoda primenljiva.

U ovom tekstu detaljnije su opisane inženjerske metode koje se tradicionalno koriste u praksi, dok su date i kratke napomene o drugim savremenim metodama proračuna. Napominje se da je preporučljivo da se složenije metode, koje se smatraju tačnijim, primenjuju kod objekata većeg značaja kod kojih je važno da se rizik od plavljenja što bolje odredi.

Ključni aspekt primene računskih kiša za proračun oticaja je činjenica da se sračunatim merodavnim proticajima pripisuje povratni period merodavne kiše. S obzirom na izrazitu nelinearnost veze između padavina i oticaja, ovakva pretpostavka u opštem slučaju nije realna. Iskustva na malim urbanim slivovima pokazuju [17] da se može prihvatiti da kiše povratnog perioda do 10 godina proizvode oticaj sličnog povratnog

perioda, dok za veće povratne periode to ne važi.

Formiranje računskih kiša kao osnovnog ulaza za proračun oticaja opisano je u poglavlju 2.2.3, dok su metode za proračun oticaja na osnovu računsku kiša opisane u poglavlju 2.2.4.

2.2.1.3 Merodavne veličine kao predmet hidroloških analiza

Merodavni oticaj za dimenzionisanje objekata odvodnjavanja može biti izražen preko različitih veličina. U najvećem broju slučajeva, merodavne veličine su:

- maksimalni protok tokom trajanja oticaja (maksimalna ordinata hidrograma oticaja),
- zapremina oticaja (zapremina otekle vode kao površina ispod hidrograma oticaja),
- celokupni hidrogram oticaja.

Maksimalni protok se koristi kao merodavna veličina za dimenzionisanje kolektora u sistemu za odvođenje voda sa kolovoza. Za određene primene potrebno je raspolagati celokupnim hidrogramom oticaja. Hidrogram oticaja je često važan za propuste i objekte za zadržavanje vode (retenzije), kao i u analizama zagađenja pri dimenzionisanju uređaja za prečišćavanje oteklih voda.

Računska kišna epizoda na osnovu koje je određen merodavni oticaj označava se kao merodavna kiša.

Kada se projektuju objekti na ukrštanju puteva sa vodotocima, pored merodavnog oticaja poželjno je da se proceni i maksimalni protok pri kome dolazi do preliivanja puta i da se na osnovu njega procene rizici i štete.

2.2.1.4 Verovatnoća i povratni period velikih voda

Hidrološke analize u projektovanju odvodnjavanja puteva treba da odslikaju buduće događaje čije se vreme pojave i intenzitet ne mogu precizno prognozirati. Iz tog razloga pojava velikih voda se opisuje probabilistički, odnosno tako što se prikazuje verovatnoća sa kojom će se određena velika voda prevazići.

Za procenu raspodele verovatnoće pojave protoka velikih voda u praksi se koristi statistička analiza nizova maksimalnih godišnjih protoka na određenom profilu vodotoka. Verovatnoća da maksimalni godišnji protok Q_{GM} prevaziđe vrednost x je:

$$p(x) = P\{Q_{GM} > x\}$$

Verovatnoća $p(x)$ se zove i *verovatnoća godišnjeg prevazilaženja*, jer predstavlja verovatnoću da maksimalni godišnji protok u bilo kojoj godini bude veći od x .

Povratni period $T(x)$ definiše se kao prosečan period (broj godina) između dva prevazilaženja protoka x . Povratni period $T(x)$ i verovatnoća $p(x)$ protoka x su recipročne vrednosti:

$$p(x) = 1/T(x)$$

Drugim rečima, povratni period $T(x)$ velike vode x se može izraziti kao recipročna vrednost verovatnoće godišnjeg prevazilaženja vrednosti $p(x)$:

$$T(x) = 1/p(x)$$

U američkoj literaturi povratni period se naziva i učestalost pojave velikih voda.

U principu je svedeno da li će se pojava velikih voda izraziti preko povratnog perioda („ T -godišnja velika voda“) ili preko verovatnoće prevazilaženja („velika voda verovatnoće p “). U praksi se sreću oba načina prikazivanja. Na primer, 50-godišnja velika voda (velika voda povratnog perioda 50 godina) može se izraziti i kao velika voda verovatnoće 2%, odnosno velika voda koja se u jednoj godini može prevazići sa verovatnoćom 0.02.

Izražavanjem velikih voda preko verovatnoće umesto preko povratnog perioda može se izbeći pogrešna interpretacija učestalosti pojave velikih voda.

S obzirom da verovatnoća prevazilaženja $p(x)$ može imati vrednosti između 0 i 1, povratni period kao njena recipročna vrednost može da se kreće u sledećim granicama:

$$1 \leq T(x) < \infty$$

Treba obratiti pažnju da povratni period ne može biti manji od 1 godine. Teorijski, on može biti jednak 1 godini samo u slučaju kada je verovatnoća prevazilaženja $p(x) = P\{Q_{GM} > x\}$ jednaka 1, što bi značilo da je pojava protoka većeg od x siguran događaj. Kako se to ne može tvrditi ni za jednu vrednost x , određivanje 1-godišnjeg protoka je nemoguć zadatak. To znači da u praksi nema smisla procenjivati protoke povratnog perioda manjeg od 2 godine. Takođe, smatra se da su ocene velikih voda povratnog perioda znatno većeg od dužine niza veoma nepouzdana, tako da u praksi ima smisla

određivati protoke za povratne periode u sledećim granicama:

$$2 \leq T(x) < 2N$$

gde je N dužina niza u godinama.

Pod terminom *rizik* najčešće se podrazumeva verovatnoća da će do prevazilaženja nekog protoka x doći bar jednom tokom L godina:

$$R(x) = 1 - [1 - p(x)]^L$$

gde je $p(x)$ verovatnoća godišnjeg prevazilaženja protoka x .

2.2.2 MAKSIMALNI PROTOCI NA IZUČENIM SLIVOVIMA

Za određivanje maksimalnih protoka na profilima izučenih slivova može se koristiti statistička analiza podataka osmatranja na razmatranom profilu.

Kao što je rečeno u uvodu, primena ovog pristupa u projektovanju odvodnjavanja puteva se može očekivati samo u slučajevima kada se put ukršta sa većim vodotocima na kojima postoje hidrološka osmatranja. Ovo poglavlje prikazuje samo opšte principe statističke analize hidroloških veličina, dok se detaljnija uputstva mogu naći u stručnoj hidrološkoj literaturi ([10], [11]).

Podaci za statističku analizu mogu se dobiti u Republičkom hidrometeorološkom zavodu Srbije.

Statistička analiza sprovodi se na nizovima velikih voda, pod kojima se najčešće podrazumevaju nizovi godišnjih maksimuma protoka ili nizovi pikova iznad praga.

Da bi rezultati statističke analize bili validni, nizovi treba da reprezentuju prirodni režim vodotoka. Na primer, ukoliko je uzvodno došlo do izgradnje akumulacije ili do značajne urbanizacije, tada je potrebna posebna obrada podataka. Drugim rečima, nizovi moraju da ispune kriterijume homogenosti i slučajnosti. Ispunjenost ovih kriterijuma potvrđuje se odgovarajućim statističkim testovima. Takođe se smatra da nizovi kraći od 25 godina ne mogu da daju pouzdane procene merodavnih voda.

Statistička analiza nizova maksimalnih godišnjih protoka sastoji se od prilagođavanja empirijske raspodele osmotrenih vrednosti nekom od teorijskih raspodela. Empirijska raspodela se formira tako što se svakom

podatku osmatranja x_i dodeli empirijska funkcija raspodele prema nekoj od formula kompromisne verovatnoće. Najčešće korišćena formula kompromisne verovatnoće je Vejbulov obrazac:

$$F_e(x_i) = \frac{i}{n+1}$$

gde je x_i i -ti član niza u uzorku uređenom u rastući redosled, $F_e(x_i)$ odgovarajuća vrednost empirijske funkcije raspodele, a n dužina niza.

Teorijske raspodele koje se najčešće koriste obuhvataju log-Pirson raspodelu III tipa, log-normalnu raspodelu (dvoparametarsku i troparametarsku), Gumbelovu raspodelu i opštu raspodelu ekstremnih vrednosti. Veliki broj nizova može se uspešno modelirati log-Pirson III raspodelom.

Saglasnost empirijske i teorijske raspodele se testira odgovarajućim statističkim testovima. Od brojnih testova koji su u upotrebi, preporučuje se primena Kramer-Mizesovog testa ili PPCC testa. Konačni izbor teorijske raspodele treba doneti na osnovu rezultata testova saglasnosti i vizuelne provere na dijagramima verovatnoće.

2.2.3 KIŠE KAO ULAZ ZA PRORAČUN OTICAJA

2.2.3.1 Opšta razmatranja

Podaci o kišama predstavljaju najvažnije ulazne podatke za proračun oticaja od kišnih voda. Karakteristike kišnih epizoda, pored karakteristika slivnih površina, imaju ključni uticaj na formiranje oticaja kišnih voda. U ovom poglavlju govori se o načinima na koji se karakteristike kiša predstavljaju da bi se na osnovu njih odredio oticaj.

Osnovni elementi kišnih epizoda su:

- trajanje kiše,
- ukupna visina kiše,
- vremenska neravnomernost intenziteta kiše,
- prostorna neravnomernost kiše.

U analizi kiša se pod trajanjem kiše podrazumeva fiksirani interval vremena u kome padne određena (najveća) visina kiše, nezavisno od toga da li je pre ili posle tog intervala vremena bilo još kiše. Ovakva definicija je neophodna jer za realne kišne epizode ne postoji opšte pravilo kako se definiše početak i kraj kiše, pa time i njihovo

trajanje. Takođe, prekidi u padanju kiše se obično zanemaruju ako su relativno kratki u odnosu na veličinu slivne površine i vreme putovanja vode na njoj. Na taj način, za definisanje računске kiše trajanja npr. 30 minuta, u realnoj kišnoj epizodi traži se deo sa najvećom visinom kiše tokom bilo kojih 30 minuta.

Vremenska neravnomernost kiše ogleda se kroz promenu intenziteta kiše tokom njenog trajanja. Intenzitet kiše se definiše kao promena visine kiše u jedinici vremena i izražava najčešće u mm/min ili mm/h, a koristi se i jedinica $Ls^{-1}ha^{-1}$ ($1 \text{ mm/min} = 167 Ls^{-1}ha^{-1}$). Dijagram promene intenziteta kiše kroz vreme naziva se hijetogram. Intenzitet kiše je jedan od najznačajnijih faktora od kojih zavise protoci kišnog oticaja, pa je važno uzeti promene intenziteta kiše u obzir za slučajeve u kojima je taj uticaj dominantan.

Kiše karakteriše i prostorna neravnomernost, uslovljena reljefom i meteorološkim uslovima. Iz tog razloga, treba koristiti podatke o kišama sa bliskih i reprezentativnih lokacija. Na primer, nije prihvatljivo koristiti podatke sa kišomerne stanice koja je od lokacije objekta odvojena visokim planinama iako je možda blizu u vazdušnoj liniji. Za veće slivne površine potrebno je koristiti podatke sa više stanica na samom slivu ili u njegovoj neposrednoj okolini i odrediti prosečne padavine na slivu nekom od metoda za prostornu interpolaciju (Tisenovi poligoni, metoda izohijeta, metoda recipročnih kvadrata rastojanja i druge).

U hidrološkim analizama za projektovanje hidrotehničkih objekata koriste se računске kišne epizode. To su hipotetičke epizode čije karakteristike treba da odražavaju karakteristike realnih (osmotrenih) kiša na nekoj lokaciji.

2.2.3.2 Zavisnosti visine i intenziteta kiša od trajanja i povratnog perioda (HTP i ITP)

Statističkom obradom osmotrenih podataka o kišama fiksiranog trajanja dobijaju se zavisnosti visina – trajanje – povratni period (*zavisnosti HTP*) ili intenzitet – trajanje – povratni period (*zavisnosti ITP*). Ove zavisnosti predstavljaju svedene informacije karakteristika kiša za neku lokaciju jer dovode u vezu visinu ili intenzitet kiše sa trajanjem i verovatnoćom prevazilaženja. Zavisnosti HTP i ITP daju praktično iste informacije, jer intenzitet u zavisnostima ITP

predstavlja *prosečni intenzitet* tokom trajanja (tj. visinu kiše podeljenu sa trajanjem).

Zavisnosti HTP i ITP za lokacije pluviografskih stanica u Srbiji mogu se dobiti u Republičkom hidrometeorološkom zavodu.

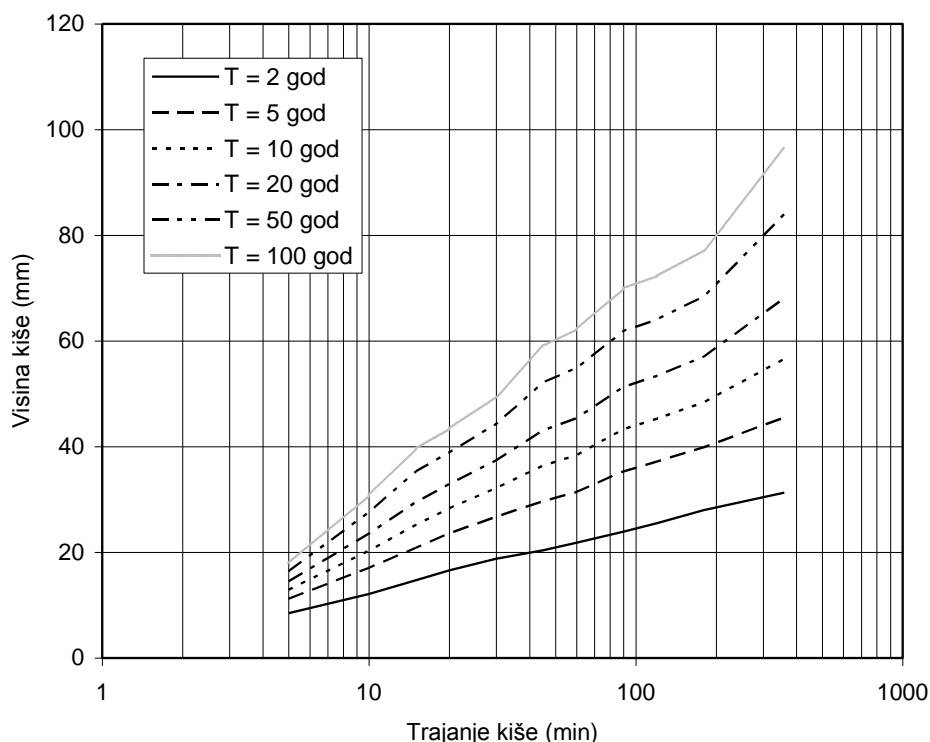
Na slici 2.2.1 dat je primer zavisnosti HTP za pluviografsku stanicu Beograd-Vračar (period obrade 1925-1989).

Za potrebe određivanja visina kiše odnosno intenziteta za proizvoljna trajanja, tabelarni i

grafički prikazi zavisnosti HTP i ITP mogu se dopuniti i analitičkim oblicima ovih krivih, dok kojih se može doći regresionom analizom. Regresione jednačine se obično traže u jednom od sledećih oblika:

$$i = \frac{A}{(t_k + C)^B}, \quad i = \frac{AT^D}{(t_k + C)^B}, \quad i = \frac{AT^D}{t_k^B + C}$$

gde je i intenzitet kiše, t_k trajanje kiše, T povratni period i A , B , C , D regresioni koeficijenti.



Slika 2.2.1: Primer zavisnosti HTP za pluviografsku stanicu Beograd-Vračar (period obrade 1925-1989); izvor: [8].

2.2.3.3 Preporuke za izbor računске kiše

Za izabrani povratni period, jednu računsku kišu karakterišu njeno trajanje, ukupna visina, i vremenska raspodela.

Za izbor trajanja računске kiše daju se sledeće preporuke:

- merodavno trajanje kiše u primeni racionalne metode za proračun oticaja jeste trajanje kiše koje je jednako vremenu koncentracije sliva (videti poglavlje 2.2.4.2);
- u primeni drugih metoda za proračun oticaja treba razmotriti nekoliko trajanja kiše u rasponu od 0.5 do 2 vremena koncentracije sliva, a za merodavno

trajanje usvojiti ono koje daje najveći sračunati oticaj;

- u primeni metode SCS i broja krive CN za proračun oticaja na malim ruralnim slivovima, kratka trajanja kiše bliska vremenu koncentracije mogu da potcene oticaj, pa treba koristiti dnevne kiše sa vremenskom raspodelom određenom iz zavisnosti ITP (metoda naizmeničnih blokova, prikazana u poglavlju 2.2.3.5.1).

Ukupna visina kiše određuje se iz zavisnosti HTP za izabrano trajanje kiše i povratni period.

Vremenska raspodela ili oblik računске kiše može se formirati na različite načine.

Sintetički oblici računskih kiša su oni kod kojih se usvoji vreme pojave najvećeg intenziteta, a zatim se intenziteti rasporede prema nekom rasporedu. U takve računске kiše spada računска kiša sa naizmeničnim blokovima (poglavlje 2.2.3.5.1). U literaturi se mogu naći mnogi sintetički oblici kiša koji su rezultat lokalnih istraživanja pojedinih autora, ali nije preporučljivo da se takvi oblici transponuju iz drugačijih klimatskih oblasti.

Statistički oblici računskih kiša su oni do kojih se dolazi statističkom obradom oblika većeg broja osmotrenih epizoda. Ovi oblici kiša opisani su u poglavlju 2.2.3.5.2.

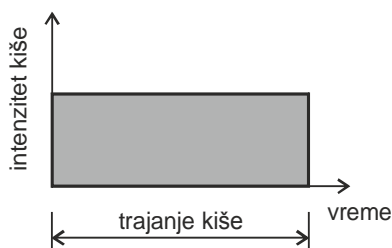
Merodavnim oblikom računске kiše smatra se onaj koji daje najveći sračunati oticaj.

U vezi sa oblicima računskih kiša mogu se dati sledeće preporuke:

- Računske kiše konstantnog intenziteta (tzv. blok kiše) mogu se koristiti u određenim primenama iako realne kišne epizode nikada nemaju konstantan već promenljiv intenzitet. To se pre svega odnosi na najkraća trajanja kiše (do 20 minuta), a samim tim i na najmanje slivove. Ove kiše su kratko opisane u poglavlju 2.2.3.4.
- Za trajanja kiše veća od 20 minuta poželjno je uneti bilo kakvu vremensku neravnomernost u računsku kišu, jer bi kiša ravnomernog intenziteta doprinela potcenjivanju merodavnih oticaja. U poglavlju 2.2.3.5 prikazane su dve jednostavne metode za formiranje računskih kiša neravnomernog intenziteta.

2.2.3.4 Računska kiša konstantnog intenziteta ("blok kiša")

Računska kiša sa konstantnim intenzitetom ima oblik hijetograma u obliku pravougaonika, pa se naziva i "blok kiša" (slika 2.2.2).



Slika 2.2.2: Blok kiša ili računска kiša konstantnog intenziteta.

Blok kiša je najjednostavniji oblik računске kiše i dobija se direktnom primenom zavisnosti ITP. Za razmatrani povratni period i izabrano trajanje kiše, zavisnosti ITP daće prosečan intenzitet kiše tokom njenog trajanja.

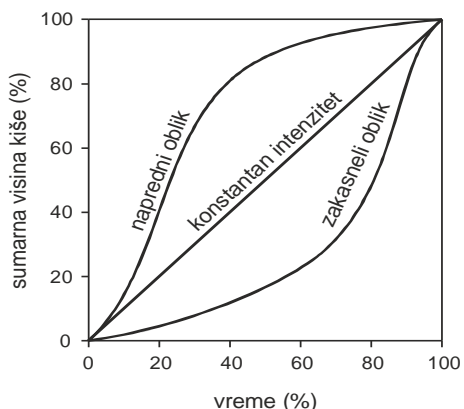
Pored toga što ne uzima u obzir vremensku neravnomernost kiša, za ovu računsku kišu se još može reći da se njenom primenom za kraća trajanja može potceniti ukupna visina kiše stvarnih kišnih epizoda. Naime, pri formiranju nizova visina kiša različitih trajanja za potrebe određivanja zavisnosti HTP i ITP, iz realnih kišnih epizoda se izdvajaju vremenski intervali sa najvećom visinom kiše, dok se "ostatak" kiše zanemaruje. Za kraća trajanja koja se koriste za definisanje zavisnosti HTP i ITP, od kojih je trajanje realnih epizoda skoro sigurno duže, taj neobračunati ostatak može biti značajno veći.

2.2.3.5 Računska kiša neravnomernog intenziteta

Računske kiše neravnomernog intenziteta doprinose većoj tačnosti hidroloških proračuna za projektovanje odvodnjavanja u poređenju sa kišama konstantnog intenziteta. Istraživanja pokazuju da neravnomerne računске kiše po pravilu proizvode veći oticaj od ravnomernih. To praktično važi za kiše svih trajanja osim najkraćih. Kako se u primarnoj obradi podataka osmatranja padavina visina kiše očitava u intervalima od 5 do 10 minuta, tako se može smatrati da se osrednjavanjem intenziteta tokom nekoliko takvih intervala (do 20 minuta) ne gubi na preciznosti opisa promene intenziteta kiše.

Merodavnim oblikom računске kiše smatra se onaj koji daje najveći sračunati oticaj.

U zavisnosti od vremena pojave najvećeg intenziteta tokom trajanja kiše, oblici kiše se dele na napredne (veći intenziteti na početku kiše) i zakasnele (veći intenziteti na kraju kiše) (slika 2.2.3). Kritičniji oblik za formiranje oticaja obično se bira probanjem. U nekim slučajevima napredni oblik kiše može da proizvede manji maksimalni protok jer se najveći intenziteti javljaju istovremeno sa najvećim gubicima (infiltracija, zadržavanje u depresijama) koji su najveći na početku kiše, dok zakasneli oblik može da proizvede veći maksimalni protok jer se najveći intenzitet javlja kasnije tokom epizode kada su gubici manji.



Slika 2.2.3: Tipovi oblika računskih kiša u zavisnosti od vremena pojave najvećeg intenziteta.

Vremenska raspodela neravnomernih kiša opisuje se u prigodnim vremenskim intervalima, ali ne manjim od 5 minuta (odnosno ne manjim od najkraćeg trajanja u zavisnosti HTP).

U nastavku se prikazuju dva načina za formiranje neravnomernih računskih kiša koji se preporučuju za primenu u putnoj hidrologiji. U literaturi se mogu naći i druge metode, ali treba biti obazriv sa primenom onih koje su rezultat lokalnih uslova drugačijih od uslova primene.

2.2.3.5.1 Kiša sa naizmeničnim blokovima

Radi se o jednostavnom načinu za formiranje vremenski neravnomerne kiše na osnovu zavisnosti HTP. Postupak je sledeći:

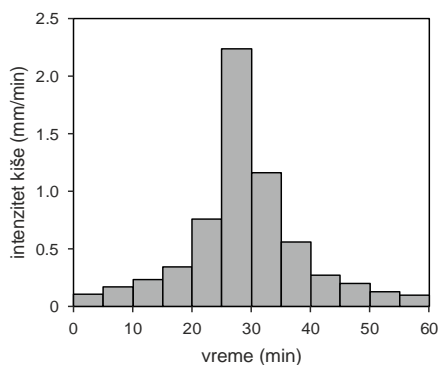
- Trajanje kiše t_k se podeli na n vremenskih intervala dužine Δt .
- Za izabrani povratni period, iz zavisnosti HTP se uzimaju visine kiša trajanja Δt , $2\Delta t$, $3\Delta t$, itd.
- Tako određene visine kiša se zatim posmatraju kao ordinate sumarne linije kiše, pa se računaju priraštaji i intenziteti kiše u svakom intervalu Δt .
- Potom se vremenski intervali i odgovarajući intenziteti kiše pregrupišu tako da se interval sa najvećim intenzitetom nađe u sredini celokupnog trajanja kiše, dok se ostali intervali ("blokovi") ređaju u opadajućem redosledu po veličini naizmenično desno i levo od centralnog bloka da bi se formirao hijetogram računске kiše.

Primer:

U tabeli 2.2.1 prikazan je primer proračuna računске kiše sa naizmeničnim blokovima, trajanja 60 minuta i povratnog perioda 5 godina, sa računskim intervalom od $\Delta t = 5$ minuta. Dobijeni hijetogram računске kiše prikazan je na slici 2.2.4.

Tabela 2.2.1: Primer proračuna računске kiše sa naizmeničnim blokovima za trajanje kiše od 60 minuta.

Iz zavisnosti HTP		Proračun po blokovima		Preuređeni blokovi	
Trajanje kiše (min)	Visina kiše (mm)	Priraštaj kiše (mm)	Intenzitet kiše (mm/min)	Vreme (min)	Intenzitet kiše (mm/min)
5	11.2	11.2	2.240	0–5	0.112
10	17.0	5.8	1.160	5–10	0.171
15	20.8	3.8	0.760	10–15	0.232
20	23.6	2.8	0.560	15–20	0.345
25	25.3	1.7	0.345	20–25	0.760
30	26.7	1.4	0.275	25–30	2.240
35	27.9	1.2	0.232	30–35	1.160
40	28.8	1.0	0.197	35–40	0.560
45	29.7	0.9	0.171	40–45	0.275
50	30.3	0.6	0.126	45–50	0.197
55	30.9	0.6	0.112	50–55	0.126
60	31.4	0.5	0.101	55–60	0.101



Slika 2.2.4: Hijetogram računске kiše dobijen metodom naizmeničnih blokova za primer iz tabele 2.2.1.

2.2.3.5.2 Statistički oblici računске kiše

Statistički oblici računskih kiša određuju se na osnovu oblika (sumarnih linija kiše) osmotrenih epizoda određenog trajanja tako što se u različitim vremenskim trenucima sprovodi statistička analiza bezdimenzionalne veličine [19]:

$$\pi(t) = \frac{P(t)}{P(t_k)}$$

gde je $\pi(t)$ bezdimenzionalna visina kiše u trenutku t , $P(t)$ visina kiše u trenutku t i $P(t_k)$ ukupna visina za celo trajanje kiše t_k . Ovakve analize sprovode se za sva trajanja kiše.

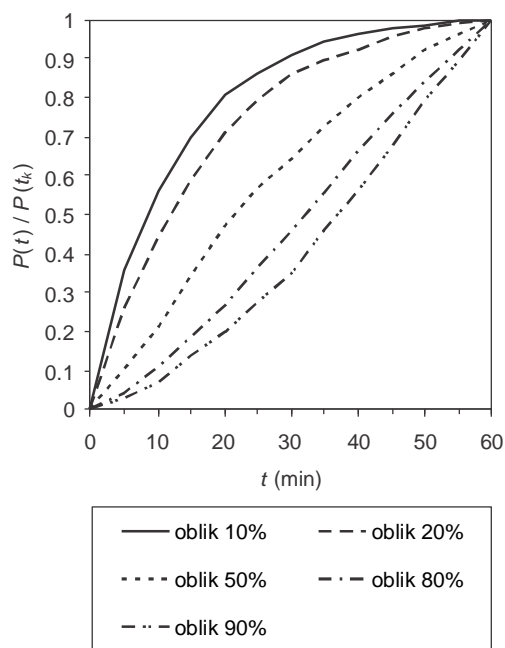
Rezultat takve analize za svako trajanje kiše su bezdimenzionalni oblici kiša određene verovatnoće, $\pi_p(t)$, gde je p verovatnoća prevazilaženja od $p\%$ bezdimenzionalne visine (npr. za $p = 10\%$, određuje se bezdimenzionalna visina $\pi_{10\%}$ od koje u uzorku ima 10% većih vrednosti).

Oblik računске kiše verovatnoće p za neko trajanje t_k i povratni period T dobija se množenjem bezdimenzionalnog oblika za to trajanje kiše sa visinom kiše istog trajanja i povratnog perioda iz zavisnosti HTP:

$$P_p(t, T) = \pi_p(t) \cdot P(t_k, T)$$

gde je $P_p(t, T)$ ordinata oblika kiše verovatnoće p za razmatrano trajanje i povratni period T , $\pi_p(t)$ ordinata bezdimenzionalnog oblika kiše verovatnoće p za razmatrano trajanje kiše, i $P(t_k, T)$ visina računске kiše razmatranog trajanja i povratnog perioda iz zavisnosti HTP.

Na slici 2.2.5 dat je primer statističkih oblika računске kiše trajanja 60 minuta na stanici Beograd-Vračar.



Slika 2.2.5: Bezdimezionalni oblici kiša trajanja 60 minuta za stanicu Beograd-Vračar za različite verovatnoće pojave naprednijeg oblika; izvor: [18].

Statistički oblici kiša za područje Srbije za pojedine lokacije mogu se nabaviti u Republičkom hidrometeorološkom zavodu Srbije i kod drugih obrađivača (Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“).

2.2.4 PRORAČUN OTICAJA NA OSNOVU RAČUNSKIH KIŠA

Kao što je rečeno u uvodu, u najvećem broju slučajeva projektovanja objekata odvodnjavanja vezanih za saobraćajnice predmet analize su slivovi na kojima nema hidroloških osmatranja (odnosno neizučeni slivovi). Klasičan inženjerski pristup tada podrazumeva da se merodavni oticaji odrede na osnovu računskih kiša.

O računskim kišama je bilo reči u poglavlju 2.2.3, dok se u ovom delu razmatraju metode proračuna oticaja na osnovu takvih kiša. Najpre su data opšta razmatranja o procesu oticaja kako bi se sagledali svi faktori koji na njega utiču, što je od značaja prilikom procenjivanja mnogobrojnih parametara u predloženim metodama. Poseban odeljak posvećen je proceni vremena koncentracije slivova. Zatim je prikazana racionalna metoda, kao osnovna metoda za proračun oticaja za potrebe odvodnjavanja kolovoza, a potom metode koje se preporučuju za

proračun oticaja na manjim ruralnim slivovima u projektovanju objekata na ukrštanju puteva sa vodotocima.

2.2.4.1 Oticaj od kišnih voda

Pod oticajem se smatra onaj deo kišnih voda koji dospeva do izlaznog profila jednog sliva. Oticaj na prirodnim slivovima koji stiže do površinskih voda (tekućih ili stajaćih, tj. reka, jezera ili mora) može biti površinski, potpovršinski ili podzemni. Poslednja dva su rezultat kretanja vode kroz nezasićene odnosno zasićene slojeve tla, i odvijaju se sporije od oticanja po površini. U tom smislu oni vrše značajnu vremensku preraspodelu voda. Dok površinski oticaj potpuno zavisi od padavina (on se formira neposredno po početku padavina i rezultuje u povećanju proticaja u rekama tokom kraćeg perioda vremena), potpovršinske i podzemne vode predstavljaju veliki rezervoar u kome se infiltrirane padavine zadržavaju, sporo otiču i dospevaju do vodotoka u manjim količinama ali znatno ravnomernije u vremenu.

Kada površinski, potpovršinski i podzemni oticaj stignu do vodotoka, oni formiraju protoke u njima. Grafička prezentacija promene proticaja u nekom profilu reke tokom vremena naziva se *hidrogram*.

Talasi velikih voda su posledica kišnih epizoda ili topljenja snega (ili kombinacije ovih pojava). Deo hidrograma koji je direktna posledica oticaja usled kiša naziva se *direktni oticaj*, dok blagopromenljivi proticaj u sušnom periodu predstavlja *bazni oticaj*, koji potiče od sporopristužućeg potpovršinskog i podzemnog oticaja.

U hidrotehničkom projektovanju objekata za odvođenje kišnih voda i objekata za zaštitu od velikih voda, od neposrednog interesa je proračun hidrograma direktnog oticaja. U slučaju vodotoka na kojima su maksimalni protoci u odnosu na protoke baznog oticaja veoma veliki, bazni oticaj se najčešće zanemaruje u proračunima. Ukoliko razmatrani vodotok ima značajan udeo baznog oticaja u ukupnom oticaju, tada bazni oticaj treba dodati na merodavne veličine direktnog oticaja.

2.2.4.1.1 Faktori koji utiču na vezu između padavina i oticaja

Proračun oticaja na osnovu padavina je zahtevan zadatak s obzirom da veza između padavina i oticaja na jednom slivu nije ni jednostavna ni jednoznačna. Oblik i veličina

hidrograma oticaja za jednu kišnu epizodu zavisi od:

- karakteristika sliva,
- karakteristika kišne epizode (vremenskog i prostornog rasporeda) i drugih meteoroloških parametara, i
- stanja vlažnosti na slivu pre kišne epizode.

Među fizičko-geografskim karakteristikama sliva, najveći uticaj na oblik i veličinu hidrograma oticaja imaju površina sliva, oblik sliva, nagib sliva, konfiguracija i gustina rečne mreže, vrsta i raspored zemljišnog pokrivača, pedološke karakteristike i geološki sastav tla, kao i orijentacija sliva u odnosu na dominantne pravce prostiranja kišnih oluja. Među ovim karakteristikama, vrste zemljišnog pokrivača su najpodložnije promenama (urbanizacija, seča šuma itd), pa je pri projektovanju neophodno uzeti u obzir potencijalne promene u uslovima oticaja u budućnosti.

Na malim slivovima intenzitet kiše ima ključni uticaj na vrednost maksimalnog protoka, jer hidrogram oticaja može imati različite oblike i različite nagibe uzlazne i silazne grane za različite oblike kiša iste ukupne visine. Što je sliv veći, to je ovaj uticaj manje izražen, a kiše koje dovode do značajnog oticaja imaju duže trajanje.

Na slivovima u brdsko-planinskim područjima značajnu ulogu u formiranju oticaja ima i sneg. U fazi formiranja snežnog pokrivača, taj pokrivač ima ulogu zadržavanja vode na slivu, dok u fazi topljenja snega on predstavlja glavni "izvor" oticaja. Na planinskim slivovima oticaj usled topljenja snega može da dominira nad oticajem usled kiša.

Pored snega, i drugi meteorološki parametri imaju uticaj na oticanje vode. Temperatura vazduha i tla, vlažnost vazduha, brzina vetra i sunčeva radijacija su ključni faktori za intenzitet evapotranspiracije, koja predstavlja glavni gubitak padavina u njihovom pretvaranju u oticaj.

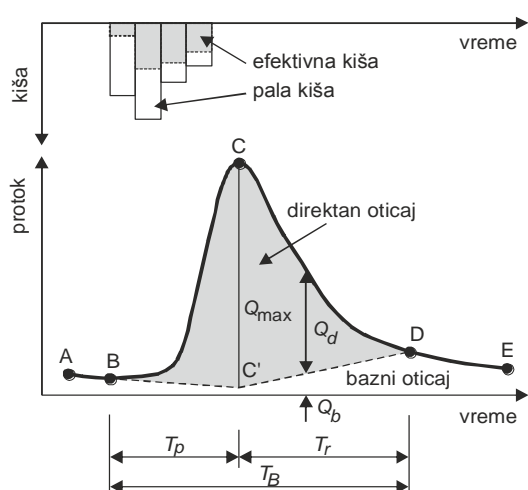
Na slivu istih karakteristika i za kišnu epizodu istih karakteristika, oticaj zavisi od prethodne vlažnosti sliva. Ako su razmatranoj kišnoj epizodi prethodile druge kišne epizode, veća prethodna vlažnost doprineće manjoj infiltraciji vode i shodno tome većem oticaju. Obrnuto, ako je kišnoj epizodi prethodio suv period, oticaj može biti manji od očekivanog.

2.2.4.1.2 Opisivanje hidrograma oticaja

Za proračun velikih voda od interesa je samo direktan oticaj, odnosno osenčeni deo hidrograma na slici 2.2.6. Na tipičnom hidrogramu oticaja usled jedne kišne epizode kao na ovoj slici može se uočiti nekoliko karakterističnih tačaka: direktan oticaj počinje u tački B, dostiže maksimum u tački C, a završava se u tački D. Segment BC predstavlja porast direktnog oticaja, segment CD opadanje direktnog oticaja, a segmenti AB i DE su recesione grane baznog oticaja koje se još nazivaju krivama iscrpljenja sliva.

Karakteristični elementi hidrograma su sledeće veličine (slika 2.2.6):

- maksimalni proticaj Q_{max} ,
- vreme porasta direktnog oticaja T_p (vreme od početka direktnog oticaja do dostizanja maksimalnog proticaja),
- vreme opadanja direktnog oticaja T_r (vreme od pojave maksimalnog proticaja do završetka direktnog proticaja).



Slika 2.2.6: Osnovni elementi hidrograma velikih voda sa podelom na bazni i direktni oticaj.

U praksi se smatra da je oticaj velikih voda sa jednog sliva opisan ako su poznate ove tri karakteristike za određeno trajanje kišne epizode konstantnog intenziteta. Vreme porasta hidrograma povezuje se sa vremenom putovanja vode na slivu odnosno vremenom koncentracije, o čemu se govori u poglavlju 2.2.4.2.

2.2.4.1.3 Efektivna kiša i direktni oticaj

U vezi sa oticajem koristi se i termin *efektivne padavine* kao deo padavina koje se pretvore u oticaj i pojave na izlaznom profilu sliva. Taj deo padavina prikazan je kao osenčeni deo

hijetograma kiše na slici 2.2.6. Preostali deo padavina koji ne dospeva do vodotoka naziva se gubicima. Radi se o gubicima sa gledišta oticaja, u koje spadaju voda koja se zadržava na vegetaciji (proces intercepcije) ili u površinskim depresijama, voda koja je isparila ili su je iskoristile biljke (evapotranspiracija) i voda koja se infiltrirala u zemljište.

Površina ispod hidrograma direktnog oticaja (osenčena deo hidrograma na slici 2.2.6) predstavlja zapreminu direktnog oticaja V_d za jednu kišnu epizodu:

$$V_d = \int_0^{T_B} Q(t) dt$$

Ukupna visina efektivne kiše P_e jednaka je sloju direktnog oticaja, odnosno zapremini direktnog oticaja po jedinici površine sliva A :

$$P_e = \frac{V_d}{A}$$

Odnos ukupnih visina efektivne i pale kiše naziva se koeficijent oticaja C :

$$C = \frac{P_e}{P}$$

On je takođe i odnos zapremine otekle vode (zapremine direktnog oticaja) i zapremine pale kiše:

$$C = \frac{P_e \cdot A}{P \cdot A} = \frac{V_d}{V_p}$$

2.2.4.2 Vreme koncentracije

Vreme koncentracije je najduže vreme putovanja vode od neke tačke na slivu do izlaznog profila sliva. Tačka od koje put vode najduže traje naziva se hidraulički najudaljenija tačka. Treba obratiti pažnju da se radi o najdužem vremenu putovanja vode, a ne o njenom najdužem putu.

Bez detaljnog poznavanja puteva vode, vreme koncentracije se može jedino proceniti na osnovu mnogobrojnih različitih obrazaca predloženih u literaturi. Ti obrasci mogu dati veoma različite rezultate, pa je potrebno obratiti pažnju kojoj vrsti tečenja vode su namenjeni.

Uobičajeno je da se vreme putovanja vode računa odvojeno za fazu površinskog oticanja vode i za tečenje u kanalima i cevima, dok se vreme koncentracije dobija sabiranjem parcijalnih vremena putovanja.

U tabeli 2.2.2 dati su neki od najpoznatijih obrazaca za proračun vremena koncentracije.

2.2.4.2.1 Vreme koncentracije za oticaj sa kolovoza

Za površinsko oticanje sa kolovoza preporučuje se korišćenje formule kinematskog talasa (tabela 2.2.2). U ovu formulu ulazi i intenzitet kiše, pa ona zahteva iterativni proračun na sledeći način:

- pretpostaviti trajanje kiše i iz zavisnosti ITP odrediti intenzitet kiše;

- izračunati vreme koncentracije t_c prema formuli kinematskog talasa;
- za trajanje kiše jednako dobijenom t_c odrediti novi intenzitet kiše iz zavisnosti ITP i uporediti sa intenzitetom u prvom koraku;
- ukoliko postoji značajna razlika, ponoviti postupak.

Iako vremenski zahtevniji, ovaj postupak vodi ka boljim procenama vremena koncentracije u odnosu na druge formule. Preporučene vrednosti koeficijenta hrapavosti po Maningu koji figuriše u ovom obrascu date su u tabeli 2.2.3.

Tabela 2.2.2. Pregled obrazaca za određivanje vremena koncentracije; izvori: [2], [21].

Metod / autor	Formula za t_c (min)	Napomena
Kinematski talas	$t_c = 1.36 \frac{L^{0.6} n^{0.6}}{i^{0.4} S^{0.3}}$ L = dužina površinskog tečenja (m) n = Maningov koeficijent hrapavosti i = intenzitet ef. kiše (mm/min) S = prosečan nagib površine (m/m)	za površinsko tečenje na izgrađenim površinama; formula se računa iterativno pošto sadrži intenzitet efektivne kiše koji zavisi od vremena koncentracije (uz korišćenje zavisnosti intenzitet kiše – trajanje – povratni period)
FAA	$t_c = 0.7(1.1 - c)L^{0.5} S^{-0.333}$ c = koeficijent oticaja u racionalnoj metodi L = dužina površinskog tečenja (m) S = nagib površine (m/m)	formula razvijena za odvodnjavanje aerodroma, a može se koristiti za urbane slivove
Yen i Chow	$t_c = 1.2 \frac{L^{0.6} n^{0.6}}{S^{0.5}}$ L = dužina površinskog tečenja (m) n = Maningov koeficijent hrapavosti S = prosečan nagib površine (m/m)	za površinsko tečenje na izgrađenim površinama; nastala kao uprošćenje formule kinematskog talasa
SCS metoda brzina	$t_c = \frac{1}{60} \sum \frac{L_i}{v_i}$ L_i = dužina putanje tečenja (m) v_i = prosečna brzina tečenja (m/s)	podrazumeva određivanje brzina površinskog tečenja (videti tabelu 2.2.4)
SCS metoda kašnjenja	$t_c = 0.0136 \frac{L^{0.8}}{S^{0.5}} (1000/CN - 9)^{0.7}$ L = hidraulički najduži put tečenja na slivu (m) CN = SCS broj krive S = prosečan nagib sliva (m/m)	za male ruralne slivove; smatra se dobrom za potpuno pokrivene površine, dok za mešovite površine daje precenjeno t_c ; nastala od pretpostavke da je $t_c = 1.67 t_p$ gde je t_p vreme kašnjenja sliva (videti poglavlje 2.2.4.4.3)
Kirpich	$t_c = 0.0195 L^{0.77} S^{-0.385}$ L = dužina toka od izvora do izlaza (m) S = prosečan nagib sliva (m/m)	za ruralne slivove sa jasno izraženim rečnim tokovima i strmim nagibima; za asfaltirane i betonske površine preporučuje se da se t_c pomnoži sa 0.4, a za betonske kanale sa 0.2

Tabela 2.2.3. Koeficijenti hrapavosti po Maningu; izvori: [5], [9], [20].

Vrsta površine	Preporučena vrednost	Raspon vrednosti
Asfalt	0.011	0.010-0.013
Beton, gladak	0.012	0.010-0.013
Betonska posteljica	0.013	
Cigla sa cementnim malterom	0.014	
Zatvoreni provodnici: Liveno-gvozdene cevi, obložene Betonske cevi Betonski kolektori sa uticajem revizionih okana i slivnika Rebraste metalne cevi	0.013 0.013 0.015 0.027	0.010-0.014 0.011-0.015 0.013-0.017 0.025-0.030
Otvoreni kanali (veštački vodotoci): Obloženi kanali: Betonsko dno i kosine Betonsko dno, kosine od ređanog zalivenog kamena Betonsko dno, kosine od kamenog nabačaja Šljunčano dno, kosine od betona Šljunčano dno, kosine od zalivenog kamena Šljunčano dno, kosine od kamenog nabačaja Obloga zidana u malteru Asfaltna obloga Neobloženi kanali: Korito od zemlje, pravolinijsko, iskopano Korito od zemlje, pravolinijsko, staro, neobraslo Korito od zemlje, pravolinijsko, obraslo niskom travom Korito od zemlje, krivudavo, neobraslo Korito od zemlje, krivudavo, obraslo gustom travom Šljunkovito dno i kosine Kamenito dno, kosine obrasle korovom Korito formirano u steni Neodržavano korito, visina vegetacije manja od dubine Neodržavano korito, visina vegetacije jednaka dubini		0.011-0.014 0.015-0.020 0.020-0.035 0.017-0.025 0.020-0.026 0.023-0.036 0.012-0.018 0.013-0.016 0.016-0.020 0.018-0.025 0.022-0.033 0.023-0.030 0.030-0.040 0.030-0.050 0.025-0.040 0.025-0.050 0.040-0.080 0.050-0.120
Prirodni tokovi (mali vodotoci sa širinom major korita < 30 m) Planinski (bujični) tokovi: Šljunkovito dno, bez vegetacije, strmih obala Korito pokriveno šljunkom i velikim kamenjem Ravničarski (aluvijalni) tokovi: Čista pravolinijska deonica bez tišaka Čista pravolinijska deonica bez tišaka, sa više trave i kamena u koritu Čista krivudava deonica sa plićacima i tišacima Čista krivudava deonica sa plićacima i tišacima, sa više trave i kamena u koritu Deonica obrasla vegetacijom, sa dubokim tišacima Deonica veoma obrasla vegetacijom, sa ostacima korenja od drveća		0.030-0.050 0.040-0.070 0.025-0.033 0.030-0.040 0.033-0.045 0.035-0.050 0.050-0.080 0.075-0.150

Tabela 2.2.4: Približne prosečne brzine (m/s) površinskog tečenja za proračun vremena koncentracije po SCS metodi brzina; izvor: [2].

Vrsta površine	Nagib sliva (%)			
	0 – 3	4 – 7	8 – 11	12 –
šume	0 – 0.46	0.46 – 0.76	0.76 – 0.99	0.99 –
pašnjaci	0 – 0.76	0.76 – 1.07	1.07 – 1.30	1.30 –
obrađene	0 – 0.91	0.91 – 1.37	1.37 – 1.68	1.68 –
asfaltirane	0 – 2.59	2.59 – 4.11	4.11 – 5.18	5.18 –

Među ostalim obrascima za proračun vremena koncentracije sa kolovoza, solidnije rezultate daju formula FAA i formula Yena i Chowa (tabela 2.2.2).

U proračun vremena koncentracije do određene tačke u sistemu za odvodnjavanje kolovoza ulazi i tečenje u sistemu kolektora (cevi ili kanala). U tom slučaju, brzina tečenja u kolektorima se najčešće računa pomoću Maningove jednačine:

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} \sqrt{S} \quad (1)$$

gde je n koeficijent hrapavosti po Maningu ($m^{-1/3}s$), R hidraulički radijus (m), i S nagib linije energije za koji se pretpostavlja da je jednak podužnom nagibu toka. Tipične vrednosti Maningovog koeficijenta hrapavosti za različite površine prikazane su u tabeli 2.2.3.

Više detalja u vezi sa procenom vremena koncentracije za oticaj sa kolovoza dato je u poglavlju 2.2.4.3.2 o racionalnoj metodi.

2.2.4.2.2 Vreme koncentracije za oticaj sa prirodnih slivova

Za pribrežne vode i za manje prirodne slivove do ukrštanja puteva sa vodotocima, u opštem slučaju se preporučuje SCS metoda brzina (tabela 2.2.2). Vreme koncentracije se dobija kao zbir vremena putovanja vode u pojedinim fazama tečenja. Vremena putovanja određuju se kao odnos dužine i brzine tečenja.

U ovoj metodi uobičajeno je da se odvojeno posmatra vreme putovanja duž padina sliva (površinsko tečenje) i vreme tečenja u vodotoku. Orijentacione brzine površinskog tečenja date su u tabeli 2.2.4 u zavisnosti od nagiba i vrste površine. Alternativni obrasci za proračun vremena koncentracije mogu biti SCS metoda kašnjenja ili formula Kirpicha.

Za vreme tečenja u vodotoku, brzine tečenja treba proceniti drugim hidrauličkim

metodama, a za prvu ocenu može poslužiti Maningova jednačina (1).

2.2.4.3 Racionalna metoda

2.2.4.3.1 Osnovne postavke

Racionalna metoda je najčešće primenjivan način za proračun oticaja sa malih slivnih površina. Prema racionalnoj metodi, maksimalni protok Q_m je jednak:

$$Q_m = CiA \quad (2)$$

gde je C koeficijent oticaja, i intenzitet kiše i A površina sliva. Da bi se protok dobio u L/s, uobičajeno je da se površina sliva unosi u hektarima (ha), a intenzitet u $Ls^{-1}ha^{-1}$. Ako su ulazne veličine date u drugim jedinicama, potrebno ih je uskladiti (napominje se da je $1 \text{ mm/min} = 167 \text{ Ls}^{-1}ha^{-1}$).

Racionalna metoda se zasniva na sledećim pretpostavkama:

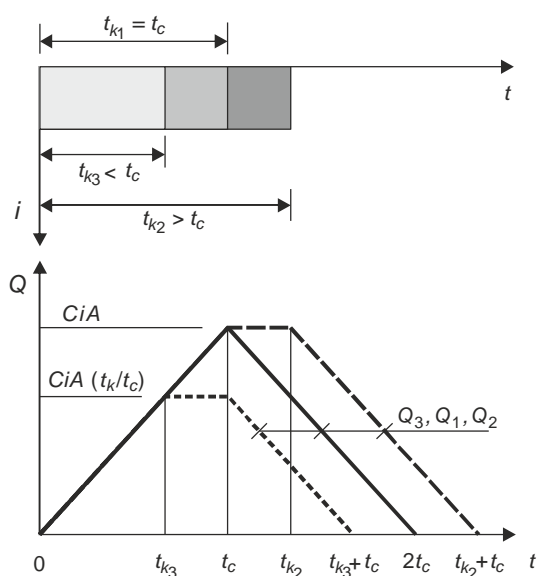
- kiša ima konstantan intenzitet tokom svog trajanja;
- kiša je ravnomerno raspoređena po površini sliva;
- maksimalni protok se javlja u trenutku kada ceo sliv učestvuje u formiranju oticaja na izlaznom profilu sliva, a to je po isteku vremena koncentracije sliva t_c ;
- povratni period maksimalnog protoka jednak je povratnom periodu računске kiše.

Zbog ovakvih pretpostavki, racionalna metoda je primenljiva samo za najmanje slivne površine. Prema [15], racionalnu metodu treba koristiti za slivove manje od 80 ha. Ovakve pretpostavke čine racionalnu metodu primenljivom za proračun količine oticaja sa kolovoza i drugih nepropusnih površina kao što su stajališta.

U primeni racionalne metode u projektovanju, oticaj se računa za kišu čije je trajanje t_k

jednako vremenu koncentracije sliva t_c . Na taj način se dobija najkritičniji slučaj.

Hidrogram oticaja prema racionalnoj metodi usled računске kiše konstantnog intenziteta i trajanja $t_k = t_c$ prikazan je na slici 2.2.7 (hidrogram Q_1). Na istoj slici prikazani su hidrogrami oticaja usled kiša konstantnog intenziteta sa trajanjem većim i manjim od vremena koncentracije (hidrogrami Q_2 i Q_3). Kada je $t_k > t_c$, dostiže se isti maksimalni protok $Q_m = CiA$ kao u slučaju $t_k = t_c$, dok se u slučaju $t_k < t_c$ taj maksimalni protok ne može dostići jer ceo sliv ni u jednom trenutku ne učestvuje u formiranju oticaja.



Slika 2.2.7: Hidrogrami oticaja po racionalnoj metodi za različita trajanja t_k kiše konstantnog intenziteta u odnosu na vreme koncentracije t_c : 1) slučaj $t_k = t_c$, 2) slučaj $t_k > t_c$, 3) slučaj $t_k < t_c$.

2.2.4.3.2 Procena vremena koncentracije

O vremenu koncentracije već je bilo reči u poglavlju 2.2.4.2. Ovde se daju dodatne napomene vezane za primenu racionalne metode u odvodnjavanju kolovoza.

Preporučuje se da se faze tečenja razdvoje na:

- površinsko tečenje u tankom sloju koje je karakteristično za oticaj sa površine kolovoza,
- tečenje duž kolovoza u rigolama, kanalima ili cevima.

Za svaku od ovih faza potrebno je primeniti odgovarajuće obrasce za proračun vremena putovanja vode, dok se vreme koncentracije dobija sabiranjem vremena putovanja u svim

fazama. U principu, za oticaj sa kolovoza to se može izraziti na sledeći način:

$$t_c = t_o + t_t$$

gde je t_c vreme koncentracije, t_o vreme oticanja po kolovozu i t_t vreme tečenja u rigolama, cevima ili kanalima.

Za fazu površinskog tečenja na dužinama do 130 m smatra se [15] da najbolje rezultate daje obrazac kinematskog talasa (videti tabelu 2.2.2). Na slivnim površinama sa dužinom tečenja preko 130 m oticaj ima tendenciju koncentrisanja u male tokove, pa se u tom slučaju preporučuje izračunavanje vremena putovanja vode na osnovu brzina koje se mogu proceniti pomoću obrasca:

$$v = k\sqrt{S}$$

gde je v brzina vode u m/s, S nagib u pravcu tečenja u procentima (%) i k koeficijent koji za pokrivene površine (asfalt, beton) iznosi $k=0,619$. Na kolovoznim površinama S je rezultujući nagib koji se računa na osnovu podužnog (S_p) i poprečnog nagiba (S_x):

$$S = \sqrt{S_x^2 + S_p^2}$$

Za fazu tečenja u rigolama, kanalima i cevima uobičajeno je da se brzina računa primenom Manningove jednačine za tečenje sa slobodnom površinom (jednačina (1)).

U praksi se često uzima da vreme putovanja oticaja sa kolovoza do slivnika iznosi $t_o = 5$ minuta. Ova vrednost se može proveriti pomoću formule kinematskog talasa za vreme koncentracije, ali se ne savetuje usvajanje $t_o < 5$ minuta zbog nerealno velikih intenziteta kiše.

2.2.4.3.3 Izbor koeficijenta oticaja

Koeficijent oticaja C u racionalnoj formuli (jednačina (2)) predstavlja brojnu vrednost između 0 i 1 i pokazuje koji deo pale se pretvara u oticaj. On prevashodno zavisi od zemljišnog pokrivača, ali zavisi i od drugih faktora od kojih zavisi i količina otekle vode među kojima treba izdvojiti intenzitet kiše.

Neke preporuke za vrednosti koeficijenta oticaja date su u tabeli 2.2.5.

Za površine koje se sastoje od delova sa različitim pokrivačem, koeficijent oticaja treba odrediti kao ponderisanu srednju vrednost koeficijenata oticaja na pojedinim delovima tj. proporcionalno njihovom udelu u ukupnoj površini:

$$C_{sr} = \frac{\sum C_j A_j}{A}$$

gde je C_{sr} ponderisana vrednost koeficijenta oticaja, C_j koeficijent oticaja na delu j , A_j površina dela j , i A ukupna slivna površina.

Tabela 2.2.5: Koeficijent oticaja u racionalnoj metodi; izvor [20].

Vrsta površine	Koeficijent oticaja*
Komercijalna namena (trgovine, poslovni prostor):	
Centralni delovi naselja	0.70 - 0.95
Delovi grada sa uređenim površinama	0.50 - 0.70
Rezidencijalna namena:	
Individualno stanovanje	0.30 - 0.50
Stambene zgrade, odvojene	0.40 - 0.60
Stambene zgrade, u nizu	0.60 - 0.75
Prigradski stambeni objekti	0.25 - 0.40
Naselja apartmanskog tipa	0.50 - 0.70
Industrijska namena:	
Manji udeo nepropusnih površina	0.50 - 0.80
Veći udeo nepropusnih površina	0.60 - 0.90
Parkovi, groblja	0.10 - 0.25
Železničke stanice sa tucanikom ispod koloseka	0.20 - 0.35
Neuređene prirodne površine	0.10 - 0.30
Kolovoz:	
Asfalt ili beton	0.70 - 0.95
Kamen ili cigla	0.70 - 0.85
Krovovi	0.70 - 0.95
Travnjaci i livade:	
Peskovito zemljište, mali nagib (2%)	0.05 - 0.10
Peskovito zemljište, srednji nagib (2 - 7%)	0.10 - 0.15
Peskovito zemljište, veliki nagib (7%)	0.15 - 0.20
Glinovito zemljište, mali nagib (2%)	0.13 - 0.17
Glinovito zemljište, srednji nagib (2 - 7%)	0.18 - 0.22
Glinovito zemljište, veliki nagib (7%)	0.25 - 0.35

* Za povratne periode veće od 25 do 100 godina može se usvojiti koeficijent oticaja veći za 10-25% (ali ne može biti veći od 1).

2.2.4.3.4 Izbor računске kiše

Osnovno pitanje izbora računске kiše za proračun merodavnog protoka za dimenzionisanje objekata odvodnjavanja (rigole, slivnici, cevi, kanali itd.) pomoću racionalne metode svodi se na pitanje izbora merodavnog trajanja kiše. Merodavno trajanje kiše u primeni racionalne metode je ono koje je jednako vremenu koncentracije slivne površine. Za tako usvojeno merodavno trajanje kiše, iz zavisnosti ITP dolazi se do merodavnog intenziteta kiše.

Ukoliko postoji potreba, za kiše duže od 20 minuta konstantan intenzitet kiše treba zameniti neravnomernim oblikom kiše. U tom slučaju, postupak je sledeći:

- za prikaz vremenske raspodele kiše koristi se vremenski korak jednak vremenu koncentracije sliva $\Delta t = t_c$;
- delovi kiše u intervalima Δt posmatraju se nezavisno, pa se određuje hidrogram oticaja za svaki interval;
- izvrši se superpozicija hidrograma od svih delova kiše da bi se dobio jedinstven hidrogram na izlazu sliva.

2.2.4.3.5 Primena racionalne metode na više slivnih površina u nizu

Uobičajeno je da se hidrološki proračun oticaja sprovodi u okviru hidrauličkih proračuna za dimenzionisanje sistema za odvodnjavanje kolovoza. Razmatrana putna deonica se deli na delove između tačaka prikupljanja vode sa kolovoza (slivnika, koruba i slično), odnosno između čvorova kolektorske mreže (cevi ili kanala). Kolektorska mreža se onda dimenzioniše postupno prema količini vode koja dotiče do određenog čvora. Ukratko, ovaj postupak se sastoji od sledećih koraka:

1. Prvi kolektor u nizu dimenzioniše se na oticaj sa prve slivne površine A_1 koji stiže do uzvodnog kraja kolektora. Vreme putovanja oticaja sa kolovoza do slivnika ili druge vrste čvora t_0 može se sračunati po formuli kinematskog talasa (tabela 2.2.2), ali se ne savetuje usvajanje $t_0 < 5$ minuta zbog nerealno velikih intenziteta kiše. Sa procenjenim vremenom koncentracije t_c određuje se intenzitet kiše za trajanje kiše $t_k = t_c$ iz zavisnosti ITP i računa se maksimalni protok kroz kolektor, na osnovu koga se kolektor dimenzioniše.
2. Drugi kolektor u nizu se dimenzioniše na oticaj sa druge slivne površine A_2 uvećan za vodu koja pristiže sa prve slivne

površine kroz prvi kolektor. Ukupni oticaj se sada određuje racionalnom formulom za zbirnu površinu $A_1 + A_2$. Vreme koncentracije je sada jednako najdužem vremenu putovanja vode, što predstavlja zbir vremena putovanja vode sa kolovoza t_o i vremena tečenja kroz prvi kolektor t_t . Vreme putovanja oticaja sa druge slivne površine kolovoza t_o se određuje na isti način kao i sa prve. S druge strane, vreme tečenja kroz kolektor t_t može se izračunati na osnovu brzine tečenja primenom Manningove jednačine (1), pri čemu se obično usvaja brzina za protok na koji je dimenzionisan prvi kolektor).

- Postupak se nastavlja za ostale slivne površine kolovoza do kraja deonice analogno koraku 2.

U proračunu oticaja do određenog čvora sistema za odvodnjavanje kolovoza, pored oticaja sa kolovoza sa konkretnog dela deonice potrebno je razmotriti da li na taj deo deonice dospeva i voda sa prethodnog dela koja nije odvedena u slivnik. Drugim rečima, ukoliko oticaj sa jedne slivne površine premaši kapacitet slivnika, deo oticaja koji slivnik ne primi preneće se na sledeću slivnu površinu. U principu, pravilnim dimenzionisanjem rastojanja između slivnika treba postići da slivnici prime celokupan merodavni oticaj. Ukoliko to nije slučaj, kapacitet slivnika i preneti oticaj moraju se uvesti u gore prikazan postupak proračuna,

pri čemu se ne posmatra nominalni kapacitet slivnika već njegov efektivni kapacitet u zavisnosti od podužnog i poprečnog nagiba kolovoza.

2.2.4.4 Metode za proračun oticaja sa slivnih površina do ukrštanja sa putevima

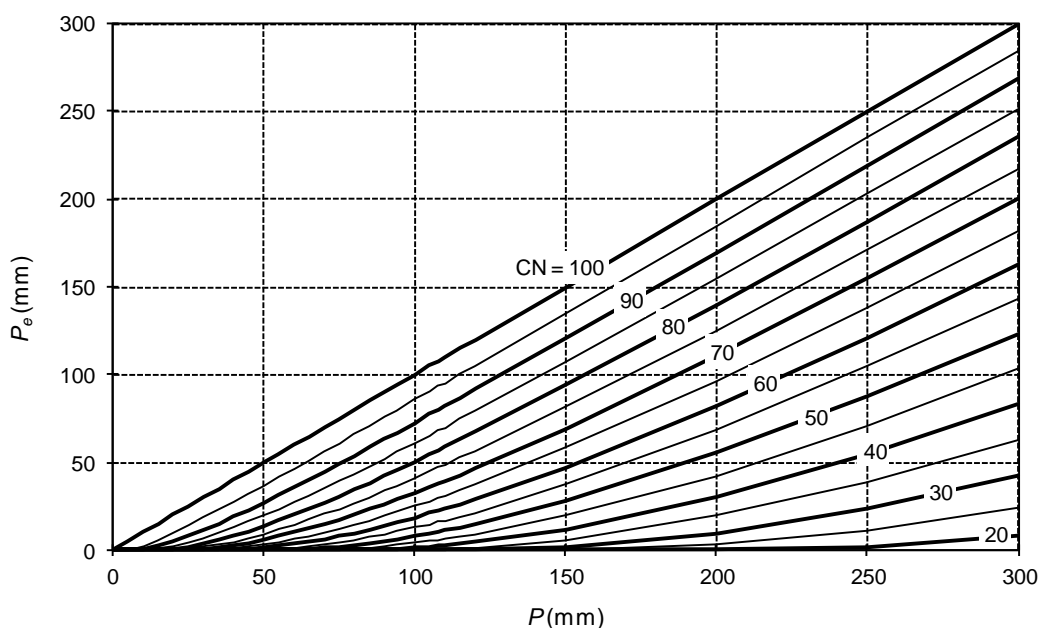
2.2.4.4.1 Proračun efektivne kiše metodom SCS

Jednu od najšire prihvaćenih metoda razvila je američka agencija Soil Conservation Service (SCS), danas National Resources Conservation Service (NRCS) [16], prema kojoj se efektivna kiša P_e određuje pomoću izraza:

$$P_e = \frac{(P - F_0)^2}{P + d - F_0} \quad (3)$$

gde je P ukupna visina kiše, F_0 početni gubici i d maksimalni kapacitet zemljišta u pogledu upijanja. Sve veličine se unose kao sloj u mm. Smatra se da početni gubici u proseku iznose 20% kapaciteta zemljišta ($F_0 = 0.2d$), pa se gornja jednačina svodi na:

$$P_e = \frac{(P - 0.2d)^2}{P + 0.8d}$$



Slika 2.2.8: Dijagram odnosa ukupne i efektivne kiše po SCS metodi.

Umesto kapaciteta zemljišta d , uvodi se tzv. broj krive CN kao parametar u gornjim jednačinama. Broj CN je bez dimenzije i vrednosti mu se kreću između 0 i 100, a njegova veza sa d je data sa:

$$d = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right)$$

gde se d dobija u milimetrima. Za nepropusne i vodene površine CN iznosi 100, dok je za prirodne površine $CN < 100$.

Veza između P , P_e i CN predstavlja poznati SCS dijagram, prikazan na slici 2.2.8. Ovaj dijagram važi za normalne uslove prethodne vlažnosti tla (AMC II). Za suve uslove (AMC I) ili za veliku prethodnu vlažnost (AMC III) računaju se ekvivalentni CN brojevi:

$$CN_I = \frac{4.2CN_{II}}{10 - 0.058CN_{II}}$$

i

$$CN_{III} = \frac{23CN_{II}}{10 + 0.13CN_{II}}$$

Definicija uslova prethodne vlažnosti data je u tabeli 2.2.6.

Brojevi CN se određuju prema vrsti tla i nameni površina, prema klasifikaciji koju je dao SCS. Tla su podeljena u četiri grupe prema sposobnosti za infiltraciju vode (tabela 2.2.7). U klasifikaciji broja CN poljoprivredne površine su često podeljene prema načinu obrade zemljišta od koga zavisi potencijal za oticanje (tabela 2.2.10). Za određene kategorije napravljena je razlika između dobrih, prosečnih i loših uslova za oticanje prema vrsti i gustini vegetacije koji imaju presudan uticaj na infiltracioni kapacitet zemljišta (tabela 2.2.8). U većini slučajeva vrsta i gustina pokrivača u sadašnjim uslovima mogu se lako odrediti obilaskom terena.

Tabela tipičnih CN brojeva data je u tabelama 2.2.9 i 2.2.10 za urbane i ruralne oblasti.

Određivanje hijetograma efektivne kiše u ovoj metodi se obavlja posredno, preko sumarne linije kiše. Za svaki vremenski interval, ordinata sumarne linije efektivne kiše $P_e(t)$ dobija se prema jednačini (3) na osnovu ordinate sumarne linije pale kiše $P(t)$. Pri tome treba voditi računa da ukupna visina kiše mora biti veća od početnih gubitaka F_0 , jer se ne može izgubiti više kiše nego što je palo. Dakle:

$$P_e(t) = \frac{(P(t) - F_0)^2}{P(t) + d - F_0}, \quad P > F_0$$

$$P_e(t) = 0, \quad P < F_0$$

Tabela 2.2.6. Definicija uslova prethodne vlažnosti tla po SCS metodi; izvor [2].

Stanje prethodne vlažnosti (AMC)	Ukupne prethodne petodnevnne padavine (mm)	
	jesen/zima	proleće/leto
I	1.3	3.6
II	1.3 - 2.8	3.6 - 5.3
III	2.8	5.3

Tabela 2.2.7: Hidrološke grupe tla prema SCS; izvori: [3], [15].

Grupa	Karakteristike i vrste tla
A	Velika propustljivost i mali potencijal oticanja: duboki pesak, duboki les, agregirane prašine
B	Srednja propustljivost u potpuno vlažnom stanju: plitak les, peskovita ilovača.
C	Mala propustljivost u potpuno vlažnom stanju: glinovite ilovače, plitka peskovita ilovača, tla sa malo organskog sadržaja, tla sa Visokim sadržajem gline.
D	Veoma slaba propustljivost i veliki potencijal oticanja: tla koja značajno bubre pri vlaženju, tla sa stalno visokom podzemnom vodom, plitka tla na nepropusnoj podlozi, teške plastične gline, neka slana tla.

Tabela 2.2.8: Hidrološki uslovi za oticanje pri izboru broja CN; izvor: [15].

Uslovi za oticanje	Opis
Slabi (veliki oticaj)	Veoma ogoljeno ili redovno paljeno zemljište. Manje od 50% površine je zaštićeno biljnim pokrivačem, niskim rastinjem ili krošnjama drveća.
Srednji	Umeren pokrivač sa 50% do 75% površine zaštićene vegetacijom.
Dobri (mali oticaj)	Gust pokrivač sa više od 75% površine zaštićene vegetacijom.

Tabela 2.2.9: Hidrološki brojevi CN za urbane oblasti (za prosečne uslove vlažnosti na slivu i $F_0 = 0.2d$); izvor: [15].

Namena zemljišta	Hidrološka grupa tla			
	A	B	C	D
Otvoren prostor, travnjaci, travnati sportski tereni, groblja i sl. slabi uslovi: trava na manje od 75% površine srednji uslovi: trava na 50% do 75% površine dobri uslovi: trava na više od 75% površine	68 49 39	79 69 61	86 79 74	89 84 80
Asfaltirani parkinzi, krovovi, prilazi	98	98	98	98
Putevi i ulice: asfaltirani sa ivičnjacima i slivnicima asfaltirani sa otvorenim putnim kanalima nasuti tucanikom ili šljunkom zemljani	98 83 76 72	98 89 85 82	98 92 89 87	98 93 91 89
Gradska jezgra, površine sa poslovnom i komercijalnom namenom (85% nepropusnih površina)	89	92	94	95
Industrijske zone (72% nepropusnih površina)	81	88	91	93
Stambene zone: parcele od 5 ari sa 65% nepropusnih površina parcele od 10 ari sa 38% nepropusnih površina parcele od 13,5 ari sa 30% nepropusnih površina parcele od 20 ari sa 25% nepropusnih površina parcele od 40 ari sa 20% nepropusnih površina parcele od 80 ari sa 12% nepropusnih površina	77 61 57 54 51 46	85 75 72 70 68 65	90 83 81 80 79 77	92 87 86 85 84 82
Građevinske parcele (samo propusno zemljište, bez vegetacije)	77	86	91	94

2.2.4.4.2 Jedinični hidrogram

Jedinični hidrogram predstavlja hidrogram direktnog oticaja usled jedinične efektivne kiše (1 mm) koja je ravnomerno raspoređena po površini sliva i konstantnog je intenziteta tokom trajanja. Jedinični hidrogram ima jedinstven oblik za jedno trajanje kiše, pa dobija i prefiks po trajanju kiše (npr. dvočasovni jedinični hidrogram). Ordinate jediničnog hidrograma $u(t)$ imaju dimenziju proticaja po jedinici visine efektivne kiše ($m^3s^{-1}mm^{-1}$). Ordinate hidrograma direktnog oticaja $Q_d(t)$ usled efektivne kiše nekog trajanja dobija se množenjem ordinata jediničnog hidrograma $u(t)$ za to trajanje sa visinom efektivne kiše P_e (princip proporcionalnosti):

$$Q_d(t) = u(t) \cdot P_e$$

Jedinični hidrogram za neki sliv može se odrediti na osnovu osmotrenih kišnih epizoda i odgovarajućih hidrograma oticaja, pri čemu kišne epizode treba izabrati vodeći računa o pretpostavkama o ravnomernosti kiše po slivu i u vremenu. Na osmotrenim hidrogramima treba odvojiti bazni i direktni oticaj (jer se za konstrukciju jediničnog hidrograma koristi samo hidrogram direktnog oticaja), a osmotrenu kišu treba razdvojiti na efektivnu kišu i gubitke. Jedinični hidrogram se tada dobija deljenjem ordinata hidrograma direktnog oticaja sa visinom efektivne kiše. Konačni jedinični hidrogram se dobija osrednjavanjem rezultata iz pojedinih epizoda. Ovaj postupak je veoma složen, ali ako se podaci pažljivo odaberu, jedinični hidrogram kao model može dati veoma prihvatljive rezultate.

Tabela 2.2.10: Hidrološki brojevi CN za ruralne oblasti (za prosečne uslove vlažnosti na slivu i $F_0 = 0.2d$); izvori: [3], [15].

Namena zemljišta ili pokrivač	Obrada tla	Hidrološki uslovi	Hidrološka grupa tla			
			A	B	C	D
Neobrađeno (ugar)	SR		77	86	91	94
Okopavine	SR	slabi	72	81	88	91
	SR	dobri	67	78	85	89
	C	slabi	70	79	84	88
	C	dobri	65	75	82	86
	C/T	slabi	66	74	80	82
	C/T	dobri	62	71	78	81
Sitnozrnaste žitarice	SR	slabi	65	76	84	88
	SR	dobri	63	75	83	87
	C	slabi	63	74	82	85
	C	dobri	61	73	81	84
	C/T	slabi	61	72	79	82
	C/T	dobri	69	70	78	81
Gusto sejane mahunarke ili livade u plodoredu	SR	slabi	66	77	85	89
	SR	dobri	58	72	81	85
	C	slabi	64	75	83	85
	C	dobri	55	69	78	83
	C/T	slabi	63	73	80	83
	C/T	dobri	51	67	76	80
Pašnjak ili prirodna livada		slabi	68	79	86	89
		srednji	49	69	79	84
		dobri	39	61	74	80
	C	slabi	47	67	81	80
	C	srednji	25	59	75	83
	C	dobri	6	35	70	79
Livada kultivirana		dobri	30	58	71	78
Šuma (šumske površine)		slabi	45	66	77	83
		srednji	36	60	73	79
		dobri	25	55	70	77
Poljoprivredna imanja sa zgradama (salaši, majuri)			59	74	83	86
Putevi zemljani tvrdi			72	82	87	87
			74	84	90	92
Legenda: SR pravolinijska obrada (u smeru pada terena) C po izohipsama T u terasama C/T po izohipsama i terasama						

U primeni jediničnog hidrograma važi i princip superpozicije, a to znači da se može primenjivati na kiše dužeg trajanja nego što je trajanje kiše za koje je jedinični hidrogram

konstruisan. Ako je jedinični hidrogram konstruisan za trajanje kiše t^* , on se obično se primenjuje za kiše čije je trajanje jednako umnošku od t^* , npr. nt^* . Tada se kiša подели

na n blokova i za svaki blok trajanja t^* odredi se hidrogram direktnog oticaja. Ukupni hidrogram od cele kiše dobija se superpozicijom n elementarnih hidrograma od svakog bloka kiše.

Jedinični hidrogram se može konstruisati samo za slivove na kojima postoje osmatranja kiše i proticaja, odnosno izučene slivove. Na neizučeni slivovima se koriste sintetički jedinični hidrogrami, čija se konstrukcija zasniva na transpoziciji podataka sa drugih slivova kroz regionalne veze između fizičkih karakteristika sliva i karakteristika hidrograma. U literaturi se mogu naći različite regionalne veze i bezdimenzionalni jedinični hidrogrami, ali u praksi treba biti obazriv u njihovoj primeni. Ove regionalne zavisnosti mogu biti razvijene za neko područje koje je po reljefu i klimi potpuno različito od razmatranog sliva.

2.2.4.4.3 Sintetički jedinični hidrogram po SCS metodi

Američka agencija SCS (danas NRCS) je razvila sintetički jedinični hidrogram (slika 2.2.9) čija je karakteristika da vreme opadanja T_r iznosi:

$$T_r = 1.67 T_p \quad (4)$$

gde je T_p vreme porasta hidrograma. Na taj način baza hidrograma T_B iznosi:

$$T_B = 2.67 T_p$$

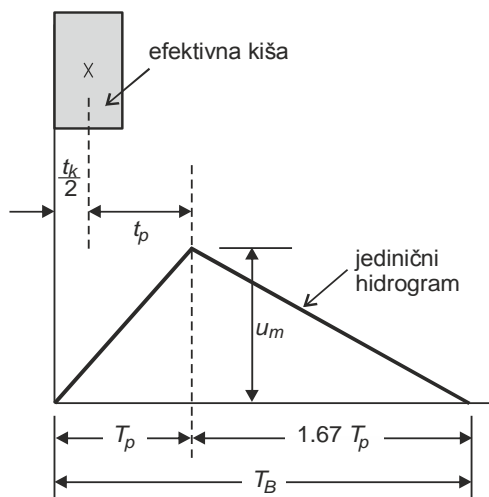
Da bi se ovakav hidrogram primenio, potrebno je odrediti vreme podizanja T_p , dok se maksimalna ordinata u_m određuje iz uslova da površina ispod jediničnog hidrograma bude jednaka zapremini oticaja od 1 mm kiše (odnosno brojno jednaka površini sliva A):

$$u_m = \frac{2A}{2.67T_p} = 0.75 \frac{A}{T_p}$$

odnosno:

$$u_m = \frac{208.33A}{T_p}$$

gde je u_m maksimalna ordinata jediničnog hidrograma u $Ls^{-1}mm^{-1}$, A površina sliva u km^2 i T_p vreme porasta u časovima.



Slika 2.2.9. Sintetički jedinični hidrogram prema SCS.

Vreme porasta T_p može se izraziti pomoću vremena kašnjenja sliva t_p (slika 2.2.9):

$$T_p = t_p + \frac{t_k}{2} \quad (5)$$

gde je t_k trajanje kiše. Vreme kašnjenja t_p se definiše kao vreme od težišta hijetograma efektivne kiše do pojave maksimalnog protoka.

Vreme kašnjenja t_p , prema SCS, može se odrediti na dva načina:

- prvi način vezuje t_p i fizičke karakteristike sliva, prema formuli

$$t_p = 0.136 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{L^{0.8}}{S^{0.5}} (1000/CN - 9)^{0.7}$$

gde je L hidraulički najduži put tečenja na slivu (m), S prosečan nagib sliva (m/m) i CN broj krive za razmatrani sliv, dok se t_p dobija u časovima;

- drugi način podrazumeva procenu t_p na osnovu prethodno određenog vremena koncentracije sliva t_c , za šta SCS predlaže aproksimaciju:

$$t_p \approx 0.6t_c$$

2.2.4.4.4 Sintetički jedinični hidrogram po Brajkoviću i Jovanoviću

Brajković i Jovanović [11] su predložili modifikaciju sintetičkog jediničnog hidrograma prema SCS. Modifikacija se sastoji iz nekoliko elemenata. Prvo, vreme opadanja hidrograma nije fiksirano kao u izrazu (4), već iznosi:

$$T_r = rT_p \quad (6)$$

gde je r konstanta za dati sliv koja zavisi od veličine sliva (slika 2.2.10). Drugo, vreme kašnjenja sliva t_p , koje određuje vreme podizanja hidrograma kroz jednačinu (5), određuje se iz zavisnosti:

$$t_p = at_k + t_o \quad (7)$$

gde su sva vremena izražena u časovima. U gornjoj jednačini a je koeficijent koji zavisi od površine sliva (slika 2.2.11), ali se za slivove do 30 km^2 može usvojiti $a = 0.3$. Vreme t_o zavisi od fizičkih karakteristika sliva [12]:

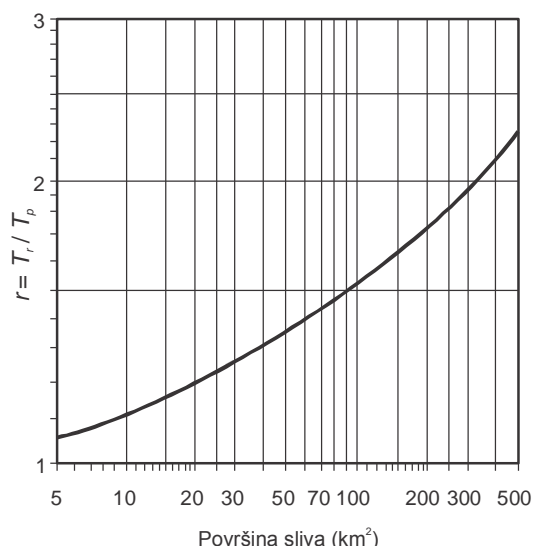
$$t_o = 0.4L^{0.67} \left(\frac{LL_c}{\sqrt{I_u}} \right)^{0.086}$$

gde je L dužina glavnog toka u km, L_c rastojanje od težišta do izlaznog profila sliva u km i I_u uravnati nagib sliva u procentima, dok se t_o dobija u časovima.

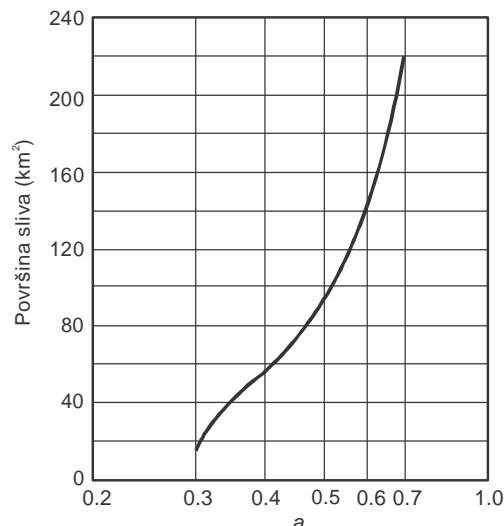
Kasnije je Brajković [1] ponovo razmatrao vrednost koeficijenta t_o i dao izraz:

$$t_o = 1.06 \left(\frac{L}{I_u} \right)^{0.47}$$

Ako se u izraz (7) stavi da je trajanje kiše t_k jednako nuli, vreme t_o se može posmatrati i kao vreme podizanja trenutnog jediničnog hidrograma, pa se može smatrati da ono zavisi samo od karakteristika sliva.



Slika 2.2.10: Zavisnost koeficijenta r u jednačini (6) od površine sliva; prema [11].



Slika 2.2.11: Zavisnost parametra a u jednačini (7) od površine sliva; prema [12].

2.2.4.5 Matematički modeli za proces padavine-oticaj

2.2.4.5.1 HEC-HMS

HEC-HMS (HEC-Hydrologic Modeling System) je model koji je razvio Hidrološki inženjerski centar američke vojske (USACE Hydrologic Engineering Center) i može se besplatno preuzeti na internet strani HEC-a [7]. Ovaj model je prevashodno namenjen za simulaciju površinskog oticaja usled individualnih kišnih epizoda, a metode proračuna koje se koriste upravo jesu metode pogodne za hidrološke analize velikih objekata. U modelu se veći slivovi mogu predstaviti kao sistem međusobno povezanih komponenti (slivnih površina, deonica vodotoka i slično). Hidrogrami oticaja sa slivnih površina mogu se odrediti pomoću nekoliko vrsta sintetičkih jediničnih hidrograma (Klarkov, Snajderov i SCS sintetički jedinični hidrogram ili proizvoljni jedinični hidrogram koji korisnik zadaje). Ulaz za proračun oticaja mogu biti realne kišne epizode koje korisnik unosi ili računске kiše (postoji mogućnost zadavanja zavisnosti ITP iz koje se računске kiše generišu sa konstantnim ili promenljivim intenzitetom).

Model HEC-HMS sadrži i modul za optimizaciju, odnosno kalibraciju parametara modela na osnovu podataka osmatranja.

Dodatak ovom softverskom paketu je i HEC-GeoHMS, koji predstavlja geoinformatički dodatak za ArcGIS i njegovu ekstenziju Spatial Analyst (ESRI). Pomoću ovog dodatka mogu se pripremiti ulazni podaci za HEC-

HMS iz digitalnog modela terena, uključujući i podelu sliva na podslivove.

2.2.4.5.2 EPA SWMM

EPA SWMM (Storm Water Management Model) je model namenjen simulacijama procesa padavine-oticađ u urbanim područjima [4]. Model može da simulira oticađ usled individualnih kišnih epizoda, ali se može koristiti i za kontinualnu simulaciju. Pored količine oticađ, model ima komponentu i za kvalitet oticađ. Za zadate padavine, komponenta modela za oticađ računa količine oticađ i zagađenja sa grupe slivnih površina, dok komponenta za propagaciju računa tečenje u sistemu cevi, kanala, retenzija, uređaja za prečišćavanje i drugih objekata.

Model SWMM razvijen je u SAD na Univerzitetu Floride, ali je 1990-tih godina njegov razvoj preuzela američka Agencija za zaštitu životne sredine (EPA). Softverski paket se može besplatno preuzeti na internet strani EPA [4].

2.2.5 RETENZIRANJE VODA

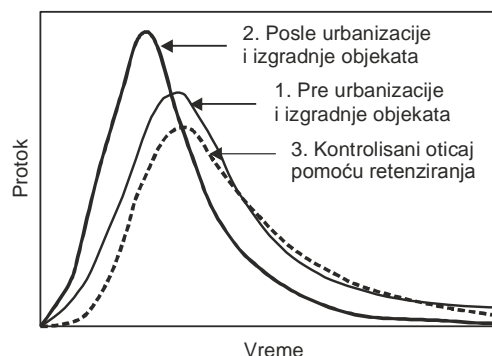
2.2.5.1 Opšta razmatranja

Privremeno zadržavanje viška kišnog oticađ služi za kontrolu količina i kvaliteta oticađ. To je jedan od osnovnih principa u zaštiti od velikih voda, koji sve češće postaje neophodan i u sistemima za odvodnjavanje puteva da bi se izbeglo njihovo preopterećenje.

Zadržavanjem kišnog oticađ u retenzionim prostorima može se smanjiti obim i učestalost plavljenja, ali i problemi sa kvalitetom oticađ. Pored toga, sa retenzionim prostorima smanjuju se dimenzije sistema kolektora za odvođenje voda, a time se smanjuje i njihovo koštanje.

Zadržavanjem vode u retenzionom prostoru smanjuje se maksimalni protok sa date slivne površine. Ovo smanjenje se obično projektuje tako da maksimalni protok koji izlazi iz retenzionog prostora bude jednak ili manji od maksimalnog protoka na datom slivu pre urbanizacije i izgradnje objekata koji su doveli do povećanja oticađ (slika 2.2.12). Pri tome, zapremina oticađ koji izlazi iz retenzionog prostora jednaka je zapremini koja ulazi u retenzioni prostor. Smanjenje zapremine na nivo pre urbanizacije i izgradnje objekata može se postići ako

lokacija retenzionog prostora dozvoljava infiltraciju vode.



Slika 2.2.12. Efekat retenziranja voda.

Pored smanjenja maksimalnog protoka u retenzionom prostoru, za dimenzionisanje retenzionih prostora primenjuju se i kriterijumi koji se odnose na kontrolu zagađenja, prikazani u svesci o projektovanju odvodnjavanja.

Posebne kriterijume u pogledu smanjenja maksimalnog protoka mogu dati nadležni vodoprivredni organi kroz vodoprivredne uslove.

Uobičajena praksa je da se retenzioni prostori dimenzionišu prema merodavnom oticađu određenog povratnog perioda (npr. 10-godišnja velika voda). Međutim, takva projektna rešenja mogu biti neefikasna za kontrolu velikih voda drugih povratnih perioda. Ako se retenzioni prostor dimenzioniše na česte događaje (mali povratni period), tada će smanjenje maksimalnog protoka tokom značajnijih događaja biti veoma malo. Slično tome, ako se retenzioni prostor dimenzioniše na retke događaje (veliki povratni period), tada će smanjenje protoka tokom čestih i manje značajnih događaja biti takođe veoma malo. Ovi problemi se mogu izbeći usvajanjem tehničkog rešenja koje omogućava smanjenje maksimalnih protoka usled kiša za više povratnih perioda (U SAD se u novije vreme zahteva prihvatanje oticađ povratnih perioda 2, 10 i 100 godina [6]).

Zadržavanjem vode u retenzionom prostoru produžava se i trajanje isticanja vode iz retenzionog prostora u recipijent, jer izlazni hidrogram ima dužu bazu. Takva situacija nije poželjna ukoliko se u recipijentu očekuje pojava talasa velike vode usled istog meteorološkog događaja i ukoliko dostizanje maksimalnog protoka u recipijentu vremenski koincidira sa pojavom maksimuma izlaznog

hidrograma iz retenzionog prostora. Iz tog razloga, potrebno je prilagoditi tehničko rešenje retenzionih prostora velikim vodama u recipijentima.

Retenzioni prostori se mogu podeliti prema svojoj funkciji na one koji privremeno zadržavaju vodu (engl. *detention*) i na one koji trajno zarobljavaju vodu (engl. *retention*). Osnovna funkcija prostora koji privremeno zadržavaju vodu jeste da prime oticaj i da ga postepeno i kontrolisano ispuštaju pomoću građevina kao što su ustave ili prelive. Prostori u kojima se voda zarobljava takođe primaju oticaj, ali on napušta prostor isključivo infiltracijom i isparavanjem. Jedna od osnovnih razlika između ove dve vrste prostora je ta što u prostorima sa privremenim zadržavanjem vode treba omogućiti potpuno pražnjenje vode, dok u drugom slučaju to nije potrebno.

2.2.5.1.1 Prostori za privremeno zadržavanje vode

Smatraćemo ovde da je izlaz iz retenzije definisan na osnovu projektnih kriterijuma, na osnovu čega se određuje kapacitet izlaznih građevina.

Retenzioni prostor mora da ima dovoljnu zapreminu da bi zadovoljio uslove o smanjenju maksimalnog protoka. Potrebna zapremina prostora određuje se kroz proračun transformacije ulaznog hidrograma. Postupak ovog proračuna prikazan je u nastavku (poglavlje 2.2.5.2).

2.2.5.1.2 Prostori za trajno zadržavanje vode

U ove prostore spadaju retenzije koje primaju oticaj i veoma sporo ga ispuštaju, kao i retenzije u obliku infiltracionih bazena i infiltracionih rovova. Ovi retenzioni prostori najčešće imaju dvostruku ulogu da kontrolišu i količine i kvalitet oticaja.

S obzirom da zadržavanje vode u retenzionom prostoru može potencijalno biti duže od vremena između kišnih epizoda, može biti potrebno da se usvoji veća zapremina prostora ili veći kapacitet evakuacione građevine.

2.2.5.2 Hidrološki proračuni za dimenzionisanje retenzionih prostora

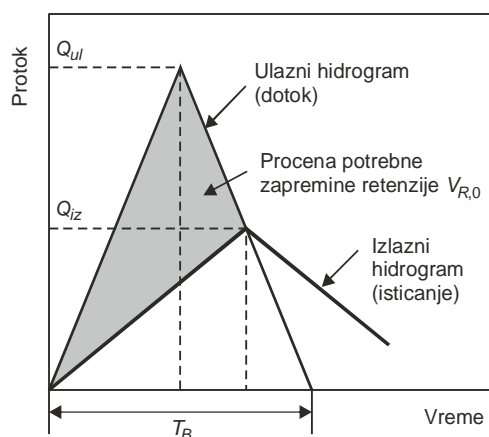
Za projektovanje retenzionih prostora od značaja su sledeći elementi:

- ulazni hidrogram (odnosno hidrogram oticaja iz sistema za odvodnjavanje kolovoza),
- kriva zapremine retenzionog prostora,
- kriva protoka na izlazu iz retenzionog prostora.

Poslednja dva elementa zavise od veličine retenzionog prostora, pa se postupak mora sprovesti tako što se pretpostavi određena veličina prostora. Zatim se proračunima utvrđuje da li se sa pretpostavljenom veličinom retenzionog prostora može dobiti željeni izlazni hidrogram.

2.2.5.2.1 Početna procena potrebne zapremine

Početna procena potrebne zapremine može se dobiti na osnovu ulaznog i izlaznog hidrograma kao razlika u njihovim zapreminama. Ulazni hidrogram je poznat, dok je izlazni nepoznat. On se može pretpostaviti tako što se formira trougaoni izlazni hidrogram čija je maksimalna oridanata jednaka željenom maksimalnom protoku Q_{iz} , a vreme podizanja (do maksimuma) se nalazi u preseku ulaznog hidrograma i maksimalnog izlaznog protoka (slika 2.2.13). Tada osenčena površina predstavlja prvu procenu zapremine retenzionog prostora.



Slika 2.2.13. Početna procena potrebne zapremine retenzionog prostora; prema [6].

Ukoliko se ulazni hidrogram može aproksimirati trouglom kao na slici 2.2.13, tada je osenčena površina jednaka:

$$V_{R,0} = \frac{Q_{ul} - Q_{iz}}{2} T_B$$

gde je $V_{R,0}$ početna procena potrebne zapremine retenzije, Q_{ul} maksimalni protok

ulaznog hidrograma, Q_{iz} maksimalni protok izlaznog hidrograma i T_B vremenska baza ulaznog hidrograma.

Ako je ulazni hidrogram složenog oblika, osenčena površina na slici 2.2.13 može se odrediti približnom integracijom primenom trapeznog pravila.

2.2.5.2.2 Kriva zapremine

Kriva zapremine je zavisnost između dubine (ili nivoa) i zapremine vode u retenzionom prostoru. Za izgrađene retencione prostore pravilnog oblika određivanje krive zapremine se svodi na prost geometrijski problem. Za retenzioni prostor u prirodnom okruženju potrebne su topografske podloge, iz kojih se za različite kote određuju površine budućeg vodenog ogledala. Zavisnost površine od kote odnosno dubine naziva se krivom površine, na osnovu koje se konstruiše kriva zapremine prema sledećem:

$$V(z_j) = V(z_{i-1}) + \frac{A(z_j) + A(z_{i-1})}{2} \cdot (z_j - z_{i-1})$$

gde su $V(z_j)$ i $V(z_{i-1})$ zapremine i $A(z_j)$ i $A(z_{i-1})$ površine retenzionog prostora za kote z_j i z_{i-1} . Proračun počinje od najniže kote prostora z_0 , za koji je $V(z_0) = 0$.

2.2.5.2.3 Kriva protoka na izlazu iz retenzionog prostora

Kriva protoka ovde predstavlja zavisnost između dubine (ili nivoa) vode u retenzionom prostoru i protoka na izlazu iz retenzionog prostora.

Uobičajeno je da retenzioni prostor ima glavni i sigurnosni ispušt. Kapacitet glavnog ispusta se obično određuje prema merodavnom protoku tako da se ne dozvoli prelivanje preko sigurnosnog preliva. Glavni ispušt je obično u vidu cevastog ispusta, preliva, ustave ili nekog drugog hidrauličkog objekta. Ako se retenzioni prostor dimenzioniše za više oticaja različitih povratnih perioda, tada je prisutno više izlaznih građevina.

Da bi se formirala kriva protoka na izlazu iz retenzionog prostora, potrebno je da se analiziraju krive protoka svake izlazne građevine (npr. za kombinaciju temeljnog ispusta i preliva konstruiše se složena kriva protoka na osnovu jednačine isticanja i jednačine prelivanja). Jednačine koje vezuju protok i dubinu (nivo) vode za različite tipove objekata mogu se naći u hidrauličkoj literaturi [13].

2.2.5.2.4 Infiltracija

Za potrebe proračuna bilansa voda u retenzionim prostorima, potrebni su podaci o propusnosti tla i hidrogeološkim uslovima na lokaciji. Preporučuje se da se infiltracija proceni na osnovu terenskih merenja.

Protoci koji napuštaju retenzioni prostor infiltracijom obično su za nekoliko redova veličine manji od merodavnih dotoka. Ukoliko retenzioni prostor ima sigurnosni izlaz, tada se infiltracija obično može zanemariti. Međutim, ako se zadržavanje vode zasniva samo na infiltraciji, tada je od značaja da se intenzitet infiltracije dovede u vezu sa zapreminom vode u retenciji.

2.2.5.2.5 Transformacija hidrograma u retenzionom prostoru

Za proračun transformacije talasa u retenzionom prostoru može se koristiti kvazistacionarna metoda. Ova metoda se zasniva na jednačini kontinuiteta, prema kojoj se razlika između dotoka i isticanja u jednom računskom koraku uravnotežuje sa promenom zapremine vode u retenzionom prostoru:

$$\bar{Q} - \bar{q} = \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

gde je Q ulazni protok, q izlazni protok, ΔV promena zapremine i Δt vremenski interval. U razvijenom obliku za interval $\Delta t = t_j - t_{j-1}$, gornja jednačina glasi:

$$\frac{Q_j + Q_{j-1}}{2} - \frac{q_j + q_{j-1}}{2} = \frac{V_j - V_{j-1}}{\Delta t}$$

Preuređenjem prethodne jednačine tako da se s jedne strane jednakosti nađu poznate veličine, a sa druge nepoznate, dobija se:

$$\frac{Q_j}{2} + \frac{Q_{j-1}}{2} + g_{j-1} - q_{j-1} = g_j \quad (8)$$

gde je:

$$g_j = \frac{V_j}{\Delta t} + \frac{q_j}{2}$$

Postupak rešavanja je sledeći:

- Za poznati ulazni hidrogram i krivu zapremine definiše se kriva protoka na izlazu iz retenzionog prostora.
- Izabere se vremenski korak Δt tako da na rastućoj grani ulaznog hidrograma bude bar 5 tačaka.
- Formira se zavisnost $g(q) = V/\Delta t + q/2$ na osnovu krive zapremine i krive protoka na izlazu iz retenzionog prostora, koja ima dimenziju protoka.

- Za početak proračuna je potrebno odrediti početni nivo vode H_0 u retenzionom prostoru, a time i početnu zapreminu V_0 i početno isticanje q_0 (za prethodno ispražnjenu retenziju $q_0 = 0$). Na osnovu ovih vrednosti računa se i početna vrednost $g_0 = V_0/\Delta t + q_0/2$.
- U sledećem vremenskom koraku na osnovu jednačine (8) računa se vrednost g_1 . Sa dijagrama $g(q)$ za vrednost g_1 određuje se izlazni protok q_1 (ili interpolacijom između brojnih vrednosti), dok se zapremina vode u retenziji dobija kao $V_1 = (g_1 - q_1/2)\Delta t$. Konačno, nivo vode H_1 se određuje iz krive zapremine za vrednost V_1 .
- U narednim vremenskim koracima proračun se ponavlja analogno prethodnom koraku.

2.2.5.2.6 Vodni bilans

Za sve stalne retenzione prostore potrebno je sprovesti proračun vodnog bilansa na godišnjem nivou u prosečnim uslovima. U ovaj bilans treba da uđu sve komponente ulaza i izlaza: padavine, doticaj, infiltracija, isparavanje, isticanje i drugi relevantni elementi.

Prosečan godišnji oticaj sa pripadajuće slivne površine može se odrediti pomoću procenjenog ponderisanog koeficijenta oticaja za sliv pomnoženom sa godišnjom sumom padavina. Infiltracija i eksfiltracija se procenjuju na osnovu vrste tla. Isparavanje se može proceniti kao prosečno mesečno isparavanje sa slobodne vodene površine za datu lokaciju (kao podaci sa isparitelja na obližnjoj meteorološkoj stanici ili proračunom na osnovu drugih meteoroloških podataka, npr. metodom Penman-Montieth).

2.2.5.2.7 Retenzioni prostori sa trajnim zadržavanjem vode

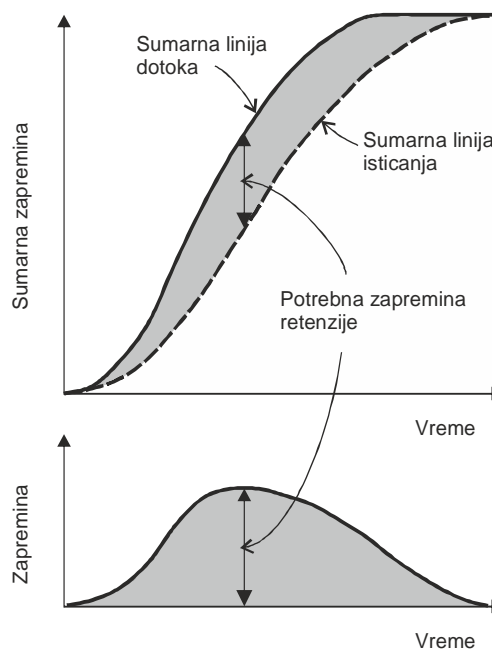
Da bi se procenili zapremine i nivoi vode u retenzionim prostorima sa trajnim zadržavanjem vode kao što su infiltracioni bazeni bez izlazne građevine i sigurnosnog preliva, primenjuje se proračun bilansa sa sumarnim linijama dotoka i izlaza iz retenzionog bazena.

U ovom slučaju izlaz iz bazena je složeni hidrološki proces koji zahteva merenja na terenu i poznavanje lokalnih uslova. Merenja na terenu su poželjna jer procene mogu biti veoma nepouzdanе.

Postupak se sastoji od sledećih koraka:

- Kao računski kiša uzima se višednevna kiša razmatranog povratnog perioda. Merodavno trajanje treba odrediti kao ono za koje dolazi do najnepovoljnijih uslova.
- Za takvu računsku kišu određuje se hidrogram dotoka do retenzionog bazena.
- Količina vode koja napušta retenzioni bazen procenjuje se za najnepovoljniji nivo podzemnih voda sa podacima o hidrauličkoj provodljivosti (koeficijentu filtracije) ili o intenzitetu infiltracije (najbolje na osnovu terenskih merenja).
- Formiraju se sumarne linije dotoka i izlaza za najnepovoljnije uslove (najsporije isticanje).
- Razlike između ordinata sumarnih linija dotoka i izlaza predstavljaju zapremine vode u retenzionom bazenu u pojedinim vremenskim trenucima (slika 2.2.14). Najveća vrednost upućuje na potrebnu zapreminu ovakve retenzije.
- Najviši nivo vode u retenziji određuje se iz krive zapremine za najveću zapreminu iz prethodnog koraka.

Smatra se da nivo koji odgovara nultoj korisnoj zapremini treba da bude najviši od sledeća tri: uobičajeni nivo vode u kišnoj sezoni, nivo podzemnih voda ili dno retenzione jame.



Slika 2.2.14. Proračun zapremine vode u retenziji pomoću sumarnih linija dotoka i isticanja.

2.2.6 REFERENCE

- [1] Brajković, M. (1994) Modifikacije metode sitetičkog jediničnog hidrograma za proračun velikih voda, 11. savetovanje Jugoslovenskog društva za hidraulička istraživanja i Jugoslovenskog društva za hidrologiju, str. 461-466.
- [2] Chow, V.T., Maidment, D.R. i Mays, L.W. (1988) *Applied Hydrology*, McGraw-Hill.
- [3] Đorović, M. (1984) Određivanje hidrološke grupe zemljišta pri definisanju oticanja u metodi "SCS", *Vodoprivreda*, 16(1): 57-60.
- [4] EPA (–), Stormwater Management Model (SWMM), US Environmental Protection Agency (<http://www.epa.gov/nrmrl/wswrd/wq/models/swmm/>).
- [5] FHA (2002) *Highway Hydrology*, Publication No. FHWA-NHI-02-001, Federal Highway Administration, US Department of Transportation (preuzeto sa http://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/library_arc.cfm?pub_number=2&id=6).
- [6] FHA (2009) Urban Drainage Design Manual, 3rd Edition, Publication No. FHWA-NHI-10-009, Federal Highway Administration, US Department of Transportation (preuzeto sa http://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/library_arc.cfm?pub_number=22&id=140).
- [7] HEC (–) HEC-HMS, Hydrologic Engineering Center, US Army Corps of Engineers (<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>).
- [8] Institut za hidrotehniku (1990) "Druga faza istraživanja procesa oticanja kišnice sa urbanih površina i njihova zaštita od plavljenja i zagađenja voda", Završni izveštaj naučno-razvojnog projekta, Građevinski fakultet, Beograd.
- [9] Jovanović, M. (2002) *Regulacija reka – Rečna hidraulika i morfologija*. Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu.
- [10] Jovanović, S. (1987) *Primena metoda matematičke statistike u hidrologiji*, treće izdanje, Građevinski fakultet, Beograd.
- [11] Jovanović, S. (1989) *Hidrologija*, poglavlje 2 u Tehničaru 6, Gradjevinska knjiga, Beograd.
- [12] Jovanović, S., Vukmirović, V., Despotović, J. i Radić, Z. (1979) Metode analize o određivanju velikih voda na nedovoljno izučenim slivovima, NIP Savremene metode analize kretanja vode i nanosa u prirodnim tokovima, izveštaj za 1979, Zavod za hidrotehniku Gradjevinskog fakulteta, Beograd.
- [13] Kapor, R. (2008) *Hidraulika*. Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu.
- [14] Mays, L.W. (2005) *Water Resources Engineering*, John Wiley & Sons, Inc.
- [15] McCuen, R.H. (1998) *Hydrologic Analysis and Design*, Prentice-Hall, Inc.
- [16] NRCS (1986) *Urban Hydrology for Small Watersheds*, Natural Resources Conservation Service, US Department of Agriculture, TR 55.
- [17] Petrović, J., Despotović, J. i Jaćimović, N. (1998) Analiza merodavnih oticaja kišnih voda na eksperimentalnom slivu Miljakovac u Beogradu na osnovu merenja u periodu 1981-1993, Zbornik radova 12. savetovanja JDHI, Subotica.
- [18] Plavšić, J. i Pavlović, D. (2005) Preporuke za izbor merodavnih kiša za projektovanje u beogradskoj kanalizaciji. Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu za JKP Beogradski vodovod i kanalizacija.
- [19] Vukmirović, V. i Despotović, J. (1986) Osnovne faze statističke obrade jakih kiša kratkog trajanja, *Vodoprivreda*, 18 (100-101), str. 89-93.
- [20] Wanielista, M., Kersten, R. and Eaglin, R. (1997) *Hydrology – Water Quantity and Quality Control*, John Wiley & Sons.
- [21] Wong, T.S.W. (2005) Assessment of Time of Concentration Formulas for overland flow, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 131(4): 383-387.