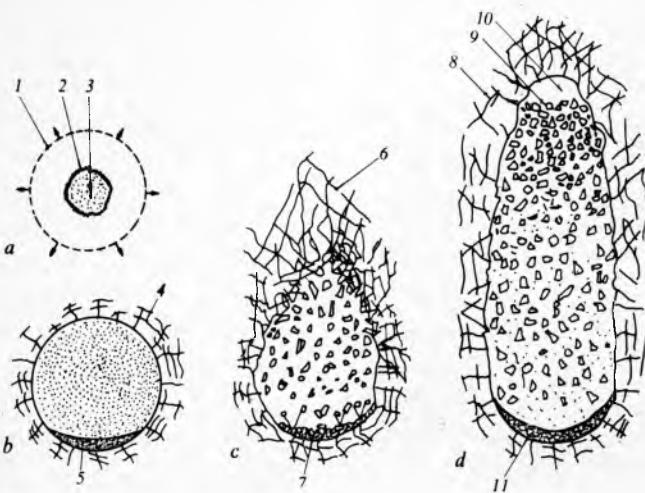


energija nuklearnog naboja. U fazi hidrodinamičkog djelovanja nastaje taljenje i isparivanje stijene. Udarni valovi drobe stijenu u blizini mjesta eksplozije, a na većoj udaljenosti nastaju seizmički valovi. U fazi kavazističkog djelovanja tlak se snizuje,



Sl. 16. Faze djelovanja nuklearne eksplozije. a) neposredno nakon nuklearne reakcije, b) hidrodinamičko djelovanje, c) kavazističko djelovanje, d) konačno stanje. 1) udarni val, 2) šupljina koja ekspandira, 3) pare na visokoj temperaturi i tlaku, 4) pukotine, 5) rastaljena stijena, 6) razaranje stijene napreduje navise, 7) razorenja stijena pomiješana s talinom, 8) raspucana stijena, 9) smrvljena stijena, 10) prazni prostor, 11) ohladena staklasta masa (slava).

počinje razaranje stijene i stvaranje konusne šupljine. U fazi termoradiacijskog djelovanja prestaje razaranje stijene i u potpunosti se oblikuje konusna šupljina. Pri tom se postepeno odvodi toplina i raspadaju radioaktivni elementi. Posljednja faza može trajati i nekoliko godina.

ŠTETNO DJELOVANJE MINIRANJA

Nakon svakog miniranja pojavljuju se seizmički valovi u okolišnom tlu, te zračni udarni valovi i razbacivanje komada minirane mase u okoliš. To su nepoželjne pojave, osobito pri miniranju u blizini stambenih zgrada i drugih građevina, jer mogu prouzrokovati njihova oštećenja.

Seizmičko djelovanje miniranja slično je potresima i za obje pojave vrijede slične zakonitosti. Miniranje treba promatrati kao slab potres, a mjesto eksplozije kao njegov epicentar. Intenzitet potresa i njegovo štetno djelovanje na građevine utvrđuje se indirektnim postupkom, tj. na osnovi izmijerenih pomaka, brzina i ubrzanja oscilacija tla nakon miniranja. U praksi se najčešće primjenjuje kriterij brzine oscilacije tla.

Zračni udarni val u bližoj zoni eksplozije djeluje dinamički a u daljoj zoni staticki. Pri nailasku na građevinu pojavljuju se u njoj naprezanja djelovanjem zračnog udarnog vala. Ako su ta naprezanja veća od čvrstoće materijala, nastaju deformacije ili rušenje. Polumjer zone ugroženosti od djelovanja zračnog udarnog vala računa se prema formuli $R_z = k_z \sqrt{Q}$ (m), gdje je Q količina eksplozivnog punjenja (kg), a k_z koeficijent koji zavisi od stupnja oštećenja i pokazatelja djelovanja eksplozije.

Razbacivanje komada minirane mase opasno je za ljudе i osjetljive dijelove građevina i uređaja. Duljina razbacivanja (m) zavisi od duljine linije najmanjeg otpora i pokazatelja djelovanja eksplozije. Aproksimativno se može odrediti prema formuli

$$R_r = 255 n^{0.75} \sqrt{W}, \quad (13)$$

gdje je n pokazatelj djelovanja eksplozije, a određen je relacijom $n = R/W$ u kojoj je R polumjer lijevka eksplozije, a W duljina linije najmanjeg otpora.

VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1969. — R. Gustafsson, Swedish blasting technique. Nora Boktryckeri, Gothenburg 1973. — Z. O. Миодели, Разрушение горных пород. Недра, Москва 1974. — H. Heinz i dr., Handbuch Sprengtechnik. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1975.

J. Krsnik

MJERENJA U INŽENJERSKOJ GEODEZIJI

MJERENJA U INŽENJERSKOJ GEODEZIJI, primjena geodetskih metoda mjerena u projektiranju i gradnji građevina te u praćenju njihovih deformacija. Često se inženjerska geodezija naziva i primjenjenom geodezijom, iako prvi naziv bolje označuje područje primjene koje je blisko povezano s građenjem.

Iskolčenje je osnovna geodetska operacija za obilježavanje projektirane građevine na terenu; za razliku od snimanja terena, iskolčenje redovito zahtijeva i veću točnost. Metode iskolčenja izložiti će se na početku jer su one zajedničke za sve primjene. Zbog šire primjene potpuniće će se obraditi trasiranje prometnica, a od ostalih primjena spomenut će se samo najvažnije. Mjerenja pomaka i deformacija građevina većim su dijelom obuhvaćena u članku *Brane, osmatranje*, TE 2, str. 133.

ISKOLČENJE

Građevine se grade na osnovi projekata prikazanih na geodetskim podlogama, kartama i planovima. Prethodni se premjjer terena i izradba planova izvode da se dobije geodetska podloga za projekt. Međutim, u sastavni dio geodetskih radova spada i obilježivanje projektirane građevine na terenu. Radovi kojima se projekt s planovima prenosi na teren nazivaju se iskolčenjima.

Iskolčenje je inverzna operacija premjjeru, odnosno snimanju. Snimanjem se na osnovi terenske izmjere izrađuju planovi, a iskolčenjem se projektirane građevine s planova prenose na teren obilježavanjem karakterističnih točaka u položajnom i visinskom smislu. Zato se i metode iskolčenja razlikuju od metoda snimanja.

Općenito, projektirana građevina prenosi se na teren u dvije etape. Najprije se *iskolčuju glavne osi* građevine, i to najčešće polazeći od točaka postojeće geodetske osnove. Preporučljivo je i ekonomično da to bude ista osnova koja je poslužila i za premjer terena prilikom izrade geodetske podloge projekta. Obilježavanjem glavnih osi utvrđen je opći položaj i orientacija građevine na terenu. U drugoj etapi, *detaljnim iskolčenjem*, obilježuju se sve karakteristične točke koje određuju projektiranu građevinu. Pri tom se detaljne točke redovito iskolčuju od već obilježenih glavnih osi, a prema razmještaju dijelova građevine. Za drugu etapu iskolčenja redovito se traži veća točnost, jer je, umjesto apsolutnog smještaja, važnije što vjernije sačuvati oblik i dimenzije projektirane građevine. Pri iskolčenjima često se visoka točnost zahtijeva samo u jednom smjeru; npr. kad je tunel u pravcu, mnogo je važnije smanjiti poprečne od uzdužnih pogrešaka koje mogu biti znatno veće.

Elementi iskolčenja. Proces se iskolčenja građevine sastoji u orientiranju glavnih osi i obilježivanju položaja i visinski karakterističnih točaka. Sve se metode iskolčenja točke svode na prijenos osnovnih elemenata: horizontalnog kuta, dužine i visine.

Prijenosu projektirane građevine na teren prethode prepmjni radovi: sastavljanje skica iskolčenja s podacima priključka glavnih osi na točke geodetske osnove i razradba geodetskog projekta za iskolčenje.

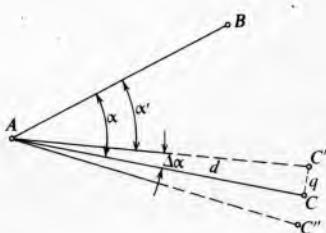
Elementi položajnog iskolčenja građevine određuju se grafičkim, grafičko-analitičkim i analitičkim postupkom.

Ako pogreške iskolčenja bitno ne utječu na funkciju građevine, primjenit će se *grafički postupak*. Koordinate se očitavaju s plana grafički, a elementi se iskolčenja, kutovi i dužine proračunavaju pomoću koordinata. Ako zadovoljava još manja točnost, kutovi i dužine očitavaju se neposredno s plana. Kod grafičkog postupka pogreške elemenata iskolčenja ovise najviše o točnosti i mjerilu plana.

Više se primjenjuje *grafičko-analitički postupak*. Tada se polazni elementi dobivaju grafički (npr. elementi za obilježivanje glavnih osi), a ostali se računaju analitički na osnovi numeričkih podataka koje daje projekt (dimenzije i oblik građevine).

U *analitičkom postupku* svi se elementi iskolčenja dobivaju analitički. Dakle, i glavne točke osi građevine zadane su svojim koordinatama; one su mjerjenjem na terenu snimljene s točaka geodetske osnove ili su neposredno uvrštene u mrežu osnove. Tada se, prema projektnim dimenzijama i međusobnim geometrijskim odnosima linija građevine, rješavaju analitički zadaci u ravnini. Geometrijski odnosi jesu: okomitost i paralelnost linije, presjek linija pod određenim kutom, polumjeri kružnih lukova, parametri ostalih krivulja itd. To je najtočniji postupak određivanja elemenata iskolčenja. Primjenjuje se kad je položaj i oblik građevine strogo određen (npr. prilikom rekonstrukcije ili proširenja postojećih građevina).

Iskolčenje horizontalnog kuta bitno se razlikuje od mjerjenja kuta. Pri mjerjenju je na terenu obilježen vrh kuta (točka A) i još dvije točke (B i C), čime su određena oba kraka između kojih se mjeri horizontalni kut α (sl. 1). Pri iskolčenju na terenu postoje samo dvije točke (A i B), a prema zadanom kutu α treba obilježiti smjer drugog kraka (točku C).



Sl. 1. Iskolčenje horizontalnog kuta

Za iskolčenje kuta postavlja se teodolit na točku A i orijentira prema signaliziranoj točki B. Očitanju limba dodaje se (ili oduzima) zadani kut α , a zakretanjem se alhidada dovodi na novo očitanje. U smjeru vizurne osi durbina teodolita, na željenoj udaljenosti, obilježi se točka C na terenu, čime je određen smjer drugog kraka. Opisani postupak može zadovoljiti samo kad se zahtijeva manja točnost. Naime, zbog različitih pogrešaka pri prijenosu, umjesto zadanog kuta α , u stvarnosti bit će iskolčen neki drugi kut α' , blizak zadanim, tj. bit će obilježena točka C' (sl. 1).

Da se isključi utjecaj pogrešaka instrumenta, isti se postupak ponavlja u drugom položaju durbina (vertikalnog kruga), pa se tada obilježi točka C''. Za većinu praktičnih zadataka može se smatrati da srednji položaj (točka C) između privremeno obilježenih točaka C' i C'' dovoljno točno određuje smjer drugog kraka zadanih kuta α .

Ako je potrebno zadani kut prenijeti na teren s još većom točnošću, iskolčuje se na principu mjerjenja horizontalnog kuta uz potrebne korekcije. Kao i prije, privremeno se obilježi točka C. Horizontalni kut BAC' mjeri se zatim u više girusa ili repeticija, čime se dobiva točnija vrijednost kuta α' . Prema kutnom odstupanju $\Delta\alpha = \alpha - \alpha'$ izračuna se linearни popravak q prema formuli:

$$q = \frac{\Delta\alpha}{\varrho} d, \quad (1)$$

gdje je $\varrho = 180^\circ/\pi = 57,2958^\circ = 206,265''$, a odmjeravanjem vrijednosti q okomito na pravac AC' obilježi se točka C. Smjer korekcije q određen je predznakom odstupanja $\Delta\alpha$. Radi kontrole kut BAC mjeri se ponovno, a ako odstupanje $\Delta\alpha$ nije u granicama tražene točnosti, postupak se ponavlja. Tako točnost iskolčenja kuta ovisi o točnosti mjerjenja kuta.

Ako se iskolčuje samo kut α , odnosno smjer AC, tada je za računanje linearne pomake q dovoljno samo približno poznavati udaljenost d . Ako točku C treba obilježiti i na točnoj udaljenosti od točke A (polarna metoda iskolčenja), najprije se fiksira smjer, a zatim iskolčuje zadana dužina.

Iskolčenje dužine također se razlikuje od mjerjenja dužine. Mjerjenjem se određuje horizontalna udaljenost između dvije točke koje su obilježene na terenu, a iskolčenjem se odmjerava zadana horizontalna udaljenost u označenom smjeru od jedne obilježene točke da bi se obilježio drugi kraj dužine. Upotrebom vrpce može se jednostavno iskolčiti dužina ako je teren pogodan za takva mjerjenja i ako zadovoljava manja točnost iskolčenja.

Za preciznija iskolčenja, kad se upotrebljava vrpca, potrebne su različite korekcije, i to neposredno prilikom odmjeravanja dužine. Sve to mnogo otežava rad na terenu. Zato se za točnija iskolčenja dužine postupa slično kao i pri iskolčenju kuta.

Ako se dužina iskolčuje vrpcom, najprije se u zadanom smjeru odmjeri približna udaljenost i privremeno se obilježi točka na drugom kraju. Zatim se ta dužina mjeri potrebnom točnošću, pazeci na sve korekcije (nagib vrpce, temperatura, istezanje, komparacija itd.); ako se radi o većim dužinama, kojih su projektne vrijednosti izračunate iz koordinata, treba još uračunati korekcije za razinsku plohu i ravninu projekcije. Na osnovi odstupanja između zadane dužine d koju treba iskolčiti i točne vrijednosti privremeno obilježene dužine d' , odmjeri se udaljenost $\Delta d = d - d'$ i definitivno se označi drugi kraj projektirane dužine.

Mjerjenje dužina vrpcom naročito je otežano na brdovitim terenima. Tada je prikladnije za iskolčenje dužina, već prema traženoj točnosti, upotrijebiti metode optičkoga, paralaktičkog ili elektrooptičkog mjerjenja dužina; osobito su prikladni autoreduksijski daljinomjeri. Primjenit će se i metode posrednog mjerjenja. Razumljivo je da će se tako uvijek mjeriti privremeno obilježene dužine. Za odmjeravanje odstupanja Δd i za iskolčenje kraćih horizontalnih dužina najprikladnije su lagane ručne vrpce.

Prijenos visine, zadane projektom, može se ostvariti geometrijskim, trigonometrijskim ili hidrostatskim nivelmanom. U praksi je najčešća upotreba geometrijskog nivelmana. Zadana visina prenosi se na teren od najbližih radnih repera. Najprije se visinski određuje točka koja ima kotu približno jednaku zadanoj, a zatim se od te točke pronalazi kota koja točno odgovara zadanoj.

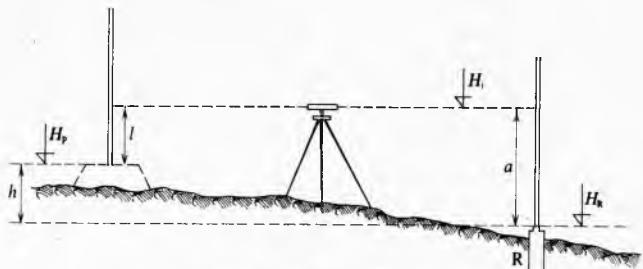
Pri prijenosu visine, odnosno visinske razlike, pôznate su kota H_R repera s kojeg se prenosi visina i kota H_P na koju treba postaviti projektiranu točku. Dakle, treba prenijeti visinsku razliku

$$h = H_P - H_R. \quad (2)$$

Niveliranjem između radnog repera i privremeno stabilizirane točke izmjerit će se visinska razlika h' . Prema tome, razlika

$$\Delta h = h - h' \quad (3)$$

pokazuje u kojem smjeru i za koliko je potrebno pomaknuti po vertikali privremeno stabiliziranu točku. Već prema položaju projektirane točke, popravak Δh može se prenijeti običnim mjerilom, vrpcom ili očitanjem na nivelmansoj letvi.



Sl. 2. Prijenos projektirane visine

Visinski položaj projektirane točke može se proračunati i pomoću horizonta instrumenta (sl. 2). Prema očitanju a na letvi postavljenoj na reperu kota je vizurne ravnine instrumenta

$$H_i = H_R + a. \quad (4)$$

Da bi se dobila projektirana kota H_p , očitanje l na letvi postavljenoj u projektiranu točku treba biti:

$$l = H_i - H_p. \quad (5)$$

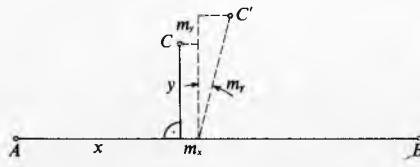
Letva se podiže ili spušta dok se ne postigne traženo očitanje. Dno letve odgovara projektiranoj visini H_p , koja se fiksira kolcem, čavljom u kolcu, horizontalnom crtom, klinom i sl. Kad je to potrebno, visina se može točnije fiksirati i fino korigirati vijkom, vertikalno uvijenim u kolac.

Prilikom visinskog iskolčenja trase redovito se nivelmanom određuju kote svih stabiliziranih točaka (kolaca) na uzdužnoj osi — uzdužni profil terena. Prema projektiranim kotama (niveleti) uz zabijeni se kolac na daščici napiše visinska razlika s predznakom + ako je projektirana kota iznad terena (nasip), a s predznakom — ako je ispod terena (usjek).

Iskolčenje točke

Metode položajnog iskolčenja točke jesu ortogonalna i polarna metoda, metoda presjeka lukova, presjeka pravaca i presjeka linija. Izbor metode zavisi od vrste građevine koja se iskolčuje, terenskih uvjeta i potrebne točnosti.

Orthogonalna metoda iskolčenja točke. Na terenu su stabilizirane točke A i B ; to su najčešće točke geodetske osnove (sl. 3). Elementi za iskolčenje točke C jesu apscisa x , pravi kut i kut i ordinata y . Elementi x i y mogu se dobiti grafički ili analitički, transformacijom koordinata točaka u sustav linije iskolčenja AB . Apscisa i ordinata redovito se odmjeravaju vrpcom, dok se pravi kut uspostavlja pomoću prizme (točnije instrumentom).



Sl. 3. Orthogonalno iskolčenje točke

Točnost iskolčenja točke C ovise o pogrešci pri mjerenu apscise m_x i ordinata m_y , pri uspostavljanju pravog kuta m_φ , te o pogrešci stabilizacije m_s točke C . Uz ove pogreške, umjesto točke C bit će iskolčena neka bliska točka C' . Srednja je pogreška položaja točke C :

$$m_C^2 = m_x^2 + m_y^2 + \left(\frac{m_\varphi}{\varrho}\right)^2 y^2 + m_s^2. \quad (6)$$

Ako se apscisa i ordinata mijere istom relativnom točnošću

$$\frac{m_x}{x} = \frac{m_y}{y} = \frac{m_d}{d}, \quad (7)$$

dobiva se

$$m_C^2 = (x^2 + y^2) \frac{m_d^2}{d^2} + \left(\frac{m_\varphi}{\varrho}\right)^2 y^2 + m_s^2. \quad (8)$$

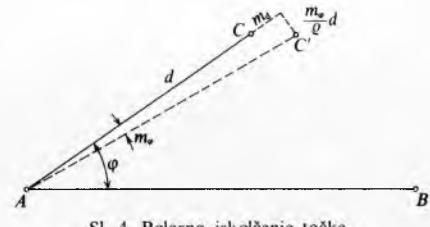
Iz formule se vidi da pogreška iskolčenja naročito ovise o vrijednosti ordinata y .

Za uspješnu primjenu te metode potrebna je nesmetana vidljivost krajnjih točaka, a teren treba biti ravan (mjerjenje duljina vrpcom). Kratke ordinate uvjetuju gustu mrežu geodetske osnove. Za iskolčenje je potreban jednostavan pribor: vrpce, prizma i trasirke.

Pogreška stabilizacije (fiksacije) točke koja se iskolčuje (m_s) ovise o signalizaciji točke na određenoj visini, o načinu projiciranja s te visine na razinu označe (obični visak, optički postupak), te o preciznosti obilježavanja točke (kolac, kolac s čavljom, kamen s križem, rupica na željeznoj ploči i sl.).

Pri razmatranju točnosti metoda iskolčenja neće se uzimati u obzir položajne pogreške datih točaka niti pogreške centriranja instrumenata i signala.

Polarna metoda iskolčenja točke primjenjuje se uglavnom za prijenos na teren s poligonskih točaka (A i B na sl. 4).



Sl. 4. Polarno iskolčenje točke

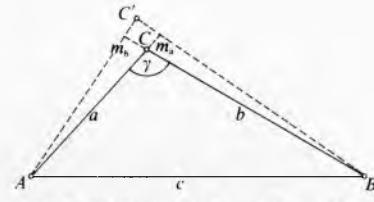
Položaj točke C na terenu određuje se pomoću kuta φ i udaljenosti d . Ti se elementi mogu dobiti grafičkim ili analitičkim postupkom.

Ako se uzmu u obzir pogreške pri prijenosu kuta m_φ i odmjeravanju duljine m_d , srednja je pogreška položaja točke C

$$m_C^2 = \left(\frac{m_d}{d}\right)^2 d^2 + \left(\frac{m_\varphi}{\varrho}\right)^2 d^2 + m_s^2. \quad (9)$$

Polarna metoda iskolčenja primjenjuje se uspješno i na težim terenima gdje nije moguće mehaničko mjerjenje duljina. Budući da je za prijenos kuta potreban instrument, najpraktičnije je istim instrumentom izmjeriti duljinu (autoreduksijski optički ili elektrooptički daljinomjer).

Iskolčenje točke presjekom lukova. Elementi iskolčenja jesu dvije duljine (a i b) kojima je određena udaljenost od točaka A i B (sl. 5). Da se pronađe položaj točke C , duljine a i b treba istodobno odmjeravati. To je i bitna razlika između iskolčenja i snimanja točke presjekom lukova.



Sl. 5. Iskolčenje točke presjekom lukova

Početak je vrpce na točki A , dok se na točki B drži vrpca na očitanju $a + b$. Zatezanjem vrpce na očitanju a dobiva se položaj točke C . Ako je duljina $a + b$ veća od duljine jedne vrpce, upotrijebit će se dvije vrpce. Na točki A drži se prva vrpca na očitanju a , a na točki B druga vrpca na očitanju b ; na počecima obiju vrpci, kad su zategnute, nalazi se položaj točke C .

Srednja pogreška položaja točke C iznosi

$$m_C^2 = \frac{1}{\sin^2 \gamma} \left(\frac{m_d}{d}\right)^2 (a^2 + b^2) + m_s^2, \quad (10)$$

uz pretpostavku da se obje duljine a i b mijere istom relativnom točnošću m_d/d . Pogreška iskolčenja točke bit će najmanja kada je $\gamma = 90^\circ$. Tada je $a^2 + b^2 = c^2$, pa je srednja pogreška

$$m_C^2 = \left(\frac{m_d}{d}\right)^2 c^2 + m_s^2. \quad (11)$$

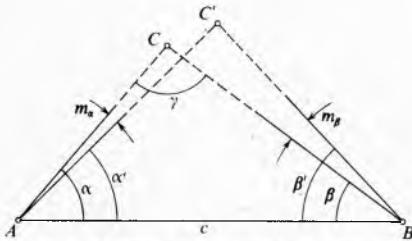
Ta se metoda uspješno primjenjuje za kraće udaljenosti a i b te kod povoljnih presjeka duljina. Potrebna je, dakle, gusta mreža geodetske osnove, a mehaničko mjerjenje duljina traži najbolje terenske uvjete.

Iskolčenje točke presjekom pravaca. Kutovi α i β jesu elementi iskolčenja. Analitički se dobivaju kao razlike smjernih kutova izračunatih iz koordinata točaka A , B i C . Položaj točke C određuje se prijenosom kutova α i β pomoću teodolita, a za orijentaciju služi baza presjeka AB (sl. 6).

Točnost iskolčenja ovise o pogreškama prijenosa kutova (m_α i m_β) i o relativnoj pogrešci baze m_c/C . Uz pretpostavku da je $m_\alpha = m_\beta = m_k$, i da su $\gamma \approx 90^\circ$ i $\alpha \approx \beta \approx 45^\circ$, srednja je pogreška položaja

$$m_C^2 = \frac{c^2 m_k^2}{\varrho^2} + \frac{1}{2} c^2 \left(\frac{m_c}{c}\right)^2 + m_s^2. \quad (12)$$

Metoda presjeka pravaca upotrebljava se pri iskolčenju većih građevina na težim terenima (mostovi, brane), pri montaži visokih građevina, te općenito za preciznija obilježivanja. Tada se i dužina baze c mjeri nekim točnjim postupkom ili se dobiva posredno (npr. stranica mikrotriangulacije).

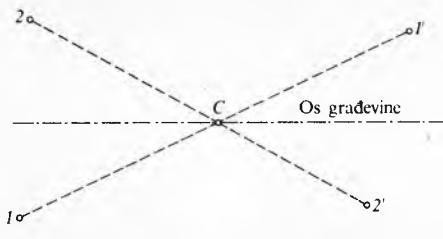


Sl. 6. Iskolčenje točke presjekom pravaca

Iskolčenje točke tom metodom primjenjuje se uspješno kada se točke geodetske osnove moraju postaviti daleko od građevine, kad je konfiguracija terena nepovoljna za mjerjenje dužina, te kad su točke koje treba iskolčiti teško pristupačne.

Iskolčenje točke presjekom linija. Tražena točka nalazi se u sječištu dviju linija koje su na gradilištu određene s dvije obilježene točke 1 i $1'$, te 2 i $2'$ (sl. 7).

Presjek linija često se upotrebljava za osiguranje već iskolčenih točaka (C), pogotovo kad se njihova trajnija stabilizacija ne može održati zbog građenja. Tom metodom moguća je jednostavna i stalna kontrola položaja točke tokom gradijanja (npr. iskolčena točka osi stupa mosta osigurava se pravcima s krajnjim točkama na suprotnim obalama).



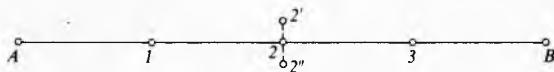
Sl. 7. Iskolčenje točke presjekom linija

Kad su dužine kratke, presjek se linija ostvaruje zategnutom špagom ili žicom, a kad su udaljenosti velike, sa dva teodolita. Prednost je te metode u tome što je mogu primjeniti i manje kvalificirane osobe.

Iskolčenje pravca

Dvjema točkama na terenu određen je pravac, pa između njih ili u produženju treba obilježiti još niz drugih točaka tog pravca. Iskolčiti se može na različite načine, već prema terenskim prilikama, udaljenosti točaka i točnosti koja se želi postići. U praksi se pojavljuje iskolčenje pravca kad se krajnje točke dogledaju, kad se krajnje točke ne dogledaju, te iskolčenje u produženju zadanog pravca.

Iskolčenje kad se krajnje točke dogledaju. Pravac prolazi točkama A i B (sl. 8). Te se točke signaliziraju trasirkama.



Sl. 8. Iskolčenje pravca umetanjem međutočaka

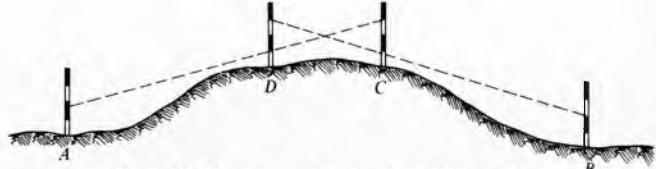
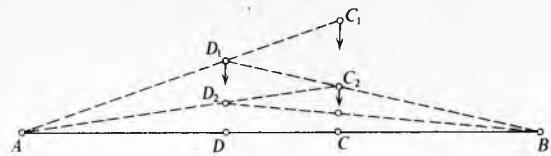
Stojeći iza jedne trasirke, a prema trasirki na drugom kraju, od oka se postavljaju u pravac trasirke $1, 2, \dots$ postavljene na povoljnim udaljenostima. Prema potrebi, međutočke se na terenu obilježuju trajnjim oznakama.

Za točnije iskolčenje na jednu se od krajnjih točaka postavlja teodolit usmjeren prema drugoj krajnjoj točki. Vertikalna vizurna

ravnina podudara se s pravcem AB , pa se postavljanjem trasirki $1, 2, \dots$ uz vertikalnu nit durbina može umetnuti potreban broj međutočaka. Ako se pri viziranju mijenja vertikalni kut durbina, položaj međutočke određuje se u dva položaja durbina radi eliminacije pogrešaka instrumenta. Točan položaj, npr. točke 2 , bit će na sredini između mjesta $2'$ određenog u prvom i mjesta $2''$ u drugom položaju durbina (sl. 8).

Pri iskolčenju dugačkih pravaca, te kad se s krajnjih točaka ne dogledaju sve međutočke, primjenjuje se metoda uzastopnog iskolčenja. S točke A iskolči se međutočka 1 . Teodolit se zatim premješta na obilježenu točku 1 , uvizira se točka A , durbin se okreće oko horizontalne osi i iskolči točka 2 . Instrument se prema potrebi ponovno premješta u iskolčenu točku 2 , vizira na točku 1 , pa se obilježuje točka 3 itd. Točke treba, u ovom slučaju, uvijek iskolčavati u dva položaja durbina.

Iskolčenje kad se krajnje točke ne dogledaju. Mogu se primjeniti različiti postupci. Za privremena iskolčenja često se primjenjuje metoda postupnog približavanja. Njena je prednost da su za iskolčenje dovoljne samo trasirke. Negdje na približno jednakoj udaljenosti od krajnjih točaka postoje mjesta C i D s kojih se vide obje krajnje točke (sl. 9). Prva trasirka C_1 približno se postavlja u pravac. Pomoću te trasirke druga se trasirka D_1 utjeruje u pravac prema točki A . Promatrajući od trasirke D_1 , prva trasirka premješta se na mjesto C_2 , tj. utjeruje se u pravac prema točki B . Ponovno se zatim, polazeći od točke C_2 , utjeruje druga trasirka na mjesto D_2 itd. Tako se postupnim približavanjem pronalaze točke C i D na pravcu AB .



Sl. 9. Iskolčenje pravca postupnim približavanjem

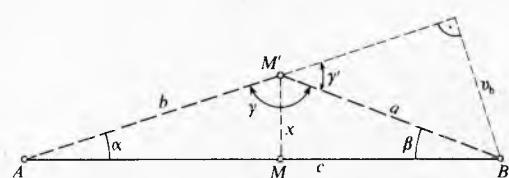
Kad se raspolaže teodolitom, primjenit će se postupak mjerjenjem prijelomnog kuta. Približno na pravcu AB izabire se pomoćna točka M' s koje se dogledaju obje krajnje točke. S točke M' izmjeri se prijelomni kut γ . Za rješenje zadatka treba poznavati još dužine a i b , pri čemu nije potrebna veća točnost, pa će se one najčešće izmjeriti tajimetrijski, istim instrumentom kojim je mjerjen i kut γ (sl. 10).

Kad se poznaju a , b i γ , može se odrediti vrijednost x (visina trokuta $AM'B$) za koju treba privremeno stabilizirano točku M' pomaknuti na mjesto M , tj. na pravac AB . Budući da je vrijednost x malena, površina je trokuta $AM'B$

$$P = \frac{cx}{2} \approx \frac{(a+b)x}{2}, \quad (13)$$

ili

$$P = \frac{1}{2} b v_b = \frac{1}{2} ab \sin \gamma. \quad (14)$$



Sl. 10. Iskolčenje pravca mjerjenjem prijelomnog kuta

Ako se izjednače desne strane formula (13) i (14), a kut je γ blizu 180° , dobiva se

$$x = \frac{ab}{a+b} \frac{\gamma}{\varphi}. \quad (15)$$

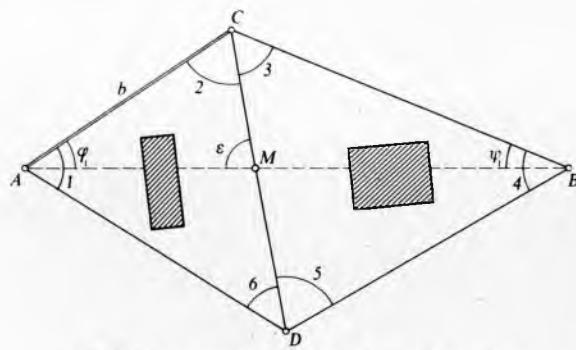
Udaljenost x odmjeri se približno okomito na pravac AB i obilježi točka na pravcu M . Radi kontrole kut u točki M ponovno se mjeri, pa kad su veće razlike od 180° , postupak se može ponoviti s drugim približenjem.

Pravac AB mogao bi se iskolčavati s krajnjih točaka i prijenosom kutova α , odnosno β , tj. tako da privremena točka M' posluži za orientaciju. Isto tako, prema poznatim a , b i γ , te uz uvjet da je kut $\gamma' = 180^\circ - \gamma$ malen, odnosno da je točka M' blizu pravca, dobiva se

$$\alpha = \frac{a\gamma'}{a+b}, \quad \beta = \frac{b\gamma'}{a+b}. \quad (16)$$

Kad su poznati kutovi α i β , tada se i točka M može točnije iskolčiti s privremene točke M' ; dužina x odmjerava se pod kutom $(90^\circ - \alpha)$ orientirajući se na točku A , odnosno pod kutom $(90^\circ - \beta)$ s orientacijom na točku B .

Trigonometrijsko rješenje. Ako između pravaca AB koji treba iskolčiti postoje zapreke kao na sl. 11, mogu se postaviti i dvije pomoćne točke (C i D). Za rješenje zadatka u figuri $ABCD$ potrebno je izmjeriti jednu stranicu (b) i kutove $1, \dots, 6$. Međutim, radi kontrole redovito se mijere svi kutovi $1, \dots, 6$, a kutno odstupanje u trokutu ACD , odnosno BCD , raspodjeljuje se podjednako na sve kutove.



Sl. 11. Trigonometrijsko rješenje iskolčenja pravca

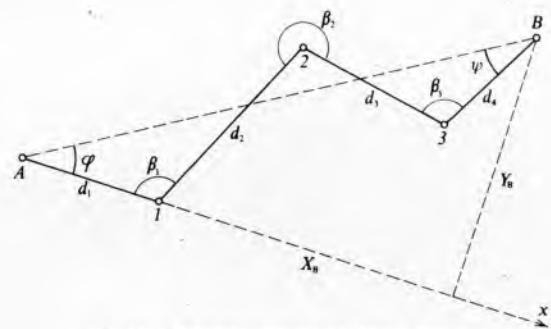
Najprije se rješava trokut ACD u kojemu su poznati svi kutovi i stranica b . Kad se izračuna zajednička stranica CD , može se rješiti i trokut BCD , tj. izračunati dužina stranice BC . Tada su u trokutu ABC poznate dvije stranice (AC i BC) i kut između njih ($2 + 3$), pa se mogu izračunati kutovi φ_1 i ψ_1 za iskolčenje pravca s točaka A i B s orientacijom na točku C . Radi kontrole mogli bi se na isti način izračunati i kutovi za iskolčenje pravca s orientacijom na točku D . Daljim rješavanjem trokuta AMC , odnosno trokuta BMC , izračuna se dužina CM , obilježi na terenu točka M i prema poznatom kutu ϵ iskolči se dio pravca između dvije zapreke.

Poligonsko rješenje. Između točaka A i B , koje se ne dogledaju (sl. 12), postavlja se slobodni poligonski vlak s potrebnim brojem točaka $1, 2, \dots$. U vlaku se mijere svi prijelomni kutovi β_1, β_2, \dots i sve stranice d_1, d_2, \dots . Najprikladnije je točku A uzeti kao početak koordinatnog sustava, a prvu stranicu ($A-1$) kao apscisnu os. U tom sustavu izračunava se poligonski vlak i dobivaju koordinate točke B (X_B, Y_B). Pomoću kuta φ , za koji vrijedi

$$\tan \varphi = \frac{Y_B}{X_B}, \quad (17)$$

pravac AB može se iskolčavati iz točke A orijentacijom teodolita na točku I poligonskog vlaka. Za iskolčenje pravca od točke B prema A kut ψ ima vrijednost

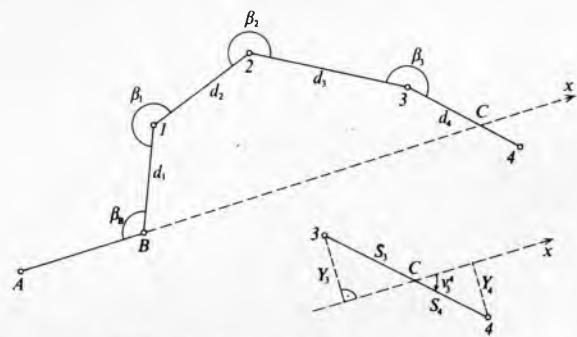
$$\psi = (n-2)180^\circ - (\varphi + \sum \beta), \quad (18)$$



Sl. 12. Poligonsko rješenje iskolčenja pravca

gdje je n broj svih kutova u zatvorenom mnogokutu (za sl. 12 $n = 5$).

Iskolčenje u produljenju zadanog pravca. Primjenjuje se pri iskolčenju manjih tunela, prosjecanju pravca kroz šume i sl. Neka je pravac zadan točkama A i B (sl. 13), a na nekoj udaljenosti (iza neke zapreke) treba u produljenju pronaći točku C na pravcu.



Sl. 13. Iskolčenje u produljenju zadanog pravca

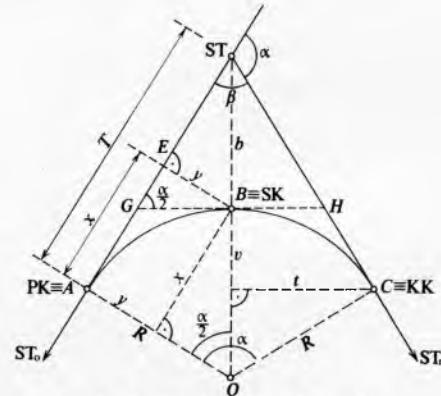
Na terenu se postavi poligonski vlak, priključen na točku B i orijentiran prema točki A . Izmjere se kutovi β_i i dužine d_i . Vlak se izračuna u koordinatnom sustavu kojemu je os x pravac AB . Ordinate poligonskih točaka daju udaljenost od pravca. Da bi se iskočila točka C na pravcu, udaljenost S_3 ili S_4 bit će prema skici na sl. 13:

$$S_3 = \frac{Y_3}{\sin v_3^4}, \quad S_4 = \frac{Y_4}{\sin v_3^4}. \quad (19)$$

Prijenosom poznatog smjernog kuta v_3^4 pravac AB može se po potrebi iskolčavati dalje s točke C .

Iskolčenje točaka kružnog luka

Kad se iskolčuje kružni luk, razlikuje se iskolčenje glavnih točaka i iskolčenje detaljnijih točaka kružnog luka. Metode za iskolčenje glavnih točaka kružnog luka ovise o pristupačnosti



Sl. 14. Glavni elementi kružnog luka

sjecišta tangenata na krajnje točke luka, a za iskolčenje *detaljnih točaka kružnog luka* primjenjuje se ortogonalna, polarna i poligonska metoda, te približne metode (metoda uzastopnih jednakih tjetiva, metoda četvrtina i metoda umetanja točaka).

Sjedište tangenata je pristupačno. Kružni luk određen je polumjerom R i središnjim kutom α (sl. 14). Glavne točke kružnog luka obilježuju se u smjeru stacionaže trase: PK početak kružnog luka, SK sredina kružnog luka i KK kraj kružnog luka. Polumjer R redovito je zadan projektom. Vršni kut β može se izračunati na osnovi poznatih koordinata točaka tangencijalnog poligona ili izmjeriti na terenu. Zbroj središnjeg i vršnog kuta iznosi:

$$\alpha + \beta = 180^\circ. \quad (20)$$

Ostali glavni elementi kružnog luka mogu se izračunati pomoću R i α prema formulama:

$$\text{tangenta } T = R \tan \frac{\alpha}{2}, \quad (21)$$

$$\text{bisektrisa } b = O(ST) - R = R(\sec \frac{\alpha}{2} - 1), \quad (22)$$

$$\text{apscisa } x = t = R \sin \frac{\alpha}{2}, \quad (23)$$

$$\text{ordinata } y = v = R(1 - \cos \frac{\alpha}{2}), \quad (24)$$

$$\text{pomoćna tangentna } GB = AG = R \tan \frac{\alpha}{4}, \quad (25)$$

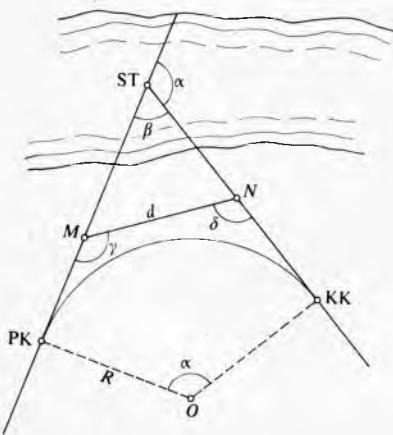
$$\text{duljina luka } AC \quad L = R \frac{\pi \alpha}{180^\circ}. \quad (26)$$

Radi lakšeg računanja postoje različite tablice. Najpoznatije su Sarrazinove, u kojima su funkcije: $\tan \frac{\alpha}{2}$, $\sec \frac{\alpha}{2} - 1$, $\sin \frac{\alpha}{2}$, $1 - \cos \frac{\alpha}{2}$, $\frac{\pi \alpha}{180^\circ}$, pomoću kojih se množenjem s polumjerom R dobivaju vrijednosti elemenata kružnog luka prema relacijama (21) do (26).

Kad su sjedišta tangenata (ST) na terenu obilježena, glavne točke kružnog luka mogu se iskolčiti: točke PK i KK odmjeravanjem dužine T u smjeru prema susjednim točkama tangencijalnog poligona, točka SK ortogonalno pomoću apscise x i ordinate y , ili polarno sa točke ST odmjeravanjem bisektrise b pod kutom $\frac{\beta}{2}$, ili preko točke G odmjeravanjem $GB = AG$

pod kutom $\frac{\alpha}{2}$.

Sjedište tangenata nije pristupačno. Ako se neko sjedište glavnih tangenata ST iz bilo kojih razloga ne može iskolčiti,



Sl. 15. Određivanje elemenata kad je nepristupačno sjedište tangenata

na terenu se obilježuju pomoćna sjedišta M i N (sl. 15). Točke M i N na tangentama izabiru se tako da se međusobno mogu dogledati i da se njihova udaljenost d može nesmetano izmjeriti.

Na točkama M i N izmjere se kutovi γ i δ , pa će biti:

$$\beta = \gamma + \delta - 180^\circ; \quad \alpha = 360^\circ - (\gamma + \delta). \quad (27)$$

Udaljenost tih točaka od ST dobit će se prema sinusovu poučku:

$$M(ST) = \frac{d \sin \delta}{\sin \beta}; \quad N(ST) = \frac{d \sin \gamma}{\sin \beta}. \quad (28)$$

Pomoću polumjera R i središnjeg kuta α , svi se elementi luka mogu izračunati iz relacija (21) do (26). Poznajući duljinu tangente T i udaljenosti (28), početak PK i kraj kružnog luka KK iskolčit će se s točaka M i N .

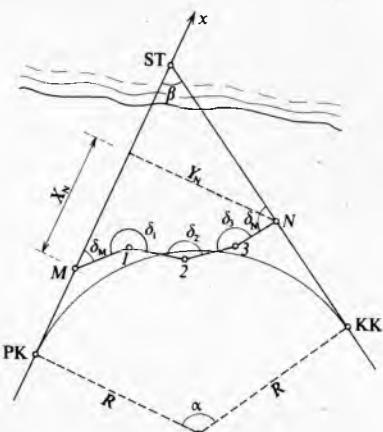
Kad su veće terenske zapreke, odnosno kad se ne mogu neposredno dogledati točke M i N , one se povezuju poligonskim vlastom $M, 1, 2, \dots, N$ (sl. 16). U vlastu se mjere svi kutovi i sve stranice. Sada je:

$$\beta = (n-2)180^\circ - \Sigma \delta; \quad \alpha = 180^\circ - \beta. \quad (29)$$

Ako se zna R i α , ostali se elementi računaju iz relacija (21) do (26). Da bi se doble udaljenosti $M(ST)$ i $N(ST)$, čime se zadat svodi na prethodni slučaj, najprikladnije je poligonski vlast računati u koordinatnom sustavu kojega je početak u točki M , a os x se podudara s glavnom tangentom. Iz koordinata točke N bit će tada:

$$M(ST) = X_N \pm Y_N \cot \beta, \quad N(ST) = \frac{Y_N}{\sin \beta}. \quad (30)$$

U praksi se pomoćne točke M i N postavljaju također i kad sjedište glavnih tangenata ST pada daleko od kružnog luka. Tada su osnovne točke za iskolčenje bliže trasi, što olakšava terenske radove.



Sl. 16. Poligonsko rješenje za određivanje elemenata kad je nepristupačno sjedište tangenata

Ortogonalna metoda. Vrijednosti apscisa x (sl. 17) odabiru se prema terenskim prilikama koje uvjetuju iskolčenje detaljnih točaka $1, 2, \dots, P$, ili se te vrijednosti odabiru tako da iznose zaokruženo 5, 10, ..., 50 metara. Vrijednostima apscisa odgovaraju vrijednosti ordinata:

$$y = R - \sqrt{R^2 - x^2} = R - R \left(1 - \frac{x^2}{R^2}\right)^{\frac{1}{2}}, \quad (31)$$

gdje je R polumjer kružnice. Ako se izraz u zagradi razvije prema binomnom poučku i zadrže prva dva člana reda, dobiva se jednostavniji približni izraz:

$$y \approx \frac{x^2}{2R}. \quad (32)$$

Za praksu je, međutim, povoljnije da se točke trase obilježuju na zaokruženim vrijednostima stacionaže. Prema odabranoj duljini luka l , središnji je kut

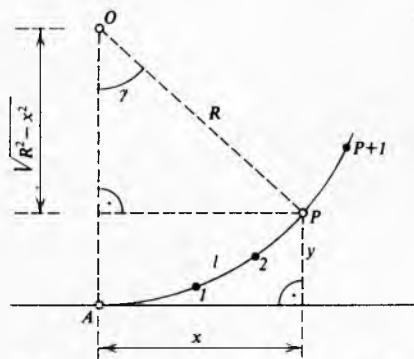
$$\gamma = \frac{l}{R} \varrho, \quad (33)$$

a koordinate točke P luka

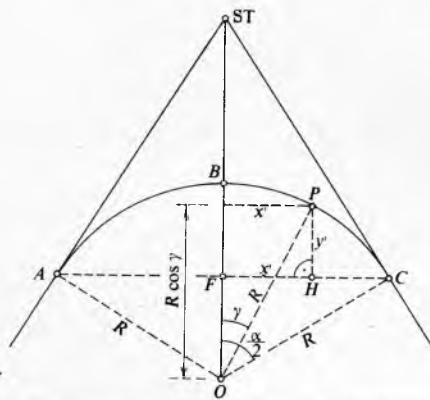
$$x = R \sin \gamma, \quad (34)$$

$$y = R(1 - \cos \gamma) = 2R \sin^2 \frac{\gamma}{2}. \quad (35)$$

Kao linija iskolčenja, osim glavnih tangenata, može se upotrijebiti i bilo koja druga tangenta kružnog luka.



Sl. 17. Ortogonalno iskolčenje kružnog luka od tangente



Sl. 18. Ortogonalno iskolčenje kružnog luka od tetine

Za iskolčenje točaka ortogonalnom metodom od tetine (sl. 18) pravokutne koordinate se računaju prema formulama:

$$x' = R \sin \gamma, \quad (36)$$

$$y' = R \left(\cos \gamma - \cos \frac{\alpha}{2} \right). \quad (37)$$

Polarna metoda. Za kružnicu vrijedi da jednakim središnjim kutovima pripadaju jednaki lukovi i da je za isti luk obodni kut jednak polovici središnjeg kuta. Neka se, npr., kružni luk iskolčuje s glavne točke $PK \equiv A$ (sl. 19). Teodolit u točki A orientira se prema glavnoj tangenti $A(ST)$. Na osnovi odabrane udaljenosti $t_1 = Al$ na kojoj treba obilježiti prvu točku smjer je iskolčenja određen kutom δ_1 prema formuli

$$\delta_1 = \frac{\gamma_1}{2}; \quad \sin \delta_1 = \frac{t_1}{2R}. \quad (38)$$

Sljedeća točka 2 iskolčuje se odmjeravanjem udaljenosti t_2 od već obilježene točke 1. Smjer iskolčenja, kut δ_2 , računa se na osnovi tetine t_2 , pa je

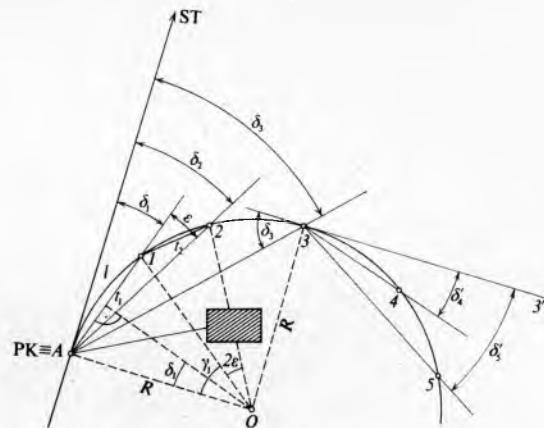
$$\sin \varepsilon = \frac{t_2}{2R}; \quad \delta_2 = \delta_1 + \varepsilon. \quad (39)$$

Točka 3 iskolčuje se odmjeravanjem dužine od točke 2 s kutom δ_3 itd.

U praksi se detaljne točke kružnog luka 1, 2, ... redovito obilježuju na kraćim međusobnim udaljenostima, gdje se duljina tetine može zamijeniti duljinom luka: $t = l$. Uz pogrešku centimetra ta je zamjena moguća kad je $l < 0,1R$, a za pogrešku milimetra kad je $l < 0,05R$. Tada se, iako se pri iskolčenju odmjeravaju tetine, kutovi δ računaju jednostavnije pomoći lukova:

$$\delta = \frac{l \varrho}{2R}. \quad (40)$$

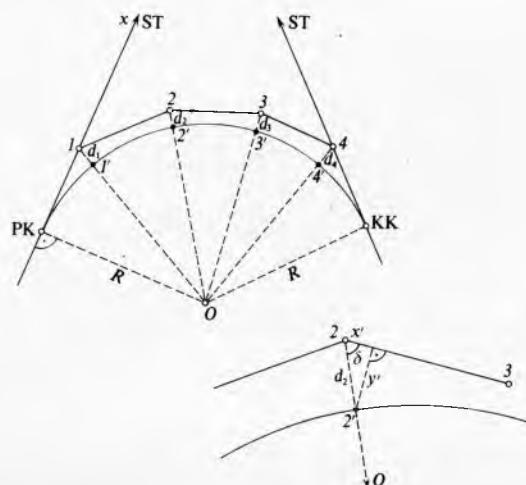
Detaljne točke kružnog luka u praksi se iskolčuju najčešće sa već iskolčenih glavnih točaka PK, SK i KK. Međutim, kao stajalište teodolita može poslužiti i bilo koja druga, već iskolčena detaljna točka. Ako se, npr., točka 4 (sl. 19) zbog zapreka ne dogleda s točke A , instrument se premješta na točku 3. Tada se može orijentirati prema prethodnom stajalištu A ; s poznatim kutom δ_3 određen je smjer tangente $3-3'$ u točki 3 kružnog luka. Točka 4 iskolčuje se tada odmjeravanjem dužine 34 i prijenosom kuta δ_4 dobivenog prema (40), točka 5 odmjeravanjem od točke 4 itd.



Sl. 19. Polarno iskolčenje kružnog luka

Za iskolčenje kružnih lukova ortogonalnom i polarnom metodom postoje različite praktične tablice. Elementi iskolčenja x , y i δ tabelirani su na osnovi zaokruženih vrijednosti argumenta R i l . U posljednje vrijeme upotreboom džepnih električnih računala računanje potrebnih elemenata na terenu znatno je jednostavnije.

Poligonska metoda. Ta se metoda upotrebljava kad je potrebna veća točnost. Poligonski vlak 1, 2, ... postavlja se blizu



Sl. 20. Poligonska metoda iskolčenja kružnog luka

osi trase, tako da krajnje točke budu na tangentama (sl. 20). Koordinate točaka vlaka računat će se u sustavu kojega je početak u PK, a pozitivni smjer osi x podudara se s glavnom tangentom. Iz poznatih koordinata središta kružnog luka O (O, R) i koordinata poligonskih točaka računaju se udaljenosti O_1, O_2, O_3, \dots . Iz razlike tih duljina i polumjera R vidi se koliko su poligonske točke udaljene od točaka $1', 2', \dots$ na kružnom luku:

$$\begin{aligned} d_1 &= \overline{O_1} - R, \\ d_2 &= \overline{O_2} - R, \end{aligned} \quad (41)$$

Ako su te razlike male, točke na luku iskolčuju se odmjeranjem približno u smjeru središta kružnice. Ako su te razlike veće, točke na trasi iskolčuju se polarnom ili ortogonalnom metodom. Kad se primjenjuje polarna metoda, kut δ izračunava se iz razlike smjerova: $\delta = v_2^0 - v_2^3$ za iskolčenje točke $2'$. Ako se zna kut δ i udaljenost d , moguće je izračunati i elemente ortogonalnog iskolčenja x' i y' .

Metoda uzastopnih jednakih tetiva. Neka je prva detaljna točka 1 iskolčena ortogonalno pomoću elemenata x (34) i y (35). Iz sl. 21 proizlazi da je

$$\sin \frac{\gamma}{2} = \frac{t}{2R}. \quad (42)$$

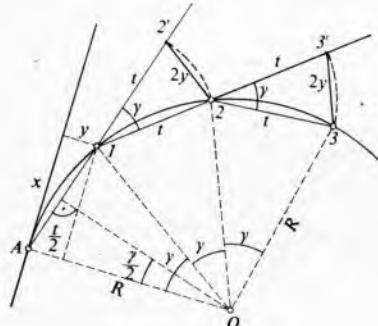
Ako se ta vrijednost uvrsti u (35), dobiva se

$$y = \frac{t^2}{2R}. \quad (43)$$

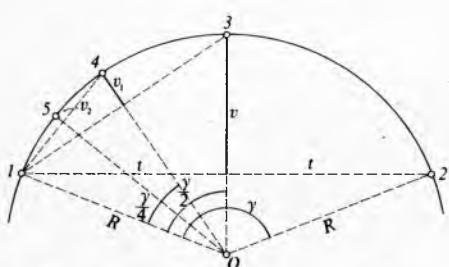
Iz toga izraza, te iz sličnosti trokuta $O_1 2$ i $12'$ dobiva se

$$\overline{22'} = \frac{t^2}{R} = 2y. \quad (44)$$

Prema tome, točka 2 iskolčuje se na sljedeći način: pravac $A1$ produžuje se preko točke 1 za duljinu tetive t pa se dobiva točka $2'$; vrpca se zatim na udaljenosti t zakrene oko točke 1 i pomoću duljine $2y$ obilježi na krugu točka 2 . Sljedeća točka 3 iskolčuje se produljenjem tetive 12 itd.



Sl. 21. Iskolčenje metodom uzastopnih jednakih tetiva



Sl. 22. Iskolčenje kružnog luka metodom četvrtina

Metoda četvrtina. Ta je metoda pogodna ako između već iskolčenih točaka treba na jednakim udaljenostima gušće iskolčiti točke na krugu. Visina luka v (sl. 22) na polovici tetive

12, prema (24) i analogno prema (32), bit će:

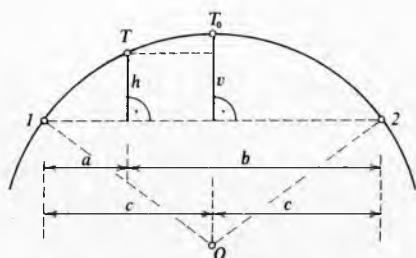
$$v \approx \frac{t^2}{2R}. \quad (45)$$

Za iskolčenje točaka na sredini lukova 13 , odnosno 23 i za dalje raspolažanje, može se približno postaviti da je

$$v_1 \approx \frac{v}{4}; \quad v_2 \approx \frac{v_1}{4}; \quad v_3 \approx \frac{v_2}{4}; \quad \text{itd.} \quad (46)$$

Međutočke iskolčuju se, dakle, ortogonalno, odmjeravanjem visina v na polovicama tetive. Točnost je to veća što su lukovi manji.

Umetanje točaka često se primjenjuje kad su na već iskolčenoj trasi neke točke uništene, pa ih treba obnoviti. Na osnovi poznatog polumjera kružnog luka R i izmjerene duljine tetive između dvije postojeće točke trase 1 i 2 (sl. 23), izgubljena točka na sredini T_0 iskolčuje se ortogonalno od tetive 12 .



Sl. 23. Umetanje točaka kružnog luka

Prema relaciji (45) visina je luka

$$v \approx \frac{c^2}{2R}. \quad (47)$$

Za iskolčenje točke T na bilo kojem drugom mjestu luka bit će

$$h = v - \frac{(b - c)^2}{2R}. \quad (48)$$

Ako se za v uvrsti (47) i postavi da je

$$c = \frac{a + b}{2}, \quad (49)$$

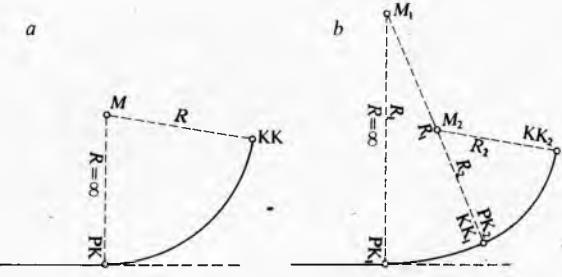
dobiva se za visinu luka

$$h = \frac{ab}{2R}. \quad (50)$$

Prijelazne krivine

Kad su se željeznička i cestovna vozila kretala malom brzinom, prometnice su se projektirale tako da je trasa prelazila iz pravca neposredno u kružni luk (sl. 24a). Međutim, pri kretanju vozila u krivini pojavljuje se centrifugalna sila. Pri prijelazu iz pravca neposredno u kružni luk centrifugalna sila pojavljuje se na početku luka u punom iznosu. Na željezničkim prugama vanjska se tračnica na tome mjestu više troši, jer na njoj djeluje bočni udarni tlak. Putnici u vozilu osjećaju trzaj, odnosno tlak koji djeluje u smjeru vanjske strane krivine. Tlak je to veći što je brzina vozila veća, a polumjer krivine manji.

U početku gradnje željeznicu, zbog malih brzina, navedeni nedostaci nisu bili izraziti, ali s povećanjem brzine ti su nedostaci bili izraziti. Zato su se



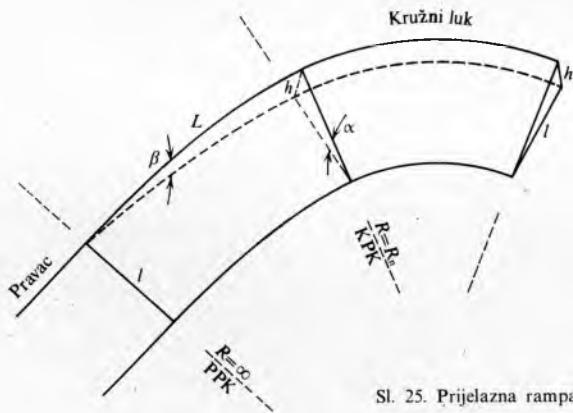
Sl. 24. Razvoj prijelaznih krivina

između pravca i kružnog luka najprije umetali kružni lukovi dvostruko većeg polumjera (sl. 24b), a zatim su se primjenjivale i trostrukе (košaraste) kružne krivine. Tako su spomenuti nedostaci znatno ublaženi, ali nisu potpuno otklojeni. Bočni se udarni tlak još uvek pojavljivao na mjestima promjene polumjera krivine, iako su udari bili blazi.

Kako su se brzine vozila i dalje povećavale, između pravca i kružnog luka počela se izvoditi prijelazna krivina ili prijelaznica. To je krivulja kojoj se polumjer zakrivenosti kontinuirano smanjuje od $R = \infty$ (pravac) do vrijednosti polumjera kružnog luka R_n (sl. 26). Tada se bočni tlak povećava kontinuirano, bez udara, od nule na početak prijelaznice do svoje punе vrijednosti na njenu kraju, odnosno na početak kružnog luka. Povećanje tlaka to je polaganje što je prijelaznica dulja.

Prijelazna krivina ima i druge prednosti. Po duljini prijelaznice kontinuirano se mijenja i nagib poprečnog profila, a kad je polumjer mali, koloz se ceste proširuje. Prometnice, pogotovo one s duljim prijelaznicama, djeluju uskladeno, što ima estetski i psihološki efekt.

Prijelazna rampa i jednadžba prijelazne krivine. Da bi se umanjilo djelovanje centrifugalne sile, prometnica ima u krivini jednostrani poprečni nagib. Na željezničkoj pruzi izvodi se nadvišenje vanjske tračnice, a na cesti izdizanje vanjske strane kolovoza; poprečni profil nagnut je prema unutrašnjoj strani krivine. Prijelaz poprečnog profila trase u pravcu prema poprečnom profilu u krivini (nagib) izvodi se kontinuirano i zahtijeva prijelaznu rampu. Ona se najlakše gradi i održava ako nadvišenje h (sl. 25) raste linearno, od $h = 0$ na početku krivine do punog nadvišenja h za profil na početku kružnog luka. Prijelazna se rampa podudara, dakle, s prijelaznom krivinom. Jednadžba prijelazne krivine dobiva se iz uvjeta da u svakoj točki krivine centrifugalna sila treba biti kompenzirana nagibom poprečnog profila.



Sl. 25. Prijelazna rampa

Polazeći od uvjeta ravnoteže vozila koje se kreće po krivini (v. Cesta, TE2, str. 602), poprečni je nagib:

$$i_p = \tan \alpha \frac{v^2}{gR}, \quad (51)$$

gdje je v brzina vozila, g ubrzanje Zemljine težine, a R polumjer krivine. Kako je $\tan \alpha = \frac{h}{e}$, gdje je e širina kolovoza, nadvišenje je na vanjskom rubu kolovoza

$$h = \frac{ev^2}{gR}. \quad (52)$$

Izraženo pomoću uzdužnog nagiba,

$$i_u = \tan \beta = \frac{h}{L}, \quad (53)$$

nadvišenje iznosi

$$h = L i_u. \quad (54)$$

Iz jednakosti desnih strana izraza (52) i (54) dobiva se

$$R = \left(\frac{ev^2}{gi_u} \right) \frac{1}{L}. \quad (55)$$

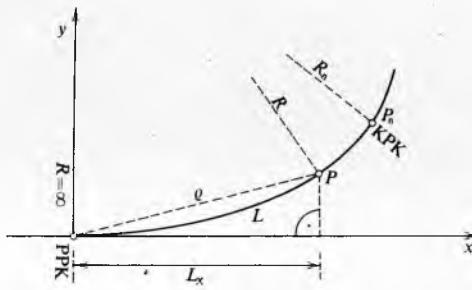
Za zadatu brzinu vozila v i uzdužni nagib i_u izraz je u zagradi konstanta C , pa je konačno:

$$RL = C. \quad (56)$$

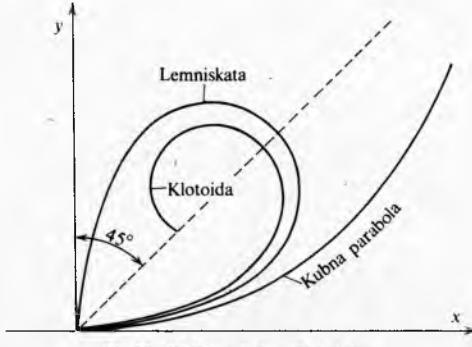
Konstanta C naziva se parametrom prijelazne krivine. Prema tome, za prijelaznu rampu kojoj se poprečni nagib linearno mijenja od 0 na početku do nagiba i_p (51) koji odgovara kružnom luku polumjera R_n , između pravca i kružnog luka treba umetnuti prijelaznu krivinu prema relaciji (56). Na početku prijelazne krivine, kad je $L = 0$, bit će $R = \infty$ (pravac). S porastom udaljenosti L od početka se polumjer R smanjuje do vrijednosti polumjera kružne krivine R_n . U zajedničkoj točki s kružnim lukom vrijednost L jednaka je duljini prijelazne krivine.

Razumije se da je za trasiranje bitno da prijelazna krivina i pravac, odnosno prijelazna krivina i kružni luk, u zajedničkim točkama imaju i zajedničke tangente.

Oblici prijelaznih krivina. Sve postavljene uvjete za prijelaznu krivinu zadovoljava krivulja koja se zove radioidna spirala ili *klotoida*. To je krivulja kojoj je u svakoj točki P (sl. 26) umnožak polumjera zakrivenosti R i duljine luka L konstantan (56). Budući da analitički izraz za klotoidu nije jednostavan, kao prijelazne krivine upotrebljavaju se i lemniskata i kubna parabola (sl. 27).



Sl. 26. Uz definiciju klotoide, kubne parabole, lemniskate



Sl. 27. Oblici prijelaznih krivina

Kao aproksimacija klotoide često se, pogotovo za željezničke pruge, primjenjuje kubna parabola. To je krivulja kojoj je u svakoj točki umnožak polumjera zakrivenosti R i projekcije luka L_x (sl. 26) na glavnu tangentu konstantan:

$$RL_x = C. \quad (57)$$

Rjeđe se upotrebljava lemniskata. Primjenjuje se za serpentine, a osobito je prikladna za polarno iskolčenje. To je krivulja kojoj je umnožak polumjera R i teticne ϱ (sl. 26) u bilo kojoj točki konstantan:

$$R\varrho = C. \quad (58)$$

Na svojim početnim dijelovima klotoida, kubna parabola i lemniskata gotovo se podudaraju (sl. 27). Zbog toga za manje duljine prijelaznica izbor oblike krivulje nema većeg značenja. To je i razlog da se za kraće prijelaznice, odnosno za manje brzine vožnje, više upotrebljavala kubna parabola, jer je tada određivanje elemenata iskolčenja mnogo jednostavnije. U posljednje vrijeme, međutim, uz različite prikladne tablice i džepna električna računala, najviše se krivine izvode prema klotoidi, koja je teorijski najbolja prijelazna krivina.

Klotoida. Polazeći od opće jednadžbe prijelazne krivine (56), za diferencijalne promjene luka vrijedi (sl. 28):

$$R = \frac{dL}{d\tau} = \frac{C}{L}, \quad (59)$$

odnosno

$$L dL = C d\tau. \quad (60)$$

Integriranjem ove diferencijalne jednadžbe (60) u granicama od 0 do L , odnosno od 0 do τ ,

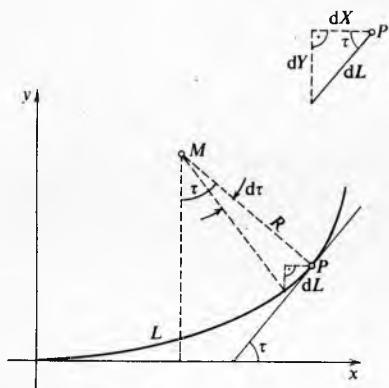
$$\int_0^L L dL - C \int_0^\tau d\tau = 0 \quad (61)$$

dobiva se

$$\frac{L^2}{2} - C\tau = 0, \quad (62)$$

a odатle

$$\tau = \frac{L^2}{2C}. \quad (63)$$



Sl. 28. Klotoida

Uvezši u obzir (63), za diferencijalnu promjenu luka diferencijalne su promjene koordinata

$$dX = \cos \tau dL = \cos \frac{L^2}{2C} dL, \quad (64a)$$

$$dY = \sin \tau dL = \sin \frac{L^2}{2C} dL. \quad (64b)$$

Pravokutne koordinate bilo koje točke na krivulji dobivaju se integriranjem izraza (64) u granicama od 0 do L , pa je

$$X = \int_0^L \cos \frac{L^2}{2C} dL, \quad (65a)$$

$$Y = \int_0^L \sin \frac{L^2}{2C} dL. \quad (65b)$$

To su Fresnelovi integrali koji se mogu rješiti razvijanjem trigonometrijskih funkcija u redove i zatim integriranjem pojedinih članova. Tada se dobiva:

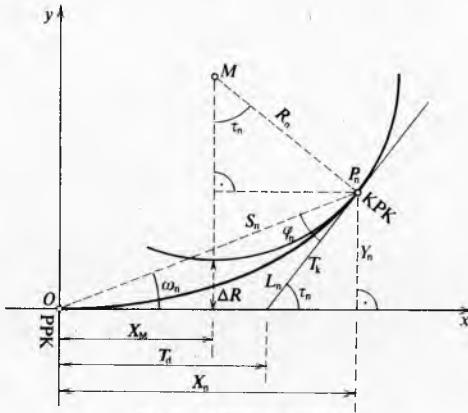
$$X = L - \frac{L^5}{40C^2} + \frac{L^9}{3456C^4} - \dots, \quad (66a)$$

$$Y = \frac{L^3}{6C} - \frac{L^7}{336C^3} + \frac{L^{11}}{42240C^5} - \dots. \quad (66b)$$

Vrijednost tih redova brzo konvergira, pa se u praksi računa samo sa prva dva ili tri člana. Prema tome, ako se poznat parametar C i duljina luka L , mogu se izračunati pravokutne koordinate za svaku točku P na klotoidi.

Glavni elementi klotoide. Za klotoidu, kao prijelaznu krivulju između pravca i kružnog luka, glavne točke jesu (sl. 29): O početna točka prijelazne krivine (PPK), odnosno klotoide, što je ujedno i ishodište koordinatnog sustava; P_n zajednička točka klotoide i kružnog luka, krajnja točka prijelazne krivine (KPK), odnosno početna točka kružnog luka (PK); M središte kružnog luka.

Elementi klotoide jesu: R_n polumjer kružnog luka, L_n duljina luka klotoide (duljina prijelaznice), X_n , Y_n koordinate zajedničke točke klotoide i kružnog luka, X_M , Y_M koordinate središta kružnog luka, ΔR udaljenost kružnog luka od glavne tangente, T_d udaljenost sjecišta tangente s osi x od ishodišta koordinatnog sustava, T_k duljina tangente do njenog sjecišta s osi x , S_n duljina tetine koja spaja početnu i krajnju točku klotoide, τ_n kut između tangente u zajedničkoj točki P_n i apscisne osi x (glavne tangente), ω_n kut između tetine i osi x , i φ_n kut između tetine i tangente u zajedničkoj točki P_n .



Sl. 29. Elementi klotoide

Klotoida je određena sa dva elementa ako to nisu kutni elementi. Najčešće se zadaje sa dva elementa iz relacije (56) iz koje se može izračunati treći element. Iz formule (63) dobiva se kut τ_n u kutnoj mjeri

$$\tau_n = \frac{L^2}{2C} \varrho, \quad (67)$$

gdje je $\varrho = 57,2958^\circ$. Pravokutne koordinate X_n , Y_n zajedničke točke P_n izračunavaju se prema izrazima (66) ako se za L uvrsti cijela duljina prijelaznice L_n . Ostali elementi izračunavaju se iz sljedećih relacija (sl. 29):

$$X_M = X_n - R_n \sin \tau_n, \quad (68a)$$

$$Y_M = Y_n + R_n \cos \tau_n, \quad (68b)$$

$$\Delta R = Y_M - R_n = Y_n + R_n (\cos \tau_n - 1), \quad (69)$$

$$T_d = X_n - Y_n \cot \tau_n, \quad (70)$$

$$T_k = \frac{Y_n}{\sin \tau_n}, \quad (71)$$

$$S_n = \sqrt{X_n^2 + Y_n^2} \quad (72)$$

$$\omega_n = \arctan \frac{Y_n}{X_n}, \quad (73)$$

$$\varphi_n = \tau_n - \omega_n. \quad (74)$$

Prilikom projektiranja trase i za grubu kontrolu proračuna korisno će poslužiti i dvije približne relacije:

$$X_n \approx 2X_M; \quad T_d \approx 2T_k. \quad (75)$$

Radi lakšeg određivanja elemenata klotoide postoji danas više pomoćnih tablica. U nas se često upotrebljavaju tablice B. Žnidrišića, u kojima se nalaze svi glavni elementi klotoide za okrugle vrijednosti argumenta R_n i L_n . Univerzalne su, međutim, tablice koje se temelje na tzv. jediničnoj klotoidi.

Jedinična klotoida. Jednadžba je klotoide $RL = C$ (56). Budući da je lijeva strana umnožak dviju veličina, na desnoj se strani postavlja $C = A^2$, pa je

$$RL = A^2. \quad (76)$$

Tako je klotoida definirana pomoću linearog parametra A .

Sve su klotoide međusobno slične, pa je omjer duljina istih linearnih elemenata dviju klotoida konstantan.

Klotoida s parametrom $A = 1$ naziva se jediničnom klotoidom. Da ne bi dolazio do zabune, uobičajeno je lineарне elemente jedinične klotoide označavati malim slovima. Tako za razliku od klotoide parametra A (76), jednadžba jedinične klotoide ($A = a = 1$) glasi:

$$rl = 1. \quad (77)$$

Usporedbom relacija (76) i (77) dobiva se da je $Ar = R$, $Al = L$. Takva veza između klotoide parametra A i jedinične klotoide vrijedi i za svaki drugi linearni element, pa je $Ax = X$, $Ay = Y$, $A\Delta r = \Delta R$, $A t_d = T_d$ itd. Zbog sličnosti klotoida kutni elementi su jednaki.

Za izračunavanje elemenata jedinične klotoide vrijede navedeni izrazi ako se uvrsti u njih $C = 1$.

Pomoću jedinične klotoide jednostavno se rješavaju i složeniji zadaci. To vrijedi i kad je klotoida određena i drugim kombinacijama elemenata, a ne samo elementima R_n i L_n . Najpotpunije je razrađena jedinična klotoida u tablicama Kasper-Schürba-Lorenz. U tablicama su podaci za elemente l , τ , ω , r , Δr , x_M , x , y , l/r , $\Delta r/r$, t_d i t_k za vrijednosti l koje se razlikuju za $\Delta l = 0.001$. Zbog malih razlika između susjednih vrijednosti dopuštena je linearna interpolacija.

Upotreba tablica jedinične klotoide. Neka su zadani elementi R i L . Kako je u tablicama omjer l/r , to se prema vrijednosti tog omjera, jer je $\frac{L}{R} = \frac{Al}{Ar} = \frac{l}{r}$, mogu iz tablica očitati vrijednosti svih ostalih elemenata jedinične klotoide. Te vrijednosti pomnožene linearnim parametrom $A = \sqrt{RL}$ daju elemente zadane klotoide.

Ako je klotoida zadana, npr., vrijednostima A i R , kao argument za tablice poslužiti će polumjer jedinične klotoide jer je $r = \frac{R}{A}$. Isto vrijedi kad je osim parametra A zadan još jedan linearni element; tada argument za tablice može biti $l = \frac{L}{A}$, $\Delta r = \frac{\Delta R}{A}$, $x_M = \frac{x_M}{A}$, $t_d = \frac{T_d}{A}$ itd.

Neka je klotoida zadana jednim kutnim i jednim linearnim elementom. Kako je kutni element jedinične klotoide jednak kutu kod stvarne klotoide, on je polazni argument za očitanje iz tablica, dok se pomoću linearog elementa pronalazi parametar klotoide. Ako je, npr., klotoida zadana sa τ i R , prema kutu τ mogu se iz tablica očitati ostali elementi jedinične klotoide, pa i polumjer r . Tada se može izračunati parametar A iz relacije $A = R/r$.

Iskolčenje detaljnih točaka klotoide. Osnovne su metode ortogonalno iskolčenje od glavne tangente i polarno iskolčenje sa stajališta instrumenta na PPK. Točke na klotoidi, međutim, mogu se iskolčivati i s drugih stajališta instrumenta na prijelaznici ili izvan nje, odnosno s drugih tangenata, tetiva ili pravaca blizu trase (operativnog poligona).

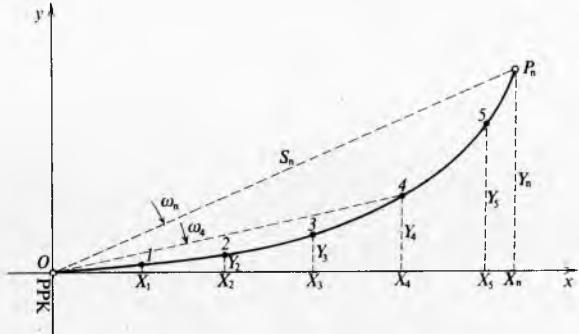
Za ortogonalno iskolčenje od glavne tangente u Žnidarskićevim tablicama nalaze se za zaokružene vrijednosti apscisa X_i pripadajuće ordinate Y_i (sl. 30). Kad se stacionira trasa, lučne se udaljenosti $\widehat{O1}$, $\widehat{12}$, $\widehat{23}$,... posebno mjere.

Primjenom jedinične klotoide, uz poznati parametar A , za lučne udaljenosti $L_1 = \widehat{O1}$, $L_2 = \widehat{12}$, $L_3 = \widehat{23}$,... izračunavaju se najprije lukovi jedinične klotoide: $l_1 = \frac{L_1}{A}$, $l_2 = \frac{L_2}{A}$, $l_3 = \frac{L_3}{A}$...

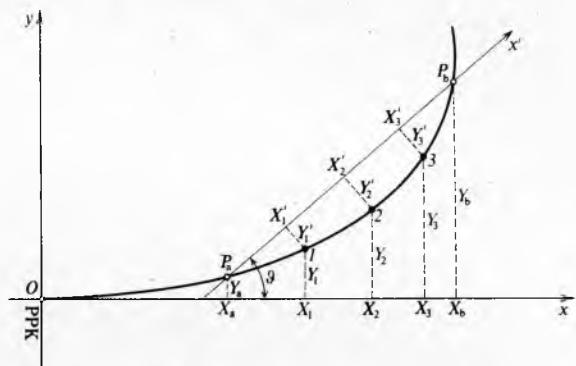
Tim lukovima, prema tablicama, odgovaraju koordinate jedinične klotoide: x_1, y_1 ; x_2, y_2 ; x_3, y_3 ... Množenjem s parametrom A dobivaju se koordinate stvarne klotoide $X_1 = Ax_1$, $Y_1 = Ay_1$; $X_2 = Ax_2$, $Y_2 = Ay_2$...

Za polarno iskolčenje, sa stajališta u točki PPK, prema duljinama luka l_1, l_2, l_3, \dots iz tablica se neposredno očitavaju pripadni kutovi $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots$ Kao i kad se iskolčuje kružni luk, svaka sljedeća detaljna točka iskolčuje se odmjeravanjem duljine od prethodno obilježene točke.

Za prijelaznice veće duljine Žnidarskićeve tablice omogućuju polarno iskolčenje s drugih stajališta instrumenta na krivulji. To je pogodno za teže i zaraštene terene, gdje se dogledanje po duljim tetivama teže ostvaruje.



Sl. 30. Iskolčenje detaljnih točaka klotoide



Sl. 31. Ortogonalno iskolčenje od tetive

Često se primjenjuje metoda ortogonalnog iskolčenja od tetive. Neka su P_a i P_b dvije točke na klotoidi, a duljine lukova tih točaka $L_a = \widehat{OP}_a$ i $L_b = \widehat{OP}_b$ (sl. 31). Klotoida ima parametar A . Treba odrediti elemente X'_i i Y'_i za ortogonalno iskolčenje točaka 1, 2 i 3 od tetive P_aP_b . Pomoću jedinične klotoide određuju se pripadni lukovi $l_a = \frac{L_a}{A}$ i $l_b = \frac{L_b}{A}$ kao argumenti pomoću kojih bi se iz tablica očitavale koordinate x_a, y_a i x_b, y_b . Pomoću razlika koordinata $\Delta x = x_b - x_a$ i $\Delta y = y_b - y_a$ određuje se kut između tetive i glavne tangente:

$$\tan \vartheta = \frac{\Delta Y}{\Delta X} = \frac{A \Delta y}{A \Delta x} = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (78)$$

i duljina tetive $D = \overline{P_a P_b}$

$$D = \frac{(Y_b - Y_a)}{\sin \vartheta} = \frac{\Delta Y}{\sin \vartheta} = \frac{A \Delta y}{\sin \vartheta} = \frac{A \Delta x}{\cos \vartheta}. \quad (79)$$

Ako su točke 1, 2 i 3, koje treba iskolčiti, određene duljinama lukova $L_1 = \widehat{O1}$, $L_2 = \widehat{12}$ i $L_3 = \widehat{23}$, na isti se način najprije određuju lukovi jedinične klotoide $l_1 = \frac{L_1}{A}$, $l_2 = \frac{L_2}{A}$ i $l_3 = \frac{L_3}{A}$ te koordinate x_1, y_1 ; x_2, y_2 ; x_3, y_3 . Poznavajući pomak x_a i y_a te rotaciju ϑ između dva koordinatna sustava, koordinate x_i i y_i mogu se transformacijom preračunati u koordinate x'_i i y'_i ; množenjem s parametrom klotoide A dobivaju se elementi za iskolčenje od tetive $X_i = Ax_i$ i $Y_i = Ay_i$.

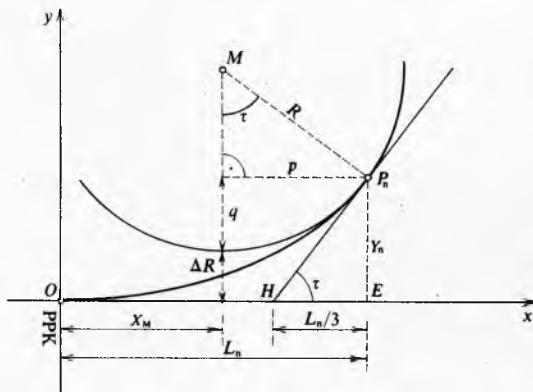
Na isti način mogu se izračunavati elementi iskolčenja točaka krivulje na produženju neke teteve.

Kubna parabola kao prijelaznica zadržala se za trasiranje željezničkih pruga do danas, jer je ona određena jednostavnim analitičkim izrazom. Jednadžba kubne parabole, koja ima isti parametar kao klotoida, odgovara prvom članu reda (66b), ako se luk L zamjeni projekcijom L_x na glavnu tangentu H , pa je

$$Y = \frac{1}{6C} L_x^3. \quad (80)$$

Budući da relacija (57) vrijedi za bilo koju točku parabole, za točku P_n (sl. 32) vrijedi $R L_n = C$, gdje je L_n duljina projekcije parabole od ishodišta do točke P_n . Ako se vrijednost za C uvrsti u (80), dobiva se:

$$Y = \frac{1}{6R L_n} L_x^3 = m L_x^3. \quad (81)$$



Sl. 32. Kubna parabola kao prijelazna krivina

Ako se u taj izraz umjesto L_x uvrsti apscisa krajnje točke prijelaznice L_n , dobiva se za ordinatu točke P_n

$$Y_n = \frac{L_n^2}{6R} \quad (82)$$

Ostali elementi dobivaju se polazeći od svojstva kubne parabole da je projekcija na apscisu bilo koje suptangente parabole jednaka trećini apscise dodirne točke $HE = \frac{L_n}{3}$. Iz trokuta HEP_n , uvezši u obzir (82), slijedi

$$\tan \tau = \frac{L_n}{2R}. \quad (83)$$

Za ostale elemente poslužit će približna vrijednost q dobivena iz relacije

$$q = R(1 - \cos \tau) = R(1 - \sqrt{1 - \sin^2 \tau}). \quad (84)$$

Kad se zamjeni $\sin \tau \approx \tan \tau = \frac{L_n}{2R}$, a izraz pod korijenom razvije u red, zadržavajući dva prva člana, dobiva se

$$q = \frac{L_n^2}{8R}. \quad (85)$$

Pomak kružnog luka od glavne tangente ΔR , prema (82) i (85), iznosi

$$\Delta R = Y_n - q = \frac{L_n^2}{24R} = \frac{Y_n}{4}. \quad (86)$$

Apscisa je središta kružnog luka $L_n - R \sin \tau$. Ako se zamjeni $\sin \tau \approx \tan \tau = \frac{L_n}{2R}$, dobiva se:

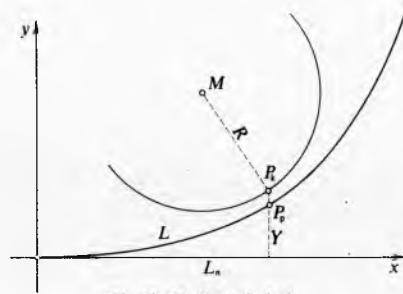
$$X_M = \frac{L_n}{2}. \quad (87)$$

Iz izvoda se vidi da izrazi (85) do (87) vrijede samo za mali kut τ , odnosno za tzv. plitke prijelaznice. U praksi je uveden kriterij prema kojemu se spomenuti izrazi mogu upotrijebiti za prijelaznice duljina $L_n < \frac{R}{3,5}$, što prema (83) odgovara kutu $\tau < 8^\circ 09'$.

Nedostatak pojednostavljene formule za kubnu parabolu (81), odnosno izraza za njenе elemente, pokazuje se kad su prijelaznice duge, jer tada parabola ne tangira kružni luk (sl. 33). Tada je ordinata krajnje točke prijelaznice manja od ordinate početne točke kružnog luka (ordinatni skok): $Y_p < Y_k$.

Navedeni se nedostaci sve više pokazuju s povećavanjem brzina, odnosno projektiranjem duljih prijelaznica. Zbog toga je M. Höfer predložio korigiranu jednadžbu kubne parabole.

Parametar se $m = \frac{1}{6RL_n}$ u (81) povećava, parabola primiče kružnom luku, pa točke P_p i P_k (sl. 33) padaju tada u istu točku. Parabola i kružni luk u toj zajedničkoj točki P_n imaju ipak različite polumjere zakrivljenosti, što je, međutim, bez praktičnog značenja.



Sl. 33. Ordinatni skok

Polazeći od opće analitičke formule za polumjer zakrivljenosti bilo koje krivulje, M. Höfer je izveo parametar korigirane parabole

$$m = \frac{1}{6RL_n} \left[1 + \left(\frac{L_n}{2R} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}. \quad (88)$$

Iz usporedbe s jednadžbom (81) vidi se da je korekcija izražena kao funkcija duljine projekcije prijelaznice na apscisnu os. Popravljena jednadžba kubne parabole glasi:

$$Y = mL_x^3 = \frac{\left[1 + \left(\frac{L_n}{2R} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}}{6RL_n} L_x^3. \quad (89)$$

Ako je poznata duljina luka prijelaznice L , njena je projekcija na apscisu (uzimajući prva dva člana reda):

$$L_n = L - \frac{L}{10} \left(\frac{L}{2R} \right)^2. \quad (90)$$

Ordinata krajnje točke popravljene parabole, kad se u (89) umjesto L_x uvrsti L_n , iznosi

$$Y_n = \frac{\left[1 + \left(\frac{L_n}{2R} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}}{6R} L_n^2. \quad (91)$$

Ostali su glavni elementi, prema sl. 32,

$$\tan \tau = \frac{3Y_n}{L_n}, \quad (92)$$

$$X_M = L_n - p = L_n - R \sin \tau, \quad (93)$$

$$\Delta R = Y_n + R(\cos \tau - 1). \quad (94)$$

Kako bi se olakšali proračuni pri projektiranju i iskolčenju, sastavljene su praktične tablice za korigiranu parabolu, iz kojih

se neposredno očitavaju vrijednosti elemenata, prema zaokruženim vrijednostima argumenata R i L . Najpoznatije su Sarrazin-Oberbeck-Höferove tablice, koje se u nas najviše upotrebljavaju. U tim tablicama su i elementi za iskolčenje detaljnih točaka parabole ortogonalnom metodom.

Popravljena kubna parabola može se tako upotrijebiti i za projektiranje duljih prijelaznica. Njena je primjena, međutim, ipak ograničena na vrijednosti kuta $\tau \leq 24^\circ 06'$. Tada, naime, u dodirnoj točki s tom tangentom parabola ima minimalni polumjer zakrivljenosti, koji dalje od te točke opet raste.

Iz istih se razloga lemniskata (sl. 27) može upotrijebiti kao prijelazna krivina do kuta $\tau = 135^\circ$. Primjena je kloidoide neograničena.

Složene krivine. Pri projektiranju prometnica, na prijelazima trase iz jednog smjera u drugi, umeću se složene krivine. Redovno se složena krivina sastoji od niza: pravac, prijelaznica, kružni luk, prijelaznica, pravac (sl. 34). S obzirom na duljinu prijelaznih krivulja, razlikuju se nesimetrične ($L_1 \neq L_2$) i simetrične ($L_1 = L_2$) krivine. Posebni oblik nastaje za $L_k = 0$, tj. kad između prijelaznica nema kružnog luka.

Nesimetrična krivina je općeniti slučaj složene krivine. Radi iskolčenja početka složene, odnosno prijelazne krivine (PPK) na jednoj i na drugoj glavnoj tangenti, potrebno je odrediti

duljine tangenata T_1 i T_2 (sl. 35). Pri tom su redovito zadani polumjer R , kut α i duljine prijelaznica L_1 i L_2 . Ako su kao prijelaznice predviđene kloidoide, umjesto duljina prijelaznica često se zadaju njihovi parametri A_1 i A_2 .

Prema obliku prijelaznih krivulja i prema zadanim elementima, za prijelaznice se najprije određuju ostali glavni elementi: X_{1M} , X_{2M} , ΔR_1 , ΔR_2 , ...

Za izračunavanje tangenata, prema Kasper-Schürba-Lorenzu, uvode se pomoćne veličine (sl. 35):

$$\Delta R_s = \frac{\Delta R_1 + \Delta R_2}{2}; \quad Z = R + \Delta R_s; \quad U = Z \tan \frac{\alpha}{2} \quad (95)$$

$$V = \Delta R_1 - \Delta R_s = \frac{\Delta R_1 - \Delta R_2}{2}; \quad W = V \cot \frac{\alpha}{2}. \quad (96)$$

Izražene pomoćnim veličinama, duljine su tangenata:

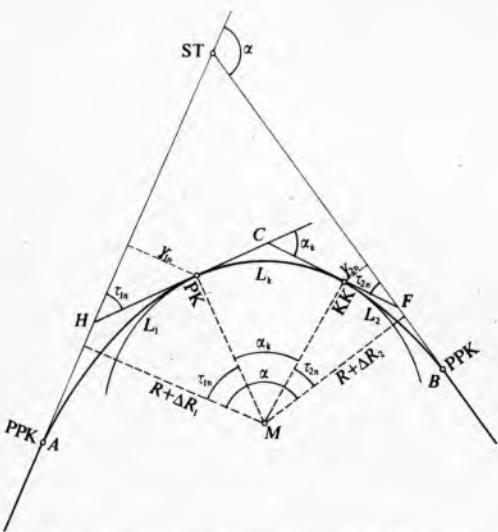
$$T_1 = X_{1M} + U - W, \quad (97a)$$

$$T_2 = X_{2M} + U + W. \quad (97b)$$

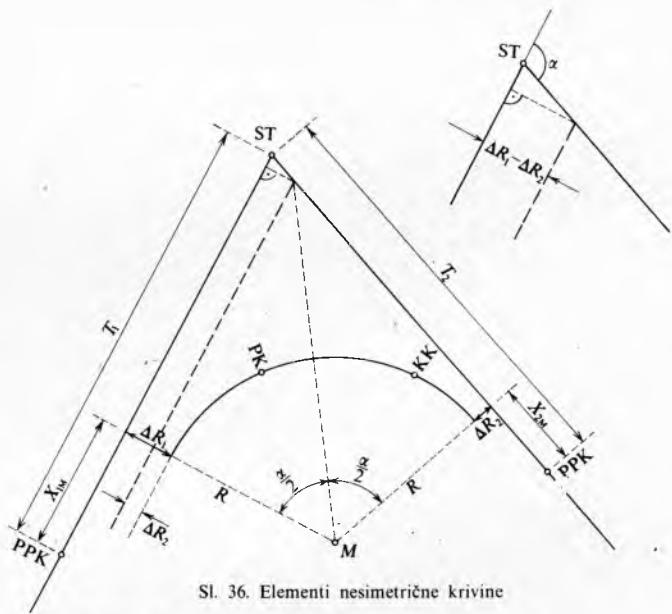
Prema B. Žnidarišiću, kad je $\Delta R_1 > \Delta R_2$ (sl. 36), tangente se računaju prema formulama:

$$T_1 = X_{1M} + (R + \Delta R_2) \tan \frac{\alpha}{2} + \frac{\Delta R_1 - \Delta R_2}{\tan \alpha}. \quad (98a)$$

$$T_2 = X_{2M} + (R + \Delta R_2) \tan \frac{\alpha}{2} + \frac{\Delta R_1 - \Delta R_2}{\sin \alpha}. \quad (98b)$$



Sl. 34. Opći oblik složene krivine između dvaju pravaca



Sl. 36. Elementi nesimetrične krivine

Ukupna duljina složene krivine iznosi (sl. 34):

$$\widehat{AB} = R \frac{\alpha_k}{\varrho} + L_1 + L_2 = R \frac{\alpha - (\tau_{1n} + \tau_{2n})}{\varrho} + L_1 + L_2. \quad (99)$$

Simetrična krivina nastaje ako je $L_1 = L_2 = L$. Tada je $\Delta R_1 = \Delta R_2 = \Delta R$ i $X_{1M} = X_{2M} = X_M$, pa su i duljine tangenata jednake $T_1 = T_2 = T$ (sl. 37). Tada su $V = 0$ i $W = 0$ (96), pa su duljine tangenata, prema (97) ili (98),

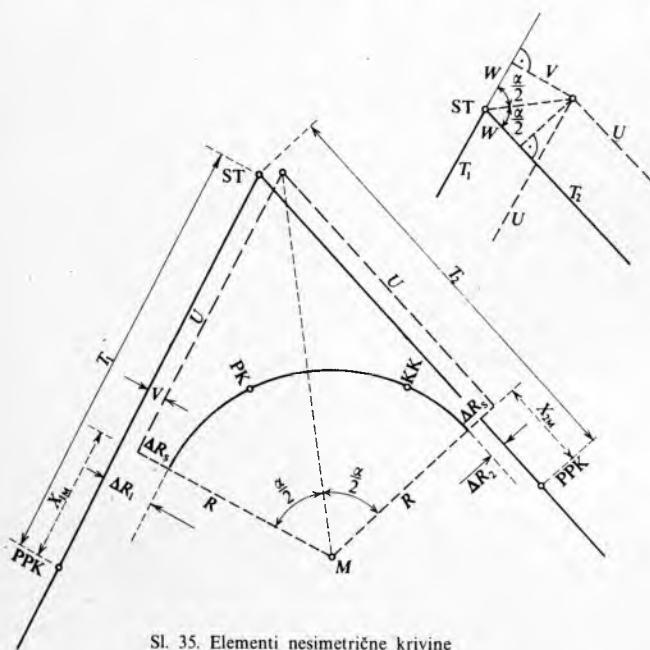
$$T = X_M + U = X_M + (R + \Delta R) \tan \frac{\alpha}{2}, \quad (100)$$

dok je ukupna duljina složene krivine

$$\widehat{AB} = 2 \widehat{AD} = 2 \left(R \frac{\alpha_k}{2\varrho} + L \right) = 2 \left(R \frac{\frac{1}{2}\alpha - \tau_n}{\varrho} + L \right). \quad (101)$$

Tada se sredina složene krivine poklapa sa sredinom kružnog luka (SK), pa su glavne tangente elementi za ortogonalno iskolčenje te točke

$$AE = X_M + R \sin \frac{\alpha}{2}, \quad (102)$$



Sl. 35. Elementi nesimetrične krivine

$$ED = R \left(1 - \cos \frac{\alpha}{2} \right) + \Delta R, \quad (103)$$

a duljina bisektrise

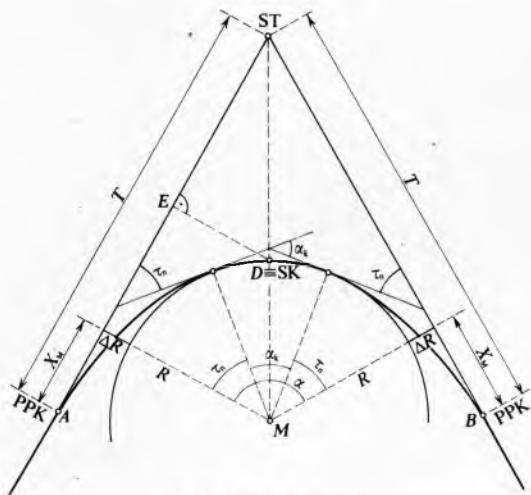
$$D(ST) = M(ST) - R = (R + \Delta R) \left(\sec \frac{\alpha}{2} - 1 \right) + \Delta R. \quad (104)$$

Navedeni izrazi vrijede za složene krivine kad su prijelaznice klotoida ili kubna parabola. Za tzv. plitke prijelaznice oblika parabole uvodi se za X_M vrijednost iz (87). Tada se, osim toga, duljina prijelaznice aproksimira kružnim lukom i pravcem

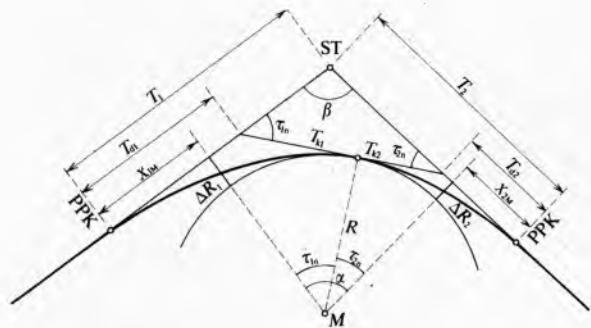
$$L = X_M + \frac{R \tau_n}{\varrho} = \frac{L_n}{2} + \frac{R \tau_n}{\varrho}, \quad (105)$$

pa se ukupna duljina složene simetrične krivine računa prema formuli

$$\widehat{AB} = 2 \widehat{AD} = R \frac{\alpha}{\varrho} + L. \quad (106)$$



Sl. 37. Simetrična krivina



Sl. 38. Nesimetrični oblik tjemene klotoide

Tjemena klotoide nastaje kad je $L_k = 0$, a može imati nesimetričan (sl. 38) i simetričan oblik. Tada je $\alpha = \tau_{ln} + \tau_{2n} = 180^\circ - \beta$, a duljine se tangenata T_1 i T_2 mogu izračunati ako se znaju vrijednosti duljih (T_d) i kraćih (T_k) tangenata obiju klotoida:

$$T_1 = T_{d1} + \frac{(T_{k1} + T_{k2}) \sin \tau_{ln}}{\sin \alpha}, \quad (107a)$$

$$T_2 = T_{d2} + \frac{(T_{k1} + T_{k2}) \sin \tau_{2n}}{\sin \alpha}. \quad (107b)$$

Za simetrični oblik vrijedi $T_{k1} = T_{k2} = T_k$, $T_{d1} = T_{d2} = T_d$ i $\tau_{ln} = \tau_{2n} = \frac{\alpha}{2}$, pa su duljine tangenata

$$T_1 = T_2 = T = T_d + \frac{T_k}{\cos \frac{\alpha}{2}}. \quad (108)$$

Ostali oblici složenih krivina. Suvremene auto-ceste imaju trase koje su većim dijelom zakriviljene, jer se trasiranje u pravcu sve više napušta (v. Cesta, TE 2, str. 605). Zbog toga se izvode ne samo dulje krivine već i složeniji njihovi oblici.

Višestruki kružni lukovi s različitim promjerima (sl. 24b) izvode se iznimno samo za blaže krivine i manje razlike polumjera susjednih kružnih lukova.

Obično se i između dva kružna luka različitih polumjera umetne prijelaznice. Klotoida umetnuta između dva kruga ima u dodirnim točkama s jednim i drugim krugom jednake polumjere zakriviljenosti i zajedničke tangente. Dakle, kao prijelaznica se ne upotrebljava početni dio klotoide od $R = \infty$ do polumjera koji odgovara većem krugu, nego dio klotoide između točaka u kojima je polumjer zakriviljenosti jednak polumjerima kružnih lukova. Složene krivine između takvih kružnih lukova nazivaju se jajastim krivinama.

Klotoida se može umetnuti kao prijelaznica između dva kružna luka uz uvjet da krug manjeg polumjera leži unutar kruga većeg polumjera (v. Cesta, TE 2, str. 607, sl. 13). Ako taj uvjet nije ispunjen, potrebno je umetnuti treći kružni luk i dvije prijelaznice. Prijelaz između dva kružna luka mogao bi se ostvariti i primjenom tzv. košarastih klotoida.

Analogno košarastim kružnim lukovima nastaju i košaraste klotoide ili klotoidni nizovi. Na klotoidu jednog parametra nastavlja se klotoida drugog parametra, a klotoide u dodirnoj točki imaju jednak polumjer zakriviljenosti i zajedničku tangentu.

U složenje oblike krivina ubrajaju se i tzv. kontrakrivine. Tada trasa prelazi iz jedne krivine u drugu krivinu suprotnog smjera, bez međupravca. Dva suprotno položena kružna luka spaja klotoida kao obratna krivulja S. Na drugim krajevima ova kružna luka redovito se spajaju s pravcima (glavnim tangentama) preko prijelaznica, pa cijela složena kontrakriva sadrži niz: prvac, klotoida, kružni luk, krivulja S, kružni luk, klotoida, prvac. Krivulja S sastoji se od dva dijela, tj. od dvije klotoide koje u dodirnoj točki imaju $R = \infty$ i zajedničku tangentu (tangenta klotoide S), a u dodirnoj točki središte zakriviljenosti prelazi na drugu stranu zajedničke tangente. Klotoide koje čine krivulju S mogu imati iste ili različite parametre.

U praksi se često između kontralukova ipak umeće kratki međupravac. Kad su prijelaznice dulje, oblik se trase tada gotovo ne mijenja, a proračun je elemenata mnogo jednostavniji, jer se svodi na dva osnovna oblika složenih krivina.

Za proračun svih složenih oblika krivina vrijedi općenito pravilo da se najprije izračunaju elementi zajedničkih točaka krivulja i da se složeni oblici svedu na više osnovnih oblika.

GEODETSKI RADOVI PRI TRASIRANJU PROMETNICA

Prometnice (ceste, željezničke pruge) po svojem su obliku dugački i relativno uski građevni objekti. Linija koja spaja središnje točke kolovoza, odnosno pruge, naziva se os prometnice. Projektirana os prometnice, ucertana u plan ili iskolčena na terenu, naziva se trasom; određena je u prostoru, a prikazuje se u horizontalnoj (položajno) i vertikalnoj projekciji (visinski).

U položajnom smislu trasa se sastoji od pravaca i krivina. Produljeni pravci, koji su ujedno glavne tangente krivina, sijeku se u sjecištima tangenata (ST). Između dviju tangenata postavlja se zaobljenje u obliku kružnih lukova i prijelaznih krivina. Trasa se položajno situira na geodetskim podlogama, tj. na kartama i planovima (v. Cesta, TE 2, str. 604).

U visinskom smislu trasa je određena nivitetom, a prikazuje se uzdužnim profilom. Niveleta trase sastoji se također od linija različitog nagiba, između kojih se umeću vertikalna zaobljenja u obliku kružnih ili paraboličnih krivulja. Osnovna je svrha uzdužnog profila da se što vjernije prikažu visinski odnosi niveleta i terena uzduž trase. Zato se uzdužni profil redovito crta u različitom mjerilu za duljine (stacionaža) i za

visine; obično su visinski odnosi prikazani u deset puta većem mjerilu.

Situiranje prometnica sa svim pratećim objektima (mostovi, vijadukti, tuneli) najčešće je povezano s geografskim odnosima i topografskim uvjetima na terenu. Stoga su pri projektiranju i gradnji prometnica, u svim njenim fazama, veoma važni geodetski radovi.

Geodetski radovi za potrebe projektiranja. Nekad se trasa utvrđivala neposredno na terenu. Prema zadanom nagibu trase, na terenu se najprije iskolčivala tzv. *nulta linija*, tj. linija jednakog pada ili uspona. Pridržavajući se osnovnih zahtjeva s obzirom na kategoriju prometnica (minimalni poljumjeri, maksimalni nagibi), unutar iskolčene nulte linije, interpolirala se zatim trasa s duljim tangentama. Nakon iskolčenja trase u drugoj su fazi izvedeni geodetski radovi za projektnu dokumentaciju: snimanje situacije uzdužnih i poprečnih profila za proračun zemljanih radova. Iskolčena trasa služila je ujedno i kao geodetska osnova za snimanje. Takvo se trasiranje sve manje primjenjuje, pogotovo za putove većeg značenja.

Danas se trasa polaze (ucrtava) na kartama ili planovima, a zatim se prenosi na teren. Projektira se u nekoliko etapa, iako se pri tom ne primjenjuje neka jedinstvena shema. Za svaku su etapu potrebni i geodetski radovi.

Tipični, potpuniji program projektiranja i geodetskih radova uključuje: a) radove na prethodnim istraživanjima za idejni projekt, b) detaljnija istraživanja i premjeravanja za glavni projekt, te c) iskolčenja i dopunska mjerena za glavni, odnosno izvedbeni projekt (detaljne nacrte).

Za *prethodna istraživanja*, tj. za generalnu studiju koja će omogućiti razradbu idejnog projekta prometnice, služe geodetske podloge manjeg mjerila, dakle i manje točnosti. Zbog toga takve karte obuhvaćaju znatno veću površinu, što omogućuje najbolji izbor trase proučavanjem topografskih i drugih karakteristika šireg područja. U našim prilikama, za tu fazu upotrebljava se kartografski materijal u mjerilima 1:100000, 1:50000, 1:25000 i 1:10000. Pri izboru trase, odnosno pri izradbi varijanta trase, treba paziti na sve zahtjeve koji s obzirom na kategoriju prometnice trebaju biti zadovoljeni. Paralelno sa studijem na kartama obilazi se teren kako bi se uočili i prikupili važniji podaci mjerodavnii za polaganje trase koji nisu označeni na kartama. Kad se raspolaže samo kartografskim materijalom starijeg datuma, koji put je potrebno dodatno terensko snimanje nekih područja.

Na temelju konačno izabrane varijante trase (ili reduciranih varijanti) razrađuje se idejni projekt. Poželjno je da je konačni položaj trase, u idejnem projektu, ucrtan na karti većeg mjerila; u našim prilikama to su mjerila 1:50000, 1:25000, 1:10000 ili 1:5000. Niveleta trase ucrtava se na uzdužnom profilu tolikom točnošću koliko je to moguće, jer se vertikalni presjek terena određuje prema slojnicama (izohipsama).

Geodetski radovi za *glavni projekt* počinju stabiliziranjem poligonskih točaka s kojih će se detaljno snimiti teren. Tzv.

operativni poligoni postavljaju se uzduž buduće prometnice, na osnovi trase utvrđene idejnim projektom (sl. 39). To treba da bude solidna geodetska osnova, osim za snimanje terena, i za kasnije iskolčenje trase. Poligonski vlakovi položajno se priključuju na postojeću triangulacijsku mrežu, a visinski na repere zemaljskog nivelmana. Kad je triangulacijska mreža uzduž trase rijetka, primjenjuje se precizna poligonometrija pomoću neke od točnijih metoda linearnih mjerena. Tada se suviše dugački i iskrivljeni poligonski vlakovi izbjegavaju jednostavnijim poligonskim mrežama, odnosno čvornim točkama u blizini trase.

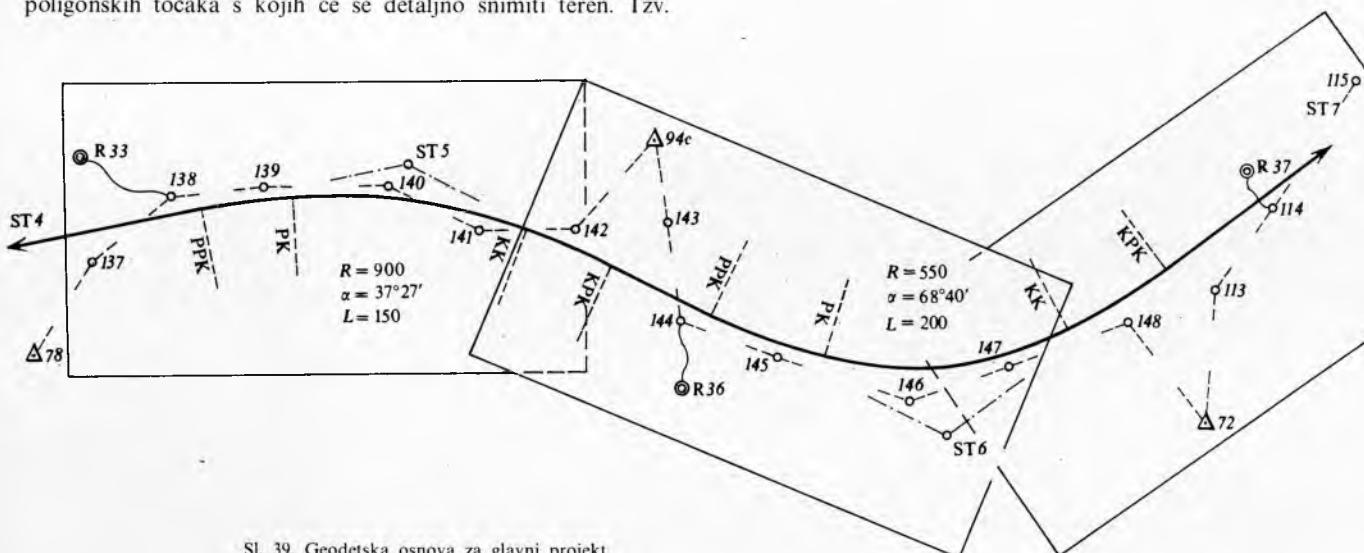
S točaka operativnog poligona snima se uži pojas terena (100–300m), najčešće tachimetrijskom metodom. Snimak služi za izradbu detaljnijih planova za glavni projekt trase. Takvi se planovi izrađuju u mjerilima 1:1000 ili 1:2000, s eviditancijom slojnice 0,5–2,0m. To su namjenski planovi, pa oni moraju sadržavati sve detalje koji su važni i karakteristični za projektirani objekt. Da bi planovi bili pregledniji, izostavljaju se nevažni detalji koji smanjuju preglednost (npr. granice parcela). Obično listovi planova svojom duljom stranom slijede tok trase. Dio plana glavnog projekta prikazan je na sl. 4 u članku *Cesta, TE 2, str. 604*.

Izrađeni planovi u većem mjerilu, s vjernijom slikom reljefa i aktualnim stanjem na području, čine geodetsku podlogu glavnog projekta.

Iskolčenje i stacioniranje trase. Trasa utvrđena na planovima, s glavnim elementima kružnih lukova i prijelaznih krivina, iskolčuje se na terenu. Mogu se primijeniti dva postupka iskolčenja: geometrijski postupak, kad se elementi trase mijere i određuju na terenu, i analitički postupak, kad se elementi trase proračunavaju prema projektnim podacima, a sve se glavne točke trase iskolčuju s operativnog poligona.

Geometrijski postupak. Na terenu se najprije iskolčuju sjecišta glavnih tangent (ST) ili, ako su ona nepristupačna, iskolčuju se pomoćne točke na glavnim tangentama. Sjecišta se mogu iskolčiti s operativnog poligona bilo kojom od metoda za iskolčenje točke. Elementi iskolčenja dobivaju se grafički, tj. neposredno se očitaju s plana, ili grafičko-analitički. Grafički se postupak primjenjuje kad blizu sjecišta koje treba obilježiti na terenu nema točaka geodetske osnove. Tada se sjecišta iskolčuju mjeranjem od bližih markantnijih objekata na terenu koji su unijeti u planove. Grafičko-analitički potupak bolje je rješenje. Koordinate sjecišta očitavaju se prema decimetarskoj mreži na planu, a elementi se iskolčenja izračunavaju, jer se znaju koordinate najbližih točaka geodetske osnove.

Pošto su sjecišta iskolčena, obilježuju se glavne tangente. Ako se susjedna sjecišta vide i nisu suviše udaljena, nisu potrebne medutočke u ovoj fazi rada. Ako se sjecišta ne vide, pravci između sjecišta obilježuju se tzv. prijenosnim koljem, na razmaku od 500 m, koje se međusobno dogleda. Zatim



Sl. 39. Geodetska osnova za glavni projekt

se mjeru prijelomni kutovi u sjecišta tangenata i duljine između sjecišta. Mjerenje duljina u ovoj se fazi često izostavlja, iako je ono važna kontrola za kasnije stacioniranje trase.

Prema izmjerenim prijelomnim kutovima u točki ST i zadanim glavnim elementima krivina računaju se ostali elementi i iskolčuju glavne točke krivina: točka PPK odmjeravanjem duljina od točke ST, a točke PK i KK odmjeravanjem od tangenata. Primjenom ortogonalne metode, iskolčiti će se zatim i sve detaljne točke krivine. Ako se radi polarnom metodom, detaljno iskolčenje krivina obično se izvodi istodobno sa stacioniranjem trase.

Stacionažom se utvrđuje položaj svake iskolčene točke na trasi, odmjeravanjem duljine od početka trase ili od koje druge točke na trasi (npr. granice dionica). Udaljenost te točke od početka trase naknadno se određuje.

Trasa se stacionira obilježavanjem na svakih 100m (hektometar), što su ujedno jedinice stacionaže. Osim hektometarskih točaka, obilježuju se i stacioniraju sve karakteristične točke terena, bilo u položajnom ili u visinskom smislu. Karakterističnim točkama u položajnom smislu smatraju se presjeci trase s potocima, kanalima, nasipima, dalekovodima, postojećim prometnicama itd., a u visinskom smislu to su točke na prijelomima terena. Na tim mjestima mjerit će se kasnije poprečni profili terena koji će poslužiti za proračun obujma zemljanih radova. Profilski kolci postavljaju se po mogućnosti na cijelim metrima stacionaže. Udaljenost poprečnih profila odabire se tako da teren između njih ima jednoličan nagib. Na ravnim terenima trasa u pravcu obilježuje se barem svakih 50m, a u krivinama na manjem razmaku.

Točke na osi najčešće se stabiliziraju kolcima u koje se, radi preciznije označke, zabije čavao. Uz svaki kolac zabije se i tablica (dačica) s upisanom stacionažom. Hektometarski kolac dobiva označku u kojoj je broj hektometara od početka trase (npr. 21 + 00). Uz ostale kolce, na tablicu se upisuje samo udaljenost od prethodnog hektometra sa znakom +, (npr. + 68,45).

Već poznate duljine između točaka na glavnim tangentama osiguravaju kontrolu pri stacioniranju. Kad se sa stacionažom stigne do početka neke krivine, prema računskim podacima elemenata krivine, izračunava se stacionaža svih glavnih točaka krivine. To je mjerodavna stacionaža koja služi kao kontrola za iskolčenje i stacioniranje detaljnih točaka krivine.

Pri stacioniranju vodi se zapisnik i crta se skica. Os trase ucrtava se u približnom mjerilu. Na toj liniji označuju se svi stabilizirani kolci. U skicu se unose i osnovni geometrijski elementi trase, označke za mjesta poprečnih profila, te situacija na udaljenosti od 50m s obje strane trase.

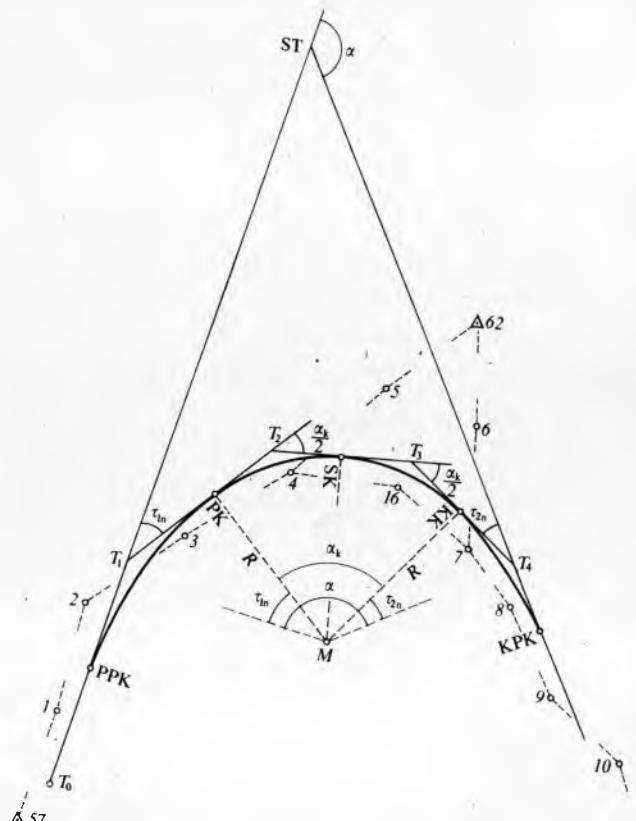
Analički postupak iskolčenja moguće je primijeniti kad na terenu, kojim prolazi trasa, postoji solidna i točnija geodetska osnova. Ako je točnost operativnog poligona manja od one koja se traži za iskolčenje trase, takav postupak nije prihvatljiv. U posljednje vrijeme upotrebo elektrooptičkih daljinomjera za linearna mjerena postiže se relativno lako, i na težim terenima, potrebna točnost geodetske osnove. Tada je analitički postupak iskolčenja bolje i ekonomičnije rješenje.

S planova se, prema decimetarskoj mreži, mogu dovoljno točno očitati koordinate svih sjecišta glavnih tangenata (ST), pa iskolčenje sjecišta tada nije potrebno. Iz očitanih koordinata točaka ST računaju se smjerni kutovi glavnih tangenata i udaljenosti između susjednih sjecišta. Prijelomni kutovi u točki ST dobivaju se kao razlike smjernih kutova glavnih tangenata. Tada se mogu izračunati svi glavni elementi krivina. U koordinatnom sustavu geodetske osnove izračunaju se zatim koordinate tangencijalnog poligona koji uključuje sve glavne točke krivine. To je poligonski vlak s točkama T_0 , PPK, T_1 , PK, T_2 , SK, T_3 , KK, T_4 , KPK... (sl. 40). Smjerni i prijelomni kutovi, te sve duljine u tom vlaku dobivaju se računski na osnovi zadanih elemenata krivina. Takvi tangencijalni poligoni mogu započeti i završiti na bilo kojem sjecištu tangenata (ST), čime se dobiva i kontrola za ispravno uvedene kutove i duljine. U daljem postupku, iz dobivenih koordinata i poznatih koordinata točaka operativnog poligona 1, 2, 3,... izračunavaju se elementi za iskolčenje svih glavnih točaka trase s najbližih

poligonskih točaka. Prema potrebi, na terenu se iskolčuju osim glavnih točaka i vrhovi poligona T_1 , T_2 , ..., radi kasnjeg iskolčenja detaljnijih točaka trase. Za sve glavne točke na trasi računski se određuju i njihove stacionaže.

Kad su međupravci i krivine dugi, s operativnog poligona iskolčuju se još i međutočke. Time se olakšava kasniji rad na iskolčenju detaljnijih točaka, uz češću kontrolu stacioniranja trase na terenu.

Analitički postupak iskolčenja ima osobito prednost na težim i zaraštenim terenima gdje je otežano mjerjenje i dogledanje po dugačkim tangentama.



Sl. 40. Iskolčenje glavnih točaka trase analitičkim postupkom

Dopunska mjerena za glavni projekt. Opisanim postupkom potpuno je određena iskolčena trasa u položajnom smislu. Planovi izrađeni u većem mjerilu, međutim, redovito nisu dovoljni za definitivno situiranje trase u visinskom smislu. Vertikalni presjek terena uzduž trase (uzdužni profil) podloga je za utvrđivanje nivele trase.

Uzdužni profil terena dobiva se nivelišanjem stacionirane i iskolčene trase. U tu svrhu uzduž trase postavlja se posebna visinska osnova, nivelmanski vlak. Glavni (stalni) reperi u tom vlaku stabiliziraju se na udaljenosti od 3-4km, a osim toga i u blizini svih važnijih objekata na trasi (mostova, tunela, presjecišta s trasama drugih komunikacija itd.). Između stalnih repera na kraćim udaljenostima umeću se privremeni radni reperi. Oni mogu biti stabilizirani u kamen, u panjeve posjećenih stabala, u zidove, pragove kuća i sl. Reperi se stabiliziraju na udaljenosti od 20-30m izvan trase, kako bi ostali sačuvani i u toku gradnje prometnice.

Visinska osnova trase oslanja se na mrežu državnog nivelmana priključkom na postojeće repere blizu trase. Tako se dobivaju zadane kote i na njih se vežu nivelmanski vlakovi uzduž trase.

Za nivelišanje uzduž trase primjenjuje se metoda tehničkog nivelmana. Upotrebljavaju se nivelmanski instrumenti srednje točnosti i letve s centimetarskom podjelom. Najčešće se nivelišu samo u jednom pravcu, jer se kontrolira prilikom nivelišanja poprečnih profila.

Najprije se niveliра uzdužni profil. Instrument se postavlja na sredinu između dviju veznih točaka. Kao vezne točke služi stacionažno kolje; ako ga nema na pravilnim razmocima za niveliiranje iz sredine, postavlja se nivelmanska papuča. Instrumentom se najprije očitava letva na veznim (krajnjim) točkama, a zatim na svim kolcima trase između njih. Tako se nastavlja niveliiranje svih kolaca na osi trase, uz priključak na sve stalne i privremene repere uzduž trase. Prva je kontrola poznata visinska razlika između dva zadana repera. Dopošteno odstupanje visinske razlike u mm, dobivene pri niveliiranju uzdužnog profila, iznosi

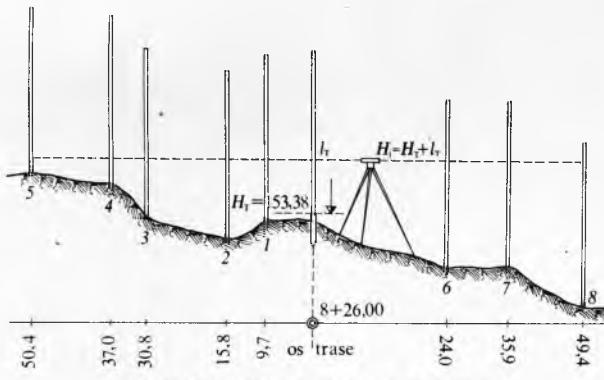
$$\Delta H = 24\sqrt{L}, \quad (109)$$

gdje je L duljina nivelmanskog vlaka izražena u km.

Prilikom niveliiranja poprečnih profila letva se postavlja tako da se preko veznih točaka mogu nezavisno računati i uspostaviti visinske razlike na kraćim potezima uzdužnog nivela.

Poprečni profili snimaju se, okomito na trasu, na svim stacioniranim profilnim kolcima. Na dijelovima trase u pravcu okomica se uspostavlja pomoću prizme ili kutnog zrcala. U kružnim krivinama, kad su jednake udaljenosti između kolaca, smjer poprečnog profila određuje se kao simetrala dviju okomica na susjedne teteve. Ako su susjedni lukovi različitih duljina i na prijelaznicama, okomica se može točnije uspostaviti prema elementima iskolčenja profilnog kolca. Za snimanje poprečnih profila terena, međutim, redovito je dovoljna njegova približna orientacija okomito na trasu. Mjerjenje treba obuhvatiti nešto veću širinu od profila buduće prometnice.

Točke poprečnog profila terena snimaju se s obzirom na stacionirani kolac trase, kojemu je visina određena u uzdužnom profilu. Vrpe, s početkom podjele na kolcu, zategne se horizontalno na jednu stranu trase. Letva se postavlja uzduž vrpe na prijelomima terena. Na vrpce se očitavaju duljine od osi trase do letve na kojoj se visine očitavaju nivelirom. To se ponavlja i na drugoj strani trase. Točke poprečnog profila nivelišu se očitavanjem u centimetrima. U zapisniku se skicira svaki profil i u njega se upisuju podaci niveliiranja i apscisnih udaljenosti (sl. 41).



Sl. 41. Niveliranje poprečnog profila terena

Snimanje je poprečnih profila nivelirom veoma uspješno ako se cijeli profil može snimiti s jednog stajališta instrumenta; dakle, na ravnim i blago nagnutim terenima. Ako su profili širi, primjenjuje se snimanje s dva stajališta. Tada se istim horizontom niveliira jedna strana od osi trase. Na više nagnutim terenima, međutim, zbog češćeg premještanja nivela i horizontalnog apscisnog odmjeranja vrpcom, ta metoda nije ekonomična.

Na težim brdovitim terenima poprečni profili snimaju se tahimetrijski. Stajalište instrumenta može biti svaki stacionažni kolac, a orijentira se na dvjema drugim stacioniranim točkama trase. Tahimetrijsko je snimanje pogodno jer se tom metodom mogu jednostavno snimiti i svi terenski oblici (jame, stara korita) te objekti koji se nalaze između poprečnih profila.

Poprečni profili terena crtaju se na milimetarskom papiru u mjerilu 1:50 ili 1:100. Određeni su stacionažom i kotom

kolca na osi trase. U uzdužnom profilu određena je za svaku stacionažu kota nivelete na osnovi koje se u poprečne profile ucrtavaju projektirani profili prometnice. Na temelju površina određenih linijom terena i projektiranim profilom mogu se između susjednih profila izračunati obujmi iskopa, odnosno nasipa.

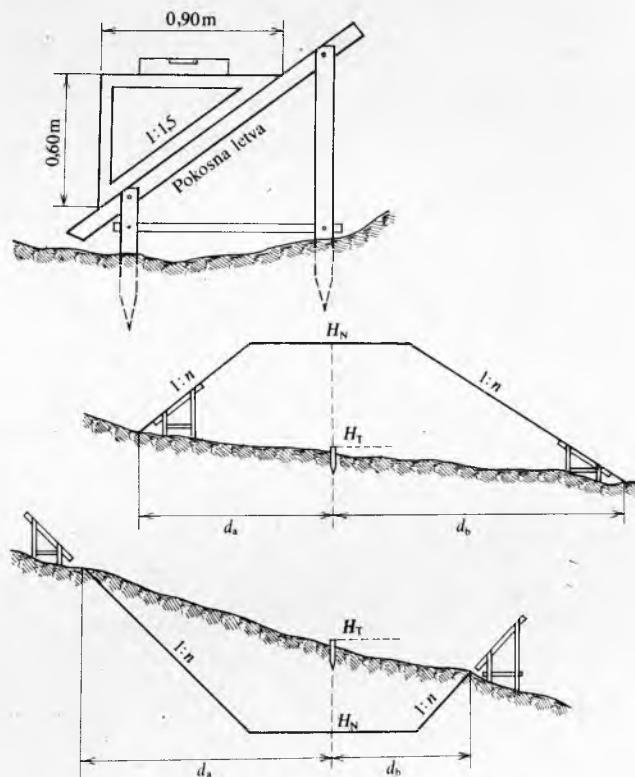
Osnovna geodetska podloga glavnog projekta u mjerilu 1:2000 neće potpuno zadovoljiti sve potrebe projektiranja. Za presjecišta projektirane prometnice s drugim objektima i na mjestima gdje se predviđa gradnja većih građevina potrebni su detaljniji planovi u mjerilu 1:1000 ili 1:500 s ekvidistančiom slojnica i do 0,25m. Snimanja za izradbu tih planova služe i kao podloga za detaljne izvedbene nacrte. Obično se izvode nakon iskolčenja trase, redovito tahimetrijskom metodom.

Planovi većeg mjerila potrebni su za projektiranje građevina na mjestima gdje prometnica prelazi vodotoke ili jaruge (mostovi, vijadukti), na križanjima s drugim prometnicama (nadvožnjaci, petlje), na mjestima gdje će se graditi objekti za eksploataciju i održavanje (željezničke stanice, zgrade), na mjestima s osobito teškim topografskim i geološkim uvjetima, u naseljima radi rekonstrukcije drugih građevina kojih se položaj i funkcija mijenjaju s gradnjom nove prometnice itd.

Na tim se planovima može korigirati i smještaj trase, čime i izvedbeni nacrti mogu manje odstupati od glavnog projekta.

Iskolčenje projektiranih poprečnih profila. Radi obavljanja zemljanih radova potrebno je na terenu obilježiti mjesta na kojima tijelo projektiranog objekta siječe teren. Usjek i nasip osnovni su oblici profila.

Ako postoje snimljeni i nacrtani poprečni profili terena s učrtanim tijelom objekta, tada se iz njih uzimaju udaljenosti d_a i d_b (sl. 42). Odmjeranjem od osi trase na terenu se pokosnicima označi poprečni profil projektiranog objekta. Za postavljanje pokosne letve u nagib usjeka ili nasipa (nagib je određen omjerom 1:n) služi pokosni (pravokutni) trokut u kojemu je omjer kateta jednak nagibu hipotenuze (pokosa). U pravilni položaj trokut se postavlja pomoću libele ili viska.



Sl. 42. Iskolčenje projektiranih poprečnih profila

Kad poprečni profili terena nisu snimljeni, poznati su kota terena (H_T) i kota nivelete (H_N) iz uzdužnog profila trase, te elementi usjeka ili nasipa (širina kolovoza i bankine, širina i dubina jaraka za odvodnju, nagib pokosa).

Pri iskolčenju usjeka najprije se odmjeravanjem duljine d od osi na terenu obilježe točke A i B (sl. 43), tj. terenske projekcije točaka u kojima pokos siječe horizontalu u osi trase. One su određene relacijama:

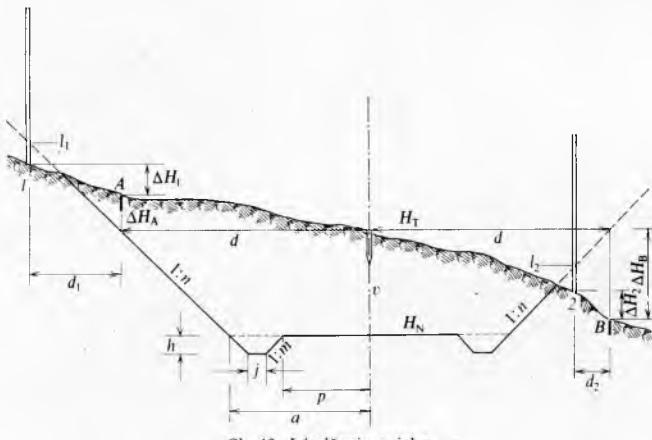
$$v = H_T - H_N, \quad (110)$$

$$d = p + j + h(m + n) + vn. \quad (111)$$

Zatim se nivelirom izmjere visinske razlike ΔH_A i ΔH_B . Za iskolčenje profila na lijevoj strani odabire se procjenom mjesto točke l , ali tako da je ona nešto dalje od mesta presjeka profila s terenom. Izmjeri se zatim duljina d_1 , a nivelirom visinska razlika ΔH_1 . Mora biti zadovoljen omjer

$$\frac{\Delta H_A + \Delta H_1 + l_1}{d_1} = \frac{1}{n}, \quad (112)$$

gdje je l_1 očitanje nivelmanske letve na presjeku s pokosom.



Sl. 43. Iskolčenje usjeka

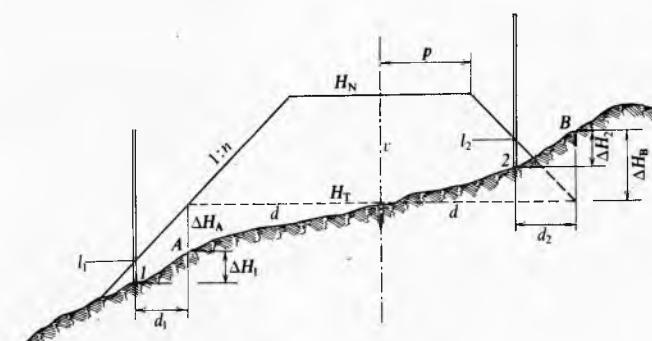
Ako vrijednost l_1 zadovoljava omjer (112), i nalazi se na pogodnoj radnoj visini, na očitanje se prislana pokosni trokut i učvršćuje pokosnik. Ako l_1 nije na pogodnoj radnoj visini, odabire se druga točka; vrijednost omjera (112) pokazuje na kojoj strani treba odabrati povoljnije mjesto.

Na desnoj se strani također približno odabire mjesto točke 2 i izmjeri duljina d_2 i visinska razlika ΔH_2 . Tada treba zadovoljiti omjer

$$\frac{\Delta H_B - \Delta H_2 - l_2}{d_2} = \frac{1}{n}. \quad (113)$$

Dalje se postupa analogno iskolčenju lijevog pokosnika.

Pri iskolčenju nasipa (sl. 44) također se najprije obilježe točke A i B koje odgovaraju potpuno horizontalnom terenu.



Sl. 44. Iskolčenje nasipa

Zatim se odredi udaljenost

$$d = p + vn \quad (114)$$

i izmjere se visinske razlike ΔH_A i ΔH_B . Odabire se točka 1

na lijevoj strani, izmjere d_1 i ΔH_1 . Kad je očitanje letve l_1 sa zadovoljenim odnosom

$$\frac{\Delta H_A + \Delta H_1 - l_1}{d_1} = \frac{1}{n}, \quad (115)$$

na prikladnoj radnoj visini učvršćuje se pokosnik. Na desnoj strani za odabranu točku 2 treba zadovoljiti omjer

$$\frac{\Delta H_B - \Delta H_2 + l_2}{d_2} = \frac{1}{n}. \quad (116)$$

GEODETSKI RADOVI PRI PROJEKTIRANJU I GRADNJI GRAĐEVINA

Trasiranje je povezano s gradnjom svih građevina izduženog oblika koje su, s obzirom na eksplotacijska i konstruktivna svojstva, veoma raznovrsne. Osim prometnica u užem smislu (ceste, željezničke pruge), takve građevine su i kanali, nasipi, cjevovodi (vodovodi, naftovodi, toplovođi, kanalizacija), dalekovodi, žičare, mostovi, tuneli (prometni, hidrotehnički, rudarski), aerodromske staze itd.

Osnovni geodetski radovi pri projektiraju i gradnji takvih građevina, nezavisno od njihove namjene, svode se na položajno i visinsko utvrđivanje trase na terenu. Raznovrsnost tih građevina, međutim, uvjetuje i specifičnost geodetskih radova.

Pri rješavanju projektnih zadataka veoma su važni postojeći kartografski materijali, karte i planovi državne izmjere. To je, međutim, uglavnom dovoljno samo za prve istražne radove. Razumljivo je da treba nastojati da se postojeće geodetske podloge što više iskoriste. Zbog toga se u fazi istražnih radova provode samo dopunska snimanja, kako bi se postojeći planovi popunili potrebnim podacima (npr. za projektiranje hidrotehničkih građevina karte državne izmjere redovito su manjkave u visinskoj predodžbi terena). Dopunama planova, međutim, osobito većim, treba pristupati oprezno, jer se na kraju često pokaže kao neuspjelo, pa i neekonomično rješenje.

Dakle, karte i planovi državnog premjera ne mogu u svim slučajevima i u potpunosti poslužiti kao osnova za projektiranje. Vrijedi i obratno. Karte i planovi koji su posebno izrađeni kao podloga za određene projekte redovito ne mogu poslužiti za druge potrebe (katastar, obrana i sl.).

Izbor geodetske osnove i njena točnost ovisi o svrsi za koju se postavlja: za snimanje terena i za izradbu geodetske podloge ili za iskolčenje projektiranog objekta. Za iskolčenje je redovito potrebna veća točnost osnove nego kad ona služi za snimanje terena.

Gdje god je to moguće, treba nastojati da ista geodetska osnova posluži u svim fazama projektiranja. To znači da najprije služi za snimanje terena, a kasnije za prijenos projektiranog objekta s planova na teren (iskolčenje). Još je bolje kad se ista osnova može iskoristiti i nakon završene gradnje, tokom eksplotacije (ažuriranje planova, snimanje oštećenja, deformacija i eventualne rekonstrukcije). Takvi zahtjevi, međutim, nisu uvek tehnički izvedivi a niti ekonomski opravdani.

Prometnice. Već opisani, potpuniji program trasiranja prometnica u praksi se modificira prema prilikama i uvjetima. Znatnije promjene, iako nisu uvek i ekonomski opravdane, uvođe se s namjerom da se ubrza projektiranje.

Znatno se ubrzanje postiže redukcijom programa kad za područje kojim prolazi trasa postoje planovi u mjerilu 1:5000 ili 1:10000. Na takvim se podlogama tada razrađuje idejni projekt, a prema njemu se trasa obilježuje na terenu. Iskolčena trasa snima se zatim pomoću poprečnih profila da se izradi situacija u većem mjerilu (npr. 1:2000). Poprečni profili tada obuhvaćaju nešto veću širinu s obje strane osi trase, a snimaju se i detalji između profila (tahimetrija). Kao geodetska osnova snimanja poslužit će već iskolčena trasa. Na tako izrađenoj situaciji korigira se, prema potrebi, položaj trase za glavni projekt. Za visinsko utvrđivanje trase (nivelete) nema bitnih izmjena.

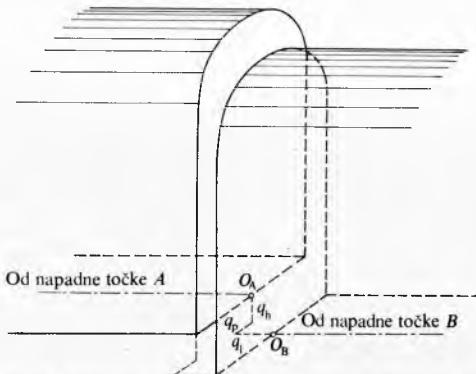
Opisani je postupak opravdan i uspješnije se može primijeniti na terenima laksim za projektiranje. Ima, međutim, pojava

da se neke faze tokom projektiranja neopravdano izostavljaju ili površno razrađuju na osnovi neadekvatnih geodetskih podloga. U toku gradnje nedostaci se takvih projekata zapažaju, ali se teško ispravljuju.

Geodetski su radovi pri projektiranju prometnica u posljednje vrijeme znatno unaprijedeni primjenom fotogrametrije. Aeronsimi omogućuju da se stereoskopski proučavaju i odabiru najpovoljnije varijante trase na širem području. Fotogrametrijska se metoda može, osim za izradbu planova potrebnih za projektiranje, iskoristiti i za snimanje poprečnih profila. Upotrebom elektroničkih računala za matematičku obradbu trase postiže se znatno skraćenje geotopogrametrijskih radova tokom projektiranja. Nešto manja točnost fotogrametrijskih metoda, s obzirom na konvencionalne geodetske metode, u znatnoj se mjeri kompenzira nižom cijenom radova i bržom izradbom projekta (v. *Fotogrametrija*, TE 5, str. 596).

Tuneli. Osnovni geodetski radovi pri projektiranju tunela sastoje se u prikupljanju i izradbi potrebnih geotopografskih podataka i podloga, a tokom gradnje tunela u točnom prijenosu osi trase na teren. Osiguravanje podzemnih probroja u granicama dopuštenih odstupanja najodgovorniji je dio geodetskih radova.

Način gradnje tunela znatno utječe na potrebnu točnost geodetskih radova. Kad se kopa sustavom jezgre, napreduje se, paralelno s osi tunela, jednim manjim profilom (potkopom) koji se poslije proširuje. Tada se odstupanje (razmimoilaženje) između radnih osi na mjestu probroja (sl. 45) lakše korigira prilikom kasnijeg proširenja. U posljednje vrijeme, međutim,



Sl. 45. Odstupanja radnih osi na mjestu probroja tunela

s većom primjenom mehanizacije, tuneli se sve više prokopavaju napredujući s konačnim, punim profilom. Ako se, osim toga, tunel odmah i podziduje, trasa je u trenutku probroja definitivna. Osim toga, radi manjih troškova gradnje, obično se radi sa što manjom gabaritnom rezervom. To traži i veću točnost geodetskih radova.

Geodetski zadaci u tunelogradnji obuhvaćaju radove na površini i pod zemljom.

Uz najbolje terenske uvjete, kad je tunel u pravcu, zadatak se može riješiti prema sl. 46. S točke C iznad budućeg tunela dogledaju se točke D i E na produljenoj osi tunela. Iskolčenjem kuta od 180° u točki C i kutova od 0° u točkama D i E stabiliziraju se točke A i B pred portalima tunela. Kako na-

preduje probijanje tunela, pravci DA, odnosno EB, produljuju se u tunel iskolčenjem podzemnih točaka pod kutom od 180° .

Za ilustraciju druge mogućnosti, poligonskog rješenja, može poslužiti sl. 12. Točke A i B na portalima, koje se međusobno ne dogledaju, povezuju se poligonskim vlakom. Od portala smjer je tunela određen kutovima φ i ψ , koji se prenaju orientacijom na poligonske točke 1, odnosno 3.

Za visinsko iskolčenje potrebno je poznavati nagib nivele tunela $p_n = \Delta H_{AB} : d_{AB}$ (sl. 46). Visinska razlika ΔH_{AB} određuje se površinskim nivelmanškim vlakom koji spaja točke na portalima. Duljina tunela d_{AB} dobiva se iz izmjerjenih horizontalnih udaljenosti AD, DC, CE i EB, ili mnogo jednostavnije, iz koordinata točaka A i B.

Opisani postupci u praksi se primjenjuju vrlo rijetko, i to samo za kratke tunele. Općenito, tunel je složenja građevina s krivinama u položajnom i visinskem smislu, a gradi se iz više napadnih točaka: portala, bočnih okna, niskopa, vertikalnih okna. Portalne točke A i B redovito se nalaze na geodetski najpovoljnijim (nedominantnim) mjestima terena. Površinsko povezivanje tih točaka zahtijeva složene, kombinirane mreže geodetske osnove.

Nadzemni radovi za pojedine faze projektiranja tunela (idejni projekt, glavni projekt) slični su onima za projektiranje prometnica. Pri tom geotopografski radovi ovise o vrsti tunela (prometni, hidrotehnički, za podzemnu gradsku željeznicu).

Za prve istražne radeve pri projektiranju prometnih tunela služe karte u mjerilu 1:10000 ili 1:25000, za idejni projekt planovi u mjerilu 1:5000 do 1:10000, za glavni projekt planovi u mjerilu 1:2000 do 1:5000. Geodetske podloge obuhvaćaju prostor širok 400–1000 m ispod kojeg je predviđen smještaj tunela. Prostor za sve važnije građevine tunela (portali, vertikalna okna i sl.) ili pomoćne građevine pri gradnji (nastambe, betonske baze i sl.) snima se i kartira u mjerilu 1:1000. Svi planovi, kad god je to moguće, izrađuju se na temelju geodetske osnove koja će poslužiti i za iskolčenje tunela.

Kao i za prometnice, trasa tunela može se iskolčiti geometrijskim ili analitičkim postupkom. Geometrijski postupak ima nedostataka, pa se uspješno primjenjuje samo za kraće tunele i uz povoljne terenske uvjete. Tada se os trase postavlja najprije na površinu DCE (sl. 46), pa se tek tako utvrđena prenosi pod zemlju.

Kad se primjeni analitički postupak, s projekta se očitavaju koordinate sjecišta tangenata trase i točaka na osima pomoćnih građevina. Iz tako očitanih koordinata računaju se prijelomni kutovi i duljine te elementi iskolčenja. Pogreške očitavanja koordinata mogu utjecati samo na položajno odstupanje trase s obzirom na situaciju. Međutim, svi elementi trase međusobno su u strogoj matematičkoj suglasnosti.

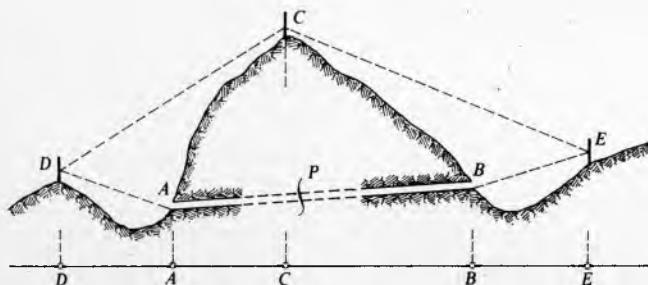
Točnost geodetske osnove za iskolčenje tunela. Na mjestu probroja tunela, između dviju napadnih točaka, nastaju odstupanja radnih osi u poprečnom q_p , uzdužnom q_l i visinskem smislu q_h (sl. 45). Uzdužno odstupanje q_l , za tunele u pravcu ili blago zakrivljene, nema većeg značenja. S postojećim instrumentima i metodama mjerenja probor u visinskem smislu može se ostvariti znatno točnije nego u položajnom smislu. Za sve tunele najvažnije je poprečno odstupanje q_p .

Konačna os trase na mjestu probroja zauzeti će izjednačenjem srednjeg položaj između radnih osi. Prema tome, ako projektom dozvoljeno odstupanje iznosi Δ , odstupanje između radnih osi smije biti 2Δ . Kao i za sva preciznija mjerjenja, tako se i za mjerjenja u tunelogradnji uzima da je maksimalno odstupanje jednako dvostrukoj srednjoj pogrešci. Odstupanje Δ može se zato pri proračunima točnosti smatrati kao srednja pogreška otklona radnih osi trase.

Srednja poprečna pogreška na mjestu probroja izračunava se prema formuli

$$M_p^2 = m_1^2 + m_2^2 + m_3^2 + m_4^2 + m_5^2, \quad (117)$$

gdje je m_1 srednja pogreška geodetske osnove na površini koja povezuje napadne točke, m_2 i m_3 srednje su pogreške orientacije podzemne osnove na mjestima napadnih točaka (ako se orientacija prenosi kroz vertikalna okna), a m_4 i m_5 srednje pogreške podzemne osnove (poligonskih vlakova) na obje strane.



Sl. 46. Iskolčenje tunela u pravcu

Za geodetske proračune točnosti polazi se od principa jednakih utjecaja: $m_1 = m_2 = \dots = m_5 = m$. Prema tome, $M_p = m\sqrt{5}$, a vrijednost bilo koje od pogrešaka ne smije biti veća od

$$m = \frac{A}{\sqrt{5}} \approx 0,45 A. \quad (118)$$

Kad se orijentacija podzemnih poligonskih vlakova ostvaruje neposredno kroz portale ili bočna okna, nije potrebna složena operacija prijenosa smjera kroz vertikalno okno. Tada je $m_2 = m_3 = 0$, pa dopuštena pogreška iznosi

$$m = \frac{A}{\sqrt{3}} \approx 0,58 A. \quad (119)$$

Tuneli veće duljine grade se istodobno iz nekoliko napadnih točaka, pa navedene formule vrijede za proračun pogrešaka svake pojedine dionice. Geodetska osnova na površini (triangulacija) obuhvaća, međutim, cijelu duljinu tunela L , s prosječnom duljinom dionica l . Ako se orijentacija ostvaruje samo kroz portale ili bočna okna, poprečna pogreška zadnje točke triangulacije s obzirom na prvu točku ne smije biti veća od

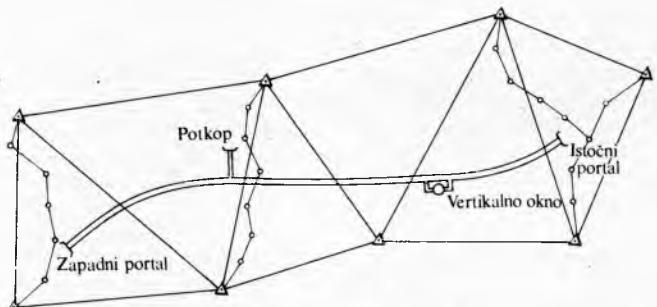
$$m_p = 0,58 A \sqrt{\frac{L}{l}}. \quad (120)$$

Kad se triangulacija na površini popunjave poligonometrijom, za svaku od tih osnova dopuštena pogreška iznosi

$$m_p = \frac{0,58 A}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{L}{l}}. \quad (121)$$

Može se, dakle, zaključiti da nadzemna mjerena trebaju biti točnija što je veći l , odnosno što je manje dionica. Najveća točnost bit će, dakle, potrebna za $l = L$, tj. kad se tunel gradi samo kroz portale, odnosno kad postoji samo jedna dionica.

Nadzemna geodetska osnova. Tunelska triangulacija glavna je položajna osnova za iskolčenje trase tunela i svih građevina. Najpovoljnije je ako se točke triangulacije što više približe napadnim mjestima tunela. Kako su ta mesta, međutim, redovito nepovoljna za razvoj triangulacije, na nju se nadovezuje osnovna poligonska mreža (sl. 47).



Sl. 47. Tunelska triangulacija i osnovna poligonometrija

Budući da je tunel izdužena građevina, tunelska triangulacija ima oblik lanaca pravilnih trokuta, geodetskih četverokuta ili središnjih sustava. Približavanje napadnim mjestima tunela i zahtjev za pravilnim mrežama traži da strane budu relativno kratke (do 3 km). Triangulacija se mora provesti s većom točnošću nego u državnoj mreži. Ne preporuča se postavljati točke triangulacije daleko od trase, ali niti preblizu iznad nje, jer su tamo moguće deformacije terena tokom iskopa.

Radi osiguranja tražene visoke točnosti triangulacije, posebna se pažnja posvećuje stabilizaciji i signalizaciji trigonometrijskih točaka. Zbog kraćih stranica triangulacijske mreže na točnost mjerena osobito utječe pogreške centriranja instrumenta i signala. Zato se točke tunelske triangulacije stabiliziraju nadzemnim betonskim ili zidanim stupovima. Visina stupa

iznad terena iznosi 1,2–1,5 m, a njegov presjek na vrhu 30 × 30 cm. Tako se neposredno bez stativa na stup može postaviti instrument ili signal. Najpovoljnije je na vrh stupa ugraditi uređaj za prisilno centriranje, čime se osigurava identičnost centriranja instrumenata i signalne značke prilikom opažanja kutova.

Tunelska se triangulacija postavlja i izjednačuje kao samostalna mreža, tako da pogreške priključnih točaka ne utječu na njenu unutrašnju točnost. Pri uklapanju u sustav državne osnove, po koordinatama priključuje se samo jedna točka (početne koordinate), a za orijentaciju se prihvata smjerni kut jedne strane.

Linearni odnosi u samostalnoj triangulaciji određuju se mjerjenjem bazisa. Najpovoljnije je neposredno mjeriti operativnu stranu. Treba nastojati da bazisna mreža bude što jednostavnija, najbolje u obliku romba (v. *Bazisne mreže*, TE 1, str. 699). Tunelska triangulacija redovito se osigurava sa dva izmjerena bazisa na krajevima lanca.

Nadzemna i podzemna geodetska osnova nalaze se na različitim visinama nad razine mora. Da se u brojna podzemna linearne mjerena ne bi uvodili popravci zbog različitih razina, svršishodno je površinsku osnovu reducirati na srednju kotu H_0 nivete tunela. Ako je bazis duljine L izmjerena na koti H_m , duljina reduciranoj bazisa L_0 dobiva se prema formuli

$$L_0 = L \left(1 - \frac{H_m - H_0}{R} \right), \quad (122)$$

gdje je R poljumer zakrivljenosti Zemlje (za naše područje $R = 6375$ km).

Osnovna nadzemna poligonometrija postavlja se ili kao samostalna mreža ili kao dopuna tunelske triangulacije. Njena je glavna svrha da se pravilnjim vlakovima približi područjima građenja (napadnim točkama) uzduž trase. Duljine osnovnih poligonskih vlakova, između točaka triangulacije, iznose do 3 km, s prosječnom duljinom stranica oko 250 m. Treba izbjegavati stranice kraće od 100 m. Pogreška mjerena prijelomnih kutova ne smije biti veća od $\pm 4''$, a dopuštena linearna odstupanja u vlakovima veća od 1:20000.

Samostalna osnovna poligonometrija (bez triangulacije) postavlja se za manje tunele. Međutim, suvremene metode linearnih mjerena upotrebom elektrooptičkih daljinomjera omogućuju da se točke osnovne poligonometrije određuju vrlo točno. Zato se samostalna poligonometrija, kao ekonomičnije rješenje, sve više primjenjuje i za dulje tunele.

Na mjestima građevnih radova (portali, vertikalna okna, ulazi u potkope) uvjeti su obično nepovoljni za postavljanje točaka osnovne poligonometrije. Zato su za povezivanje nadzemnih i podzemnih osnova ponekad potrebni još i tzv. *priklučni poligonski vlakovi*, koji se oslanjaju na osnovnu poligonometriju. Točke priključnih vlakova služe za položajni priključak (prijenos koordinata) podzemne osnove. Prijenos smjernog kuta, međutim, treba ostvariti neposredno od neke stranice triangulacije ili osnovne poligonometrije.

Radi osiguranja proboga u visinskom smislu, na površini se razvija geodetska osnova u obliku nivelmanske mreže. Osnovni je princip da sva napadna mjesta tunela budu međusobno povezana nivelmanskim vlakovima. Nivelira se u oba smjera. Ne preporuča se da se kote repera tunelske mreže odrede odvojenim priključkom na repere državnog nivelmana.

Podzemna geodetska osnova je poligonometrija s koje se iskolčuje ne samo os tunela nego i druge podzemne građevine. Točke podzemnih vlakova postavljaju se kako napreduju radovi na probijanju tunela: u početku su to vlakovi radne poligonometrije (za određivanje smjera kopanja) s kraćim stranicama, a zatim vlakovi osnovne poligonometrije s duljim stranicama i solidnijom stabilizacijom točaka.

Podzemna se osnova određuje u istom koordinatnom sustavu u kojemu je i geodetska osnova na površini. Prema tome, poligonometrija se priključuje i orijentira na nadzemnu mrežu. To se ostvaruje povezivanjem dviju osnova na različite načine, već prema mogućem pristupu s površine pod zemlju: neposredno kroz portal ili okno, odnosno kroz vertikalno okno (ili kroz dva okna). U prvom slučaju tunelska se poligonometrija nastav-

Ija na točke nadzemne osnove. U drugom slučaju složena se geodetska operacija prijenosa koordinata i smjera ostvaruju projekcijom točaka kroz relativno usko vertikalno okno (v. *Geodetski radovi u rudarstvu*, TE 6, str. 62).

Podzemna poligonometrija ima sljedeće karakteristike: oblik vlakova (ispruženost) i duljina stranica u njima, ovise o obliku tunela i pristupnih rovova, vlakovi su priključeni i orijentirani samo na jednom kraju (slobodni ili slijepi vlakovi); obostrani priključak i izjednačenje mogući su tek nakon proboga tunela.

Mjerenja u podzemnoj poligonometriji izvode se s posebnom pažnjom, s ponavljanjima i čestim kontrolama. Zbog jednostranog priključka te odstupanja od teoretski povoljnijih oblika vlakova pojavljuju se veće pogreške koje utječu na točnost koordinata krajnjih točaka. Zato se za takva mjerenja upotrebljava specijalna poligonska oprema, višestavni pribor za prisilno centriranje s vlastitom rasvjetom signalnih znački. Za dulje vlakove preporuča se nezavisna kontrola orientacije prijenosom smernog kuta pomoću giroteodolita (v. *Geodetski instrumenti i uredaji*, TE 6, str. 41).

Oznake točaka podzemne poligonometrije postavljaju se na dno, svod ili bokove tunela, vodeći računa o točnom centriranju instrumenta i signala, te o udobnosti opažanja. Poželjno je da oznaka istodobno posluži i kao reper podzemnog nivelmana. Točke se najčešće stabiliziraju betonskim stupovima sa željeznom šipkom i rupicom na sredini. Vrh oznake zaštićuje se metalnom kapom. Ne preporuča se stabilizacija na sredini tunela, gdje su oznake najviše izložene oštećenju i pomacima zbog odvodnje, transporta i sl.

Visinska podzemna osnova također mora biti povezana s nadzemnom visinskom osnovom. Tada se kao složenija geodetska operacija pojavljuje prijenos visine kroz vertikalno okno (v. *Geodetski radovi u rudarstvu*, TE 6, str. 68). U tunelu visinska se osnova određuje prema napredovanju gradnje, i ona se redovito poklapa s podzemnom poligonometrijom. Ipak se preporuča da se posebno stabiliziraju reperi podzemnog nivelmana, približno na svakih 500 m trase.

S točaka podzemne poligonometrije obilježava se trasa tunela. Elementi iskolčenja računaju se iz koordinata poligonskih točaka i koordinata točaka na osi tunela dobivenih analitičkim proračunom trase.

Mostovi. Prijelazi preko vodenih zapreka, suhih jaruga, drugih prometnica (nadvožnjaci) ili planinskih klanaca (vijadukti) složene su građevine. Kao i ostale veće građevine, mostovi se projektiraju na topografskim podlogama, a na terenu se obilježuju s točaka geodetske osnove.

Prijelazi preko vodenih tokova izvode se po mogućnosti na dijelovima rijeke bez većih krivina, okomito na vodenim tokom. Najpovoljnije je ako se lokacija mosta podudara s općim pravcem trase prometnice. Budući da tako određeni smještaj mosta obično nije najbolji, trasa se prometnice na potезu prijelaza prilagodjuje lokaciji mosta.

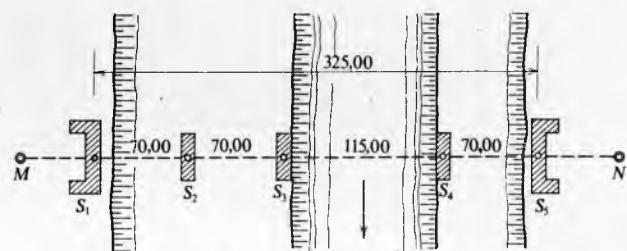
Mostovi se projektiraju na osnovi kompleksnih proučavanja hidrologije rijeke, geoloških i topografskih uvjeta na području prijelaza. Osnovna je geodetska podloga situacija u mjerilu 1:5000. Snimak treba obuhvatiti nešto veći dio terena od poplavnog zemljišta u vrijeme najviših vodostaja, a uzvodno i nizvodno prema potrebi, ponekad i više od jednog kilometra. Ako za to područje postoje standardne geodetske karte u mjerilu 1:5000, one se dopunjaju podacima koji su specifični za projektu podlogu mosta: reljef riječnog korita, napuštenih korita, poplavnog područja, kote svih karakterističnih točaka, položaj stalnih i privremenih vodomjera. Geodetske osnove za ova snimanja razvijaju se kao kombinacija poligonskih mreža i mikrotriangulacijskih lanaca.

Kad je izabrana konačna varijanta prijelaza, za detaljni projekt mosta izrađuje se plan u mjerilu 1:1000 ili 1:2000 sa slojnicama od 0,5–1,0 m. Snimak obuhvaća uže područje mosta: uzvodno i nizvodno 1–2 duljine mosta, a u smjeru trase do granice poplavnog područja ili spoja s trasom prometnice. Riječno se korito snima posebno, mjeranjem dubina, po profilima okomitim na tok rijeke.

U blizini mosta te uzvodno i nizvodno od njega na udaljenosti od 1–2 km postavljaju se privremeni vodomjeri. Međusobno

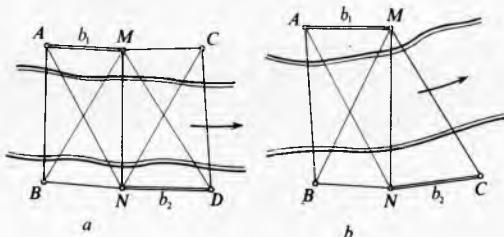
se povezuju nivelmanskim vlakom i priključuju na repere državnog nivelmana. Vodomjeri služe za povremeno opažanje razine vode. Iz razina vode na privremenim i stalnim vodomjerima određuju se učestalosti pojedinih vodostaja i kote najviših vodostaja na mjestu prijelaza. U blizini mosta obavljaju se i druga hidrometrijska mjerenja: pad površine vode, brzina toka rijeke, smjer strujanja (v. *Hidrometrija*, TE 6, str. 416).

S obzirom na točnost, najveći zahtjevi postavljaju se na iskolčenje donjeg dijela mosta: upornjaka, riječnih i obalnih stupova. Tome se prilagođuje i geodetska osnova. Na osi prijelaza najprije se određuje udaljenost između dviju polaznih točaka M i N , stabiliziranih na suprotnim obalama (sl. 48). Te dvije točke situiraju se tako da ostanu sačuvane za sve vrijeme gradnje, da budu dalje od mjesta mogućih pomaka tokom gradnje, utjecaja prometa i miniranja i sl. Zato je dobro postaviti pored polaznih još i točke osiguranja. Veoma je svrshodno da polazne točke M i N budu ujedno točke geodetske osnove koje se postavljaju za iskolčenje mosnih građevina i kontrolu tokom gradnje.



Sl. 48. Polazne točke na osi prijelaza

Za veće rijeke udaljenost MN mjeri se točnjim elektrooptičkim daljinomjerima ili se određuje posredno: paralaktički s bazisnom letvom preko pomoćnih baza ili mikrotriangulacijom (triangulacija kratkih stranica). Ako konstrukcija mosta zahtijeva iskolčenje točaka (osi stupova) na nepristupačnim mjestima, najbolje je primijeniti mikrotriangulacijsku mrežu.

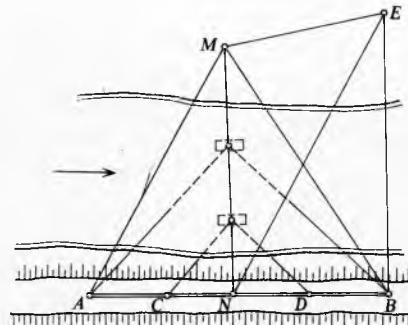


Sl. 49. Mikrotriangulacija za iskolčenje mosta. a dvostruki geodetski četverokut, b četverokut s trokutom

Oblik mikrotriangulacijske mreže ovisi o reljefu i situaciji na terenu. Treba nastojati da mreža bude što jednostavnija: obični ili dvostruki geodetski četverokut, četverokut spojen s trokutom i slično (sl. 49). Izbjegavaju se oštri kutovi (manji od 30°), a sve vizure moraju biti obostrane. Radi određivanja linearnih odnosa mjeri se dvije bazisne strane, redovito na suprotnim obalama. Prema traženoj točnosti, baze se mjeri paralaktički, invarnim vrpcama na terenu ili invarnim žicama preko stativa. Duljine baza moraju biti u skladu sa širinom rijeke, vodeći računa o ispravnosti presjeka pravaca za iskolčenje stupova mosta (kut presjeka ~90°) s točaka mikrotriangulacije (A, B, C, D). Najpovoljnija je duljina baze oko $b = \frac{1}{2} MN$, ali svakako treba postići $b > \frac{1}{3} MN$.

Točke mikrotriangulacije mosta stabiliziraju se slično kao i u tunelskoj triangulaciji (prisilno centriranje instrumenta i signala).

Na sl. 50 prikazana je geodetska osnova kad voda češće popavljuje lijevu obalu rijeke. Za iskolčenje stupova bližih obali na kojoj se mjeri baza postavljene su pomoćne točke



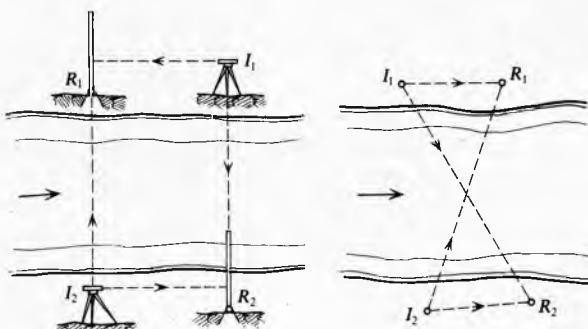
Sl. 50. Iskolčenje stupova s jedne obale

C i D. Treba nastojati da se na plavljenoj obali odabere bar jedna točka (E) koja će kasnije, pri iskolčenju, poslužiti za orijentaciju.

Središta mosnih stupova (S na sl. 48) iskolčuju se s točaka mikrotriangulacije, najčešće metodom presjeka pravaca. Polazna duljina MN nanosi se na plan s detaljnijim projektom mosta, a precizno se određuje iz geodetske osnove. S plana se očitava samo jedna, početna udaljenost MS_1 (sl. 48). Sve se ostale duljine na osi prijelaza određuju numerički: duljina $S_1N = MN - MS_1 - S_1S_2$, a duljine raspona $S_1S_2, S_2S_3\dots$ zadane su projektom. Polazna stranica MN apscisna je os koordinatnog sustava u kojem se iskazuju koordinate točaka mikrotriangulacije, a koordinate središta stupova $S_1, S_2\dots$ računaju se kao točke na liniji MN. Elementi iskolčenja računaju se iz koordinata. Tako pogreška grafičkog očitavanja početne duljine MS_1 može, u granicama točnosti plana, utjecati samo na absolutni smještaj mosta, što nije bitno. Svi relativni odnosi potpuno su suglasni projektu.

Tokom gradnje središte se stupa više puta obilježuje i kontrolira. Zato se položaj osi stupa, nakon konačnog iskolčenja, osigurava presjekom linija pomoću točaka na suprotnim obalama. (sl. 7).

Prijenos visine preko vodotoka. Za visinsko se iskolčenje mosne građevine na svakoj obali rijeke stabiliziraju reperi: jedan blizu osi prijelaza, a po jedan užvodno i nizvodno na udaljenosti na kojoj gradnja neće utjecati na njihovu stabilnost. Reperi na suprotnim obalama međusobno se povezuju nivelmanom, kako bi visinski odnosi činili cjelinu. Mjesto prijenosa visine izabire se na najužem dijelu rijeke. Prijenos preko vode najčešće se ostvaruje modificiranim metodom geometrijskog nivelmana.



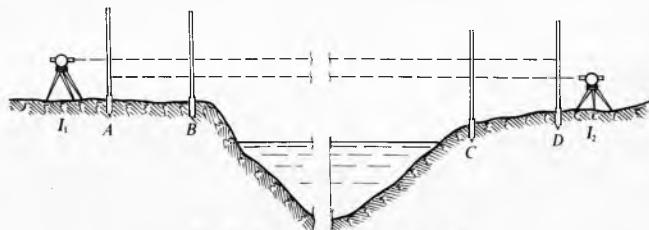
Sl. 51. Prijenos visine nivelirom

Prije niveleranja na obalama se stabiliziraju reperi R_1 i R_2 , nastojeći da njihova visinska razlika bude manja od 1 m (sl. 51). Stajališta nivela (I_1 i I_2) odabiru se tako da figura povezivanja bude bliža pravokutniku u kojem je $R_1I_1 \approx R_2I_2$ i $R_1I_2 \approx R_2I_1$. Također treba nastojati da horizontalna vizura bude najmanje 1 m iznad zemlje. Iako su opažanja na bliže letve točnija, udaljenosti I_1R_1 , odnosno I_2R_2 , ne treba suviše skratiti. Tada ima veći utjecaj pogreška fokusiranja durbina nivela, jer se više mijenja fokusiranje za bližu i dalju letvu.

Sa stajališta nivela I_1 očitava se najprije bliža letva na reperu R_1 , a zatim dalja letva na reperu R_2 . Ne mijenjajući fokusiranje durbina, instrument se pažljivo prevozi na drugu obalu i postavlja na stajalište I_2 . Tada se, s istim fokusiranjem, očita najprije dalja letva na reperu R_1 , a zatim bliža letva na istoj obali (R_2). Već prema traženoj točnosti prijenosa visine, taj se postupak ponavlja.

Opisanim prijenosom visine narušen je princip niveleranja iz sredine. Za svaku visinsku razliku pojavljuje se pogreška zbog neparalelnosti vizurne osi durbina i tangente na marku libele, te zbog utjecaja zakrivljenosti Zemlje i refrakcije. To se odnosi uglavnom na očitanje dalje letve. Teorija, međutim, pokazuje da je aritmetička sredina visinskih razlika, dobivenih opisanim postupkom mjerena sa dva stajališta, oslobođena od spomenutih utjecaja. Kako se refrakcijski uvjeti mijenjaju tokom vremena, poželjno je da se mjerena na jednoj i drugoj obali obave u što kraćem vremenskom razmaku. Potpunija eliminacija refrakcijskih utjecaja postiže se istodobnim opažanjem visinske razlike sa dva nivelmanска instrumenta, koji zatim mijenjaju mjesto.

Na sl. 52 prikazana je mogućnost prijenosa visine kad se raspolaže teodolitom s velikim povećanjem i kvalitetnom optikom. Prijenosu visine tada prethodi postavljanje durbina u horizontalni položaj. U tu se svrhu na obalama u pravcu prijenosa odaberu po dvije točke (A, B, i C, D) na udaljenosti od 40–50 m. Između točaka na istoj obali, niveleranjem iz sredine, izmjeri se visinska razlika vrlo točno. Teodolit se postavlja iza tih točaka. Očitavanjem letava na istoj obali i finim okretanjem durbina u vertikalnoj ravni, horizontalni konac durbina navodi se na očitanja koja će dati istu visinsku razliku što je dobivena niveleranjem iz sredine. Time je vizurna os teodolita dovedena u horizontalni položaj. Očitavanjem letava na suprotnim obalama i dvostrukim mjeranjima određuje se visinska razlika između točaka A i C, te B i D. Točnost takva prijenosa ovisi o povećanju durbina i o točnosti kojom se vizurna os teodolita dovodi u horizontalni položaj.



Sl. 52. Prijenos visine teodolitom

Neposredno očitavanje podjele na letvi moguće je do udaljenosti od ~150 m. Za dulje vizure na letvu se postavlja specijalna pomicna marka (značka) kod koje je duljinom podjele u suglasnosti s duljinom vizure i povećanjem instrumenta. Prema signalizaciji opservatora pomoćnik na letvi namješta značku po vertikali u položaj koji točno pogda horizontalna nit durbina. Položaj značke, tj. očitanje na letvi, tada bilježi pomoćnik. U posljednje vrijeme, međutim, uz laserski dodatak instrumentu, značka je nepotrebna i za duge vizure. Tada nije potrebno sporazumijevanje između opservatora i pomoćnika za namještanje značke. Pomoćnik neposredno očitava podjelu na kojoj laserska zraka pogda letvu.

Osim geometrijskog nivelmana, prijenos visine preko širih vodotoka može se ostvariti i metodama trigonometrijskog ili hidrostatičkog nivelmana.

Dalekovodi. Električna energija prenosi se na veće udaljenosti zračnim vodovima. Glavni su dijelovi zračnih vodova: stupovi, izolatori i vodići. Stupovi mogu biti zatezni ili nosivi. Zatezni su stupovi masivniji od nosivih a na njima su lanci izolatora u približno horizontalnom položaju. Na nosivim stupovima lanci su izolatora u okomitom položaju. Stupovi dalekovoda postavljaju se na razmacima od 200–500 m, a udaljenost između zateznih stupova, koji su obično na prijelomima trase, iznosi 2–5 km.

Prilikom trasiranja dalekovoda treba se pridržavati propisa o vertikalnoj i horizontalnoj zoni sigurnosti. Za različite napone utvrđene su minimalne visine vodiča iznad zemljišta, prometnica, cjevovoda, drugih linija i objekata. U horizontalnom smislu sigurnosna zona lijevo i desno od trase iznosi najmanje 1,5 visine stupa dalekovoda.

Program geodetskih zadatka za projektiranje dalekovoda sadržava: radeve za idejni projekt, iskolčenje glavnih točaka trase na terenu, snimanja za glavni projekt i iskolčenje stupova.

Idejni projekt razrađuje se na osnovi projektnog zadatka u kojem su određene krajnje točke dalekovoda, usputne veze s rasklopnim postrojenjima i osnovne karakteristike dalekovoda. Povezivanjem zadanih točaka odabire se najpovoljnija trasa (ili njene varijante), vodeći računa o nizu ekonomskih i tehničkih zahtjeva (v. *Dalekovodi*, TE 3, str. 150). Za studije u toj fazi projektiranja dovoljne su karte državnog premjera u mjerilu 1:25000 do 1:100000. Kad se raspolaže zastarjelim kartama, trasa se utvrđuje rekognosciranjem na terenu.

Osnovna karakteristika trase dalekovoda jesu dugački pravci bez krivina. Prema idejnom projektu, na terenu se najprije iskolčuju, privremeno stabiliziraju i signaliziraju prijelomi trase (sjecišta pravaca), pri čemu nije potrebna veća točnost. Prijelomne točke obilježavaju se na osnovi grafičkih elemenata, odmjeravanjem od najbližih točaka geodetske osnove ili istaknutih građevina. Orientirajući se prema signaliziranim prijelomima, obilazi se teren uzduž trase, kako bi se zapazili svi detalji koji mogu utjecati na projekt. Eventualnim pomicanjem ili označavanjem novih prijelomnih točaka na terenu se definitivno utvrđuje smjer trase. Prijelomne se točke zatim trajnije stabiliziraju.

Od točaka državne triangulacije, gdje je to moguće, određuju se koordinate prijelomnih točaka trase metodom uvrštenih točaka, kao za triangulacijske mreže nižeg reda (v. *Triangulacija*). Koordinate služe za obilježavanje prijenosnih točaka u svrhu dogledanja uzduž pravaca. Zatim se na razmaku od ~200 metara postavljaju točke na osi trase i stabiliziraju jačim koljem. Te se točke postavljaju na dominantnijim mjestima terena. Tako obilježena trasa (strog ispruženi poligonski vlakovi) ujedno je geodetska osnova za snimanja potrebna za glavni projekt. Za linearne mjerena u takvim vlakovima dovoljna je točnost od 1:2000 do 1:3000. Vlakovi se priključuju na prijelomne točke trase.

Visinska osnova dobiva se niveliranjem svih stabiliziranih točaka na osi trase. Vlakovi s točnošću tehničkog nivelmana priključuju se na repere državne mreže najmanje svakih 15...20 km. U brdovitim terenima, gdje je primjena geometrijskog nivelmana otežana, vlakovi se mogu udaljiti od trase da bi se ponovno uključili na povoljnijem mjestu. Kote točaka na zaobiđenim dijelovima određuju se trigonometrijskim nivelmanom ili tahimetrijskom metodom. Na razmacima od 3...5 km posebno se stabiliziraju visinske točke (reperi) trase.

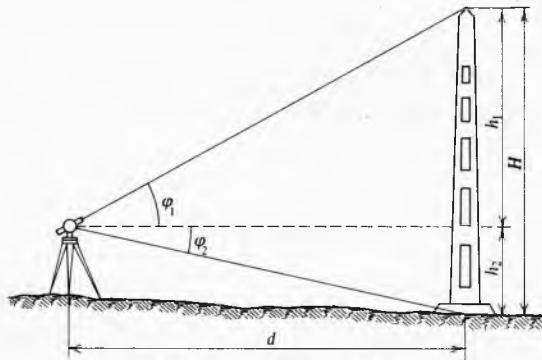
Geodetske podloge za glavni projekt dalekovoda sačinjavaju: situacija u mjerilu 1:2000 ili 1:5000 i uzdužni profil terena sa 5 ili 10 puta većim mjerilom za visine. Detaljne točke na uzdužnom profilu i užem pojasu, lijevo i desno od trase, snimaju se tahimetrijski sa stabiliziranih (položajno i visinski određenih) poligonskih točaka na osi trase. Treba snimiti sve visinske karakteristične točke terena na osi trase (tereni s većim poprečnim nagibom, s obzirom na trasu, snimaju se sustavom poprečnih profila), granice kultura koje mogu utjecati na visinu stupova (šume, voćnjaci), granice kliznih i močvarnih područja, korita potoka i rijeka, granice poplavnih područja za vrijeme visokih vodostaja i sve objekte unutar užeg pojasa trase. Područja prijelaza trase preko prometnih i drugih građevina snimaju se u većem mjerilu (1:1000, 1:500). Na podlogama za glavni projekt naročito je važno detaljnije prikazati sva mesta i građevine koje bi mogle biti kritične s obzirom na minimalnu visinu vodiča. Pri presjecanju drugih zračnih linija (telefonski, električni vodovi) određuju se visine njihovih stupova i vodiča.

Posredno određivanje visine građevine iznad terena prikazano je na sl. 53. Instrument se postavlja na mjesto udaljeno od građevine približno za $d = 2H$. Mjere se vertikalni kutovi φ_1 i φ_2 , a duljina d mjeri se vrpcem ili očitava na vertikalnoj

letvi pomoću daljinomjernih niti durbina. Visina je građevine

$$H = h_1 + h_2 = d(\tan \varphi_1 + \tan \varphi_2). \quad (123)$$

Kad se određuje visina nekog vodiča iznad zemlje, najprije se njegova linija projicira na teren, a instrument za mjerjenje vertikalnog kuta postavlja se približno okomito na liniju.



Sl. 53. Mjerenje visine građevine

Na izrađenim geodetskim podlogama, situaciji i uzdužnom profilu utvrđuje se položaj i visina svakog stupa trase (v. *Dalekovodi*, TE 3, str. 150). Stacionažom određena mjesta stupova obilježavaju se na terenu. Budući da se središta stupova nalaze na pravcu, njihovo se iskolčenje svodi na odmjeravanja uzduž obilježene trase. Odmjerava se razlika stacionaže, od najbliže poligonske točke na trasi, a pravac se određuje teodolitom. Iskolčenje se kontrolira domjeravanjem duljine od obilježenog središta do susjedne poligonske točke. Temelji se stupa iskolčuju sa središta orientacijom na uzdužnu os trase.

GEODETSKI RADOVI U HIDROTEHNICI

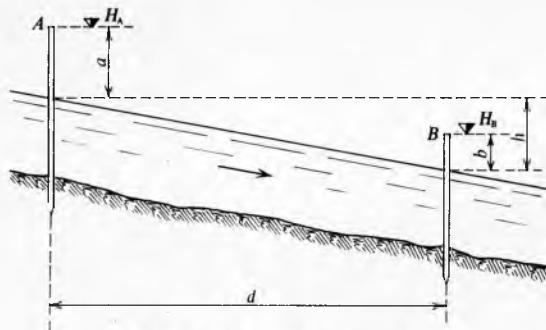
Važniji geodetski radovi u hidrotehnici jesu određivanje pada razine vode, brzine vode i smjera struje, te snimanje poprečnih profila riječnog korita. Uz situaciju, osnovna podloga za projektiranje hidrotehničkih građevina jest uzdužni profil rijeke koji se izrađuje prema elementima poprečnih profila i snimljenim obalama (v. *Hidrologija*, TE 6, str. 396; v. *Hidrometrija*, TE 6, str. 416).

Pad razine vode. Uzdužni profil rijeke određuje se uz pretpostavku da je razina vode izmjerena istog trenutka na točkama raspoređenima uzduž vodotoka. Cijeli se tok rijeke podjeli na dionice (20...50 km), a svaka dionica na manje poteze. Na granicama dionica postave se stalne ili privremene vodo-mjerne stanice; za vrijeme radova na njima se najmanje tri puta dnevno očitavaju vodostaji. Iz tih opažanja utvrđuje se zakonitost kolebanja razine vode tokom vremena. Tako se dobivaju parametri pomoću kojih se izmjerene razine vode unutar dionica mogu reducirati na visinu nekog vodostaja za cijelu rijeku. Prema tome, razlikuju se radna razina vode u trenutku mjerjenja i reducirana razina, odnosno vodostaj, preračunat na isti trenutak za cijelu rijeku ili za njen veći dio.

Unutar jedne dionice, na određenim razmacima, u koritu rijeke se zabiju jači kolci tako da vire iz vode 30...50 cm. Duljine poteza su različite, već prema promjeni poprečnog profila, odnosno nagiba razine vode. U srednjem i donjem toku većih rijeka duljina poteza iznosi od 200 m do nekoliko kilometara; u gornjim tokovima i za brdske rijeke odabiru se kraći potezi. Kolci se postavljaju uz obalu, na plitkim i ogradienim mjestima zaštićenim od valova. Obično se, radi kontrole, postavljaju po dva kolca na manjem razmaku (1...3 m), a također i u parovima na objema obalama.

Jedna je dionica podijeljena na više poteza s različitim nagibima vodene razine. Na svim kolcima jedne dionice razina se vode mjeri istodobno, odnosno unutar kraćeg vremenskog intervala. Općenito, za određivanje pada razine izabire se doba ustaljenih vodostaja, kad se ne pojavljuju vodenii valovi.

Razina se bilježi na kolcu olovkom, a metrom ili ravnalom odmjerava se razmak od vrha kolca (a, b na sl. 54). Ako su



Sl. 54. Određivanje pada razine vode

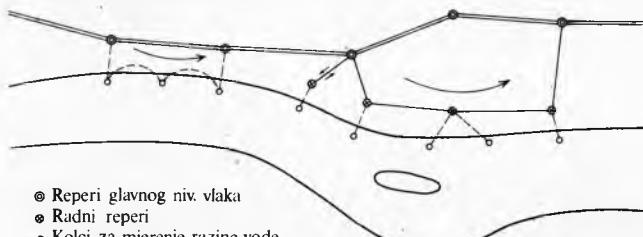
H_A i H_B kote susjednih kolaca, visinska je razlika razine vode na mjestima A i B

$$h = (H_A - a) - (H_B - b) = \Delta H_{AB} - (a - b), \quad (124)$$

a nagib razine vode

$$i = \frac{h}{d} 1000\%, \quad (125)$$

Kote vrhova kolaca dobivaju se niveliranjem od repera državne mreže, odnosno od glavnog vlaka. Budući da se glavni nivelmani vlakovi obično povlače po tvrdom terenu, oni su često udaljeni od riječnih korita. Tada se kote kolaca određuju od radnih repera priključenih na glavnu mrežu (sl. 55). Radni reperi stabiliziraju se što bliže koritu rijeke, ali tako da ipak budu na čvršćem terenu. Za jednostrano priključene (slijepe) radne nivelmane vlakove visinske se razlike moraju odrediti niveliranjem u oba smjera. Samo za kraće zatvorene vlakove primjenjuje se metoda dvostrukog niveliranja pomakom horizonta instrumenta.



Sl. 55. Visinska osnova za određivanje pada razine vode

Točnost određivanja nagiba razine vode i (125) ovisi o točnosti mjerjenja visina. Za položajno određivanje kolaca nije potrebna veća točnost. Često je za manje nagibe dovoljno točno očitanje duljine d s postojećih planova. Za veće nagibe (gornji tok) može se za mjerjenje visina primijeniti tajometrijska metoda ili trigonometrijski nivelman umjesto geometrijskog nivelmana, jer je to ekonomičnije.

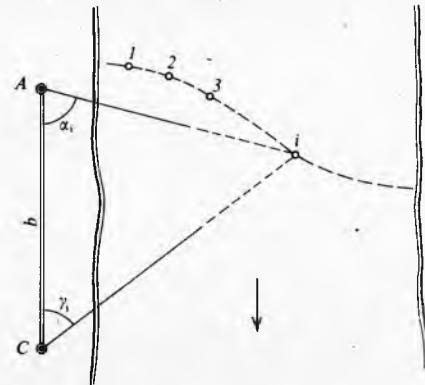
Brzina toka vode. Okomito na tok vode iskolče se i na obalama signaliziraju tri paralelna profila: uzvodni, glavni i nizvodni. Razmak između profila treba biti približno toliki da ga plovak na najbržem dijelu rijeke prijeđe za 30–40 sekunda. S čamca, oko 5–10 metara uzvodno od gornjeg profila, puštaju se plovci na različitim dijelovima rijeke po širini. Stopericom se mjeri vrijeme prolaza plovka kroz sva tri profila. Osim toga, na glavnom profilu određuje se položaj plovka u koritu rijeke. Površinska brzina toka vode v , na mjestu glavnog profila, dobiva se iz formule

$$v = \frac{L}{t}, \quad (126)$$

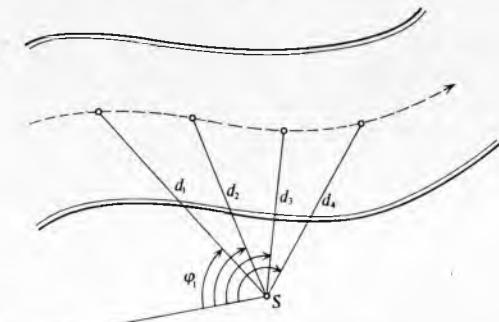
gdje je L razmak između uzvodnog i nizvodnog profila, a t vrijeme koje je potrebno da plovak prođe taj razmak. Aritmetička sredina svih brzina na glavnom profilu površinska je brzina rijeke.

Točnije, brzina toka vode mjeri se hidrometrijskim krilom (v. *Hidrometrija*, TE 6, str. 418). S hidrometrijskim krilom može se brzina mjeriti i na različitim dubinama rijeke.

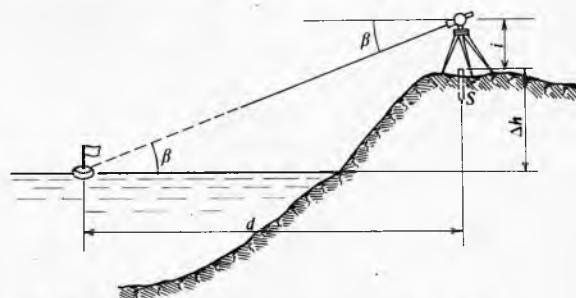
Smjer struje određuje se opažanjem putanje plovka na različitim dijelovima rijeke. Položaj plovka određuje se na dva načina: ili simultanim presjekom s neke baze na obali (sl. 56), ili polarnom metodom kad se mjeri orientacijski kut φ i udaljenost plovka d (sl. 57). Udaljenost od stajališta do plovka može se odrediti: a) mjerjenjem vertikalnog kuta β (sl. 58).



Sl. 56. Mjerjenje sa dva teodolita



Sl. 57. Snimanje smjera struje



Sl. 58. Određivanje duljine mjerjenjem vertikalnog kuta

Poznavajući visinsku razliku Δh između razine vode i stajališta teodolita te visinu instrumenta i , udaljenost do plovka iznosi

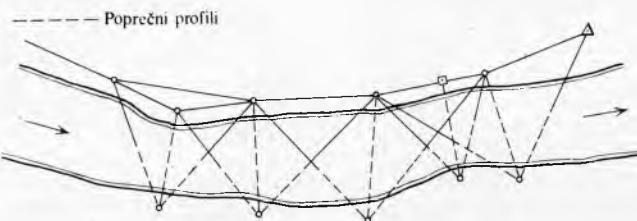
$$d = (\Delta h + i) \cot \beta. \quad (127)$$

Na točnost određivanja udaljenosti znatno utječe vrijednost kuta β . Zbog toga se ta metoda uspješno primjenjuje samo kad su obale visoke; b) optičkim daljinomjerom s bazom u stajalištu (v. *Daljinomjeri*, TE 3, str. 166); c) fotogrametrijski. U rijeku se tada puštaju plovci različitog izgleda. Sa dva fototeodolita, simultanim snimanjem s neke baze na obali, dobiva se stereopar, a na autografu smjer strujanja.

Snimanje poprečnih profila riječnog korita. Poprečni profili snimaju se na karakterističnim mjestima riječnog korita. Stabiliziraju se trajnjim oznakama, a postavljaju se približno

okomito na smjer vodenog toka. Razmak između profila ovisi o promjenama oblika korita, pa može varirati od nekoliko desetaka do više stotina metara.

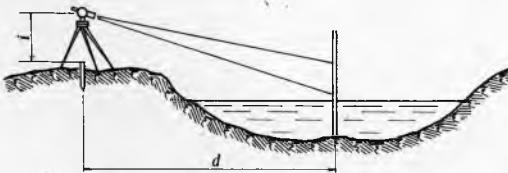
Geodetska je osnova za snimanje trigonometrijska, poligonska i nivelmanska mreža. U našim prilikama, kad postoji trigonometrijska mreža nižeg reda, prilikom prognošćivanja osnove, najracionalnije je primijeniti poligonometrijsku metodu. Kombinirani postupak prikazuje sl. 59. Poligonski vlast je uzduž jedne obale, dok se točke na drugoj obali određuju presjekom pravaca. Često se primjenjuju mikrotriangulacijski lanci trokuta ili geodetskih četverokuta koji su, kao i poligonometrija, povezani na trigonometrijske točke državne mreže.



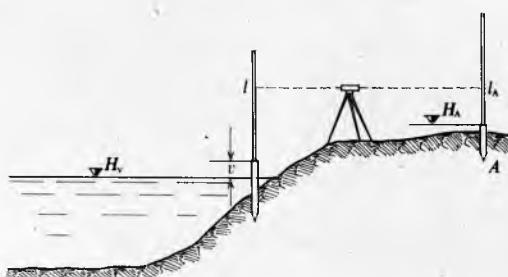
Sl. 59. Geodetska osnova za snimanje poprečnih profila riječnog korita

Krajnje točke poprečnih profila obično se postavljaju blizu riječnog korita. Položajno su određene pomoću poligonometrije, trigonometrijski ili kombinirano, a visinski niveliранjem. Osim za snimanje profila, uz ostale točke geodetske osnove, služe i za snimanje šireg područja s objiju strana riječnog korita. Pri tom se najčešće primjenjuje tahimetrijska metoda snimanja.

Mjerenje profila riječnih korita manjih brdskih rijeka, koje se u sušno godišnje doba mogu pregaziti, vrlo je jednostavno. Detaljne točke korita snimaju se redovito tahimetrijski, s jedne od krajnjih točaka profila. Tahimetrijska letva postavlja se na dno riječnog korita (sl. 60).



Sl. 60. Snimanje poprečnih profila manjih rijeka



Sl. 61. Određivanje kote razine vode

Kote detaljnih točaka korita većih rijeka dobivaju se posredno: mjerenjem dubine, uz poznatu kotu razine vode u trenutku snimanja. Kotu razine vode H_v određuje se nivelišanjem kolca uz obalu i odmjeravanjem razine vode v od vrha kolca (sl. 61) iz relacije

$$H_v = H_A - (l - l_A) - v, \quad (128)$$

gdje su l_A i l očitanja na letvama. Vremenom se mijenja kota razine vode. Ako snimanje poprečnog profila traje duže vrijeme, a pojavljuju se veće promjene razine, vrijednost v mjeri se i nekoliko puta tokom snimanja. Tada se bilježi i

vrijeme mjerena kako bi se kasnije, pri računanju kota detaljnih točaka, uvele korekture.

Metode snimanja poprečnih profila razlikuju se u određivanju položaja detaljnih točaka na profilu. Za veće rijeke glavne su metode snimanja: pomoću zategnutog užeta preko rijeke, presjecanjem naprijed s izabrane baze na obali i tahimetrijska metoda.

Mjerenje pomoću zategnutog užeta. Preko rijeke se zategne čelično uže koje na sebi ima podjelu za odmjeravanje. Podjela je obično označena na svakih 0,5 m. Čelično je uže pričvršćeno na jednoj obali za kolac, a na drugoj je obali namotano na bubanj i dobro zategnuto (sl. 62).

Za položajno određivanje točaka profila 1, 2, 3... izmjeri se udaljenost a od stabilizirane krajnje točke poprečnog profila A do početne oznake podjele na čeličnom užetu. Ako su O_1, O_2, O_3, \dots očitanja na čeličnom užetu, apscisne su udaljenosti detaljnih točaka profila od početne točke A :

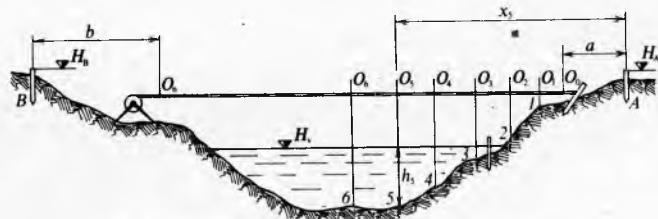
$$x_1 = a + O_1, \quad x_2 = a + O_2, \dots, x_i = a + O_i. \quad (129)$$

Radi kontrole mjeri se i udaljenost b od neke oznake na čeličnom užetu O_n do druge krajnje točke profila B . Kako je udaljenost AB poznata iz položajnog određivanja krajnjih točaka profila, točnost se kontrolira relacijom

$$AB = a + O_n + b. \quad (130)$$

Mjerenje b također služi za popravke apscisa x_i kad čelično uže nije dobro zategnuto.

Visinsko određivanje točaka na profilu iznad vode vrlo je jednostavno: kote se dobivaju nivelišanjem ili tahimetrijski na osnovi poznatih visina krajnjih točaka profila (H_A, H_B).



Sl. 62. Snimanje profila pomoću zategnutog užeta

Kote točaka koje su ispod razine vode dobivaju se prema određenoj koti razine vode H_v mjerjenjem dubine vode h_i za svaku točku profila. Dubina se može mjeriti na različite načine, već prema brzini i dubini vode te raspoloživom priboru. Kad su manje dubine, upotrebljava se obična letva s podjelom ili sondna motka. Sondne su motke dugačke 4–7 m, okruglog su presjeka promjera 3–5 cm, s podjelom na decimetre. Na donjem kraju pričvršćena je okrugla željezna ploča, da motka pravilnije tone i da ne upadne u muljevitno dno (sl. 63). Takvom



Sl. 63. Sondna motka i sondni visak

motkom mjeri se dubine do ~6 m. Za veće dubine upotrebljava se sondni visak. To je fleksibilno uže s podjelom, koje ima na kraju uteg od 2–10 kg takva oblika da ne tone u mulju.

Apscisne udaljenosti između detaljnih točaka odabiru se prema širini korita i prema nepravilnosti dna, a iznose od 0,5...5,0 m. Ekipa za snimanje sastoji se od jednog ili dva stručnjaka i nekoliko pomoćnika. Pomoćnici održavaju čamac na smjeru profila i pokreću ga od jedne prema drugoj obali. Na određenim razmacima jedan od pomoćnika mjeri dubinu vode i diktira očitanja na čeličnom užetu O_i i dubinu h_i , što se unosi u zapisnik mjerena.

Umjesto održavanja čamca veslima, može se razapeti između obala posebno uže pomoću kojeg se upravlja čamacem. To se primjenjuje kad je korito usko a rijeka brza, pa je zadržavanje čamca veslima otežano.

Na velikim i dubokim rijeckama te kad se snimaju profili jezera i mora mjeri se dubine s echosonderom (v. *Hidrometrija*, TE 6, str. 418).

Točnost mjerena dubine iznosi od ± 10 do ± 20 cm.

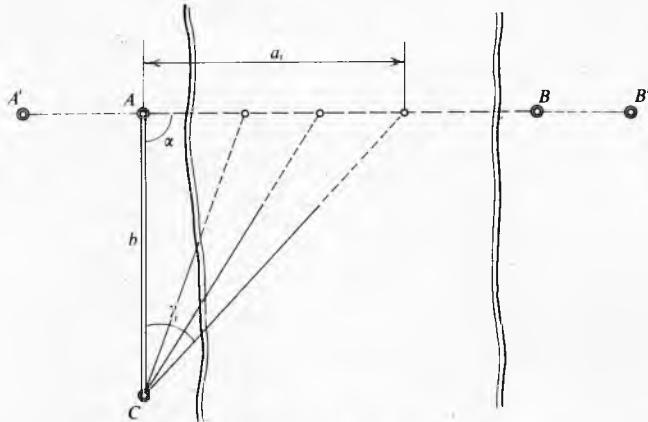
Mjerenje presijecanjem pravaca. Na širokim rijeckama otežano je postavljanje čeličnog užeta. Ono se, naime, ne može dovoljno zategnuti. Tada se za položajno određivanje detaljnih točaka profila primjenjuje metoda mjerena presijecanjem pravaca.

Na obali rijeke stabilizira se i izmjeri baza $AC = b$ i kut α (sl. 64). Čamac se odoka utjeruje u pravac profila AB pomoću signaliziranih točaka $A'A'$ ili $B'B'$. U momentu mjerena dubine u točki C teodolitom se izmjeri kut γ_i . Udaljenosti a_i od krajnje točke profila A do pojedinih detaljnih točaka dobivaju se prema formuli:

$$a_i = \frac{b \sin \gamma_i}{\sin(\alpha + \gamma_i)}. \quad (131)$$

Kad je baza okomita na poprečni profil ($\alpha = 90^\circ$), a_i se izračunava iz formule

$$a_i = b \tan \gamma_i. \quad (132)$$



Sl. 64. Mjerenje s jednim teodolitom

Na brzim rijeckama čamac je teško održavati na pravcu AB . Za položajno određivanje točaka tada su potrebna dva instrumenta postavljena na krajevima baze A i C . Za svaku točku profila ($1, 2, \dots, i, \dots$) simultano se mijere kutovi α_i i γ_i (sl. 56). Detaljne se točke određuju presijecanjem. S obzirom na potrebnu točnost presijecanje se ne određuje numeričkim već grafičkim postupkom. Na plan se nanose izmjereni kutovi α_i i γ_i , a u presjeku se dobiva položaj detaljne točke.

U ekipi za snimanje potrebna su tri stručnjaka: jedan u čamcu i dva na obali za mjerene kutova α_i i γ_i . Kao signalna značka za presjek služi vertikalni signal na čamcu ili jarbol. U trenutku mjerena dubine pomoćnik u čamcu daje znak opservatorima na obali da izmjere kutove.

Snimanje tahimetrijskom metodom. Uspješno se primjenjuje na plitkim rijeckama koje se mogu pregaziti kad se tahimetrijska letva može postaviti neposredno na dno (sl. 60). Primjena je moguća i za široke mirne rijeke s malom brzinom toka. Sa stajališta na obali mjeri se orientacijski kutovi i duljine na tahimetrijskoj letvi pričvršćenoj za jarbol čamca. Kote točaka dobivaju se mjeranjem dubina. Potrebno je raspolagati većim,

stabilnijim čamcem, jer njegovo njihanje mnogo otežava očitavanje podjele na vertikalnoj letvi. Umjesto uobičajenog tahimetrijskog instrumenta, određenu prednost imaju daljinomjeri s bazom u stajalištu.

Uzdužni profil rijeke. Na osnovi poprečnih profila, izmjerena padova razine vode i snimljenih obala izrađuje se uzdužni profil rijeke. Za razliku od profila prometnica, uzdužni profil rijeke sadrži znatno više elemenata. U profil se unose: stacionaža (obično se računa od ušća rijeke idući po osi riječnog korita), kote dna riječnog korita (maksimalne dubine), kote radnih razina vode s datumom niveliranja, kote razina vode reduciranih na stanje u određenom trenutku, maksimalni vodostaji zabilježeni na vodomjernim stanicama, nagib razine vode, brzine vode, kote obala, obrambenih nasipa i sl., te stacionaže i kote vodomjernih stanica, objekata na rijeci itd. Svaki uzdužni profil ne mora sadržavati sve navedene elemente. Radi preglednosti može se za istu rijeku izraditi više profila, s različitim sadržajem i podacima, koji ne moraju biti u istom mjerilu.

Zbog velike razlike u dimenzijama između horizontalnih i visinskih odnosa grafički prikaz uzdužnog profila izrađuje se u različitim mjerilima za horizontalnu i vertikalnu os. Za izbor horizontalnog mjerila najmjerodavniji je prikaz svih karakterističnih točaka dna riječnog korita. Te se točke redovito nalaze na manjem razmaku, a po visini variraju više od ostalih točaka profila. Tako se i izbor vertikalnog mjerila redovito temelji na visinskim razlikama dna korita. Izbor mjerila općenito ovisi o nagibu razine vode rijeke i o svrsi za koju se profil izrađuje.

Uzdužni prifili prikazuju se u mjerilima: horizontalnom od 1:5000 do 1:500 000 i vertikalnom od 1:50 do 1:1000.

LIT.: O. Sarrazin, H. Oberbeck, Priručnik za obeležavanje krivina sa prelaznicama ili bez njih na železnicama, drumovima i kanalima. Subotica 1955. — M. Janković, Inženjerska geodezija II. Tehnička knjiga, Zagreb: II dio, 1966; I dio, 1968. — B. Žnidarić, Priručnik za obeležavanje prelaznice oblika klotoidne pravouglim koordinatama. Građevinska knjiga, Beograd 1966. — Č. Cvjetković, Primena geodezije u inženjerstvu. Građevinska knjiga, Beograd 1970. — H. N. Lebedev, Kurs inženjerne geodezije. Nedra, Moskva 1970. — Г. Л. Левенчик, Курс инженерной геодезии. Недра, Москва 1970. — Справочник геодезиста, книга 2. Недра, Москва 1975.

Z. Narobe

MJERNA NESIGURNOST, podatak u mernom rezultatu kojim se iskazuje s kolikom je nesigurnošću poznata izmjerena vrijednost fizikalne veličine. Mjerenje je eksperimentalni postupak kojim se doznae vrijednost fizikalne veličine. Mjeriti se mogu samo jednoznačno definirane fizikalne veličine (v. *Metrologija, zakonska*), i to prema mjerenoj jedinici ili prema nekoj drugoj jednoznačno definiranoj referentnoj vrijednosti mjerene fizikalne veličine. Svaki se mjeri rezultat (izmjerena vrijednost fizikalne veličine) doznae s nekom pogreškom, tj. svaki je rezultat više ili manje nesiguran.

Iskazivanje mernog rezultata. Radi jedinstvenosti mjeriteljskog sustava državni standardi (DIN, ГОСТ, BS itd.) propisuju *način iskazivanja nesigurnosti*. Kao obvezni sastavni dijelovi mernog rezultata iskazuju se: a) izmjerena i standardnim postupkom obrađena vrijednost mjerne fizikalne veličine x , b) merna nesigurnost (pogreška) $U(x)$ iskazana svojom donjom i gornjom granicom, c) statistička sigurnost (vjerojatnost) P da se naznačena nesigurnost nalazi unutar iskazanih granica (v. jednadžbe (7) i (8)). Npr., izmjerena topolinska provodnost ($x = \lambda$) neke izolacijske tvari pri naznačenoj srednjoj temperaturi, vlažnosti i tlaku iznosi

$$\lambda = 59 \frac{\text{mW}}{\text{Km}}, \quad U(\lambda) = \pm 3 \frac{\text{mW}}{\text{Km}}, \quad P = 0,68.$$

Mjerni se iskaz može napisati i u obliku

$$\lambda = (59 \pm 3) \frac{\text{mW}}{\text{Km}}, \quad P = 68\%,$$