

Prema originalu opisa lista plana ili karte montira se sav unutrašnji i vanjski opis lista plana ili karte.

Tada se pristupa umnožavanju listova plana ili karte u jednoj ili više boja.

LIT.: Pravilnik o katastarskom premeravanju, II deo, Poligona i linijska mreža; III deo, Omedavanje i snimanje detalja; V deo, Izrada planova i računanje površina. Ministarstvo finansija, Beograd 1930. — Topografski ključ za planove u razmerama 1 : 500, 1 : 1000, 1 : 2000 i 1 : 2500. Glavna geodetska uprava, Beograd 1955. — Pravilnik za državni premer; II deo, Opšte odredbe o promeru i propisi o linijskoj mreži; III deo, Razgraničenje i snimanje detalja i reljeta zemljista i detaljni nivelman. Savezna geodetska uprava, Beograd 1958. — Uputstvo za fotogrametrijske radove na državnom premeru. Savezna geodetska uprava, Beograd 1962. — Uputstvo za fotogrametrijske radove na državnom premeru; II deo, Kancelarijski radovi. Savezna geodetska uprava, Beograd 1964. — Kartografski ključ za osnovnu državnu kartu u razmeri 1:5000 i 1:10000. Savezna geodetska uprava, Beograd 1964. — Pravilnik o tehničkim propisima za izradu originala planova i određivanje površina parcela pri premeru zemljista. (Službeni list, br. 8/1970), Beograd 1970. — Zakon o geodetskoj izmjeri i katastru zemljista. (Narodne novine, br. 16/1974), Zagreb 1974. — Zbirka kartografskih znakova. Prilog Pravilniku kartografskim znakovima. (Narodne novine, br. 24/1976), Zagreb 1976. — A. L. Higgins, Higher Surveying. London 1944. — W. Jordan, C. Reinhardt, O. Eggert, Handbuch der Vermessungskunde. Stuttgart 1935—1966. — S. Macarol, Praktična geodezija. Tehnička knjiga, Zagreb 1968. — F. Braum, Elementarna fotogrametrija. Sveučilište u Zagrebu, Zagreb 1969.

Z. Gjurgjan

## GEODETSKI INSTRUMENTI I UREĐAJI

upotrebljavaju se za geodetska mjerena i ispitivanja (v. *Geodezija*). Vrlo različiti zadaci geodetskih mjerena u izmjeri zemljista, primjenjenoj geodeziji u inženjerskim radovima, melioracijskoj izmjeri, zatim u fizikalnoj geodeziji i drugim praktičnim i znanstveno-istraživačkim radovima uvjetovali su razvoj i primjenu raznovrsnih mjernih instrumenata. Radi preglednosti instrumenti se svrstavaju u osnovne grupe: instrumenti za mjeru kutova, iskolčenje i ispitivanje pravaca, instrumenti za mjeru visinskih razlika, instrumenti za mjeru duljina, tajimetri, laboratorijski mjerni instrumenti i uređaji. Posebnu grupu čine fotogrametrijski mjerni instrumenti i uređaji, koji se upotrebljavaju pri izvođenju i obradi geodetskih radova primjenom posebnih metoda snimanja (v. *Fotogrametrija*). U posebnu grupu moraju se izdvojiti i instrumenti koji se primjenjuju u geofizičkim mjerjenjima, gravimetriji (v. *Gravimetrija*) i geodetskoj astronomiji.

Već od najstarijih vremena aktivnost i interes čovjeka usmjereni su i na različita mjerena pri određivanju udaljenosti, visinskih razlika, položaja objekata, a zatim pri izvedbi građevina, izradbi karata i pri astronomskim istraživanjima. Potreba mjerena uvjetovala je razvoj mjernih metoda i instrumenata kojima su se bavile posebne znanstvene discipline: geodezija i astronomija (v. *Astronomija*; v. *Geodezija*).

Prva pisana djela o mjernim instrumentima pojavila su se pred više od 2000 godina. Heron iz Aleksandrije napisao je djelo *περὶ διόπτρας* peri dioptrias *O dioptri*. Uz različite zadatke mjerena, u tom je djelu opisan i instrument s ugradenom kružnom horizontalnom pločom i linealom za viziranje. Instrument je imao i poseban uređaj za mjeru visinskih razlika, temeljen na primjeni spojenih posuda, a sastojao se od brončane cijevi s nastavcima od staklenih cijevi u obliku slova U. Na točke bila je postavljena letva s podjelom, a vertikalno po letvi pomicala se marka do vizirane visine. Instrumenti, poznati u doba aleksandrijske epohe, nisu se znatno izmjenili sve do XVII st. U to vrijeme bile su poznate različite konstrukcije uređaja za viziranje i za mehaničko mjerene duljine. Prva kružna podjela nalazi se na astrolabu (poznat već od Hiparha), koji je služio za mjerene visinskih razlika, a zatim visinskih kutova. Arapi uvođe stupanjsku podjelu, pa je astrolab u srednjem vijeku najviše upotrebljavani instrument. Postavljen horizontalno, preteća je današnjih teodolita. U XVI st. konstruiran je i merni stol s linealom za viziranje.

Tek konstruiranjem durbina (1609) i mikroskopa nastaje nova era u razvoju mjernih instrumenata. Prva geodetska mjerena uz primjenu durbina duljine 1 m načinio je francuski astronom J. F. Picard (1670) prilikom njegovih gradusnih mjerena. Niti

prvih mjernih durbina bile su tanke žice, svilene niti, ili niti paučine. God. 1748. primjenjuje Tobias Mayer staklenu pločicu s urezanim crtama. God. 1674. upotrebljava J. F. Picard pri mjerjenjima i uređaj za niveleranje i mjerene malih visinskih kutova. To je durbin s njihalom duljine 1,30m. Razvoj niveleri i uređaja za horizontiranje započinje izuzom cijevne libele (1662, Thévenot), dok se dozna libela primjenjuje tek od 1770 (J. Mayer). Nivelir s reverziskom libelom konstruiran je 1857.

Prvi teodolit, u osnovi sličan današnjem teodolitu, izradio je engleski mehaničar John Sisson (1730). U istom stoljeću poboljšan je radovima J. Shorta, Adamsa, a posebno Lessa Ramsdena, koji je uveo i mikrometrički vijak (1783) za točnija očitavanja limbova pomoći mikroskopa i konstruirao okular sa dvije leće. Okular sa tri leće uvodi mehaničar Kellner (1849). J. Ramsden je izradio i prvi kvalitetan stroj za izradbu podjele krugova (1763), a 1840. uvodi se prvi automatski stroj (Oertling). Nakon konstrukcije prvih akromatskih objektiva (J. Dollond, 1758), pojavljuje se i prvi geodetski durbin s akromatskim objektivom (J. Ramsden, 1878). Znatan razvoj dalekozora postignut je radovima J. Fraunhofera koji uvodi proračun i mjeru kontrolu optičkih sustava.

Kutno zrcalo za iskolčenje okomica pronašao je londonski mehaničar Adams (1740), a poslije se za tu svrhu uvodi trostrana pravokutna prizma (Bauernfeind, 1851), a zatim i pentagonalna prizma (Goulier, 1864).

Velike zasluge za modernizaciju geodetskih instrumenata pripadaju H. Wildu (1877—1951), koji dolaskom u tvornicu Zeiss u Jeni osniva odjeljenje za geodetske instrumente. On uvodi unutrašnje izoštivanje konstrukcijom teleobjektiva (1908) i time znatno skraćuje durbin i poboljšava kvalitetu viziranja, uvodi cilindrične osi, libelu s koincidencijom mjeđuhura (1908), staklene limbove umjesto metalnih. H. Wild je konstruirao i prvi optički teodolit (1922) s optičkim mikrometrom s plan-paralelnim pločama. Prvo uvođenje tih znatnih promjena bilo je tehnološki teško izvedivo zbog sjedinjavanja više optičkih elemenata u malom prostoru instrumenta, no bio je to znatan korak u razvojnom putu do suvremenih instrumenata.

Očitanje pomoći skale uvodi Hensoldt (1879), a jednostavni optički mikrometar H. Heckmann-Fennel (1930). H. Wild je konstruirao teodolit s dvostrukim krugovima (DK-teodoliti tvornice Kern) i medialni teodolit (DKM-3, 1936), koji se proizvodi i danas. Prvi teodolit s fotografском registracijom podataka konstruiran je prema E. Gigasu 1942. Teodoliti i tajimetri s automatskom registracijom podataka uz kodirane podjele pojavljuju se 1963 (tvornica Fennel) i 1965 (tvornica Kern). Digitalni teodolit, tj. teodolit s digitalnim očitavanjem krugova i mogućnosti automatske registracije konstruiran je 1965 (Breit-haupt).

Iako su svojstva zvrka poznata od 1852 (L. Foucault), konstrukcija giroteodolita pojavljuje se oko 1950, a serijska proizvodnja 1960 (KT-1, Fennel). Od 1963. izrađuju se girosustavi i kao dodatak teodolitu.

Pokušaji automatskog horizontiranja vizurne linije durbina poznati su već u XVIII st. S durbinom, kao i s njihalom i zrcalom, ispred objektiva (Couturier, 1878) za otklon vizurne osi za  $90^\circ$  postignuta je točnost horizontiranja  $\pm 10''$ . Claude i Driencourt (1900) primjenjuju živin horizont za horizontiranje durbina, a H. Wild (1922) uključuje takav horizont, kao optičku plohu, u preslikavanje durbina s točnošću horizontiranja  $\pm 1''$ . H. Heckmann (1932) uvodi preslikavanje mjeđuhura libele u vidno polje durbina radi automatske korekcije očitavanja. Na tom principu konstruirao je Stodoljkjević (1946) vrlo kvalitetan niveler koji je primjenjen u SSSR-u. Međutim, prekretnica u razvoju niveleri s automatskim horizontiranjem nastaje 1950, kada je tvornica Opton (Zeiss) u Oberkochenu proizvela niveler Ni2 (sl. 46) uz primjenu optičkog kompenzatora (optičkog elementa na njihalu). Optički element kompenzatora je pravokutna prizma gdje se za razliku od čitavog durbina (Couturier) njiše svega 1/100 mase durbina. Uz praktični oblik i veličinu vrlo se brzo afirmirao u praksi, te se uskoro razvijaju i primjenjuju brojni niveleri s automatskim horizontiranjem. Slično se zamjenjuje i libela vertikalnog kruga teodolita. Nakon što je tvornica Opton u Oberkochenu uvela automatizaciju preslikavanjem mjeđuhura

# GEODETSKI INSTRUMENTI

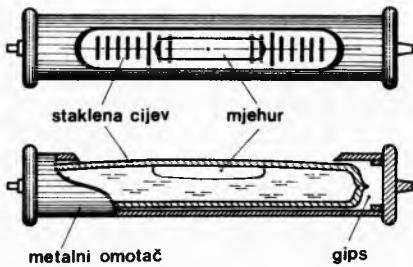
libele vertikalnog kruga u vidno polje mikroskopa kao indeksa za očitavanje (teodolit Th3), tvornica Askania iz Berlina primjenjuje prvi optički kompenzator — pravokutnu prizmu na njihalu (1956), čime se također postepeno eliminira libela vertikalnog kruga, pa se konstruirala više teodolita s automatskim stabiliziranjem indeksa.

Razvoj instrumenata za mjerjenje duljina započinje također u XVII st., nakon izuma durbina. Sve do polovine ovog stoljeća to je razdoblje razvoja mehaničkog i optičkog mjerjenja duljina. Pronalaskom invara uvode se u mjerjenja invarske zice i vrpce (R. Benoit i C. E. Guillaume, 1898). Wäisälä (1923) primjenjuje interferenciju svjetlosti za najtočnija mjerena duljina. Važno razdoblje razvoja optičkog mjerena duljina jest prva polovina ovog stoljeća, kada je konstruirano mnogo vrlo kvalitetnih optičkih daljinomjera, no s njima se direktno mjeri samo vrlo male duljine. Razvojem elektroničkih daljinomjera u geodetskim mjerjenjima (E. Bergstrand, Geodimetar i prva serijska proizvodnja svjetlosnog daljinomjera Mod. 2A 1953) i mikrovalnog daljinomjera (T. Wadley—Telurometar 1956) započelo je najvažnije razdoblje u rješavanju problema mjerena duljina i razvoja instrumentalne mjerne tehnike uopće. God. 1960. konstruiran je laser (T. H. Maiman), koji je uskoro primijenjen u geodetskim instrumentima. U isto vrijeme konstruirana je fotodioda kao izvor i modulator svjetlosnih valova, koja će znatno ubrzati razvoj elektrooptičkih daljinomjera kratkog doseg-a. Električki tachimetri ulaze u serijsku proizvodnju 1968 (Wild, DI 10; Reg Elta, Opton) i njihova pojava uvjetuje razvoj elektroničke tachimetrije i automatizacije geodetskih radova. Elektroničkim mjerjenjem duljina riješen je problem direktnog mjerena duljina u geodeziji. Konstrukcija elektroničkih daljinomjera i njihova primjena jedno je od velikih dostignuća ovog stoljeća u razvoju geodezije.

## LIBLE

Libela je sastavni dio gotovo svih geodetskih instrumenata i pribora. Služi za postavljanje karakterističnih osi instrumenata u vertikalni ili horizontalni položaj, a u nekim slučajevima i za mjerjenje odstupanja od tog položaja. U novije vrijeme često se zamjenjuje i optičkim kompenzatorima koji djeluju na principu njihala. U geodetskim mjerjenjima libele se upotrebljavaju za postavljanje znački, mernih letvi i sl. u ispravan položaj. Prema obliku razlikuju se dvije vrste libela s tekućinom: cijevne i dozne.

**Cijevna libela** sastoji se iz staklene cijevi u unutrašnjosti brušene u bačvastom obliku, ispunjene tekućinom vrlo niskog ledišta (ispod  $-50^{\circ}\text{C}$ ), većinom eterom, i učvršćene u zaštitnom metalnom omotaču s otvorom za promatranje mjejhura libele (sl. 1).

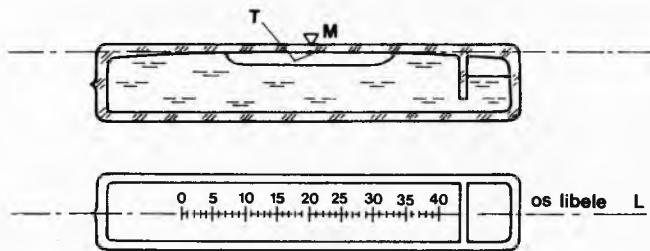


Sl. 1. Cijevna libela

Kvaliteta libele ovisi o točnosti brušenja kružnog luka uzduž kojeg klizi mjejur. Za promatranje ili očitavanje položaja mjejhura libele nacrtana je skala na vanjskoj strani staklene cijevi. Razmak crtica skale jest 2 mm (prije 2,2558 mm, tzv. pariška linija), a naziva se *pars libele*. Podjela može biti kontinuirana ili prekinuta. Srednja točka podjele je *marka libele M* (sl. 2).

**Tjeme libele T** nalazi se na unutrašnjoj brušenoj plohi u točki u kojoj je presijeca pravac položen markom libele i središtem zakrivenosti kružnog luka libele. Tangenta položena tjemenom libele u ravnini glavnog presjeka libele naziva se *glavna tangenta* ili *os libele*. Padne li sredina mjejhura u tjeme libele, kaže se da libela *vrhuni* i tada je os libele horizontalna,

tj. okomita na smjer djelovanja sile teže (vertikalnu). Budući da je sredina mjejhura libele pri promatranju okom nedovoljno točno određena, to se vrhunjenje libele promatra pomoću krajeva mjejhura, tj. simetričnog položaja mjejhura s obzirom na marku libele. U svakom drugom položaju postoji otklon mjejhura libele, ili kraće: otklon libele. Očitanjem položaja mjejhura na skali moguće je pomoću libele izmjeriti mali nagib podloge ili os instrumenta na kojoj je postavljena, no za takva mjerena libela mora biti rektificirana. Za upotrebu libele pri mjerenu potrebno je poznavati njen osnovni podatak, a to je njena *osjetljivost*.



Sl. 2. Libela s kontinuiranom podjelom

Osjetljivost libele određena je središnjim kutom koji odgovara luku od jednog parsa. Označi li se duljina luka parsa sa  $a$ , a polumjer zakrivenosti kružnog luka sa  $r$ , to će osjetljivost libele biti:

$$\epsilon'' = \frac{a}{r} \varrho'' \quad (1)$$

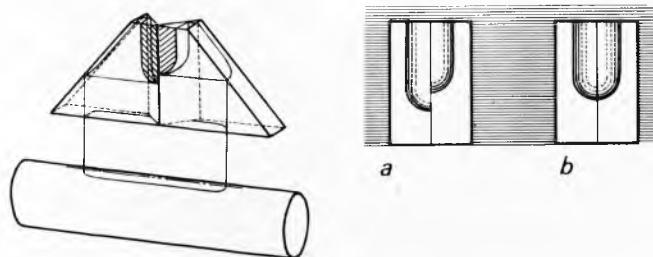
gdje  $\varrho'' = 206265$  broj sekunda radijana. Osjetljivost libele je to veća što je polumjer  $r$  veći. Što je veća osjetljivost libele, pomak mjejhura je uz istu promjenu nagiba veći, pa libela brže i uočljivije reagira na promjene njenog položaja, odnosno podloge na kojoj se nalazi. No, u vrlo osjetljivim libelama i mjejhur je nemirniji, što u njenim primjenama, posebno u terenskim uvjetima mjerena, može djelovati i vrlo nepovoljno. Pokretljivost mjejhura libele ovisi i o adheziji tekućine i stakla, pa veći mjejhuri lakše svladavaju tu silu. Stoga je optimalna duljina cijevi 2,5 do 3 duljine mjejhura libele. Cijevne libele geodetskih instrumenata imaju osjetljivost  $10''\dots60''$  (stupnjevano po  $5''$ ), a u nekim slučajevima i do  $120''$ . Najpreciznije libele imaju osjetljivost  $1''\dots2''$  (instrumenti za astronomsku opažanja).

Na točnost libele utječe i promjena temperature. Nagle promjene utječu na metalna kućišta libele i time uzrokuju napetost u staklu i promjenu zakrivenosti. Nejednoliko zagrijavanje mijenja položaj mjejhura; on se pomiče prema toplijem mjestu. Promjena temperature utječe i na duljinu mjejhura, pri zagrijavanju on postaje kraći. Zbog toga u nekim preciznijim libelama postoji mogućnost regulacije duljine mjejhura primjenom pregrade s malim otvorom (sl. 2). U nekim libelama pojavljuje se tzv. vučenje mjejhura libele. Ono se pojavljuje zbog kemijskog sastava stakla, pogrešaka brušenja i pojave napona u staklu. Zbog ovih nedostataka nastoji se cijevna libela zamijeniti drugim uređajima, u prvom redu optičkim kompenzatorima koji su manje osjetljivi na promjene temperature.

**Vrste cijevnih libela i njihova primjena.** Cijevne libele su prenosive ili su pričvršćene na podlogu instrumenta. Prenosive su libele: stolna, jahača i viseća libela. **Reverziske libele** su cijevne libele specijalne konstrukcije. Te libele imaju na suprotnim stranama u unutrašnjosti cijevi dvije brušene plohe jednakih polumjera zakrivenosti. Reverziske libele imaju dvije osi koje su međusobno paralelne, a mogu se primijeniti u dva položaja.

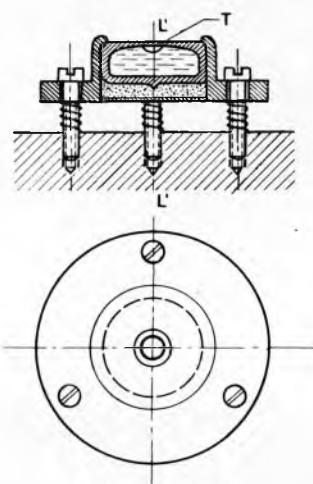
Cijevne libele upotrebljavaju se u prvom redu za postavljanje osi instrumenata u horizontalan, odnosno vertikalni položaj. Da bi libela ispunila taj zadatak, mora biti zadovoljen osnovni uvjet: os libele mora biti paralelna s osi podloge na kojoj leži libela (npr. prenosiva jahača libela, sl. 7), ili u drugom slučaju, okomita na os zakretanja oko koje se zakreće libela zajedno s podlogom (npr. alhidadna libela teodolita, sl. 8). Ako taj uvjet za libelu nije zadovoljen, treba položaj libele ispraviti postupkom koji se naziva *rektifikacija libele*. Zato svaka libela ima korekcijske vijke pomoću kojih je moguće cijev libele s kućištem podizati ili spuštati za male iznose.

Posebnim dodatkom bloka prizama (sl. 3) moguće je preslikati dvije polovine suprotnih strana mjejhura, tako da se obje polovine slike mjejhura prividno pomicu uzduž razdjelnog brida prizme u suprotnom smislu. Libela vrhuni kada obje polovine slike mjejhura koincidiraju. Odатле je i naziv: *libela s koincidencijom mjejhura*. Prednosti su takvih libela: veća točnost vrhunjenja (oko 4 puta veća u usporedbi s običnom libelom iste osjetljivosti) i bolja zaštita libele. Libela s koincidencijom mjejhura najčešće se upotrebljava za niveliranje i kao libela vertikalnog kruga teodolita.



Sl. 3. Libela s koincidencijom mjejhura: a libela ne vrhuni, b libela vrhuni

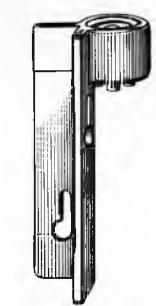
**Dozna ili kružna libela** sastoji se od staklene posudice (doze) u obliku valjka kojoj je gornja ploha dio kugline plohe. Ispunjena je tekućinom (najčešće eter ili alkohol) i učvršćena u metalnom kućištu (sl. 4). Kao i cijevna libela, dozna libela ima kružni mjehurići promjera nekoliko milimetara. Za promatranje vrhunjenja načrtani su na vanjskoj gornjoj plohi jedna ili više koncentričnih kružnica. Središte kružnica je *marka libele*.



Sl. 4. Dozna libela

Os dozne libele L' prolazi markom i središtem zakrivljenosti i presijeca unutrašnju brušenu plohu u točki koja se naziva *tjeme libele* T. Kad libela vrhuni, os libele je vertikalna, a tangencijalna ravnina na tjeme libele horizontalna. Dozne libele izrađuju se s osjetljivošću 8°...20°, tj. u području polumjera 0,86m...0,34m. Osjetljivosti mogu biti izuzetno i manje (čak i 80°, ali i veće (sve do 2°).

Dozne libele služe za horizontiranje ravnina ili postavljanje vertikala s manjom točnosti, npr. značke, mjerne letve (sl. 5). Posebno im je važna primjena u nivelirima s kompenzatorima, gdje libele služe za horizontiranje instrumenta, a funkciju cijevnih libela preuzimaju kompenzatori. Prednost je primjene doznih libela u tome, što se horizontiranje izvodi samo u jednom postavu libele, ali libelu treba prije toga rektificirati. Npr., za pravilno postavljanje vertikalne osi instrumenta, os dozne libele mora biti paralelna s tom osi. Za korekciju libele služe korekcijski vijci (sl. 4), ili se, ako ovih vijaka nema, prilagođuje ležajna ploha libele.



Sl. 5. Dozna libela za vertikalnu mernu letvu

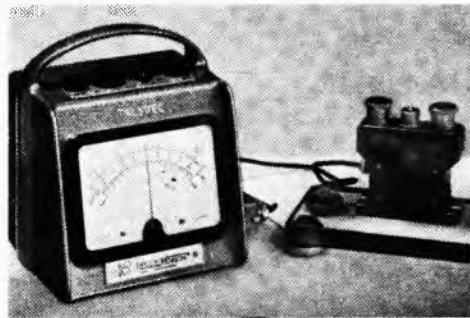
### Posebne konstrukcije libela

U novije vrijeme izrađeni su uređaji koji ili proširuju funkciju libele ili je u potpunosti zamjenjuju.

**Laserska libela** je spoj prenosive stolne cijevne libele i lasersa. Kad cijevna libela vrhuni, laserska zraka je horizontalna.

**Optička libela**. Primjenom optičkih kompenzatora na principu njihala moguće je upotreba i tzv. optičke libele. U vidnom polju mikroskopa optička libela izgleda kao dozna libela, no umjesto mjehurića pomicu se pri nagibu instrumenta, zbog djelovanja optičkog elementa na njihalu, slika kružića urezanog na staklenoj pločici, a preslikanog pomoću optičkog sustava (primjena kompenzatora; v. *Teodolit, mjerjenje vertikalnog kuta*). Postiže se točnost postavljanja vertikalne osi od 1"…5".

**Elektronička libela** građena je na principu metalnog njihala koje nije između dviju zavojnica. Promjenom položaja njihala mijenja se induktivni otpor zavojnica, a time i struja u dijagonalni Wheatstoneova mosta s galvanometrom koji ove promjene registrira. Elektronička libela sastoji se od tijela libele (mase



Sl. 6. Elektronička libela

~1 kg) i električnog uređaja za očitavanje. Služi za vrlo precizna mjerena promjene nagiba podloge. Mjerno područje iznosi maksimalno 2°...3° (grad ili gon, centezimalna jedinica kuta;  $1^\circ = \frac{\pi}{200}$  rad = 0°54'). Pravi kut ima 100°, s direktnim očitavanjem 1" (sl. 6).

### INSTRUMENTI ZA MJERENJE KUTOVA, ISKOLČENJA I ISPITIVANJE PRAVACA

Vrlo važno područje geodetskih mjerena jest mjerena i iskolčenje kutova. Kutovi koji se mjeru mogu biti horizontalni i vertikalni. U horizontalnim kutovima vrh kuta je u stajališnoj točki instrumenta, krakovi kuta nalaze se u horizontalnoj ravni, tj. oni su projekcije vizurnih pravaca na pojedine točke na tu ravninu. Analogni, u vertikalnim kutovima krakovi leže u vertikalnoj ravni. Vertikalni kutovi mogu biti zenitni kutovi ili zenitne daljine ako je jedan krak kuta u smjeru vertikale, odnosno visinski kutovi ako je jedan krak kuta u horizontalnoj ravnini. Geodetskim instrumentima najčešće se uz horizontalne kutove mjeru zenitni kutovi.

Prema točnosti mogu se za mjerena kutova primijeniti različiti instrumenti i uređaji. Za vrlo jednostavna mjerena primjenjuju se mali kutomjerni instrumenti, kao npr. kružna busola s kutnom podjelom, a za iskolčenja prizme ili kutna zrcala. U geodetskim mjerjenjima najviše se primjenjuje teodolit jednostavne ili složenije gradi prema točnosti mjerena.

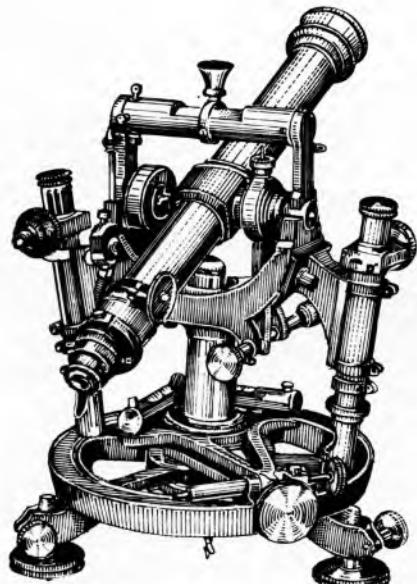
Za iskolčenje i ispitivanje pravaca vertikale primjenjuju se optički viskovi, odnosno na nestabilnom stajalištu girovertikali. Posebno područje čine instrumenti i uređaji za aliniranje, primjenjeni u radovima inženjerske geodezije, pri izvedbi i kontroli nadzemnih i podzemnih građevinskih objekata.

### Teodolit

Teodolit je instrument za mjerena horizontalnih, ili horizontalnih i vertikalnih kutova (sl. 7, sl. 8). Sastavljen je od tri osnovna dijela. Donji dio teodolita ili podnožje nosi čitav instrument i omogućuje njegovo pričvršćenje na stativ. To je

## GEODETSKI INSTRUMENTI

najčešće tronožac, koji se sastoji od podnožne ploče na kojoj su podnožni vijci i opružna ploča koja priteže podnožne vijke. Djelovanjem na središnji vijak stativa čvršće se steže opružna ploča i time pričvršćuje instrument za stativ. Većinom se izvode sa tri pravilno raspoređena podnožna vijka koji služe za horizontiranje instrumenta. U Americi i Japanu instrumenti imaju i četiri podnožna vijka. Na kućištu donjeg dijela teodolita često se nalazi i dozna libela, a ponekad i okularni dio optičkog viska (sl. 8).



Sl. 7. Teodolit starije konstrukcije

Srednji dio teodolita (sl. 9) sadrži osnovni dio — *horizontalni krug* ili *limb*. To je staklena ili metalna kružna ploča ili kružni vijenac s kružnom skalom. Danas se limbovi većinom izrađuju od stakla, skala je sa seksagezimalnom ( $0^\circ \dots 360^\circ$ ) ili centezimalnom podjelom ( $0^\circ \dots 400^\circ$ ). Promjer kružne podjele iznosi  $70 \dots 100$  mm, a za teodolite visoke točnosti i do  $250$  mm.

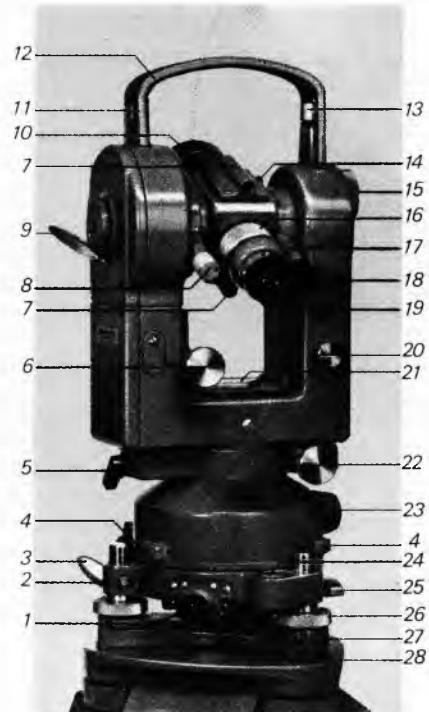
Limb je ili čvrsto povezan s donjim dijelom ili se pomoću posebnog uređaja može zakretati oko glavne osi teodolita.

U teodolite srednjih točnosti ugrađen je tzv. repeticijski uređaj, koji se sastoji od kočnice za pritezanje limba uz donji dio i od vijka za fini pomak kojim je moguće zakretati limb zajedno s gornjim dijelom teodolita i nakon stezanja kočnicom. Nakon što je gornji dio teodolita stegnut svojom kočnicom, moguće je zakretati limb zajedno s gornjim dijelom otpuštanjem kočnice repeticijskog uređaja. Primjenom repeticijskog uređaja, tzv. repeticijske metode mjerjenja kutova, postiže se veća točnost mjerjenja i uz manje točnosti očitavanja.

Gornji dio teodolita zakreće se iznad srednjeg i donjeg dijela oko glavne ili vertikalne osi teodolita. Osnovni su mu dijelovi: kućište s nosačima durbina (nazvan i *alhidada*), durbin, vertikalni krug (ako je ugrađen), uređaji za očitavanje i libele. Durbin se može okretati oko horizontalne osi. Sastoji se od dijela s objektivom i okularnog dijela s nitnim križem (v. *Durbin, TE3*, str. 480). Povećanja geodetskih durbina su različita, najčešće između  $20\times$  i  $50\times$ . Alhidada i durbin mogu se u određenom položaju zakočiti pomoću vijaka za kočenje, a nakon toga i zakretati pomoću vijaka za fini pomak (sl. 8).

Sustav vertikalne osi, kao mehanički dio, povezuje alhidadu, srednji dio s limbom i donji dio teodolita. Izvedba tog sustava mora osigurati stabilnost instrumenta i vrlo pravilno zakretanje pokretnih dijelova, što zahtijeva dobru kvalitetu materijala, konstrukciju, montažu (zračnost u ležajevima ne smije biti veća od svega nekoliko mikrometara) i mazivo, kako bi ispravno i jednako radio i pri vrlo niskim, odnosno visokim temperaturama. Osovina se izvodi u koničnom i cilindričnom obliku. Teodoliti starije konstrukcije imali su konične osovine zbog jednostavnije izvedbe i montaže, no današnji precizni instrumenti imaju uvjek cilin-

drične osovine (sl. 10). Cilindrična ploha osovine ima jedino zadatku vođenja i ne preuzima nikakve sile zbog pritiska mase gornjeg dijela. Masu gornjeg dijela nosi ili čelna ploha osovine, ili njena donja ploča, često s posebnim završecima (jednostavnije konstrukcije), ili za tu svrhu služe kuglični ležajevi.



Sl. 8. Suvremeni sekundni teodolit T2 na stativu.  
 1 okular optičkog viska, 2 tronožac, 3 zrcalce za rasvjetu horizontalnog kruga, 4 oslonac, 5 kočnica alhidade, 6 vijak za fini pomak durbina, 7 vizir, 8 kočnica durbina, 9 zrcalce za rasvjetu vertikalnog kruga, 10 objektiv durbina, 11 osigurač drška, 12 držak, 13 stezni vijak drška, 14 regulator rasvjete nitnog križa (pri umjetnoj rasvjeti), 15 dugme optičkog mikrometra, 16 prsten za izoštivanje, 17 prsten okulara durbina, 18 okular mikroskopa, 19 okular durbina, 20 preklopka za očitanje horizontalnog ili vertikalnog kruga, 21 alhidadna libela, 22 vijak za fini pomak alhidade, 23 poklopac dugmeta za zakretanje horizontalnog limba, 24 dozna libela, 25 dugme za pričvršćenje tronošca, 26 podnožni vijak, 27 podnožna ploča 28 stezna ploča



Sl. 9. Srednji dio teodolita s limbom

**Karakteristične osi teodolita.** Teodolit ima nekoliko karakterističnih osi kojih je položaj bitan za točnost mjerjenja.

*Glavna ili vertikalna os VV* jest pravac oko kojeg rotiraju sve točke gornjeg dijela teodolita pri zakretanju alhidade. Ova os mora biti postavljena *vertikalno*, što se postiže djelovanjem na podnožne vijke i promatranjem alhidadne libele. Pri ispravno postavljenoj osi ova libela vrhuni u svim položajima alhidade.

*Horizontalna os HH* određena je pravcem oko kojeg se zakreće durbin.

*Vizurna ili kolimacijska os KK* centriranog optičkog sustava durbina određena je pravcem koji prolazi presjecištem nitnog križa i glavnom točkom objektiva.

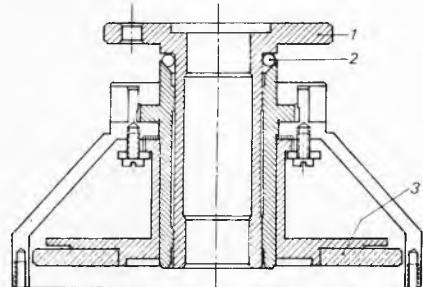
*Os alhidadne libele LL* jest horizontalna kad libela vrhuni.

Pojedine osi moraju zadovoljiti slijedeće uvjete:

$$LL \perp VV, HH \perp VV, KK \perp HH \quad (2)$$

Namještanje radi postignuća navedenih uvjeta naziva se *rektifikacija*.

U rektificiranom teodolitu vizurna os opisuje zakretanjem durbina tzv. *vizurnu ravninu*. Od opisanih uvjeta osnovni je uvjet okomitost osi alhidadne libele i glavne osi, jer odstupanje od tog uvjeta uzrokuje neverikalnost glavne osi, a time i pogreške u mjerjenjima kutova, koje se tada nikakvim načinom mjerena ne mogu ukloniti.



Sl. 10. Sustav cilindrične osi (sHEMA). 1 alhidada, 2 kuglični ležaj, 3 horizontalni limb

**Rektifikacija alhidadne libele i horizontiranje.** Pri postavljanju teodolita prvo se postavlja vertikalna, tj. glavna os teodolita približno vertikalno (npr. pomoću dozne libele ili nerekrtificirane alhidadne libele). Zatim se dovodi libela u smjer dvaju podnožnih vijaka i vrhuni se pomoću njih. Nakon toga se zakrene alhidada s libelom za  $180^\circ$ . Otklon mjejhura libele pokazuje dvostruku pogrešku. Polovica otklona mjejhura ispravlja se zakretanjem podnožnih vijaka koji su u smjeru libele, a druga polovica djelovanjem na korekcijske vijke libele pomoću posebne igle. Obično postoje dva korekcijska vijka na jednom kraju metalnog omotača libele, pa je potrebno jedan vijak otpustiti, a drugi pritegnuti, što će pomaknuti libelu. Postupak se ponavlja sve dok libela ne vrhuni u oba položaja. Time je libela rektificirana i zadovoljen osnovni uvjet. Kako bi se nakon toga i glavna os postavila vertikalno, zakrene se alhidada za  $90^\circ$ . Tada libela dolazi u smjer trećeg podnožnog vijka (os libele postavlja se okomito na spojnicu prvih dvaju vijaka). Čitav otklon mjejhura ispravlja se pomoću trećeg vijka. Kaže se, da je teodolit takvim postupkom horizontiran.

**Centriranje teodolita.** Teodolit se za mjerjenje kutova postavlja u stajališnoj točki na stativ, uz pritezanje na ploču glave stativa



Sl. 11. Precizno centriranje teodolita na betonskom stupu (točnost nekoliko stotinki milimetra)



Sl. 12. Podložna ploča s doznom libelom za centriranje

pomoću centralnog vijka. Kad su potrebna naročito točna mjerjenja, teodolit se postavlja na betonski stup uz upotrebu podnožne ploče ili specijalnog uređaja za centriranje (sl. 11). Podnožna

ploča (sl. 12) upotrebljava se i za postavljanje teodolita kad se mjeri s tornjeva, visokih piramida i slično.

Postavljanje teodolita na stajališnu točku, tako da njegova vertikalna os prolazi tom točkom, naziva se *centriranje*. Ono se obično izvodi pomoću *viska*. To je mali uteg sa završetkom u obliku stošca, koji se pomoću uzice ovjesi o kuku središnjeg vijka na teodolitu tako da vrh stošca dosije gotovo do označene stajališne točke. Odstupanja se ispravljaju pomicanjem instrumenta na stativu prije stezanja središnjim vijkom. *Kruti visak* sastoji se od dviju metalnih cijevi koje ulaze jedna u drugu, i od kojih se gornja pričvršćuje na centralni vijak, a šiljak donje cijevi u obliku stošca postavlja se na označenu stajališnu točku. Centriра se pomicanjem instrumenta na stativu uz promatranje dozne libele postavljene na cijevi viska. Doznu libelu treba prije toga ispitati zakretanjem cijevi s libelom za  $180^\circ$ . Ispravna libela će u oba karakteristična položaja vrhuniti. *Optički visak* je u teodolitu ugrađeni mali slomljeni durbini s okularnim dijelom na alhidadi ili na podnožju teodolita (1 na sl. 8) s vizurnom osi, koja je optički slomljena pomoću prizme, tako da prolazi smjerom glavne osi. Okretanjem okulara izoštrava se slika stajališne točke, a pomicanjem instrumenta po stativu dovodi se slika stajališne točke u presjecište nitnog križa optičkog viska ili u središte malog kružića, već prema tome što je ugravirano na staklenoj pločici ispred okulara optičkog viska.

**Prisilno centriranje.** Pri prisilnom centriranju mogu se na postavljenim stativima i tronožcima, koji se centriraju pomoću optičkog viska (koji se izvodi i kao zaseban instrument), izmjenjivati instrument i vizurna značka ili optički visak kao zaseban



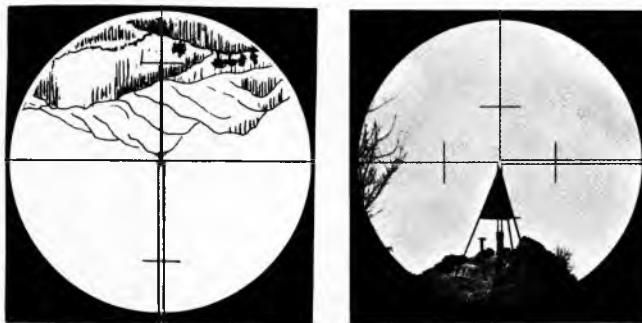
Sl. 13. Odvajanje teodolita za prisilno centriranje

instrument, ako za tu svrhu imaju odgovarajuće mehaničke uređaje, tako da njihove vertikalne osi dolaze prisilno na isto mjesto s točnošću  $0,01 \dots 0,1$  mm. Na sl. 13 prikazano je odvajanje teodolita od tronošca radi zamjene s vizurnom markom pri prisilnom centriranju.

**Viziranje.** Nakon centriranja i horizontiranja teodolita na stajališnoj točki, okretanjem alhidade oko vertikalne osi i durbina oko horizontalne osi, usmjeruje se durbini prema vizurnoj točki koja je na terenu označena. U tom položaju zakoči se alhidada i durbini pomoću prikladnih kočnica. Izoštrivši prethodno nitni križ durbina pomicanjem okulara prema nitnom križu, djeluje se na prsten ili vijak za izoštravanje slike (16 na sl. 8), dovodi sliku vizurne točke što točnije u ravlinu nitnog križa (metoda poništavanje paralakse, v. *Durbini TE3*, str. 489), a nakon toga izvrši se *viziranje* djelovanjem na vijke za fini pomak alhidade, odnosno durbina (sl. 14). Nakon viziranja očitava se na horizontalnom, odnosno vertikalnom krugu teodolita pomoću uređaja za očitavanje. Točnost viziranja ovisi o više faktora: rasvjeti, kontrastu i obliku mjerenoj objekta, stanju u zračnim slojevima

## GEODETSKI INSTRUMENTI

kroz koje se vizira, svojstvu durbina, paralaksi nitnog križa, fiziološkim i optičkim svojstvima oka opažača i psihološkim utjecajima. Optički sustav durbina pomaže oku pri viziranju i povećava točnost mjerena njegovim povećanjem, no unatoč mnogim pokušajima teško je odrediti točnost viziranja samo na osnovi optičkih karakteristika durbina zbog složenosti utjecaja drugih faktora.



Sl. 14. Vidno polje astronomskog (a) i terestričkog (b) durbina teodolita nakon viziranja

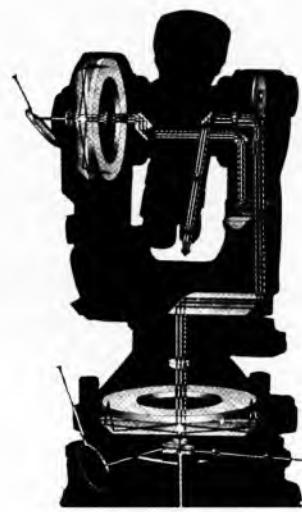
U nastojanju da se mjerni proces ubrza i što više eliminira subjektivni utjecaji pri viziranju okom, konstruirani su i već usavršeni uređaji kao dodatak durbinu za *elektroničko viziranje* koji su nazvani *elektroničko oko*. Ono se primjenjuje samo za viziranje na većim daljinama (trigonometričke mreže I i II reda), uz svjetlosnu signalizaciju točke cilja. Primjenom elektroničkog oka zamjenjuje se vertikalna nit nitnog križa bridom krovne prizme, koja nakon izoštrenja slike točke cilja dijeli snop zraka svjetlosti. Ako se ovi odvojeni snopovi dovedu do fotočelije, oni će proizvesti električne struje koje se međusobno uspoređuju metodom kompenzacije. Pri jednakosti tih struja točka cilja je vizirana.

**Geodetska vizirna linija** skup je točaka u prostoru, u kojem je pomoću objektiva durbina preslikano presjecište nitnog križa prilikom izoštrevanja (v. Durbin, TE3, str. 488). Ova definicija aktuelna je posebno za moderne durbine, a potječe od F. R. Helmerta (1876). U durbinima s teleobjektivom u općenitom slučaju ta je linija hiperbola. Spoji li se točka geodetske vizurne linije koja je vizirana s presjecištem vertikalne i horizontalne osi teodolita, dobiva se *vizurni pravac*. Asimptota na geodetsku vizurnu liniju naziva se *geodetska vizurna os*.

**Uredaji za očitavanje krugova**. Pri mjerenu horizontalnih kutova okreće se s alhidadom i indeks za očitavanje, odnosno optički sustav koji prenosi sliku limba, a horizontalni krug je nepomičan. Pri mjerenu vertikalnih kutova obično indeks ili optički sustav koji prenosi sliku u optičkim teodolitima miruje (sl. 15, sl. 16), a s durbinom se okreće vertikalni krug. U određenom položaju alhidade, odnosno durbina, nakon viziranja očitava se na odgovarajućem krugu kut između radiusa nulte

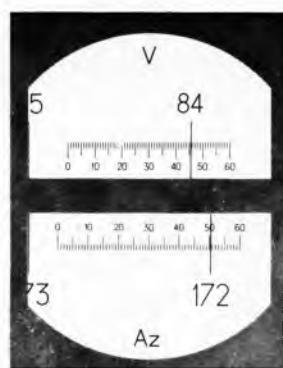
crte podjele kruga i indeksa pomoću uređaja za očitavanje. Uređaji za očitavanje građeni su uglavnom na slijedećim principima: procjenjivanje desetina intervala, koincidencija crta, postavljanje jedne crte između dvostrukih crta.

U teodolitima starije konstrukcije primjenjivali su se mehanički uređaji za očitavanje (indeks, nonij, mikrometrički vijak) zajedno s lupom ili mikroskopom. Na sl. 7 prikazan je takav teodolit starije konstrukcije s mikroskopima za očitavanje i mikrometričkim vijkom. Nedostatak je takvih konstrukcija uređaja za očitavanje u tome što se opažač morao kretati oko instrumenta, što je svakako utjecalo na točnost mjerena i na produženje mjerena. Uvođenjem staklenih limbova (H. Wild) i složenih optičkih sustava mikroskopa s prizmama (tzv. optički teodoliti), dovedena je slika podjele limba u vidno polje okulara mikroskopa koji se nalazi neposredno uz okular durbina, pa su time spomenuti nedostaci uklonjeni (sl. 15, sl. 16). Takvim

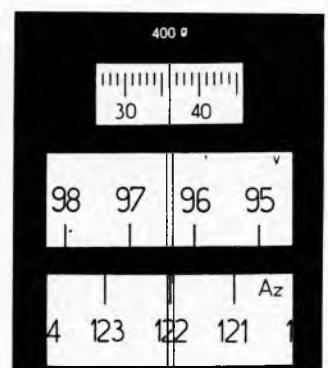


Sl. 16. Optička shema sekundnog teodolita T2

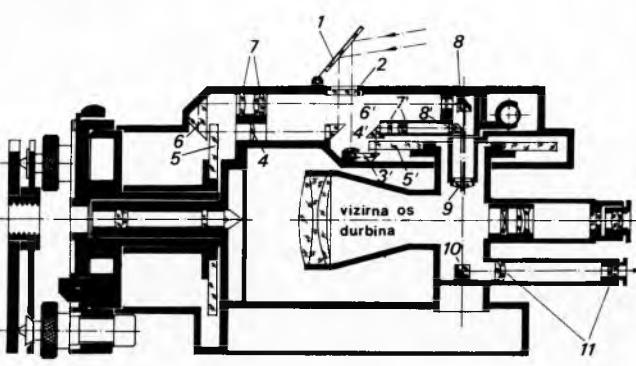
konstrukcijama u isto vidno polje mikroskopa moguće je preslikati horizontalni krug (oznaka Hz ili Az) i vertikalni krug (oznaka V) tako, što se obje slike vide ili istodobno (sl. 17, sl. 18), ili se mogu vidjeti naizmjeno (sl. 19) prebacivanjem slike pomoću posebne preklopke (20 na sl. 8) koja pomiče posebni optički element (sl. 16). Primjenom optičkih sustava



Sl. 17. Vidno polje optičkog sustava za očitavanje limba. Očitanje: V  $84^{\circ}45.7'$  i Az  $172^{\circ}50.4'$



Sl. 18. Vidno polje jednostavnog optičkog mikrometra. Očitanje: Az  $122.360^g$



Sl. 15. Optička shema teodolita T16. 1 zrcalce za rasvjetu krugova, 2 zaštitno staklo, 3 pravokutna prizma, 4 kondenzor, 5 horizontalni krug, 6 pravokutna prizma, 7 objektiv horizontalnog kruga, 8 pravokutna prizma, 9 staklena pločica sa zaslonom, 10 pravokutna prizma, 11 okular; 3'-8' anagni elementi pri rasvjeti i preslikavanju vertikalnog kruga

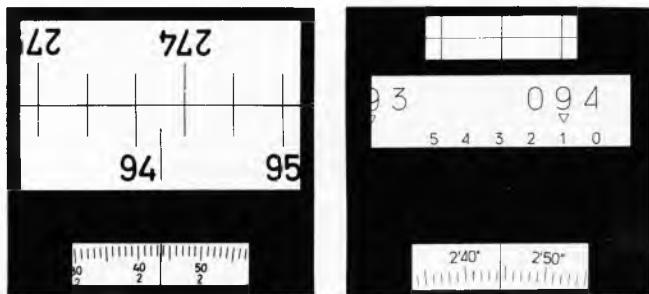
moguće je preslikati i dijametralna mesta limba u zajednički okular mikroskopa za istodobno očitavanje dijametralnih mesta limba s automatskim formiranjem aritmetičke sredine očitavanja (sl. 19). Optička shema na sl. 15 prikazuje preslikavanje podjele kruga Hz i kruga V teodolita T16 (Wild) s očitavanjem na jednom mjestu kruga pomoću skale koja se nalazi na staklenoj pločici u ravnini zaslona vidnog polja (pozicija 9). Na sl. 16

vidi se nešto složenija optička shema uz preslikavanje dijametalnih mesta kruga na preciznom teodolitu T2 (Wild).

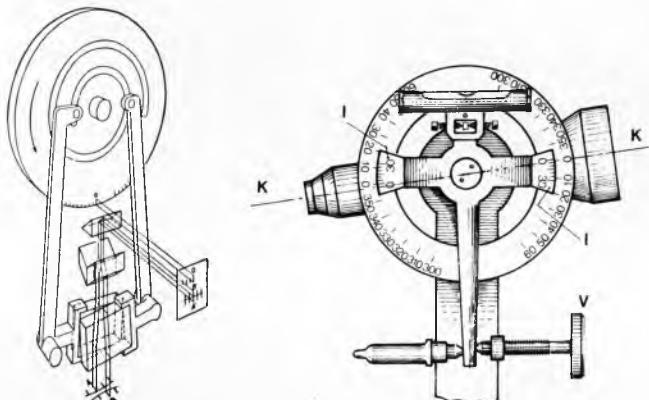
Za očitavanje limbova postoje različite konstrukcije, prema broju i rasporedu optičkih elemenata te načinu očitavanja. Jednostavni načini očitavanja prikazani su na sl. 17 (pomoću skale) i sl. 18 (pomoću jednostavnog optičkog mikrometra s planparalelnom pločom).

Pri očitavanju jednostavnim optičkim mikrometrom potrebno je djelovati na dugme mikrometra, a time i plan-ploču, te tako pomicati sliku podjele sve dok dvostruka crtica indeksa ne obuhvati crtu preslikane podjele kruga.

Optički mikrometri mogu biti i složenije građe ako se istodobno očitavaju dijametalna mesta kruga. Kao optički elementi ovih mikrometara mogu biti primijenjene planparalelne ploče (pp-ploče) ili stakleni klinovi. Na sl. 20 optička je shema optičkog mikrometra s parom pp-ploča, izgled vidnog polja i očitanje na sl. 19.



Sl. 19. Vidno polje optičkog mikrometra (istodobno očitanje dijametalnih mesta kruga nakon koïncidencije crta; a starija konstrukcija (očitanje: 94°12'43,6"), b novija konstrukcija (očitanje: 94°12'44,3")



Sl. 20. Shema funkcije optičkog mikrometra sa planparalelnim pločama

Sl. 21. Libela vertikalnog kruga teodolita starije konstrukcije. I indeks za očitanje, V vijak za fini pomak libele

Dugme mikrometra (15 na sl. 8) zakreće kružnu pločicu s utorom u obliku spirale unutar kojeg se pomiču čepovi poluge tako da se njihov razmak mijenja, što zakreće dvije pp-ploče u suprotnom smislu. Na istoj osovini nalazi se i staklena pločica s mikrometričkom skalom koja je preslikana u vidno polje okulara mikroskopa. Zakretanjem pp-ploče pomiču se slike crta dijametalnih mesta kruga u suprotnom smjeru do koïncidencije.

Optički mikrometri s klinovima upotrebljavaju se za očitavanja na analognom principu koïncidencije crta, ali je konstrukcija uređaja drugačija, jer se za pomak slike primjenjuje translacija para klinova.

Pri mjerenu horizontalnog kuta potrebna su uvijek dva očitavanja na horizontalnom krugu. Razlika ovih očitanja daje horizontalni kut, tj. kut s vrhom u vertikalnoj osi teodolita i krakovima koji prolaze viziranim točkama, a projicirani su na horizontalnu ravninu.

**Mjerenje vertikalnih kutova.** Pri mjerenu vertikalnog kuta potrebno je samo jedno očitavanje vertikalnog kruga. Ver-

ticalni krug s kružnom podjelom postavljen je tako da se središte podjele nalazi u horizontalnoj osi durbina, a položen je vertikalno kada je teodolit horizontiran. Promjer vertikalnog kruga nešto je manji od promjera horizontalnog. Kružna podjela vertikalnog kruga označena je u današnjim teodolitima kontinuirano  $0^\circ \dots 360^\circ$ , odnosno  $0^\circ \dots 400^\circ$ , s očitanjem  $0^\circ$  pri zenitnom viziranju, odnosno  $90^\circ$  ili  $100^\circ$  pri horizontalnom položaju vizurne osi. Prema tome je očitanje na vertikalnom krugu, nakon izvršenog viziranja, *zenitni kut* ili *zenitna duljina z*. Visinski kut  $\varphi$  može se izračunati iz izmjerenoj zenitnog kuta:  $\varphi = 90^\circ - z$  ili  $\varphi = 100^\circ - z$ . Vertikalni kut obično se mjeri u dva položaja durbina, tj. viziranjem točke u prvom položaju (s vertikalnim krugom na lijevoj strani durbina) i u drugom položaju nakon okretanja alhidade za  $180^\circ$ , odnosno  $200^\circ$ , i durbina oko horizontalne osi (vertikalni krug s desne strane durbina). Zbroj ovih očitanja treba biti  $360^\circ$  ili  $400^\circ$ . Ukoliko to nije, postoji pogreška indeksa  $\epsilon$ , koja se očituje u dvostrukom iznosu:  $O_1 + O_2 = 360^\circ + 2\epsilon$  odnosno  $O_1 + O_2 = 400^\circ + 2\epsilon$ . Zbog pogreške indeksa očitanje vertikalnog kuta je pogrešno. Međutim, mjeranjem zenitnog kuta u dva položaja durbina može se računom pogreška indeksa eliminirati:  $z = \frac{O_1 - O_2}{2}$ .

U starijim konstrukcijama teodolita vertikalni krug bio je podijeljen polukružno, ili po kvadrantima  $0^\circ \dots 90^\circ$  uz očitavanje visinskih kutova. Točnost mjerjenja vertikalnih kutova ovisi o stabilnosti položaja indeksa za očitavanje. Položaj indeksa, međutim, ovisi o položaju glavne osi teodolita i mijenja se pri okretanju alhidade oko nagnute glavne osi. Kako bi se ovi utjecali sveli na najmanju mjeru, primjenjuju se dva konstruktivna rješenja: a) uz vertikalni krug ugrađuje se posebna libela koja se naziva *libela vertikalnog kruga* ili *visinska libela*, a povezana je s indeksom za očitavanje. U starijim teodolitima ta je veza neposredna (sl. 21), a u optičkim teodolitima ta je libela povezana s optičkim sustavom za prijenos slike vertikalnog kruga ( $6'$ ,  $7'$ ,  $8'$  na sl. 15). U oba slučaja djeluje se na libelu posebnim vijkom za fini pomak, a tako i neposredno ili posredno na indeks za očitavanje; b) uz vertikalni krug ugrađen je poseban uređaj za automatsku stabilizaciju indeksa.

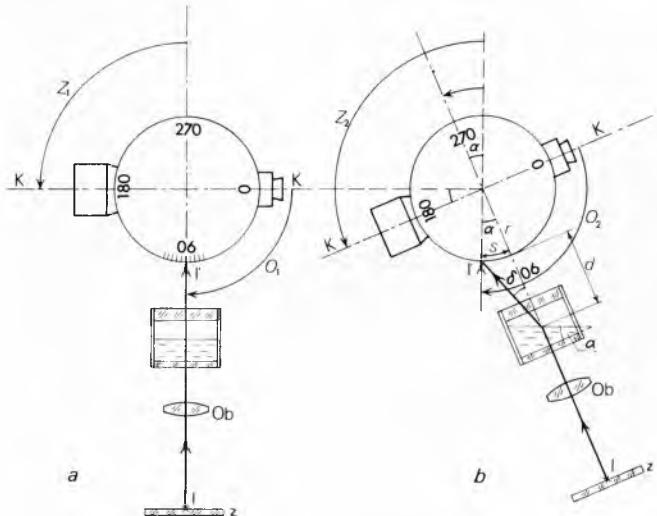
Kad postoji libela vertikalnog kruga, potrebno ju je prije svakog očitavanja vertikalnog kuta vrhuniti pomoću njenog vijka za fini pomak, najčešće uz koïncidenciju mjeđura (sl. 3). Tako će se indeks za očitavanje dovesti u ispravan položaj, unatoč nevertikalnosti glavne osi teodolita.

Pogreška indeksa ispravlja se *reklijifikacijom libele*. Nakon što se mjeranjem vertikalnog kuta u dva položaja durbina (viziranjem na istu točku) odredi pogreška indeksa  $\epsilon$ , očitanje se kuta ispravlja za iznos pogreške s odgovarajućim predznakom, djelujući na vijak libele, a libela se nakon toga vrhuni njenim korekcijskim vijcima. Ako su za očitavanje primjenjeni optički mikrometri s koïncidencijom dijametalnih crta limba, pri reklijifikaciji najprije se korigira očitanje na mikrometričkoj skali za iznos pogreške indeksa, djelujući na vijak mikrometra. Tako je koïncidencija crta poremećena te se ponovo uspostavlja pomoću vijka za fini pomak libele i nakon toga se libela vrhuni njenim korekcijskim vijcima.

**Uredaji za automatsku stabilizaciju indeksa** automatski korigiraju promjenu očitanja zbog pogrešnog položaja glavne osi, tj. automatski svode očitanje vertikalnog kruga u vizurnoj ravni na smjer vertikale pri mjerenu zenitnih kutova. Konstrukcije su takvih uređaja različite. Automatska kompenzacija moguća je i preslikavanjem mjeđura visinske libele u ravninu skale u vidnom polju mikroskopa, gdje mjeđur ujedno služi i kao indeks za očitavanje (Th3, Opton). Međutim, u većini suvremenih teodolita ne primjenjuje se visinska libela, nego se upotrebljavaju kompenzatori. Kao kompenzator može služiti tekućina (ulje u posudici), te optički elementi na njihalu (leća objektiva, objektiv mikroskopa, prizma, optički sustav preslikavanja kruga). Na sl. 22 prikazana je shema funkcije kompenzatora teodolita T1-A (Wild). Kao kompenzator upotrebljena je tekućina, s indeksom loma  $\sim 1,4$ . Kad je glavna os teodolita vertikalna, tekućina formira planparalelnu ploču (sl. 22a). Stoga pri prolazu nema otklona svjetlosnih zraka i pri horizontalnom

## GEODETSKI INSTRUMENTI

položaju durbina očitanje je vertikalnog kruga  $90^\circ(z_1)$ . Indeks I nalazi se na staklenoj pločici u ravnini zaslona vidnog polja mikroskopa, a u optički reverzibilnom procesu preslikan je u ravninu vertikalnog kruga (I'). Kad bi glavna os bila nagnuta za kut  $\alpha$  (sl. 22b), indeks bi se projicirao na pogrešno mjesto i očitanje vertikalnog kruga ne bi odgovaralo položaju vizurne osi. Međutim, tekućina formira tada optički klin koji otklanja zrake pri preslikavanju, te se indeks projicira ponovno na mjesto ispravnog položaja (I') i očitanje je vertikalnog kruga  $90^\circ + \alpha$ , što odgovara promjenjenom položaju vizurne osi (zenitni kut  $z_2$ ). Za ispravno projiciranje indeksa mora biti zadovoljen uvjet kompenzacije na osnovi koje se određuju konstruktivni elementi.



Sl. 22. Shema funkcije kompenzatora s tekućinom teodolita T1-A. a) glavna os teodolita je vertikalna, b) glavna os teodolita je nagnuta prema vertikali

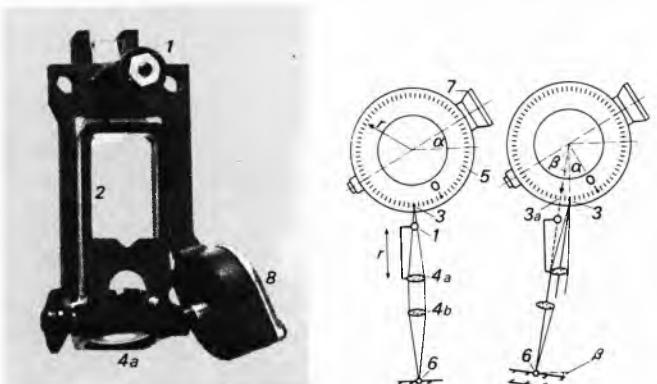
Prema sl. 22b je  $s = r \operatorname{arc} \alpha$ , a budući da su kutovi  $\alpha$  i  $\delta$  mali, vrijedi da je  $s \approx d \operatorname{arc} \delta$ , gdje je  $r$  polumjer kružne podjele,  $d$  udaljenost kompenzatora od vertikalnog kruga,  $\delta$  otklon zrake kroz klin. Taj otklon iznosi  $\delta = (n-1)\varphi$ , gdje je  $n$  srednji indeks loma,  $\varphi$  prelomni kut klina. Budući da je  $\varphi = \alpha$ , slijedi

$$r \frac{\alpha}{\varphi} \approx (n-1) \frac{\alpha}{\varphi} d, \quad (3)$$

a odatle

$$d \approx \frac{r}{n-1}. \quad (4)$$

Udaljenost kompenzatora određena je, dakle, polumjerom kružne podjele kruga i indeksom loma tekućine. Očito je da se promjenom udaljenosti posudice može kompenzator justirati. Na sl. 23 prikazan je kompenzator (leća objektiva mikroskopa



Sl. 23. Kompenzator teodolita K1-A (lijevo) i shema funkcije (desno). 1 kuglični ležaj njihala, 2 tijelo njihala, 3 ispravno mjesto očitanja vertikalnog kruga, 4 objektiv (4a kompenzator), 5 kružna podjela vertikalnog kruga, 6 indeks za očitanje vertikalnog kruga, 7 durbin, 8 prigušni valjak (pričvršćenje njihaja komprimiranjem zraka)

na njihalu) teodolita K1-A (Kern). Objektiv je sastavljen od dva dijela (leće 4a, 4b) od kojih je leća 4b čvrsto povezana s instrumentom, a leća 4a nalazi se na njihalu kojem je duljina jednaka polumjeru kružne podjele vertikalnog kruga. Između obje leće objektiva zrake su pri preslikavanju međusobno paralelne. S durbinom se vizira točka s visinskim kutom  $\varphi = \alpha$ . Mjesto očitavanja vertikalnog kruga 3 preslikava se na indeks 6. Pri ispravno horizontiranom teodolitu očitanje vertikalnog kruga odgovara visinskom kutu. Međutim, kad teodolit nije ispravno horizontiran, te je vertikalna os nagnuta u vizurnoj ravnini za kut  $\beta$ , bit će mjesto kruga 3a projicirano na indeks, očitanje vertikalnog kuta bit će, dakle, pogrešno za kut  $\beta$ . Ako se primijeni kompenzator 4a, mjesto kruga 3 bit će preslikano na indeks, pa je pogreška očitavanja eliminirana djelovanjem kompenzacijskog elementa. U teodolitima Mod. 4149 i 4200 (Filotechnica Salmoiragh) kao kompenzator djeluje objektiv mikroskopa koji visi o tri niti. Za kontrolu djelovanja kompenzatora u području kompenzacije ugrađena je optička libela.

*Električna rasvjeta krugova i nitnog križa teodolita potrebna je ako se mjeri noću, u tunelima, rudnicima i sl. Svaki se teodolit zbog toga može priključiti na baterije koje su u posebnoj kutiji (sl. 24).*



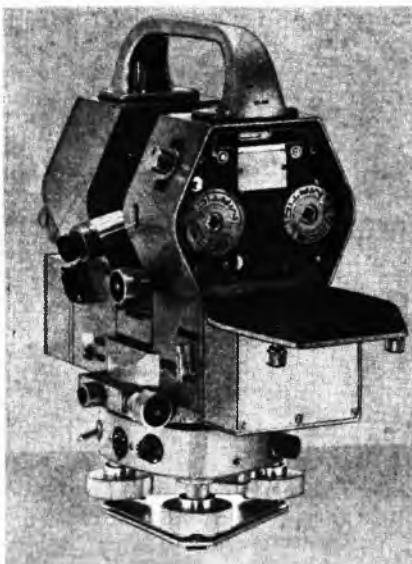
Sl. 24. Teodolit s priključenom električnom rasvjetom

**Automatska registracija podataka** primjenjuje se radi skraćivanja mjernog procesa i eliminacije upisivanja podataka u zapisnike mjerjenja (što je jedan od izvora pogrešaka). Također i kao međufaza automatizacije mjernog procesa i priprema za obradu podataka mjerjenja. U kratkom razvojnom putu razrađeno je nekoliko postupaka:

**Fotografska registracija podataka** s krugova i naknadno mikrometričko očitavanje s filmova pomoću mikroskopa. Postupak je analogni kao i pri neposrednom očitavanju, no trajanje mjernog procesa je skraćeno, jer se očitavanje obavlja naknadno. Čitav proces naravno nije skraćen, već samo vremenski drugačije raspoređen. Primjenjuje se kad je kratko povoljno razdoblje za opažanja na terenu (npr. vidljivost) ili kad se radi o opažanjima pokretnih ciljeva. Teodoliti moraju imati za tu svrhu mogućnost priključka specijalnih fotokamera, ili su građeni kao specijalni teodoliti (npr. Tpr, Siemens).

**Fotografska i fotoelektrična registracija** podataka na kružovima s kodiranim podjelom. Za razliku od prethodnog postupka kojim je samo skraćeno vrijeme mjernog procesa,

ovim se postupkom automatizira čitavi proces od registracije do obrade podataka. Krugovi s *kodiranim podjelom* imaju normalnu kružnu podjelu limba. Za identifikaciju fotoelektričnim putem nanijete su posebne oznake, tzv. kode, s nekoliko koncentričnih pruga naizmjenično crnih i bijelih polja različite duljine za kombinacije brojeva 0,0 do 399,9°, npr. teodolit FLT3, Fennel, sa 4 pruge za očitanja 100, 10, 1 i 0,1°. Dodatne središnje pruge ne služe za kodiranje, već za prenošenje određenih naloga uređaju za očitavanje. Danas postoje već različite konstrukcije ovih instrumenata, koji su u stalnom razvoju zbog posebnog značenja za automatizaciju geodetskih radova. Podaci s kruga snimaju se na film (npr. za teodolit FLT3 upotrebljava se film širine 35mm, sl. 25). Na filmu se osim toga nalaze podaci o stajalištu instrumenta, točki cilja i drugi podaci unijeti na osnovi posebnog ključa. Sve te dodatne podatke unosi opažač pomoću posebnog uređaja za upisivanje podataka. Na film dug 10 metara može se snimiti oko 340 registracija obaju krugova. Uredaj za očitavanje filma (npr. ZUSE Z 84) prenosi informacije na 5-kanalnu bušenu vrpcu koja služi za dalju obradu podataka pomoću elektroničkog računala. Oni daju rezultate računa ili ih opet prenose na bušene trake ili kartice za automatsko kartiranje. Teodolit Ko-B1(MOM) sastoji se od teodolita i elektroničke jedinice. Podaci se mogu digitalno očitati, odnosno prenijeti na bušene trake.



Sl. 25. Umetanje filma za teodolit s kodiranim podjelom FLT3

*Fotoelektrično brojenje* pri mjerenu kuta uz primjenu im-pulsnih krugova. Za razliku od starijih konstrukcija, u ovom postupku se s alhidadom zakreće tzv. *impulsni horizontalni krug*, na kojem je radikalni raster tamnih i svjetlih polja. Uz električnu rasvjetu jednog ili dijametalnih mjesta kruga, okretanje alhidade uzrokuje periodičke promjene svjetlosnih impulsa, pa je broj impulsa mjera za okretanje alhidade. U praktičnoj izvedbi (DIGIGON, Breithaupt; GEODIMETAR 710, AGA) preslikava se osvijetljeno mjesto kruga na dijametalnu stranu kao preokrenuta slika. Na taj način izlazni svjetlosni intenzitet s obzirom na broj intervala ima dvostruko više perioda. Za krug s rasterom od 5000 polja dobiva se po okretu 10000 periodičkih promjena intenziteta, koji se pomoću fotodioda pretvaraju u električne signale. Svakoj periodičkoj promjeni odgovara kut od 400° (° je oznaka za metričku sekundu: 1° = 0,324''). Kako se ta vrijednost interpolatorom razdvaja u 40 impulsa, brojačem se neposredno digitalno registriira kutna vrijednost od 10°. Analognom konstrukcijom mjeri se i vertikalni kut. Podaci se mogu prenijeti na bušenu vrpcu radi dalje obrade.

Osim takvih konstrukcija postoje i druge, za sada samo u eksperimentalnoj fazi, ili za teodolite specijalnih namjena

(npr. Tpot, Siemens) s mogućnošću pretvaranja mjerene vrijednosti luka u električnu veličinu i time mogućnosti prijenosa na daljinu (v. *Daljinsko mjerjenje*, TE3, str. 175).

### Osnovne pogreške teodolita

**Pogreška vizurne ili kolimacijske osi.** Vizurna os nije okomita na horizontalnu os, već odstupa od tog položaja za iznos kuta  $k$ . Pri mjerenu pravca u dva položaja durbina viziranjem na daleku točku, razlika očitanja na horizontalnom krugu trebala bi biti 180° (200°). Odstupanje od tog iznosa je dvostruka kolimacijska pogreška  $2k$ . Uzimanjem aritmetičke sredine očitanja kruga u dva položaja durbina pogreška će biti eliminirana. Može se svesti na minimalan iznos pomicanjem nitnog križa durbina pomoću njegovih korekcijskih vijaka za određeni iznos. Pri mjerenu u jednom položaju durbina pogreška pravca će iznositi:

$$\Delta\alpha_k \approx \frac{k}{\cos\varphi} \quad \text{ili} \quad \Delta\alpha_k \approx \frac{k}{\sin z}. \quad (5)$$

Pogreška pravca je to veća, što je visinski kut  $\varphi$  veći. Pri horizontalnom durbinu ( $\varphi = 0$ , odnosno  $z = 90^\circ$  ili  $z = 100^\circ$ ) pogreška je najmanja i jednaka je kolimacijskoj pogreški.

**Pogreška horizontalne osi.** Horizontalna os nije okomita na vertikalnu, već odstupa za iznos kuta  $i$ . Pogreška pravca će iznositi:

$$\Delta\alpha_i \approx i \tan\varphi \quad \text{ili} \quad \Delta\alpha_i \approx i \cot z. \quad (6)$$

Kad je durbin horizontalan, nema pogreške pravca zbog pogreške horizontalne osi, a za visinski kut 45° pogreška je  $\Delta\alpha_i = i$ . Pogreška pravca raste s povećanjem visinskog kuta. Pogrešku horizontalne osi modernih teodolita može ispraviti samo specijalizirani mehaničar. Najjednostavnije se može ispitati projekcijom visoke točke u dva položaja durbina na horizontalno položenu letvu. Utjecaj pogreške horizontalne osi može se eliminirati mjeranjem pravca u dva položaja durbina, analogno eliminiranju pogreške kolimacijske osi.

**Pogreška vertikalne osi.** Ta će se pogreška pojavit kad glavna ili vertikalna os teodolita nije postavljena vertikalno, već od tog položaja odstupa za iznos kuta  $v$ . Pri zakretanju alhidade oko tako nagnute osi, vizurna ravnina periodički mijenja nagib prema vertikali od 0 do  $v$ . Taj je nagib  $v \sin \alpha$ , gdje je  $\alpha$  kut zakreta alhidade od položaja kada alhidadna libela vrhuni (vizurna ravnina je vertikalna!) do pravca, kojem se pogreška ispituje. Pogreška pravca će iznositi

$$\Delta\alpha_v = v \sin \alpha \tan \varphi. \quad (7)$$

Nema pogreške kad je  $\alpha = 0$  i kad je vizurna točka u horizontu instrumenta ( $\varphi = 0$ ). Utjecaj pogreške vertikalne osi ne može se eliminirati načinom mjerena, pa treba na tu činjenicu obratiti pažnju, posebno kad je durbin više nagnut. Neki moderni teodoliti visoke točnosti imaju ugrađene kompenzatore za eliminaciju utjecaja pogreške vertikalne osi (Theo 002, Zeiss).

**Ekscentričnost vizurne osi.** Vizurna os, točnije geodetska vizurna os ekscentrična je s obzirom na glavnu os za iznos  $e$ . Pogreška pravca će iznositi:  $\Delta\alpha_e = \frac{e}{d} \varrho$ , gdje je  $d$  udaljenost vizurne točke. Utjecaj pogreške je to manji, što je udaljenost  $d$  veća. Mjeranjem u dva položaja durbina i uzimanjem aritmetičke sredine eliminira se utjecaj ove pogreške.

**Ekscentričnost alhidade.** Glavna okretna os ne prolazi središtem kružne podjele horizontalnog kruga, već je ekscentrična za iznos  $e$ . Očitanje na kružnoj podjeli pomoću indeksa ne odgovara stvarnom kutu zakreta alhidade. Pogreška će iznositi:

$$e'' \approx \frac{e}{r} \varrho'' \sin \alpha, \quad (8)$$

gdje je  $r$  polumjer kružne podjele,  $\alpha$  kut zakreta alhidade, odnosno indeksa za očitavanje s obzirom na smjer ekscentričnosti, tj. pravca koji prolazi središtem podjele i presjecištem glavne osi i kruga.

Maksimalna pogreška pojavit će se za položaj polumjera indeksa u smjeru okomitom na smjer ekscentričnosti

$$\epsilon''_{\max} \approx \frac{e}{r} \varrho''. \quad (9)$$

Teodoliti su u tvornici centrirani obično s točnošću ekscentričnosti alhidade od  $1\text{ }\mu\text{m}$ . Prema tome, za veće točnosti mjerjenja ta je pogreška i pored takvog centriranja prevelika. Utjecaj ekscentričnosti alhidade može se eliminirati mjerjenjem u dva položaja durbina, odnosno očitanjem kruga na dva dijametralna mjesta, te uzimanjem aritmetičke sredine očitanja. Teodoliti starije konstrukcije imaju mikroskope za očitavanje krugova na dijametalnim mjestima (sl. 7), a noviji optičku konstrukciju za istodobno čitanje dijametalnih mjesta pomoću bloka prizama.

**Ekscentričnost horizontalne osi** s obzirom na vertikalni krug uzrokuje analogne pogreške pri mjerenu vertikalnih kutova, pa postoje i analogni uređaji za očitavanje dijametalnih mjesta kruga. To ima posebno značenje, jer se pogreška u potpunosti ne eliminira mjerjenjem u dva položaja durbina.

**Ekscentričnost limba.** Okretna os limba ekscentrična je s obzirom na glavnu os. Utjecaj je analogan ekscentričnosti alhidade.

**Pogreške podjele kruga.** Pri izradbi kružne podjele neizbjegljene su pogreške položaja crtica. Ove pogreške mogu biti nepravilne (tj. odstupanje crtica je po veličini i predznaku sasvim slučajno) ili periodičke. Utjecaj pogrešaka podjele u znatnoj mjeri eliminira se ponavljanjem mjerena na različitim mjestima kruga, što je omogućeno konstrukcijom srednjeg dijela teodolita. Posebnim mernim programom moguće je ispitati kvalitetu kružne podjele limba za što postoje i posebni uređaji (sl. 73).

**Run mikroskopa i run korekcija.** Kad se očitava krug pomoću skale u optičkim teodolitima, potrebno je da interval preslikane podjele limba u ravnini zaslona vidnog polja mikroskopa odgovara mernom području skale. Kad se upotrebljava optički mikrometar s koincidencijom crta, merno područje skale mora odgovarati optičkom pomaku slike za dvije uzastopne koincidencije dijametalnih crta limba. Odstupanje od tog uvjeta naziva se *run mikroskopa* i uzrokuje pogrešku u očitanjima. Na svakoj skali određen je broj intervala  $n_0$  (nominalni broj intervala). Ako postoji run mikroskopa, izmjeri se neki drugi broj podjela  $n$  koji odgovara veličini preslikanog intervala limba, odnosno pomaku slike. Prema tome je *run mikroskopa*  $r = n_0 - n$ . *Run mikroskopa* ovisi o veličini slike intervala limba, a to znači o žarišnoj duljini objektiva mikroskopa, o udaljenosti limba od objektiva i veličini intervala, a prema tome i o točnosti s kojom je izveden limb. Zato se *run mikroskopa* ispituje na različitim mjestima limba po određenom programu. Ako prelazi veličinu koja utječe na točnost mjerena, potrebno je u očitanja uvoditi *run korekciju*, tj. korigirati ih za odgovarajući iznos. *Run mikroskopa* moguće je najčešće ukloniti justiranjem mjerila preslikavanja objektiva mikroskopa.

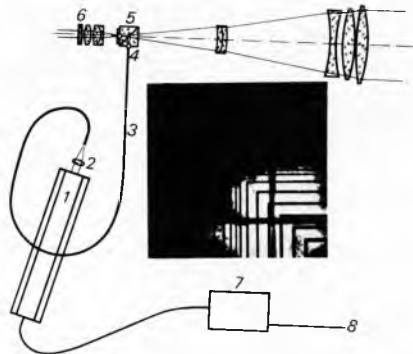
#### Posebne konstrukcije i dodaci teodolitu

**Laserski teodolit** ima durbin s laserskim dodatkom za optičko projiciranje nitnog križa pomoću laserskog snopa. Dok je u običnom durbinu projekcija nitnog križa nevidljiva, primjenom laserskog snopa ona postaje vidljiva i danju, pa je moguće realizirati svaku točku geodetske vizurne linije do izvjesne udaljenosti. To ima niz praktičnih primjena, posebno pri izvođenju građevnih radova (npr. usmjeravanje pokretnih građevnih strojeva). Laserski teodoliti imaju ili ugrađene specijalne durbine s laserima ili se mogu obični okulari zamijeniti laserskim okularima (npr. GLO1, Wild). Primjenjuje se plinski helij-neonski laser s emisijom zračenja valne duljine  $632,8\text{ nm}$  i snage  $3\text{--}5\text{ mW}$ . Laser se postavlja na stativ (sl. 26). Emitirani laserski snop koncentriira se kondenzorom na snop promjera  $\sim 0,08\text{ mm}$  i vodi svjetlosnom fleksibilnom cijevi u durbin na ploču sa zaslonom u obliku nitnog križa (sl. 27). Pomoću staklene diobene kocke otklonjen je laserski snop s nitnog križa prema objektivu i njime projiciran u prostor, tako da se u konjugiranoj ravnini određenoj položajem prstena za izoštravanje dobiva realna slika

nitnog križa. Postoje i druge konstrukcije koje se razlikuju donekle od ove. Npr. GLO1 (Wild) nema posebnog nitnog križa, već projicira crvenu, tzv. lasersku točku u presjecište nitnog križa, a zatim pomoću objektiva u konjugiranu ravninu s promjerom  $\sim 5\text{ mm}$  na udaljenosti  $100\text{ m}$ . Zbog utjecaja atmosfere doseg korisne projekcije iznosi oko  $400\text{ m}$ . Durbin se može primjeniti i za normalno promatranje okom koje je zaštićeno od štetnog djelovanja laserske svjetlosti specijalnim filtrom ugrađenim u okularu.



Sl. 26. Teodolit DKM-2A s laserom



Sl. 27. Prijenos laserske svjetlosti u durbin i projekcija nitnog križa pomoću laserskog snopa. 1 izvor laserskih zraka, 2 kondenzor, 3 svjetlosna cijev, 4 nitni križ lasera, 5 optička diobena kocka, 6 filter, 7 ispravljač, 8 dovod električne energije

**Tahimetarski teodolit** ima ugrađene i uređaje za mjerjenje udaljenosti.

**Meteorološki teodolit** je posebno konstruiran za mjerjenje horizontalnih i vertikalnih kutova radi određivanja smjera i jakosti vjetrova pomoću meteoroloških balona. Zbog toga se i zove balon-teodolit (npr. GARAT-Breithaupt; Balon-teodolit, Hilger and Watts).

**Kinoteodolit** je specijalni precizni teodolit za kontinuirano određivanje položaja i staze pokretnih ciljeva koji se prate s dva sinhronizirana instrumenta uz snimanje pomoću filmskih kamera

(5, 10, 20 ili 30 snimaka u s). Cilj se prati ili ručnim upravljanjem ili pomoću elektroničkog servo-uređaja (Kth, Siemens, EOTS, K 400, Contraves).

**Potenciometarski teodolit** služi za praćenje i registriranje podataka pokretnih ciljeva s kutnom brzinom  $1\cdots 2^\circ$  u sekundi. Potenciometarski teodolit Tpot-Siemens ima optički slomljeni durbin povećanja  $10\times$  i žarišne duljine objektiva 500 mm. Umjesto krugova ima vijenac s pužnim navojem (ukupno 360 navoja). Mjerjenjem vremena neposredno se očitava kutna brzina, no osnovno je da se zakreti vijka s pužnim navojem prenose pomoću zupčanika (mogućnost ukopčavanja dvaju prijenosa) na potenciometar koji ima funkciju pretvarača kutne mjerne veličine u razmjerne promjene napona. Te promjene prenose se do prijamne stанице gdje se signal ponovo pretvara u kutnu vrijednost. Digitalne vrijednosti mogu se prenijeti na bušene kartice ili trake.

**Busolni teodolit** je teodolit s ugrađenim kompasom (busolom, npr. BT1, Ertel), ili teodolit s horizontalnim krugom čvrsto povezanim s magnetskom iglom s kojom se njije (npr. To, Wild; Te-E5, MOM). Krug s iglom može se s okretne točke u središtu kruga podići i pritegnuti uz nepokretni dio instrumenta (aretiрати), pa se instrument može upotrebljavati kao običan teodolit. Kad krug nije aretiran, on se orijentira prema položaju magnetske igle, te se na krugu očitavaju azimuti. Na točnost mjerjenja nepovoljno djeluju mjesne i vremenske promjene magnetske deklinacije.

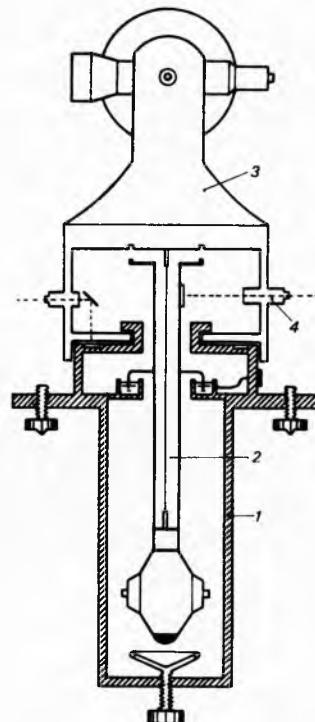
**Giroteodolit** je teodolit s giroskopom za mjerjenja astronomskog azimuta. Upotrebljavaju se i nazivi: indikator meridijskog, girobusola, giroorientir. Sastoji se od tri osnovna dijela: girosustava, teodolita i izvora energije. Girosvastav može biti sastavni dio teodolita (MRK-2, Freiberger Präzisionsmechanik, GiB1, GiB2, MOM; MW-2, MWT-2, SSSR), ili izведен kao giroskopski dodatak teodolitu (GAK1, Wild; Gi-C1, MOM; MT-1, SSSR). Prednost je primjene giroteodolita s obzirom na druge metode određivanja astronomskog azimuta: jednostavnost i brzina mjerjenja neovisno o meteorološkim uvjetima, mogućnost mjerjenja ispod površine zemlje, u tunelima, zatvorenim građevinama i sl. Metoda giroskopske orientacije omogućuje jednostavnije određivanje azimuta, odnosno smjernih kutova, pa se primjenjuje u poligonometriji za orijentaciju samostalnih geodetskih mreža, za azimutalni priključak aerosnimaka, za iskolenje dalekovoda i sl., zatim za orijentiranje usmjerenih antena, radio-signalnih uređaja, navigacijskih instalacija itd. Kao mjera točnosti  $m$  definira se srednja pogreška određivanja azimuta u jednom girusu. Giroteodoliti s obzirom na točnost mogu biti: precizni ( $m < 20''$ ), srednje točni ( $m < 30''$ ) i malo točni ( $m < 3'$ ). Iako su po osnovnoj zamisli primjene giroskopi jednostavni (v. *Giroskop*), giroteodoliti po konstrukciji i izvedbi ipak spadaju u vrlo složene instrumente.

U giroteodolite ugrađuju se tzv. njihajući giroskopi, koji mogu biti *plutajući* (giromotor u obliku valjka, uronjen u tekućinu, hermetički zatvoren u kućište, koji se gornjim dijelom kuglastog oblika upire o sforno ležište) ili *viseći torzijski giroskop*. Najviše se primjenjuje torzijski sustav. Tada giroskop visi o tankoj metalnoj niti učvršćenoj za alhidadu teodolita (sl. 28). Viseći dio sastoji se od gromotora, koji se nalazi u kućištu s cijevnim nastavkom koji ima na gornjem dijelu ravno zrcalo. To zrcalo omogućuje registraciju svakog pomaka uz pomoć autokolimacijskog durbina. Aretirani girosvastav vezan je uz alhidadu, a torzijska nit je rasterećena. Glavni je dio girosvastava gromotor koji se sastoji od statora i rotora koji rotira  $20000\cdots 30000\text{ min}^{-1}$ .

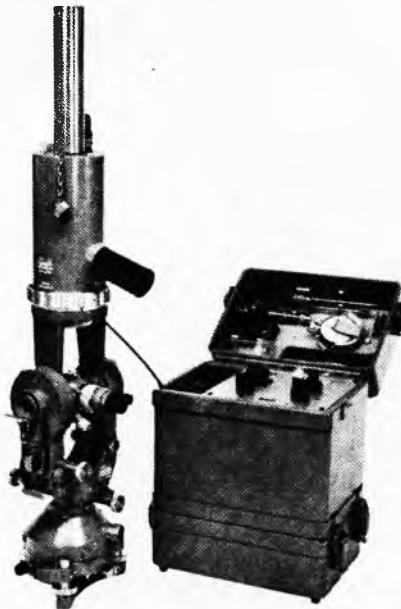
Kad se mjeri, os giroskopa ne postavlja se u smjer meridijskog, već zbog inercije njije simetrično s obzirom na taj smjer, što se u autokolimacijskom durbinu registruje pomicanjem marke na skali. S obzirom na to mjeri se primjenom reverzijske metode (pomicanje alhidade), amplitudnom metodom (uz nepomičnu alhidadu) i mjerjenjem vremena prolaza kroz nultu crtu (uz obračun korekture).

Nakon centriranja i horizontiranja instrumenta na stajalištu vizira se točka prema kojoj se određuje azimut i očita se horizontalni krug. Pomoću busole durbin se približno usmjeruje

prema magnetskom sjeveru. Vijcima aretacijskog uređaja oslobođa se viseći sustav giroskopa i stavlja se giromotor u pogon priključkom na izvor energije. Kad je postignuta radna brzina rotora, pogon se isključuje, te se aktivira uređaj za kočenje.



Sl. 28. Shema torzijskog giroteodolita.  
1 nepomična osnova, 2 torzijski giroskop, 3 teodolit, 4 autokolimacijski durbin



Sl. 29. Teodolit T2 s giroskopskim dodatkom GAK 1 i izvorom energije

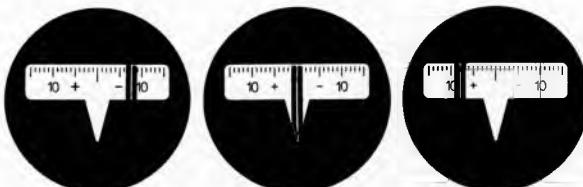
Tada se promatra pomična marka, smanjujući amplitudu njihanja pomoću uređaja za prisilno prigušivanje sve dok se reverzijske točke ne nalaze unutar skale. Kad se primjenjuju reverzijske metode, prati se pomična marka, djelujući na vijak za pomak alhidade tako da se indeks održava na nultoj točki skale. Na reverzijskim točkama čini se da indeks kratko vrijeme miruje. Tada se očitava horizontalni krug teodolita. Iz najmanje triju opažanja reverzijskih točaka može se izračunati smjer geografskog

## GEODETSKI INSTRUMENTI

meridijana, a time i azimut. To je samo osnovna shema mjerena bez određivanja nultog položaja, tj. položaja asimetrije njihaja. Svakako da je za rad s tako složenim i osjetljivim uređajima potrebna visoka stručnost. Na točnost mjerena bitno utječe vanjski utjecaji i zagrijavanje giromotora.

Kad se primjenjuje amplitudna metoda, alhidada je nepomična, a očitavaju se reverziske točke na amplitudnoj skali.

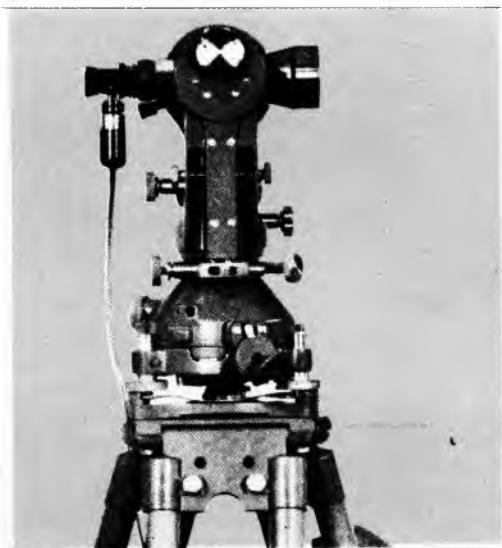
Metoda mjerena vremena prolaza često se primjenjuje posebno kad je girosvustav dodatak teodolitu. Tada se mjeru vremena prolaza pomicne marke kroz sredinu skale, tj. trenutak koincidencije pomicne marke i nulte crte skale te amplitude, tj. položaj reverziskih točaka. Iz ovih mjerena računa se korektura približne orientacije, koja je proporcionalna amplitudi i razlici vremena prolaza. Na sl. 29 prikazan je teodolit s giroskopskim dodatkom GAK1 (Wild), a na sl. 30 izgled amplitudne skale i položaj pomicne marke pri mjeranjima amplitude i vremena prolaza. Na srednjoj slici vidi se položaj kad je postignuta koincidencija pomicne marke i nulte crte skale. Giroskopski dodatak ima masu 1,8kg, visinu 34cm i najveći promjer 8,5cm. Mjerenje traje oko 20 minuta s točnošću određivanja pravca sjevera od  $\pm 20''$ .



Sl. 30. Karakteristični položaji pomicne marke na skali

**Teodolit s autokolimacijskim okularom** (sl. 31). Okular durbina može se u nekim teodolitima zamijeniti s autokolimacijskim okularom. To je posebna konstrukcija okulara s mogućnošću rasvjete nitnog križa. Tako su moguća autokolimacijska mjerena teodolitom uz uobičajenu upotrebu ravnog zrcala ispred objektiva durbina koji je fokusiran na neizmjerno. Kad se postigne koincidencija nitnog križa i njegove reflektirane slike, vizurna je os durbina okomita na ravninu zrcala. Upotrebljava se u industriji za ispitivanje položaja strojeva i uređaja, njihovih pokretnih dijelova, te u laboratorijima za ispitivanja mjernih instru-

menata. Ako se zrcalo nalazi, npr., na dijelu stroja, može se opaziti svaka promjena smjera, i to kao dvostruka promjena kuta (svojstvo pri zakretu ravnog zrcala).

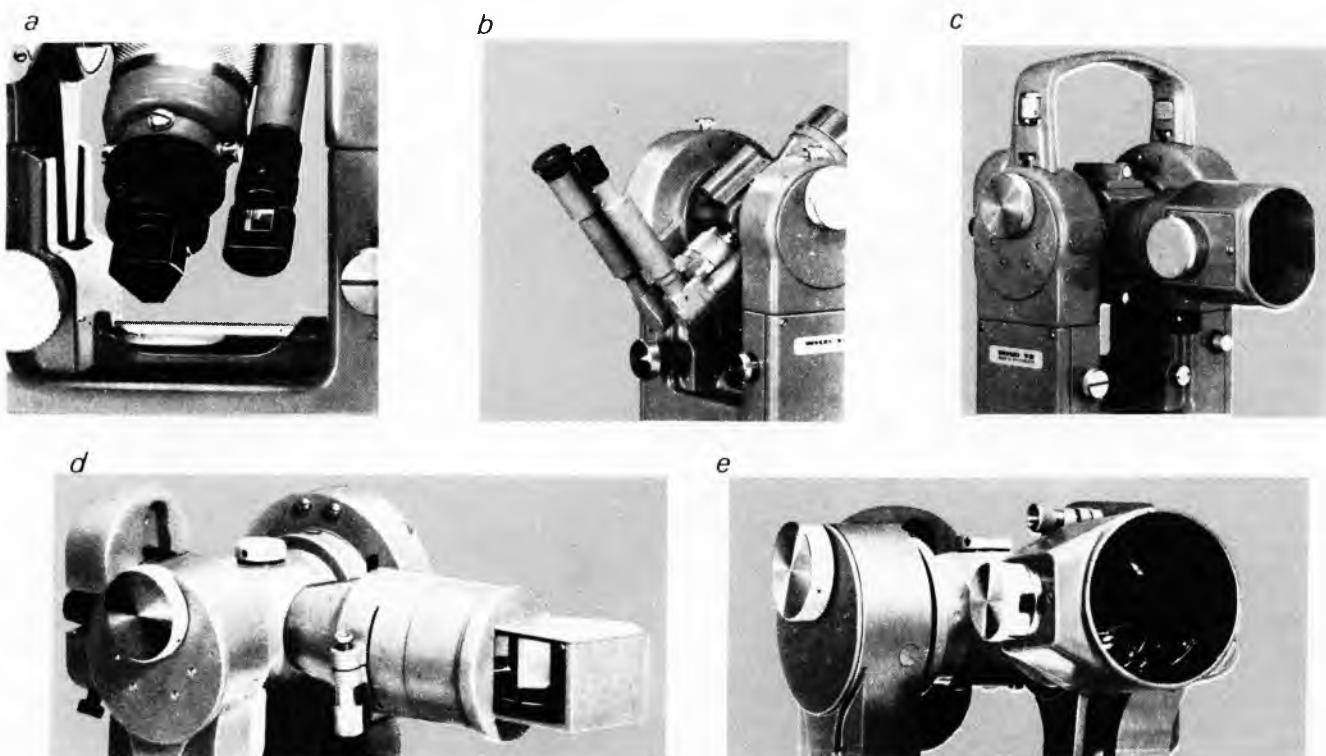


Sl. 31. Teodolit T2 s autokolimacijskim okularom

Osim autokolimacijskog okulara, tvornice geodetskih instrumenata proizvode i druge različite dodatke durbinu radi što svestranije primjene teodolita (sl. 32).

**Okularna prizma** (sl. 32a) je dodatak okularu durbina (i mikroskopa) koja omogućuje viziranje pri jače nagnutom durbinu (do  $\sim 65^\circ$ ). Zenitni okulari (sl. 32b) zamjenjuju obične okulare i služe za viziranje sve do smjera prema zenitu.

**Optički mikrometar** (sl. 32c) s planparalelnim pločama natiče se na cijev objektiva i služi za mjerjenje linearnih odstupanja od točke vizurne linije u ravnini cilja. Mjerno područje iznosi 10mm s vrijednošću intervala 0,2mm. Zakretanjem dodatka oko kućišta objektiva moguće je mjeriti odstupanja u svim smjerovima u ravnini objekta unutar mjernog područja.



Sl. 32. Različiti dodaci durbinu teodolita. a) okularna prizma, b) zenitni okular, c) optički mikrometar, d) pentagonalna prizma, e) optički daljinomjerni klin

**Pentagonalna prizma** (sl. 32d) služi za otklon vizurne osi za  $90^\circ$ . Zakretanjem prizme taj je otklon moguć u svim smjerovima.

**Optički daljinomjerni klin** (sl. 32e) prekriva srednji dio objektiva, a upotrebljava se za mjerjenje udaljenosti na principu dvostrukih slika uz primjenu posebne horizontalno položene mjerne letve na točki cilja (v. *Daljinomjeri*, TE3, str. 170). Ostali su dodaci teodolitu: izmjenljivi okulari za različita povećanja, nivelačijska libela za durbin, optički visak na durbinu, predleće za objektiv, jahača libela i različiti dodaci za astronomsku opažanje. Uz ove dodatke proizvodi se i različiti pribor. To su u prvom redu različite marke za viziranje s uređajem za prisilno centriranje (sl. 13), bazisna letva s priborom, uredaji za svjetlosnu signalizaciju cilja i dr.

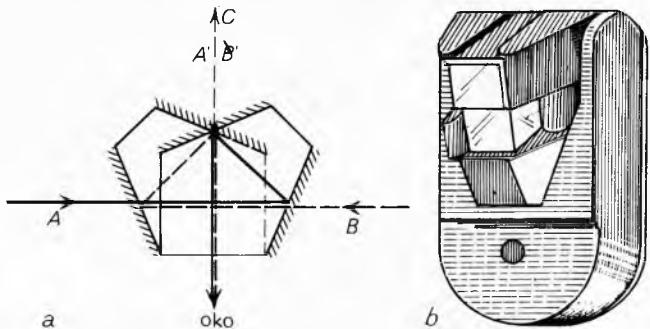
**Vrste teodolita prema točnosti mjerena**. Kriterij za ocjenu točnosti teodolita srednja je pogreška mjerene pravca u dva položaja durbina. Pogreška se izražava u metričkim sekundama. Prema tome kriteriju teodoliti se svrstavaju u četiri grupe: a) precizni teodoliti visoke točnosti, srednja pogreška  $m \leq \pm 2''$ , npr. Theo 002, Zeiss-Jena; T3, Wild (sl. 11); OT-02, SSSR; DKM-3, Kern; b) precizni teodoliti, srednja pogreška  $m \leq \pm 6''$ , npr. T2, Wild (sl. 8, sl. 16, sl. 24, sl. 31); Te-B1, MOM; FLT3, Fennel (sl. 25); DKM-2, Kern (sl. 26); Theo 010, Zeiss-Jena; Th3, Opton-Oberkochen; T5, SSSR; KE-2c, SAD; c) teodoliti srednje točnosti, srednja pogreška  $m \leq \pm 20''$ , npr. DKM-1, Kern; T1-A, Kern (sl. 13, sl. 22); NT-2, Nippon-Kogaku; TE-D1, MOM; Th 4, Opton-Oberkochen; T-10 i T-20, SSSR; Theo 020, Zeiss-Jena; Transit 50, 60 i 110, SAD; d) obični ili jednostavnji teodoliti, srednja pogreška  $m \leq \pm 80''$ , npr. T1, Miller; KT-1, Ertel; STNO, SLOM, Paris; Theo 080, Zeiss-Jena.

#### Jednostavniji instrumenti za mjerjenje i prenošenje kuta

**Kutno zrcalo** sastoji se od dvije ravne zrcalne plohe koje zatvaraju kut od  $45^\circ$ . Služi za otklon svjetlosnih zraka za  $90^\circ$ , pa se upotrebljava za iskolčenje pravog kuta, tj. okomice na zadani pravac.

**Trostrana pravokutna prizma** izrađena je od optičkog stakla, a ploha koja odgovara hipotenuzi prekrivena je zrcalnim slojem (sl. 33). Upotrebljava se također za iskolčenje pravog kuta postavljanjem u jedan od dva karakteristična položaja (sl. 33).

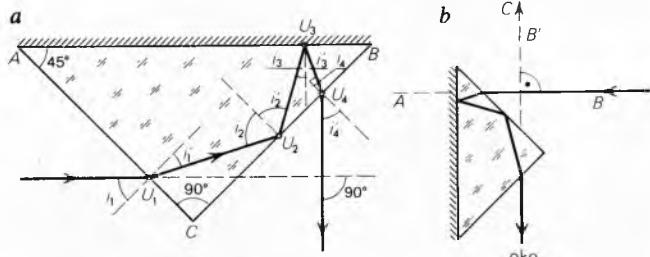
čine pravi kut, a dvije zrcalne plohe kut od  $45^\circ$ . Optička funkcija i primjena analognog je trostranoj pravokutnoj prizmi, no vrh pravog kuta nalazi se unutar pentagonalne prizme, što povećava točnost iskolčenja. Zbog toga, a i zbog drugih praktičnih razloga, pentagonalna prizma se znatno više upotrebljava. Jedan je od razloga i posebna izvedba kao kombinacija dviju pentagonalnih prizama postavljenih jedne poviše druge



Sl. 34. Glavni presjek dvostrukog pentagonalnog prizma (a) i vanjski izgled prizma s kućištem (b)

(sl. 34). Takva dvostruka prizma služi, osim za iskolčenje okomica, i za postavljanje točke u pravac. Ako se krajnje točke A i B dužine markiraju trasirkama, pomakom se dvostruku prizmu u smjeru okomitom na pravac AB dovode slike trasirki A' i B' u koincidenciju, što znači da se točka koju pogađa visak prizme nalazi na pravcu AB. Okomica na pravac iskolčuje se u vizuelnom produženju koicidiranih slika.

**Busola** se izrađuje u različitim oblicima, kao dodatak instrumentima ili kao zaseban instrument. Osnovni sastavni dio busole jest slobodno obješena magnetska igla, a obično je dodan još i uređaj za viziranje. Busolom se mjeri magnetski azimuti. U mjerenoj tehničkoj upotrebljava se kao kružna busola i kao obična busola za orientaciju koja je dodatak instrumentu. Kružna busola često se izrađuje kao samostalan instrument s dioptrima za viziranje ili s durbinom (sl. 35), ali i kao dodatak instrumentu, npr. kao jahača busola.



Sl. 33. Otklon zrake svjetlosti pod pravim kutom prolazom kroz trostranu pravokutnu prizmu uz dvije refleksije

Optički djeluje kao planparalelna ploča i kutno zrcalo s kutom od  $45^\circ$ . Prema zakonu otklona zrake na kutnom zrcalu slijedi da je  $U_3U_4 \perp U_1U_2$ , a kako su dioptrijske plohe AC i BC međusobno okomite, to su i kutovi  $i_4$  i  $i'_1$  međusobno jednak, pa prema Snellovu zakonu loma slijedi da je  $i'_4 = i_1$ . Izlazni kut zrake jednak je upadnom kutu na prvu plohu i oba kuta su istog predznaka, pa je izlazna zraka okomita na upadnu zraku, bez obzira na iznos upadnog kuta zrake  $i_1$ . To znači da se otklon zrake ne mijenja pri zakretu prizme oko osi okomite na glavni presjek prizme. Prizma se nalazi u kućištu s drškom o koji je obješen visak. S točke dužine iskolčuje se okomica promatranjem slike trasirke koja je postavljena na krajnjoj točki dužine (okomica na dužinu AB u smjeru C na sl. 33b).

**Pentagonalna prizma** izrađena je od optičkog stakla i u glavnom presjeku ima oblik peterokuta. Dvije dioptrijske plohe

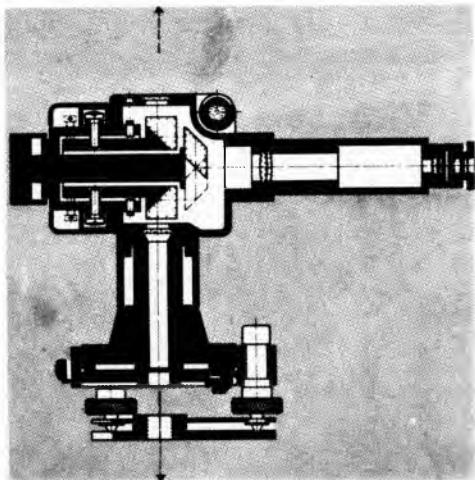


Sl. 35. Kružna busola s durbinom TB

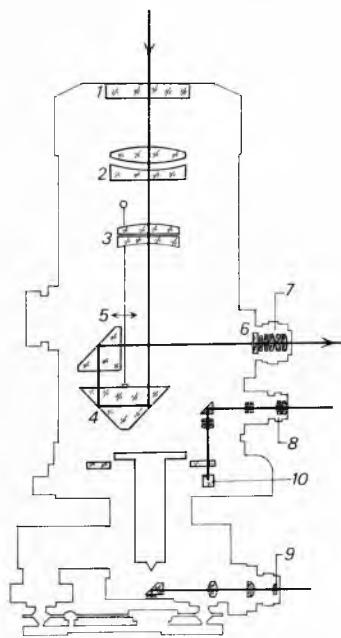
## GEODETSKI INSTRUMENTI

Busola se upotrebljava pri jednostavnijim mjerjenjima, posebno u šumskim i brdovitim područjima, za izmjeru busolnih vlačkova i pri tahimetrijskim snimanjima, ako za tu svrhu ima predviđene dodatne uređaje. Ugradnjom busole u teodolit dobiva se *busolni teodolit*.

**Optički visak** kao poseban instrument služi za kontrolu točaka, odnosno za određivanje pravca vertikale. Glavni mu je sastavni dio durbin koji ima, za razliku od nivelira, geodetsku vizurnu liniju u vertikalnoj ravnini. Mnogo se primjenjuje pri kontroli izvedbe visokih građevina, mostova, brana, televizijskih tornjeva itd. Kad je durbin horizontalan, otklon geodetske vizurne osi u vertikalu postiže se pomoću prizama (sl. 36). Prebacivanje



Sl. 36. Optički visak ZNL (Wild)



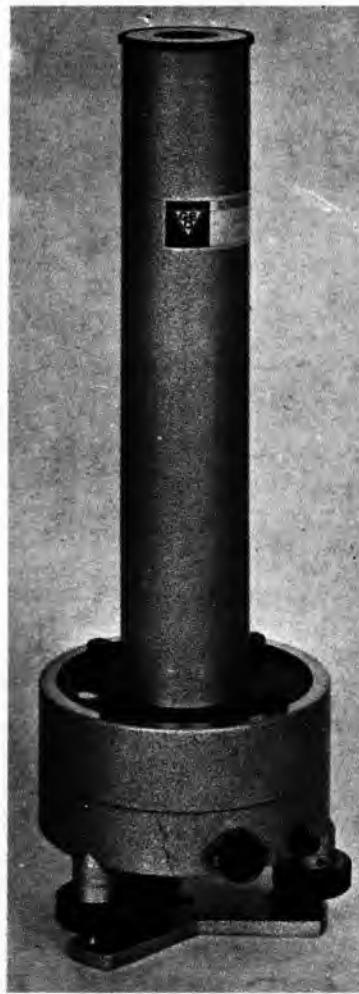
Sl. 37. Optička shema optičkog viska PZL (Zeiss). 1 zaštitno staklo, 2 konvergentni dio objektiva, 3 divergentni dio objektiva, 4 prizma kompenzator, 5 krovna prizma, 6 pločica s nitnim križem, 7 okular durbina, 8 okular mikroskopa, 9 okular optičkog viska za centriranje, 10 izvor svjetla za osvjetljavanje glavnog kruga

viziranja u smjer zenita ili nadira moguće je u nekim optičkim visicima posebnim dugmetom, koje djeluje na položaj prizme (sl. 36). Za ispravno postavljanje geodetske vizurne osi upo-

trebljavaju se cijevne libele ili optički kompenzatori (sl. 37), koji djeluju automatski.

Karakteristične osi optičkog viska s libelom jesu: glavna os, vizurna os i os libele. Os libele mora biti okomita na glavnu os, a ona mora biti paralelna s vizurnom osi, što se postiže rektifikacijom. Točnost je optičkih viskova u određivanju smjera vertikale  $\pm 1\text{ mm}/30\text{ m}$  do  $\pm 1\text{ mm}/100\text{ m}$ .

**Laserski optički visak** upotrebljava za određivanje pravca vertikale laserski snop projiciran u smjer vertikale. Na sl. 38



Sl. 38. Laserski optički visak LL12

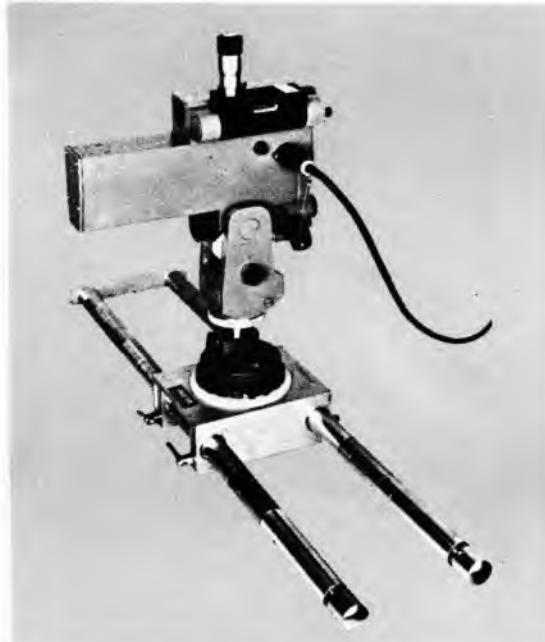
prikazan je model LL 12 (Geo-Feinmechanik GmbH) mase 8 kg, snage 2mW s presjekom snopa  $\sim 25\text{ mm}/100\text{ m}$ .

**Girovertikal** je instrument za određivanje vertikale na pomičnoj osnovi. Taj je instrument građen na osnovi primjene giroskopija. Girovertikali se najviše primjenjuju za gravimetrijska mjerena koja se izvode s brodova i zrakoplova, te za orijentaciju i stabilizaciju osi aerokamera pri fotogrametrijskom snimanju.

### Instrumenti za alinjiranje

Instrumenti za alinjiranje služe za ispitivanje odstupanja točaka od pravca, za iskolčenje i kontrolu pravaca pri izvedbi građevinskih objekata (promjene zbog opterećenja, vremenske i temperaturne promjene) i za postavljanje i kontrolu položaja različitih uređaja i postrojenja. Kako su odstupanja od pravca pri ovim ispitivanjima malena, potrebna je visoka preciznost tih mjerena. Instrumenti za alinjiranje većinom nemaju ni horizontalnog niti vertikalnog kruga, no ako ti krugovi i postoje, točnost očitanja je mala. Postoje vrlo različite konstrukcije takvih instrumenata.

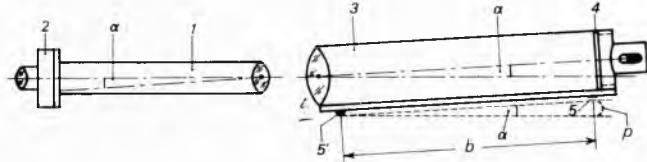
**Instrumenti za alinjiranje s durbinom.** Većina konstrukcija instrumenata za alinjiranje ima, kao osnovni sastavni dio, durbin s velikim povećanjem koji se može zakretati oko horizontalne osi. Alinjira se sa stabilno postavljenim instrumentom, a vizira marka na kraju linije alinjiranja. Tako je određen referentni pravac, odnosno zakretanjem oko horizontalne osi referentna vertikalna ravnina. Pomicanjem marka na međutočke okomito na referentnu ravninu mjeru se odstupanja od te ravnine. U većini instrumenata danas se upotrebljavaju plinski helij-neonski laseri snage 1...5 mW, valne duljine 632,8 nm. Laserska zraka kao referentni pravac tehničkog alinjiranja ima znatnu prednost jer omogućava određivanje horizontalnih i vertikalnih odstupanja građevinskog objekta ili elementa. Laseri emitiraju vrlo uske i prodrorne koherentne snopove kojih se divergencija može primjenom optičkih sustava i dalje reducirati. U praktičnoj primjeni otvor snopa iznosi 10" - 40" (promjer snopa 5...20 mm na udaljenosti 100 m), pa se takav usmjereni snop naziva i laserska zraka. Bez posebnih uređaja za prijam, kad se traži srednja točnost, može se postići srednja točnost od 2" (1 mm na udaljenosti 100 m), a pomoću prijamnika može se odrediti središte laserske zrake s kutnom točnošću od 0,2", što omogućuje točnost alinjiranja do 0,1 mm na udaljenosti 100 m. Laserska zraka može biti projicirana pomoću objektiva uvođenjem laserske svjetlosti u durbin primjenom specijalnih okulara (laserski teodolit, sl. 26), no danas postoje brojni specijalni instrumenti s vrlo različitim priborom za primjenu lasera s dosegom 300...400 m (npr. TL-7, Geofeinmechanik; AGL Bau-Laser; LT-3, RK-8, Model 855, Spectra-Physics; VSE 19, VSE 20, Laser Light; Visomat LS-4, LS-5). Na sl. 39 vidi se Visomat LS-5 s laserom snage 1,5 mW, s laserskim (povećanje 10×) i običnim durbinom (povećanje 18×), uz mogućnost nagiba +25° do -30° i okretanja oko vertikalne osi 360°.



Sl. 39. Laser za primjenu u građevnim radovima LS-5

Vodenje i upravljanje pokretnim građevnim strojevima dalja je mogućnost primjene lasera. Laserska zraka, vidljiva na ekranu postavljenom na stroju, omogućuje stalnu kontrolu, bez prekida rada. Pomoću laserske zrake može se djelomično ili potpuno automatizirati upravljanje strojevima. U ishodišnom položaju fotočelija se postavlja tako da laserska zraka pogleda središnji dio. Fotočelije registriraju svaku promjenu smjera, pa ovu informaciju pretvorenu u signale prenose mehanizmu za automatsko održavanje smjera (npr. linijika 2, SSSR). U praktičnoj primjeni može se postići da odstupanja smjera ne budu veća od 4 mm. Takvi instrumenti u stalnom su razvoju, posebno s obzirom na automatizaciju.

**Ispitivanje pravaca pomoću kolimatora.** Prednost je primjene kolimatora za ispitivanje malih odstupanja točaka od referentne ravnine, što i pri različitim udaljenostima nije potrebno izoštavanje slike durbina. Uređaj (sl. 40) sastoji se od durbina 1 s okularnim mikrometrom 2 i kolimatora 3 sa skalom 4 koja se nalazi u žarišnoj ravni objektiva kolimatora (interval 0,1 mm). Kolimator ima dvije kontaktne točke na polukuglastim glavama 5 i 5'. Pravac položen kontaktnim točkama mora biti u ravni kolimacijske osi.



Sl. 40. Shema uređaja durbina kolimatora za ispitivanje pravaca visokom točnosti. 1 durbin, 2 okularni mikrometar, 3 kolimator, 4 skala, 5 i 5' polukuglaste kontaktne glave

Na početku ispitivanja na početnu točku pravca postavlja se durbin, a na drugu vizurnu marku, koja se vizira durbinom uz očitavanje mikrometra. Pri pomaku kolimatora u smjeru paralelnom s vizurnom osi durbina slika skale kolimatora u durbinu ostaje u nepromijenjenom položaju. U slučaju bilo kakvog zakreta kolimatora za kut  $\alpha$ , pomaknut će se slika s obzirom na nitni križ durbina. Taj se pomak može precizno izmjeriti pomoću skale i mikrometra i tako odrediti odstupanje  $p$  kontaktne točke koje iznosi:

$$p = b \frac{\alpha''}{\varphi''}, \quad (10)$$

gdje je  $b$  razmak kontaktnih točaka. Kako je  $\alpha'' = n\varphi''$ , gdje je  $\varphi''$  vrijednost intervala okularnog mikrometra, a  $n$  broj očitanih podjela, dobiva se

$$p = b \frac{n\varphi''}{\varphi''}. \quad (11)$$

Konstanta uređaja  $k$  definira se relacijom

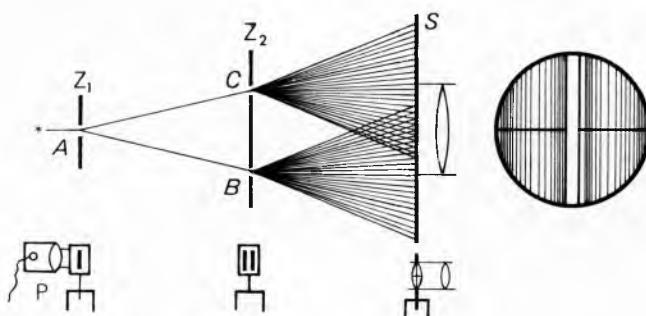
$$k = b \frac{\mu''}{\varphi''}, \quad (12)$$

pa je odstupanje kontaktne točke  $p = kn$ . Za razmak kontaktnih točaka od 2000 mm dobiva se srednja pogreška mjereno odstupanja  $\pm 0,004$  mm. Pri određivanju odstupanja međutočaka kolimator se postepeno prenosi uzduž osi uz određivanje otklona pojedinih odsječaka. Pri tom zadnja kontaktne točka kolimatora dolazi u položaj prednje itd. S povećanjem udaljenosti potrebno je i durbin primaknuti kolimatoru. Prije takvog prijenosa izmjeri se odstupanje na mikrometru, pa se nakon postavljanja durbina ispred kolimatora ponovno orijentira durbin, tako da se postigne jednako očitanje na mikrometru. Pri mjerenu odstupanja na duljini od 200 m (za  $b = 200$  mm, potrebno je 100 prijenosa kolimatora) srednja pogreška iznosi  $\sim \pm 0,04$  mm.

**Difrakcijsko-interferencijski uređaj.** Konstrukcija se osniva na pojavu ogiba svjetlosti prolazom kroz dvije uske pukotine (v. Optika). Snop zraka svjetlosti dobiven pomoću objektiva projektora  $P$  prolazi najprije kroz usku pukotinu  $A$  zaslona  $Z_1$ , širine 0,2...0,5 mm i dolazi do zaslona  $Z_2$  s uskim pukotinama  $B$  i  $C$  (sl. 41). Prema Huygens-Fresnelovu principu koherenti snopovi zraka koje prolaze kroz pukotine  $B$  i  $C$  interferirat će stvarajući difrakcijsku sliku koja se može promatrati pomoću luke u ravnini  $S$ . Difrakcijska slika sastoji se od simetrično raspoređenog niza tamnih i svjetlih pruga, ako je primjenjena monokromatska svjetlost. Uz primjenu prirodne svjetlosti, pruge su (osim središnje) obojene. Referentna ravnina određena je osi pukotine  $A$  i simetralom pukotina  $B$  i  $C$ . U toj ravnini je i os simetrije difrakcijske slike.

Uređaj je građen tako da se u ishodišnom položaju os simetrije pukotina nalazi u vertikalnoj okretnoj osi zaslona  $Z_2$ .

Položaj se očitava mikrometrom. Pri svakom pomaku tog zaslona okomito na referentnu os, na mikrometru se očitava odstupanje od ishodišnog položaja. Kad se određuju položaji međutočaka, postavlja se na jednu točku referentnog pravca zaslona s pukotinom  $Z_1$  zajedno s projektorom, a na drugu točku prijamnik difrakcijske slike. Opažać promatra na prijamniku difrakcijsku sliku u žarišnoj ravnini lupe gdje se nalazi nitni križ. Pri pomaku zaslona  $Z_2$  na međutočki okomito na pravac pomiče se difrakcijska slika sve dok nit nitnog križa ne dođe u os simetrije. Na mikrometru se tada očita odstupanje međutočke. Iz dva do tri mjerjenja moguće je postići srednju pogrešku mjerena  $\pm 0,010 \dots \pm 0,015$  mm za razmak točaka do 50 m, odnosno do  $\pm 0,030$  mm za razmak do 80 m. U posljednjim modelima izrađenim u SSSR-u upotrebljavaju se plinski helijsko-neonski laseri kao izvor svjetlosti.



Sl. 41. Shema primjene difrakcijsko-interferencijskog uredjaja

**Mehaničko alinjiranje.** Za mehaničko alinjiranje optička se referentna linija zamjenjuje mehaničkom. Najviše se u tu svrhu primjenjuje napeta žica promjera  $\sim 0,3 \dots 0,8$  mm. Prednost je primjene takve metode što nema utjecaja refrakcije ili turbulencije zračnih slojeva kao pri optičkim metodama, a osnovni su nedostaci pomaci od referentne osi i progib. Za mjerjenje poprečnih odstupanja mogu se primijeniti mehaničke, optičke (npr. optički ordinatometar) ili električne metode s mogućnostima primjene automatizacije.

## INSTRUMENTI ZA MJERENJE VISINSKIH RAZLIKA

Za mjerjenje visinskih razlika upotrebljavaju se metode geometrijskog, trigonometrijskog i barometrijskog nivelmana.

Za gradnju instrumenata za geometrijski nivelman iskorištava se djelovanje sile teže. Ono se manifestira u pojavi da se sredina mjehura u cijevnoj libeli postavlja u tjeme libele kad je os libele horizontalna, da se os njihala postavlja u smjer djelovanja sile teže i da su razine površina tekućine u spojenim posudama na istoj visini (hidrostatski nivelman).

Trigonometrijski se nivelman osniva na mjerenu udaljenosti i kutova iz kojih se pomoću trigonometrije izračunavaju visinske razlike.

Osnova za barometrijski nivelman jest pojava da se s povećanjem nadmorske visine smanjuje atmosferski tlak, pa se mjenjem toga tlaka zaključuje o visinskim razlikama.

## Niveliri

Nivelir je osnovni instrument za mjerjenje visinskih razlika u geometrijskom nivelmanu. Osnovni mu je sastavni dio durbin koji se zajedno s uređajima za horizontiranje vizurne linije može okretati oko glavne ili vertikalne osi nivela. Pomoću uređaja za horizontiranje postavlja se vizurna linija u horizontalnu ravnicu, pa se visinske razlike točaka određuju očitavanjem na mernim letvama koje se postavljaju vertikalno pomoću dozne lible. Niveliri se postavljaju na stative, obično u sredinu između točaka kojih se visinska razlika određuje.

**Grada nivela.** Donji dio nivela je za vrijeme mjerena čvrsto povezan sa stativom pomoću središnjeg vijka. Sastoji se od tronošca s podnožnim vijcima (sl. 42). U nekim kon-



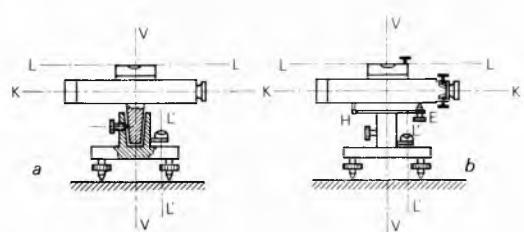
### Sl. 42. Nivelir N10

strukcijama donji dio nivela ima cilindrički završetak s konavnim sfernim ili koničnim ležajnim ploham. Takvi niveli nemaju podnožnih vijaka, ni podnožnu i opružnu ploču, već direktno leže na glavi stativa koja je sfernog oblika i na koju se neposredno pritežu središnjim vijkom (sl. 43). U nekim nivelirima postoji na donjem dijelu i horizontalni krug, pa postoji mogućnost očitavanja i horizontalnih kutova. Točnost takvih očitanja je malena, pa se iskorištavaju samo kao ispomoć (npr. niveliranje profila, plošni nivelman).



### Sl. 43. Nivelir GK II

Sustav vertikalne osi nivela povezuje donji i gornji dio, a može biti koničan ili cilindričan (sl. 44). Nivelir je jednostavnije građen nego teodolit.



Sl. 44. Shematski presjek niveliра s libelama. *a* niveler s koničnim sustavom vertikalne osi, *b* niveler s cilindričnim sustavom vertikalne osi i s elevacijskim vijkom

Postoje dva osnovna tipa nivela: niveli s libelama i niveli s kompenzatorom.

**Niveliri s libelama.** Gornji dio nivelira s libelama okreće se oko glavne osi i može se pomoću vijka zakočiti u određenom

položaju, a zatim za male iznose zakretati posebnim vijkom za fini pomak. Jednostavni nivelići često nemaju kočnice, ni vijka za fini pomak, već se gornji dio zadržava samo trenjem u određenom položaju. Suvremeni nivelići, posebno oni s kompenzatorima, imaju u nekim izvedbama vijak za fini pomak s pužnim navojem, a grubo okretanje gornjeg dijela moguće je jednostavnim svladavanjem trenja kočnice.

Gornji dio nivelića s libelama sastoji se od kućišta, durbina i niveličiske cijevne libele. Durbin nivelića srednjih točnosti, a posebno u preciznih nivelića moguće je zakretati za male iznose kuta oko horizontalne osi H posebnim *elevacijskim vijkom* E (sl. 44 b). Prije svakog očitavanja mjerne letve potrebno je niveličku libelu vrhunuti elevacijskim vijkom. O kvaliteti izvedbe elevacijskog vijka bitno ovisi točnost niveliiranja preciznim nivelićima s libelama. U jednostavnim nivelićima većinom nema elevacijskog vijka, pa se nivelička libela vrhuni podnožnim vijkom koji se postavlja u smjeru mjerne letve. Za grubo horizontiranje služe dozne libele osjetljivosti 8°...15°. Nivelička libela položena je u smjeru durbina i čvrsto je s njime povezana. Njena je osjetljivost 2°...15°. Mjehur libele promatra se ili pomoću ravnog zrcala (sl. 43), ili pomoću sustava prizama (sl. 3) i lupe, što ne samo povećava točnost vrhunjenja već i omogućava bolju zaštitu libele. U nekim preciznim nivelićima mjehur libele preslikava se u dio vidnog polja durbina, pa se neposredno promatra uz sliku letve koja se očitava (sl. 58), što je velika prednost.

S obzirom na način veze libele s durbinom i durbina s donjim dijelom postojala je slijedeća podjela nivelića: 1) nivelići s nepomičnim durbinom i nepomičnom libelom (libela, durbin, nosač durbina i glavna osovina čvrsto su međusobno povezani), 2) nivelići s durbinom za okretanje i reverziskom libelom (reverziska libela je čvrsto povezana s durbinom koji se može zakrenuti oko svoje mehaničke osi za 180°), 3) nivelići s durbinom za prelaganje (durbin se može iz svojih ležajeva podignuti i preložiti); neke konstrukcije imaju jahaču libelu.

Većina nivelića je prve konstrukcije. Vrlo su rijetki danas nivelići drugog konstruktivnog tipa (npr. N2, Wild). Prednost im je pojednostavljena rektifikacija koja se izvodi samo s jednog stajališta instrumenta, a nedostatak im je nedovoljno stabilno ležište durbina i nerentabilna proizvodnja.

Nivelići treće grupe su zastarjeli i danas se više ne proizvode.

*Karakteristične osi nivelića s libelama* jesu: glavna ili vertikalna os VV koja ima istu funkciju kao u teodolitu, vizurna ili kolimacijska os KK, os niveličke libele LL, os dozne libele L'L' i mehanička os DD u niveliću s durbinom za okretanje.

Osi moraju zadovoljiti nekoliko uvjeta. Osnovni je uvjet  $LL \parallel KK$ . Ako je taj uvjet zadovoljen, pri vrhunjenju cijevne libele vizurna os je horizontalna, što je osnovno za mjerjenje visinskih razlika. Ostali su uvjeti:  $LL \perp VV$ ,  $L'L' \parallel VV$ , te  $DD \parallel LL \parallel KK$  kad niveličar ima durbin za okretanje.

Osnovni uvjet ( $LL \parallel KK$ ) ispituje se najčešće metodom tzv. niveliiranja iz sredine i s kraja. Niveličar se na približno ravnom terenu postavlja u sredinu između točaka na koje su vertikalno postavljene mjerne letve. Letve su udaljene od nivelića 20...40 m. Svaka letva očitanja se uz prethodno vrhunjenje niveličke libele. Razlika očitanja daje ispravnu visinsku razliku točaka, bez obzira na to što osnovni uvjet nije zadovoljen, zbog jednakih udaljenosti mjernih letava od instrumenta. Tada se niveličar postavlja blizu jedne letve i kad libela vrhuni očitanja se bliža letvi. Ispravno očitanje na daljoj letvi izračunava se tako da se očitanju na bližoj letvi doda visinska razlika s odgovarajućim predznakom. Nakon izoštrenja slike dalje letve i poništenja paralaksne nitnog križa, nitni križ se pomiče na izračunato očitanje pomoću posebnih korekcijskih vijaka, ako niveličar nema elevacijskog vijka. U protivnom durbin će se pomaknuti elevacijskim vijkom na potrebitno očitanje i nakon toga vrhunuti libelu djelujući na njene korekcijske vijke.

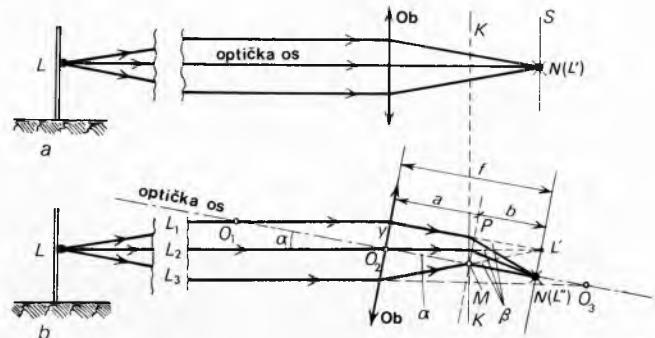
Položaj osi niveličke libele i osi dozne libele ispituje se analogno kao i za teodolit. U niveliću s elevacijskim vijkom ispravlja se polovica otklona mjehura libele podnožnim vijkom, a polovica elevacijskim vijkom.

**Nivelići s kompenzatorom.** Niveličar s kompenzatorom nema cijevne libele, niti elevacijskog vijka, već se vizurna linija

postavlja automatski u horizontalnu ravninu djelovanjem posebnog kompenzatora, nakon približnog horizontiranja pomoću dozne libele. Funkcija kompenzatora osniva se na djelovanju sile teže, a kao kompenzaciji element upotrebljava se tekućina ili optički element (ili više elemenata) na njihalu, kao npr. pravokutna prizma, krovna prizma, sustav prizama, ravno zrcalo, leća. Kad niveličar ima kompenzator, nije potrebno vrhunjenje cijevne libele, što je ovisno o promatraču, a često o različitim utjecajima koji mogu biti i vrlo nepovoljni, kao što je nestabilno tlo, vibracije i sl. Treba naglasiti da je kompenzator znatno manje osjetljiv na temperaturne promjene.

Nivelići s kompenzatorom zbog praktičnosti primjene i brzine mjerjenja (potrebno je oko 40% vremena s obzirom na mjerjenje nivelićom s libelama) sve više zamjenjuju niveliće s niveličkom libelom.

**Optička kompenzacija.** Objektiv durbina Ob (sl. 45) stvara realnu sliku mjerne letve u ravnini slike S, gdje se nalazi ravnilna nitnog križa. Zbog jednostavnosti razmatranja uzima se da se vizurna os poklapa s optičkom osi objektiva, pa će i slika točke L, koja odgovara očitanju na letvi pri horizontalnoj vizurnoj osi, biti u L' na optičkoj osi (sl. 45a), gdje se nalazi i presječiste nitnog križa N. Ako se durbin nagnje za kut  $\alpha$ , slika točke L neće više pasti u horizontalnu nit nitnog križa, već izvan optičke osi u točku L' (sl. 45b).



Sl. 45. Princip optičke kompenzacije. Očitavanje pri a horizontalnoj i b nagnutoj optičkoj osi

Zadatak je kompenzatora da pri nagnutom durbinu, unutar područja kompenzacije, automatski otkloni zrake koje dolaze od točke L, za određeni kut  $\beta$ , da bi se točka L (polozaj očitanja pri horizontalnoj vizurnoj osi) ponovno preslikala na horizontalnoj niti nitnog križa, tj. u točki L'. Znači, očitanje letve i pri nagnutom durbinu unutar područja kompenzacije mora ostati nepromjenjeno.

Omjer kutova (sl. 45b)  $\alpha/\beta = k$  naziva se faktor ili koeficijent kompenzacije. Aproksimiraju li se dužine  $PM$  i  $L'N$  s lukovima kružnice i računa li se da je realna slika približno u žarišnoj ravnini objektiva, dobiva se  $L'N \approx f\alpha \approx b\beta$ , odnosno da je

$$\beta = \frac{f}{b} \alpha, \quad (13)$$

gdje je f žarišna duljina objektiva, a b udaljenost kompenzatora od nitnog križa. Jednadžba (13) nazvana je jednadžbom kompenzacije. Budući da je  $k = f/b$ , ako se postavi da je  $a = f - b$ , dobiva se

$$a = f \frac{k-1}{k}, \quad (14)$$

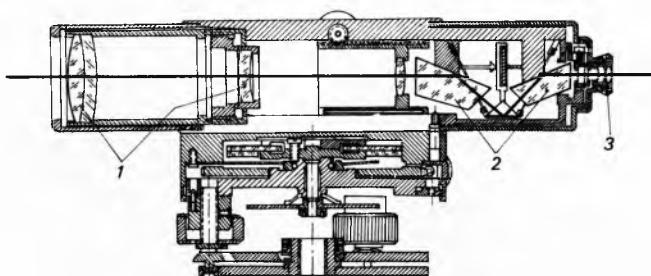
čime je određen položaj kompenzatora. Faktori kompenzacije, a time i položaj kompenzatora, mogu biti različiti.

Prema položaju kompenzatora postoje različite konstrukcije nivelića.

**Kompenzator između nitnog križa i leća objektiva durbina** (npr. Ni1 i Ni2, Optron; Koni 007 i Koni 025, Zeiss, Jena; NiB3, MOM; Na2, Wild). Vizurna linija odgovara položaju zrake  $L_1$  (sl. 45b) s okretnom točkom pri nagibu durbina  $O_1$ .

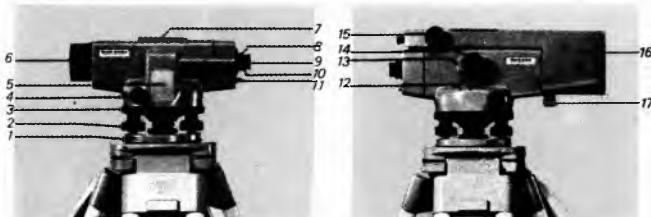
## GEODETSKI INSTRUMENTI

Jedan od prvih nivela s optičkim kompenzatorom bio je Ni2, Opton. Optika kompenzatora sastoji se od tri prizme, od kojih su dvije vanjske čvrsto povezane s tijelom durbina, a srednja pravokutna prizma je kompenzacijski element (sl. 46) koji je ovješen na četiri tanka žice od vrlo otpornog materijala. Za prigušenje njihaja služi zrak u prigušnoj komori u obliku valjka.

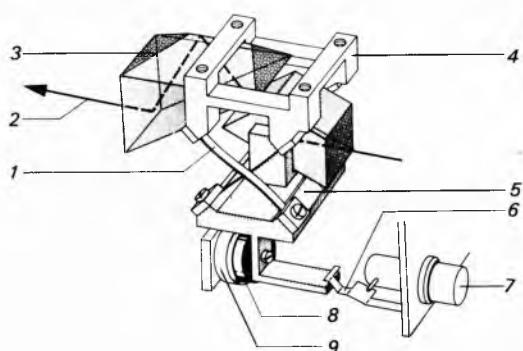


Sl. 46. Presjek nivela Ni2 s kompenzatorom. 1 objektiv durbina, 2 sustav prizama s kompenzatorom, 3 okular

Područje pomaka prizme ograničeno je graničnicima tako da područje kompenzacije iznosi  $\pm 15'$ . Čitav pomični sustav ima masu 20g, što znači da je svaka nit opterećena sa 5g, a može izdržati opterećenje od 2kg. Zbog tako visoke sigurnosti nije potreban uređaj za aretiranje. Okularna prizma načinjena je kao krovna prizma, te čitav optički sustav kompenzatora djeluje kao preokretni sustav, pa durbin daje uspravnu sliku (terestrički durbin). Kad se os durbina nagne za kut  $\alpha$ , hipotenuzna ploha nagnje se za  $3\alpha$ , a kako ta ploha djeluje optički kao ravno zrcalo, ukupni je otklon zrake na kompenzatoru  $6\alpha$ . Faktor kompenzacije prema tome iznosi 6.



Sl. 47. Nivelir s automatskim horizontiranjem NaK2 (s horizontalnim krugom). 1 temeljna ploča, 2 podnoći vijak, 3 prsten za okretanje horizontalnog kruga, 4 vijak za zakretanje gornjeg dijela, 5 prozorič za rasvjetu horizontalnog kruga, 6 cijev objektiva, 7 letvica za grubo viziranje, 8 prsten okulara, 9 okular durbina, 10 okular mikroskopa, 11 dugme za kontrolu funkcije kompenzatora, 12 dozna libela, 13 prizma dozne libele, 14 dugme za izoštravanje, 15 dugme optičkog mikrometra, 16 kućište optičkog mikrometra s planparalelnim pločama (dodatak durbinu), 17 vijak za pričvršćenje mikrometra

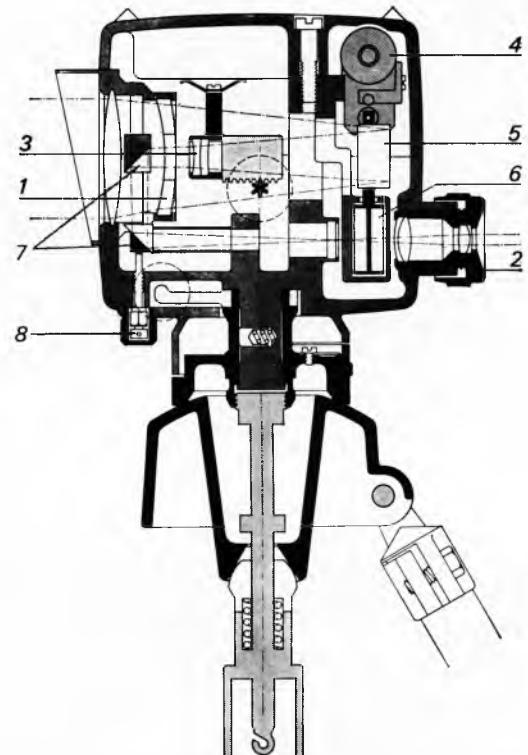


Sl. 48. Kompenzator NA-2. 1 elastične vrpce kompenzatora, 2 zraka svjetlosti, 3 krovna prizma, 4 okvir za pričvršćenje, 5 tijelo njihala s prizmom, 6 opruga, 7 dugme za kontrolu funkcije kompenzatora, 8 čep prigušne komore, 9 prigušna komora

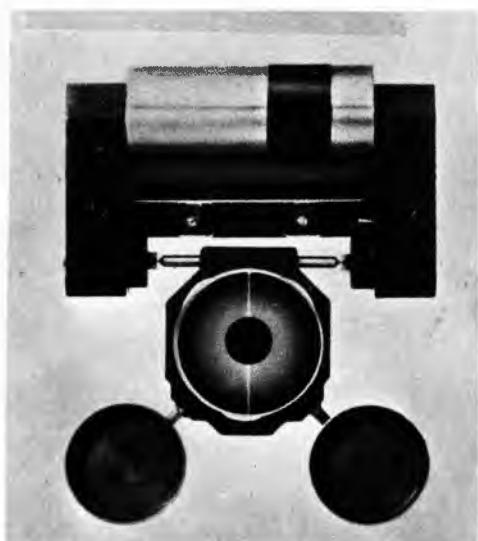
Sl. 47 prikazuje niveler s automatskim horizontiranjem NAK-2, Wild, a sl. 48 shematski prikaz njegova kompenzatora



Sl. 49. Nivelir GK 1-A



Sl. 50. Shematski presjek nivela GK 1-A. 1 objektiv (konvergentni dio), 2 okular, 3 objektiv (divergentni dio), 4 magnetski ležaj, 5 krovna prizma, 6 prigušna komora, 7 pravokutne prizme, 8 korekcijski vijak nultog položaja



Sl. 51. Kompenzator GK 1-A

( $k = 6$ ). Tijelo njihala povezano je sa čvrstim okvirom pomocu prekriženih elastičnih vrpca. Područje je kompenzacije  $\pm 15'$ , a točnost horizontiranja  $\pm 0,3''$ .

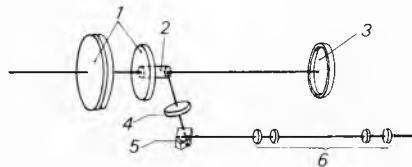
Nivelir KONI 007 (Zeiss) ima analognu optičku shemu kao i optički visak PZL (sl. 37), ali se ispred objektiva nalazi pentagonalna prizma za projiciranje presjecišta nitnog križa u horizontalnu ravninu. Kompenzator je pravokutna prizma, a duljina njihala jednaka je polovici žarišne duljine objektiva. Faktor kompenzacije  $k = 2$ . Područje kompenzacije iznosi  $\pm 10'$ , a srednja pogreška horizontiranja  $\pm 0,2''$ . Funkciju optičkog mikrometra ima pentagonalna prizma uz zakretanje oko njene horizontalne osi.

*Kompenzator između leća objektiva.* Kompenzacijski element nalazi se između pozitivnog i negativnog člana objektiva (npr. Na, Franke; Autom, Breithaupt; GK1-A, Kern). Vizurna linija odgovara položaju zrake  $L_3$  (sl. 45) s okretnom točkom  $O_3$ .

Na sl. 49 prikazan je nivalir GK1-A, Kern, mase 1,6kg. Kompenzator je njihalo s krovnom prizmom (sl. 50 i 51).

Težište njihala udaljeno je svega 13mm od osi rotacije, pa su upotrijebljeni magnetski ležajevi kako bi se utjecaj trenja sveo na minimum. Njihalo je građeno simetrično s pneumatskim prigušenjem njihaja pomoću dviju prigušnih komora. Faktor kompenzacije jest 2, a područje kompenzacije  $\pm 10'$ . Točnost horizontiranja iznosi  $\pm 0,5'' \dots \pm 1,5''$ .

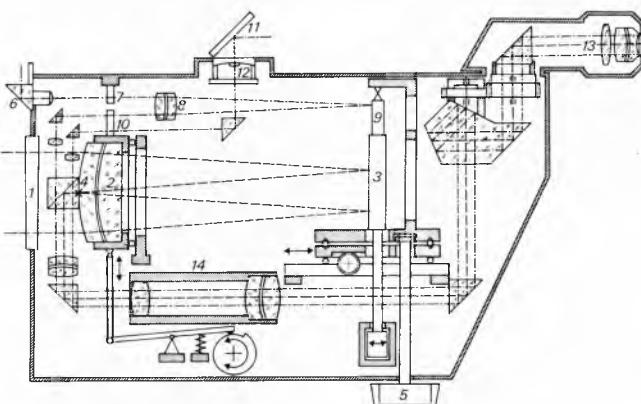
*Kompenzator kao uredaj za izoštravanje.* Kompenzacijski element je ravno zrcalo (sl. 52) koje visi o dvije tanke niti, a i koje se translatira prilikom izoštravanja slike. Faktor kompenzacije jest 2. Durbin je slomljen (npr. Ni V i Ni VI, Miller; Al-2 i Al-3, Sokkisha, Tokio; Ni002, Zeiss-Jena). Pri pomaku kompenzatora prilikom izoštravanja ostaje njegova udaljenost od objektiva jednaka udaljenosti od nitnog križa.



Sl. 52. Ravno zrcalo kao kompenzator i elementi za izoštravanje slike. 1 objektiv, 2 centralna prizma, 3 kompenzator, 4 pločica s nitnim križem, 5 pentagonalna prizma, 6 okular

Vizurna linija odgovara položaju zrake  $L_2$  (sl. 45) s okretnom točkom  $O_2$ .

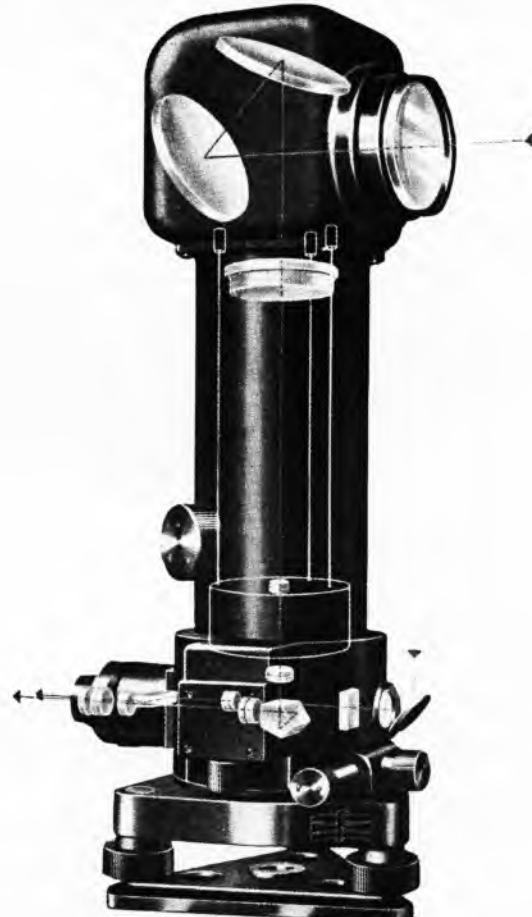
Precizni nivalir visoke točnosti Ni002, Zeiss-Jena, ima optički sustav turbina naročite konstrukcije radi dobivanja što stabilnije vizurne linije (sl. 53). Iza zaštitnog stakla u obliku klina 1 (rotacija tog klina omogućuje rektificiranje položaja vizurne linije analognim ispitivanjem kao i u nivalirima s libelama) nalazi se objektiv 2, a njihalo se s ravnim zrcalom, tj. kompen-



Sl. 53. Optička shema preciznog nivalira visoke točnosti Ni002. 1 zaštitno staklo (klin), 2 objektiv, 3 kompenzator, 4 nitni križ, 5 dugme, 6 prizma, 7 indeks mikrometra, 8 leće, 9 zrcala na njihalu, 10 mikrometrička skala, 11 zrcalce, 12 dozna libela, 13 okular, 14 kolimator

zatorom 3 nalazi na udaljenosti  $f/2$  od objektiva. Nitni križ 4 urezan je na ravnoj plohi pravokutne prizme koja se nalazi neposredno uz objektiv tako da bilo kakve promjene položaja ovog dijela instrumenta jednako utječu na objektiv i nitni križ, čime je postignuta stabilizacija vizurne linije. Čitav optički uređaj s prizmama i telesustavom 14 služi samo za preslikavanje ravnine nitnog križa 4 u ravninu slike ispred okulara 13 koji djeluje kao lupa. Pomoću dugmeta 5 može se zrcalo zakrenuti za  $180^\circ$ , pa se mjerjenjem u tva dva položaja u znatnoj mjeri eliminira pogreška položaja vizurne linije, što omogućuje točna mjerjenja i na nejednakim udaljenostima mjernih letava od instrumenta. Pomoću prizme 6 osvjetljava se indeks mikrometra 7 koji se pomoću optičkog sustava 8 i zrcala na njihalu 9 preslikava na mikrometričku skalu 10. Ta se skala i mjeđusobno dozne libele 12 rasvijetljene zrcalcem 11 zajedno s nitnim križem i slikom mjerne letve preslikavaju u zajedničku ravninu slike ispred okulara 13. Područje kompenzacije iznosi  $\pm 10'$  sa srednjom pogreškom  $\pm 0,05''$ .

*Nitni križ kao kompenzator.* Kompenzacijski element je nitni križ turbina koji nije obješen o metalne niti. Faktor kompenzacije  $k = 1$ . U preciznom nivaliru visoke točnosti (5190-Filotecnica Salmoiraghi, sl. 54) pločica s nitnim križem ovješena



Sl. 54. Nivalir s automatskim horizontiranjem 5190

je sa tri niti. Pri nagibu turbina pomiče se nitni križ, a kako je glavna točka objektiva okretna točka, to vizurna os zadržava vertikalni smjer. Pomoću kutnog zrcala s kutom od  $45^\circ$  vizurna os se otalanja u horizontalan smjer. Kako bi translacija nitnog križa odgovarala pomaku slike letve u ravnini slike pri nagibu turbina, mora biti zadovoljen uvjet jednakosti duljine njihala i žarišne duljine objektiva. Prigušenje njihaja je pneumatičko. Za promatranje nitnog križa umjesto običnog okulara služi mikroskop. Objektiv mikroskopa preslikava nitni križ zajedno sa slikom mjerne letve u ravninu staklene pločice na kojoj su nešto deblje gravirani parovi crtica, koji označuju područje kompen-

## GEODETSKI INSTRUMENTI

zacijs u iznosu  $4' \dots 5'$ . Srednja pogreška horizontiranja iznosi  $\pm 0,2''$ . Kao optički mikrometar djeluje kutno zrcalo ispred objektiva s translacijom u smjeru vertikale. Mikrometrička skala preslikana je posebnim optičkim sustavom u vidno polje okularnog mikroskopa.

**Objektiv durbina kao kompenzator.** Kompenzacijski element je objektiv koji nije na metalnim nitima. Faktor kompenzacije  $k = 1$  (npr. 5172-Filotechnica Salmoiraghii).

**Kompenzator ispred objektiva durbina.** Različiti optički elementi kao kompenzatori mogu se nalaziti i ispred objektiva durbina (npr. NŠM-2A, SSSR, ispred objektiva nalazi se leća; NiE1, MOM, pravokutna prizma). Jednostavni niveli NiE1 ima masu svega 0,5kg i povećanje durbina  $6,25 \times$ . U durbin se gleda odozgo.

Kompenzatori se izrađuju i kao dodaci ispred objektiva durbina. Ovim kompenzacijskim dodatkom može se u svakom niveleru s libelama postići automatsko horizontiranje.

Niveler s kompenzatorom mora ispuniti osnovni uvjet da u području kompenzacije vizurna linija bude u horizontalnoj ravnini. Rektifikacija se izvodi jednak i u niveleru s libelama — nivelliranjem iz sredine i s kraja. Justira se specijalnim vijcima za pomak nitnog križa, odnosno prizme, ili se direktno utječe na položaj njihala. U nekim preciznim nivelerima za tu se svrhu zakreće zaštitno staklo ispred objektiva koje je izvedeno u obliku klinova. Zbog nesavršenosti funkcije kompenzatora pojavit će se, i nakon ispravne rektifikacije, pogreška u položaju vizurne linije zbog tzv. histereze kompenzatora (kompenzator se nakon otklona ne vraća u ishodišni položaj) ili pogreške kompenzacije. Utjecaj ove pogreške može se svesti na minimum, ako se pri preciznim mjerjenjima niveler što točnije horizontira pomoću dozne libele i ako se odabere pogodan način mjerjenja visinske razlike. To se, npr., može postići slijedećim postupkom: vrhunuti doznu libelu pri usmjerenu durbina na zadnju letvu, očitati obje letve, zatim vrhunuti doznu libelu pri usmjerenu durbina na prednju letvu i očitati obje letve; izračunavanjem aritmetičke sredine tih mjerena pogreška se u znatnoj mjeri eliminira.

Pogreška u položaju glavne osi može utjecati na točnost mjerjenja sa svakim nivelerom. Pogreška visinske razlike kad se mjeri nivelirom s libelama bit će uzrokovana ekscentričnošću horizontalne okretnice s obzirom na glavnu os (tzv. pomak horizonta pri zakretanju durbina oko glavne osi), a kad se mjeri nivelirom s kompenzatorom pogreška je posljedica ekscentričnosti položaja okretnice vizurne linije. Nakon okreta durbina za  $180^\circ$  pri očitavanju zadnje i prednje letve pogreška visinske razlike iznosić će  $\Delta h = 2 e \sin v$ , gdje je  $e$  iznos ekscentričnosti, a  $v$  kutno odstupanje glavne osi od smjera vertikale.

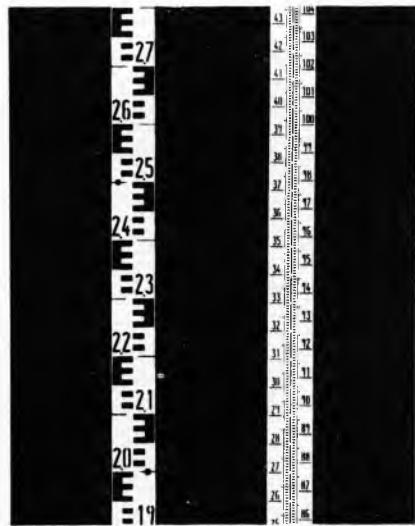
**Dodaci niveleri.** Optički mikrometar često je sastavni dio niveleri, ali se izrađuje i kao dodatak (16 na sl. 47) radi točnijih očitanja mjerne letve. Najviše se primjenjuje planparalelna ploča ispred objektiva s mogućnosti zakretanja oko horizontalno položene osi. Mjerno područje iznosi 5 ili 10mm, a skala mikrometra ima najčešće 100 dijelova. Radi što točnijeg mikrometričkog mjerjenja nitni križ niveler izveden je u obliku klinova (sl. 58).

Niveleri imaju često dodatke kao i teodolit, npr. prizmu objektiva, autokolimacijski okular, predleće i sl.

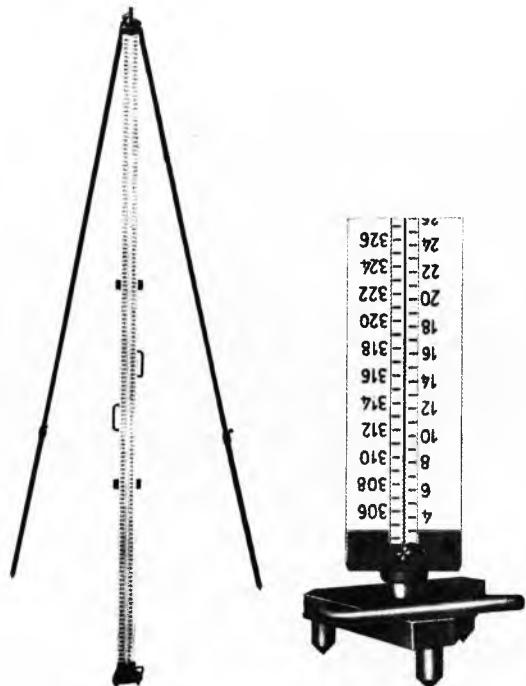
**Laserski niveleri** imaju laserski snop. Neki automatski niveleri imaju u priboru laserske okulare (npr. NA2, Wild), pa se zamjenom standardnog okulara dobiva horizontalan laserski snop. Zakretanjem durbina oko glavne osi dobiva se referentna horizontalna ravnina za prijenos visinskih razlika od stajališne točke.

Niveleri kao najvažniji instrumenti za mjerjenja visinskih razlika u stalnom su razvoju, ne samo s obzirom na automatizaciju mernog procesa primjenom kompenzatora (što je omogućilo i primjenu tzv. motoriziranog nivelmana s nivelerom u terenskom automobilu uz prijenos mernih letava pomoću motorkotača) i laserskog snopa već i s obzirom na automatizaciju cijelog mernog procesa i radova u cjelini. Za tu svrhu navedene su mjerne letve prilagođene za emisiju i prijam optičkih signala fotočelijom s mogućnošću digitalnog očitavanja letve, odnosno visinske razlike i automatske registracije podataka.

**Mjerne letve niveleri** jesu jednostavne nivelmane letve (sl. 55) duljine 3 ili 4m i širine 8...10cm s nanjetom podjelom. Na donjem dijelu, u nultoj točki podjele, nalazi se čelična ravna zaštitna ploča, postavljena okomito na plohu s podjelom. S obje strane letve na visini  $\sim 1,25$ m postavljeni su držači letve. Letve se izrađuju kao krute iz jednog dijela, ili za sklapanje radi lakšeg prijenosa.



Sl. 55. Jednostavna (lijevo) i precizna (desno) nivelmanска letva s polumentimetarskom podjelom



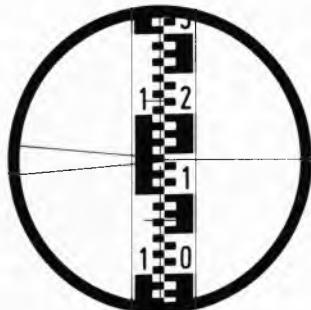
Sl. 56. Precizna nivelmanска letva s centimetarskom podjelom (Wild) u mernom postavu; desno: povećani donji dio

**Specijalne precizne letve** (sl. 56) duljine 3m primjenjuju se za precizni nivelman. Sastavljene su od drvene ili metalne podloge s upetom vrpcom od invara, vrlo malog koeficijenta rastezanja. Široke su  $\sim 25$ mm a na njima su nanijete crte podjele s intervalima od 5 ili 10mm. Invarska vrpca učvršćena je u donjem dijelu, a na gornjem upeta preko opruge.

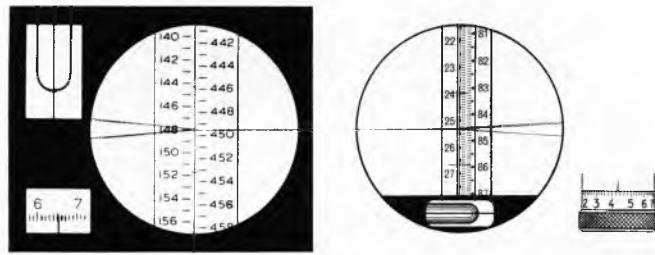
Srednja pogreška na letvi iznosi  $\pm 0,01$  mm po metru. Brojne podjele nalaze se na drvenoj ili metalnoj podlozi, a nulta točka podjele u ravnini podnožne ploče. Zbog kontrole mjerjenja na letvi su dvije podjele — glavna i kontrolna — jedna s obzirom na drugu pomaknute za iznos koji se naziva *konstanta letve*.

Za postavljanje letve u vertikalni položaj služe dozne libele osjetljivosti  $5' \dots 20'$  (sl. 5).

Na sl. 57 i 58 prikazani su primjeri očitanja mjernih letava.



Sl. 57. Očitanje jednostavne letve:  
1143 mm



Letva s centimetarskom podjelom (Wild), očitanje: 148,652 cm

Letva s polucentimetarskom podjelom (Kern), očitanje:  $253,430 = 1,26715 \text{ m}$

Sl. 58. Očitanje preciznih letava pomoću optičkog mikrometra

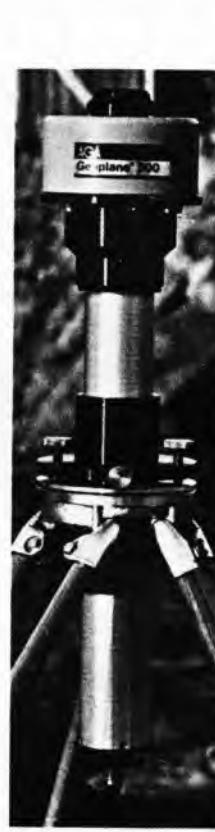
**Vrste nивелира према тачности.** Тачност нивелира оцjenjuje се средњом погрешком висинске разлике на 1 km udaljenosti при dvostrukom niveliranju (напријед и natrag). Prema iznosu погрешке, niveliри су врстани у четири групе: a) precizni niveliри visoke točnosti, средња погрешка  $m \leq \pm 0,5 \text{ mm}$ , npr. Ni002, Zeiss-Jena (sl. 53); 5190, Filotechnica Salmoiraghi (sl. 54); N3, Wild; Ni-A1, MOM; Ni1, Opton; N1, SSSR; 55, Sokkisha; b) precizni niveliiri, средња погрешка  $m \leq \pm 2 \text{ mm}$ , npr. NA 2, Wild (sl. 47); Ni2, Opton (sl. 46); Ni007, Zeiss-Jena; GK 23, Kern; c) niveliiri srednje točnosti, средња погрешка  $m \leq \pm 6 \text{ mm}$ , npr. GK1, Kern (sl. 43, 49 i 50); Ni V, Miller; N10, Wild (sl. 42); d) обични или једноставни niveliiri, средња погрешка  $m \leq \pm 20 \text{ mm}$ , npr. Ni E1, MOM; Ni VI, Miller; NS4, SSSR; GKO, Kern; NK 01, Wild.

**Instrumenti s rotirajućom laserskom zrakom** djelomično spadaju u niveliere, jer pomoću laserske zrake ostvaruju horizontalnu referentnu ravninu. Međutim, većina konstrukcija omogućuje nagib referentne ravnine za određen kut, što dopušta svestraniju primjenu (npr. Geoplane 300, AGA; Laserplane-Rotelite, Spectra-Physics). U Geoplane 300 ugrađen je helijsko-neonski laser snage 1 mW. Glava instrumenta rotira oko vertikalne osi sa  $\sim 10$  okretaja u sekundi. Na dijametalnim stranama glave nalaze se dva otvora za propuštanje dviju polariziranih laserskih zraka tako da je jedna laserska zraka otklonjena za mali elevacijski kut, a druga za jednak depresijski kut s obzirom na referentnu ravninu. Kut je izabran tako da su intenziteti svjetlosti jednak u ravnini simetrije, tj. referentnoj ravnini. Ako se gleda prema instrumentu, vidjet će se niz svjetlosnih impulsa različitog intenziteta kad je oko izvan ravnine simetrije. U ravnini oko prima impulse obaju dijametalnih snopova, tj. 20 impulsu u sekundi, koje više ne može razdvajati. To znači da se pomicanjem oka u smjeru vertikale može naći položaj referentne ravnine. Kako bi se olakšalo određivanje točaka i povećala točnost indikacije, upotrebljava se pomoćni pribor za vizuelno ili fotoelektrično primanje svjetlosnih signala. Za vizuelno promatranje služi staklena pločica na nosaču postavljenom na vertikalnu letvu, od koje oko pri promatranju impulsa mora biti udaljeno  $30 \dots 50 \text{ cm}$ . Fotoelektrični detektor sastoji se od dva

dijela: prijamnika s fotočelijom i jedinice s instrumentima koja sadrži bateriju i indikator. Prijamnik se pomiče (npr. po mjernoj letvi) sve dok kazaljka indikatora ne bude na nuli. Prijamnik ima dvije fotodiode. Svaka dioda prima odgovarajuće polarizirano svjetlo. Nalazi li se visinski indeks izvan referentne ravnine, to će kazaljka pokazati otklon (pozitivan ili negativan, već prema tome koja fotodioda prima svjetlost). Unutar vrlo uskog područja ( $2 \text{ mm} / 60 \text{ m}$ ) obje fotodiode su jednako osvijetljene, te se kazaljka indikatora postavlja u nulto područje (između pozitivnog i negativnog), što znači da je indeks u referentnoj ravnini. Indikator se može odvojiti od prijamnika i držati u ruci, a s prijamnikom je spojen pomoću kabela.

Geoplane 300 postavlja se za mjerjenja na stativu sa specijalnom glavom (sl. 59). Izvor energije je baterija napona 12V. U donjem dijelu cijevi nalaze se električni dijelovi i laser, a u gornjem motor i stabilizator brzine okretanja. Aluminijска cijev ima podjelu u centimetrima, pa se može podešavati visina referentne ravnine. Horizontiranje je automatsko, s područjem kompenzacije  $\pm 0,2^\circ$ . Brzina rotacije može se regulirati. Pri jačoj rasvjeti i velikim dužinama ona se mora smanjiti.

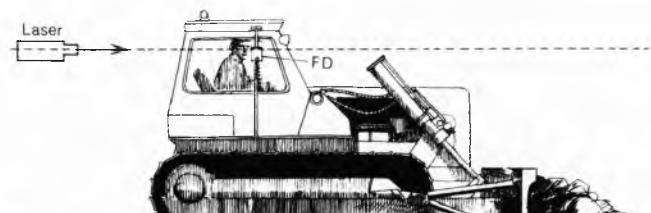
Ravninu simetrije moguće je nagnuti za određeni kut. Mjeriti se može istodobno u svim točkama referentne ravnine. Točnost



Sl. 59. Geoplane 300 AGA



Sl. 61. Mjerni sustav prečizne hidrostatske vage s indikatorom



Sl. 60. Vođenje stroja pomoću rotirajuće laserske zrake i fotoelektričnog detektora FD

mjerenja iznosi  $\pm 2\text{ mm}$  unutar polumjera od  $60\text{ m}$ , odnosno  $\pm 2\text{ cm}$  na dužinama s duljinom do  $250\text{ m}$ . Instrument je težak  $8\text{ kg}$ .

Detektor se može upotrijebiti i za kontrolu vođenja pokretnog stroja (sl. 60).

### Trigonometrijsko mjerjenje visinskih razlika

Visinska razlika  $\Delta h$  određuje se mjeranjem vertikalnog kuta pomoću teodolita i poznate ili izmjerene horizontalne udaljenosti točaka  $d$

$$\Delta h = d \tan \varphi = d \cot z \quad (15)$$

gdje je  $\varphi$  visinski kut,  $z$  zenitni kut.

Pri većim udaljenostima treba uzeti u obzir utjecaj zakrivljenosti Zemlje i vertikalne komponente terestričke refrakcije.

**Hidrostatski nivelman.** Osnovni je instrument za mjerjenje visinskih razlika u hidrostatskom nivelmanu *hidrostatska vaga*. Njena funkcija osniva se na zakonitosti spojenih posuda u kojima mirna površina tekućine formira razinsku plohu (tangenta u svakoj točki plohe okomita je na vertikalu), a koja se za manje razmake točaka može aproksimirati horizontalnom ravninom.

Hidrostatska vaga sastoji se od dvije staklene posudice u obliku valjka na kojima se nalazi podjela u milimetrima. Posudice su povezane krtom ili savitljivom cijevi.

Hidrostatska vaga prema Meissseru (Freiberger Präzisionsmechanik) (sl. 61) sastavljena je od dva mjerna staklena valjka unutrašnjeg promjera  $42\text{ mm}$ . Mjerno područje iznosi  $100\text{ mm}$  s intervalima na bubnju mikrometra od  $0,01\text{ mm}$ . Savitljiva cijev duga je  $30\text{ m}$ . Mjerni sustavi ovjese se na repere s poliranom sfernom plohom. Nakon smirenja površine tekućine pomiče se mjerno vreteno sve dok njegov vršak ne dotakne površinu. Na oba mjerna sustava očitava se istodobno, uz višestruko ponavljanje, visinska razlika točaka objesista i površine tekućine. Doticanje površine tekućine ne promatra se vizuelno, već pomoću indikatora optičkim signalom svjetlosne cijevi.

Na objema mjernim točkama očitavaju se termometri radi temperaturne korekcije visinske razlike. Temperaturne razlike bitno utječu na točnost mjerjenja.

U novije vrijeme razvijeni su za hidrostatski nivelman stacionarni sustav i sustavi za daljinsko očitavanje. Stacionarni se sustavi ugrađuju u objekte koji se moraju stalno kontrolirati (npr. ispitivanje deformacija brana). Cijevi su od nerđajućeg materijala. Automatizirani sustavi imaju spojne cijevi od materijala koji podnosi visok tlak, a pune se životom. Podaci mjerjenja mogu se digitalno očitavati ili se automatski registriraju. Uredajima za hidrostatski nivelman s daljinskim očitavanjem mogu se dobiti informacije o ponašanju onih točaka objekta koje su drugim metodama mjerena nedokučive. Takvi uređaji posebno su korisni za ispitivanje slijeganja visokih objekata od nasutog materijala. Izrađuju se kao stacionarni i prijenosni sustavi (npr. stacionarni uređaj Beckera radi s točnošću  $\pm 0,01 \dots \pm 0,1\text{ mm}$ ; prijenosni uređaj TIVAG ima točnost  $\pm 1 \dots \pm 2\text{ cm}$ ).

**Barometrijsko mjerjenje visinskih razlika.** Tlak zraka smanjuje se što je nadmorska visina veća (približno linearna ovisnost). Međutim, tlak zraka ovisan je i o temperaturi zraka, vlazi i geografskoj širini. Barometrijsko mjerjenje visinskih razlika zasnovano je prema tome na mjerenu tlaka zraka; upotrebljavaju se različite konstrukcije barometara. Ta je metoda mjerjenja manje točna od metoda geometrijskog i trigonometrijskog nivelmana. S preciznim barometrima mogu se postići točnosti  $\pm 0,3 \dots \pm 0,8\text{ m}$ .

### INSTRUMENTI ZA MJERENJE DULJINA

Mjerjenje duljina spada u najznačajnije područje geodetskih mjerjenja i ono uz mjerjenje kutova i visinskih razlika obuhvaća najviše mjerjenja. Potreba mjerjenja udaljenosti točaka u vrlo širokom rasponu, od vrlo kratkih duljina sve do duljina od sto i više stotina kilometara, često i s vrlo visokom točnošću, uvjetovala je razvoj ne samo različitih metoda mjerjenja već i vrlo mnogo raznovrsnih instrumenata i uređaja. U geodetskim

mjerjenjima duljina primjenjuju se mehaničko, optičko i elektročičko mjerjenje.

**Mehaničko mjerjenje duljina** provodi se neposrednim nizanjem mjernih letava ili vrpca u smjeru mjerene duljine. Letve su drvene, duge 3 ili 5m. Čelične vrpce duge su 10, 20, 25, 30 ili 50m, a izuzetno i 100m. Upotrebljavaju se invarske vrpce, duljine 6 ili 12m, i invarske žice, duljine 25 i 50m. Ove se pri mjerenu zatežu silom  $10\text{ kp}$  ( $\sim 100\text{ N}$ ).

U mehaničkom mjerenu duljina pojavljuju se problemi zbog reljefnosti terena, zaraštenosti, močvarnih površina, vodotoka i prometnica. Konstrukcijom instrumenata (daljinomjera) za mjerjenje duljina pomoću optičkih (optički daljinomjeri) ili elektroničkih elemenata (elektronički daljinomjeri) omogućeno je mjerjenje duljina i u uvjetima kad je mehaničko mjerjenje neizvedivo ili bi zahtijevalo postavljanje vrlo složenih geodetskih mreža (v. *Daljinomjeri*, TE3, str. 163).

**Optički daljinomjeri** upotrebljavaju se za mjerjenja malih duljina ( $150 \dots 200\text{ m}$ ). Samo posebne konstrukcije omogućuju direktna geodetska mjerjenja i duljina do  $1000\text{ m}$ .

**Elektroničkim daljinomjerima** mogu se direktno izmjeriti duljine i do  $100\text{ km}$ , a pomoću radio-valova (radar) i više stotina km. Primjenom elektroničkih daljinomjera omogućena je i automatska registracija podataka pri izmjeri, što je važno za automatizaciju geodetskih radova.

**Geodetski daljinomjeri** prema dosegu mjerjenja mogu se svrstati u sljedeće grupe:

**Daljinomjeri za vrlo veliki doseg** (veći od  $100\text{ km}$ ). Takvi su impulsni elektronički daljinomjeri (SHORAN, HIRAN), koji se primjenjuju za izmjeru geodetskih mreža na velikim prostranstvima, za tzv. interkontinentalne geodetske mreže.

**Daljinomjeri za veliki doseg** (veći od  $10\text{ km}$ ). Upotrebljavaju se za mjerjenja stranica u trigonometričkim mrežama I i II reda. Takvi su instrumenti: mikrovalni daljinomjeri (npr. Telurometar, modeli MRA-X; Distomat DI 50 i DI 60, Wild), elektro-optički daljinomjeri (npr. Geodimetar 2-AGA; EOD-1M, SSSR; daljinomjer s laserom: Geodimetar 6BL-8, AGA; Kvarc, SSSR; Geodolit 3G, Spectra-Physics).

**Daljinomjeri za srednji doseg** ( $1 \dots 10\text{ km}$ ). Primjenjuju se za mjerjenje stranica u trigonometričkim mrežama III i IV reda. Takvi su npr. Geodimetar 4B i 6B, AGA; Laser-Ranger, Laser Systems and Electronics; SVV-1, SSSR; EOS, Zeiss-Jena.

**Daljinomjeri kratkog doseg** ( $1 \dots 2\text{ km}$ ). Upotrebljavaju se za mjerjenje stranica u trigonometričkim mrežama (dopunske mreže), poligonometriji, mjerjenja duljina u geodetskoj izmjeri, u radovima inženjerske geodezije itd. Posljednjih desetak godina konstruirani su brojni praktični elektrooptički daljinomjeri kratkog doseg (npr. Telurometar MA 100; Cubitape DM-60, Cubic Corporation; DM 1000 i DM 2000, Kern; Mekometar ME 3000, Kern; DI-10, Wild). Posebno značenje u tom području mjer ног doseg a imaju elektronički daljinomerni uređaji koji su ili dodatak, ili sastavni dio teodolita. Ovi se instrumenti nazivaju **elektronički tahimetri**, a primjenjuju se u tahimetrijskim snimanjima većeg doseg, u tzv. *elektroničkoj tahimetriji*.

**Daljinomjeri vrlo kratkog doseg** ( $100 \dots 200\text{ m}$ ). To su optički daljinomjeri koji se upotrebljavaju za geodetska mjerjenja. U tom području doseg može se primjeniti i mehaničko mjerjenje duljina vrpčama.

Svi se daljinomjeri ili daljinomerni uređaji ne mogu strogo svrstati u pojedine grupe, ali je njihova primjena u određenom području duljina, s obzirom na njihovu konstrukciju i masu, u najviše slučajeva najsvršishodnija. Tako se npr. daljinomjerima velikog doseg mogu mjeriti i vrlo male duljine, no takvo je mjerjenje neekonomično.

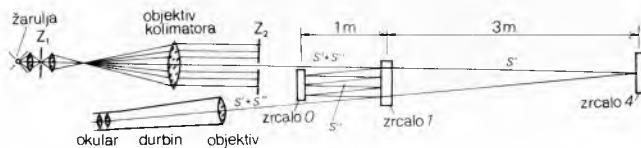
**Elektrooptički daljinomjeri.** Elektrooptički daljinomjeri rade s emisijom elektromagnetskih valova u području vidljivog spektra za mjerjenje srednjih i malih duljina. Takvi daljinomjeri imaju izvjesne prednosti pred daljinomjerima s emisijom elektromagnetskih valova mikrovalnog područja. Te su prednosti: a) elektro-optički daljinomjeri emitiraju uske snopove koji se šire uzduž mjerene dužine. Put valova, mjereni modularnim valovima, sa zadovoljavajućom točnošću reproducira stvarnu duljinu. Npr.

otvor emitiranog snopa elektrooptičkog daljinomjera DI 10 iznosi  $\sim 15'$ , a mikrovalnog daljinomjera modela telurometra  $10^\circ$  do  $12^\circ$ . Prednost je uskih snopova, što na točnost mjerena znatno manje utječe oblik terena (štetne refleksije i lažni povratni signali). b) Elektrooptički daljinomjeri primaju povratni signal pomoću relativno jednostavnih reflektora (prizma, sustav prizama) postavljenih u krajnjoj točki mjerene dužine, koji su lako prenosivi i njihova je upotreba jednostavna. Kad se, međutim, mjeri mikrovalnim daljinomjerima, na točki cilja mora se postaviti sekundarna stanicu jednakih tehničkih karakteristika kao i primarna. c) Meteorološke prilike uzduž mjerene dužine utječu na točnost mjerena. Relativna vлага znatno manje utječe na točnost mjerena kad se radi s elektrooptičkim daljinomjerima.

Sve to potvrđuju i podaci o srednjim pogreškama dvaju tipova daljinomjera. Elektrooptički daljinomjer Geodimetar 8 i 6B, AGA, ima srednju pogrešku  $\pm (5\text{mm} + 10^{-6}D)$  za duljine  $D$  do 60km ( $D$  treba uvrstiti u milimetrima). Mikrovalni daljinomjeri Telurometar MRA-3 i MRA-301 imaju srednju pogrešku  $\pm (15\text{mm} + 3 \cdot 10^{-6}D)$ , a DJ-50, Wild,  $\pm (20\text{mm} + 10^{-5} \dots 10^{-6}D)$  za duljine do 50km.

Osnovni je nedostatak svjetlosnih daljinomjera znatan gubitak svjetlosti zbog apsorpcije u atmosferi kroz koju prolaze zrake, a isto tako i štetno djelovanje difuzne svjetlosti, što danju znatno smanjuje doseg. Taj se problem rješava u znatnoj mjeri upotrebom lasera, zbog izvanredne koherencnosti, usmjerenosti (npr. Geodimetar 8 ima promjer snopa 10cm na udaljenosti 1km) i intenzivnosti laserskog snopa. To omogućuje i primjenu filtra na prijamnom sustavu za eliminaciju difuzne svjetlosti.

**Interferencijski komparator.** Najtočnija mjerena duljina zasnovana su na primjeni pojave interferencije svjetlosti. Osnovna konstruktivna zamisao interferencijskog komparatora sastoji se u višestrukom prenošenju osnovne duljine od 1m primjenom odbijanja svjetlosti na ravnim zrcalima i interferencijom koherentnih snopova zraka svjetlosti. Na sl. 62 prikazano je učetverostručenje osnovne duljine od 1m.



Sl. 62. Shema interferencijskog komparatora

Zaslonom  $Z_1$  mijenja se otvor za snop zraka koje dolaze od izvora svjetlosti, a pomoću objektiva kolimata i zaslona  $Z_2$  dobiva se snop međusobno paralelnih zraka. Zrake  $s'$  i  $s''$  prelaze iste putove tako da se zraka  $s''$  višestruko reflektira na zrcalima 0 i 1. Ta zrcala imaju u srednjem dijelu pojas od 2cm koji nije pozrcaljen, kako bi se mogao odrediti njihov osnovni razmak pomoću posebnog etalona (kremenog štapa duljine 1m) posebnom interferencijskom metodom. Zrcala 1 i 4 imaju u središnjem pojasu dva kružna otvora promjera 2cm za prolaz zraka svjetlosti. Npr. zraka  $s'$  prolazi kroz lijevi otvor zrcala 1, odbija se na zrcalu 4 i na povratnom putu prolazi kroz desni otvor zrcala 1. U žarišnoj ravnini objektiva durbina snopovi zraka ( $s'$  i  $s''$ ) stvaraju vidljivu interferentnu sliku kad su jednaki optički putovi. Zrcala 1 i 4 potrebno je postaviti na  $n$  puta veći razmak s točnošću  $\sim 0,5\text{mm}$ , jer se optički put zraka može u tom intervalu mijenjati pomoću kompenzatora planparalelne ploče ispred objektiva durbina. Nakon postignute interferentne slike dobivena je osnovna duljina. Nakon toga zrcala 0 i 4 određuju novu osnovnu duljinu koja će se uvišestručiti postavljanjem zrcala 1 analognim postupkom.

Pomoću interferencijskog komparatora mogu se komparirati invarske žice duljine 24m s prijelazima 1-6-24. Na terenu su izmjerene duljine s ovim daljim prijelazima: 24-48-96-192-384-768, ili 24-72-144-288-576, 24-72-216-432-864m. Izmjerena baza u Finskoj (864m) određena je sa srednjom pogreškom od  $0,05 \dots \pm 0,08\text{ mm}$  (mjerena više godina).

### Mjerjenje duljine elektroničkim daljinomjerima

Mjerjenje duljine elektroničkim daljinomjerima osniva se na određivanju vremena koje je potrebno da elektromagnetski valovi dva puta (tamo i natrag) prijeđu mjerenu dužinu. Primopredajnik daljinomjera postavlja se u početnu točku dužine koja se mjeri, a retranslator u krajnju točku. Duljina se izračuna po formuli

$$D = \frac{1}{2}ct, \quad (16)$$

gdje je  $c$  brzina elektromagnetskih valova, a  $t$  vrijeme od emisije do prijema signala u primopredajniku. Brzina valova određuje se na temelju poznavanja brzine širenja valova u vakuumu  $c_0$  i srednjeg indeksa loma zraka  $n$ :

$$c = \frac{c_0}{n}. \quad (17)$$

Indeks loma zraka ovisi o meteorološkim prilikama (temperatura, tlak i vлага zraka). U praksi se svaki daljinomjer baždari na određenu brzinu  $c$ , tj. za određene meteorološke uvjete. Rezultati mjerena korigiraju se bilo promjenom mjerne konstante (frekvencije moduliranog vala), bilo korekcijom duljine. Neki daljinomjeri automatski korigiraju duljinu (npr. Mekometar ME 3000). Za korekciju duljine, pri mjerjenjima elektrooptičkim daljinomjerima kratkog dosegaa, dovoljno je mjeriti temperaturu na stajalištu instrumenta.

Prema načinu mjerena vremena postoje impulsni i fazni elektronički daljinomjeri.

U *impulsnim daljinomjerima* vrijeme od emisije do prijema signala  $t$  mjeri se neposredno. Točnost mjerena vremena zadovoljava samo kad se mjeri vrlo velike duljine.

U *faznim daljinomjerima* vrijeme od emisije do prijema signala određuje se posredno. Za mjerje duljine faznom metodom potreban je izvor harmoničkih oscilacija, koje se mogu prikazati funkcijom

$$y = a \cos(\omega t + \phi_0), \quad (18)$$

gdje je  $y$  elongacija,  $a$  amplituda signala,  $\phi_0$  početni fazni pomak (u momentu  $t = 0$ ),  $\omega$  kružna frekvencija

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}, \quad (19)$$

gdje je  $f$  frekvencija, a  $T$  perioda oscilacije (trajanje jednog titraja).

U trenutku  $t = T$  trenutna vrijednost signala jednaka je početnoj vrijednosti (u  $t = 0$ ), a ona se ponavlja periodički (u trenucima  $t = 2T, 3T \dots$ ). Pri širenju valova brzinom  $c$ , trajanju jedne oscilacije odgovara put jedne valne duljine  $\lambda = cT$ .

Za mjerje duljine potrebna su dva signala koji polaze od istog izvora oscilacija istodobno — jedan referentni izlazni signal i drugi koji prelazi mjerenu dužinu u oba smjera, a koji se naziva mjeri ili povratni signal. Usposređivanjem faznih pomaka tih signala u faznom indikatoru dobiva se razlika faznih pomaka, koja daje informaciju o mjerenoj dužini. Ukupno vrijeme za koje je signal prešao dužinu može se izraziti kao zbroj trajanja cijelih perioda ( $N \cdot T$ ) i dijela periode ( $\Delta N \cdot T$ ) koji se očituje kao fazna razlika referentnog i mjernog signala u faznom indikatoru. Ukupno je trajanje putovanja vala

$$t = (N + \Delta N)T, \quad (20)$$

gdje je  $N$  prirodni broj, a  $\Delta N$  vrijednost između 0 i 1. Uvrsti li se (20) u (16), dobiva se za mjerenu dužinu

$$D = (N + \Delta N) \frac{cT}{2}, \quad (21)$$

a ako se  $T$  zamijeni frekvencijom prema (19), odnosno produkt brzine  $c$  i vremena  $T$  zamijeni duljinom vala  $\lambda$ , dobiva se

$$D = (N + \Delta N) \frac{c}{2f} = (N + \Delta N) \frac{\lambda}{2}. \quad (22)$$

Polovina duljine vala ( $\lambda/2$ ) naziva se mjernom jedinicom, a ona

se može prikazati i pomoću brzine širenja valova u vakuumu  $c_0$

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{c_0}{2nf}, \quad (23)$$

gdje je  $n$  indeks loma zraka.

Mjerna jedinica ovisi o atmosferskim prilikama (veličina  $n$ ) i frekvenciji oscilatora (osnovna karakteristika daljinomjera). Da se dobije mjerna jedinica pogodna za mjerjenja, potrebno je osnovni elektromagnetski val koji prelazi dužinu (tzv. prijenosni val) modulirati, tj. narinuti mu periodičku promjenu karakterističnog parametra, amplitudu, frekvencije ili početne faze. Najviše se primjenjuje amplitudna modulacija, što za svjetlosne daljinomjere znači periodičku promjenu intenziteta svjetlosti. Mjerna jedinica moduliranog vala, prema tome, postaje mjerna veličina slična vrpcu kojom se mjeri duljina. Kako se faznim uređajem mjeri fazna razlika referentnog i mjernog signala, koja se može direktno izraziti i kao dio mjerne jedinice, tj.

$\Delta N \frac{\lambda}{2}$ , to ostaje kao nepoznanica veličina  $N$ , tj. broj cijelih mjernih jedinica u mjerenoj dulžini. Tehnička su rješenja: primjena različitih stalnih frekvencija, kontinuirana promjena frekvencije u određenom intervalu. Frekvencija kojom se određuju najmanji dijelovi mjerene dulžine, o kojoj time ovisi i točnost mjerjenja, naziva se *osnovna mjerena frekvencija*. Osnovne mjerne frekvencije obično iznose 10...75 MHz, što odgovara mernim jedinicama 15...2 m. Te frekvencije mogu biti i znatno veće (npr. Mekometar ME3000 ima osnovnu mjeru frekvenciju 500 MHz i mernu jedinicu 30 cm), odnosno znatno manje (npr. Akkuranger MK 1, 0,5 MHz i mernu jedinicu 300 m). Ako instrument ima samo jednu mernu frekvenciju, on može jednoznačno odrediti duljinu samo unutar mjerne jedinice (npr. Akkuranger MK 1).

Zbog spomenutih prednosti, posljednjih godina naročito su se razvili elektrooptički daljinomjeri, a danas je njihova upotreba u geodetskim mjerjenjima vrlo velika.

Osnovni su dijelovi elektrooptičkih daljinomjera: a) izvor svjetlosti (žarulja, laser, svijetleća dioda), b) modulator (Kerrova celijska, kristal kalij-dihidrogenfosfata ( $KH_2PO_4$ ) tzv. KDP-kristal, uređaj s ultrazvukom, svijetleća dioda), c) optički sustav za emisiju i prijam signala, te reflektor na točki cilja, d) uređaj za mjerjenje fazne razlike – fazni indikator, e) uređaj za očitavanje.

Tehnička rješenja vrlo su različita, stalno se razvijaju, pa instrumenti tehnički zastaruju već za nekoliko godina. U instrumentima prve generacije ručno se mijenjala mjerena frekvencija, a isto tako i mjerjenje fazne razlike, a duljina se računala na osnovi izmjerenih podataka. Već u drugoj generaciji znatno se povećava točnost mjerjenja mjerjenjem fazne razlike na znatno manjim frekvencijama i uz djelomično digitalna očitanja mjerene dulžine. Najnovije konstrukcije imaju automatsku izmjenu frekvencije i neposredno digitalno očitanje, a merni proces traje do 15 s (npr. DM-1000 i DM-2000, Kern; Reg-Elta 14 i EL DI-1, Opton).

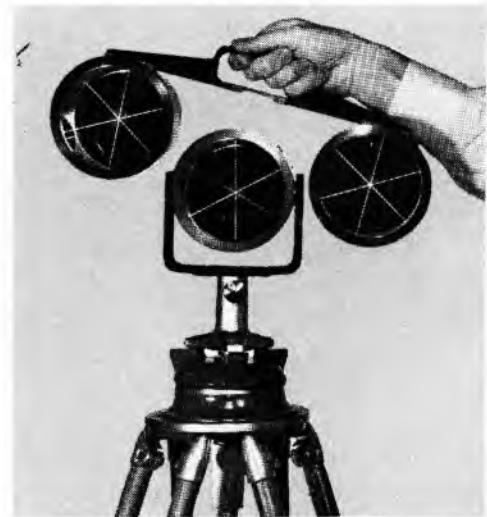
Daljinomjer DM-2000 (sl. 63.) ima svijetleću diodu kao izvor svjetlosti i modulator. Duljina je nosećeg vala 875 nm (infra-crveno područje), a mjerne frekvencije 14,9854 MHz i 149,854 MHz, što odgovara mernim jedinicama 10 m i 1 m, uz temperaturu zraka od 12°C i normalni tlak. Divergencija je snop-a 4' (12 cm na 100 m), a masa instrumenata 10,6 kg. Doseg je ~1500 m s jednom prizmom kao reflektoru, a ~2500 m sa tri prizme (sl. 64.). Srednja je pogreška  $\pm (4 \text{ mm} + 4 \cdot 10^{-6} D)$ .

Posebnom preklopkom može se modulirani signal usmjeriti na mjerenu dulžinu ili na kratki unutrašnji put u instrumentu. Kako referentični put izlaznog signala određuje polaznu fazu signala i time ishodišnu točku mjerjenja razlike faza, pomoću kratkog unutrašnjeg puta uzima se u obzir mogući fazni pomak u unutrašnjosti instrumenta, što osigurava konstantnost ishodišne točke. U prijamnom dijelu fotodiode pretvaraju mjerni signal u električnu struju koja se registrira u faznom indikatoru. Kao rezultat mernog procesa, baziranog na funkciji elektroničkih elemenata (digitalni način mjerjenja fazne razlike primjenom elektroničkih vrata), dobivaju se na ekranu prve

znamenke vrijednosti mjerene dulžine. Nakon toga se automatski uključuje mjerjenje s većom frekvencijom, pa se istim mernim postupkom dobivaju i slijedeće znamenke mjerene vrijednosti.



Sl. 63. Elektrooptički daljinomjer DM-2000



Sl. 64. Reflektor

Daljinomjer El DI 1, Opton, ima svijetleću diodu (GaAs) kao izvor svjetlosti valne duljine 910 nm. Potpuno je automatiziran, a trajanje mjerjenja iznosi 5 s. Doseg mu je 5...7 km, već prema meteorološkim uvjetima. Ima dva područja točnosti mjerjenja sa srednjim pogreškama:

$$\pm (5 \dots 10 \text{ mm} + 2 \cdot 10^{-6} D) \text{ i } \pm (10 \dots 20 \text{ mm} + 2 \cdot 10^{-6} D).$$

Masu ima 8 kg. Slične je građe i točnosti daljinomjer El DI-2, mase 4,2 kg.

Daljinomjer Mekometar ME 3000. Izvor je svjetlosti ksenonska cijev sa zračenjem valne duljine 480 nm. Osnovna je merna frekvencija 499,5104 MHz (20°C, normalni tlak) sa četiri pomoćne frekvencije: 10%, 1%, 0,1% i 0,01% od osnovne frekvencije. Uz ručnu izmjenu frekvencija mjerjenje traje 2 minute. Razlika faza mjeri se optičko-mehaničkom promjenom

duljine puta zraka pomicanjem prizmi, što je moguće zbog male mjerne jedinice (30cm). Razlika faza pretvara se u odgovarajuću digitalnu vrijednost duljine. Instrument ima ugrađen uređaj za automatsku kompenzaciju promjene temperature i tlaka. Masa je instrumenta 14,5kg, a točnost mjerena  $\pm (0,2\text{mm} + 2 \cdot 10^{-6} D)$ .

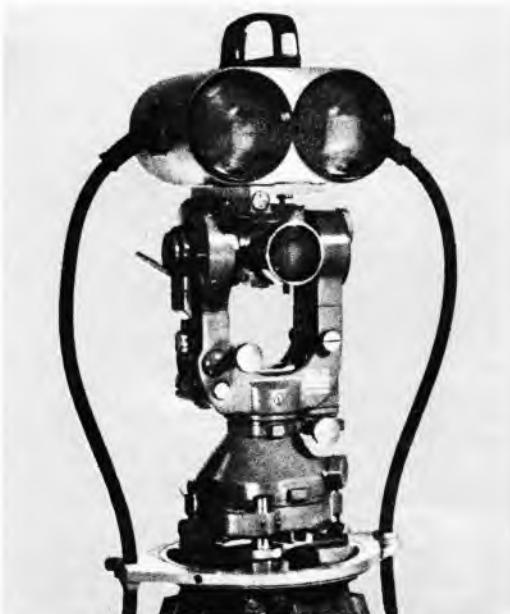
### Tahimetri

Tahimetrija je metoda izmjere kojom se sa stajališta tahimetra određuje situacijski i visinski položaj detaljne točke. Tahimetrima se, prema tome, mjere horizontalni kutovi, udaljenosti i visinske razlike, odnosno vertikalni kutovi. Tahimetri su najčešće teodoliti koji imaju i uređaj za mjerjenje duljina, a često i mogućnost direktnog mjerjenja visinske razlike. Rjeđe se za tu svrhu na ravnom terenu upotrebljavaju i niveleri koji imaju horizontalan krug i najčešće na pločici nitnog križa daljinomjerne crtice za optičko mjerjenje duljine. Prema uređaju za mjerjenje duljine tahimetri su *optički* i *elektronički*.

**Optički tahimetri** i njihove konstrukcije za mjerjenje duljina i visinskih razlika opisani su u članku *Daljinomjeri*, TE3, str. 168-172. Za vrijeme mjerena upisuju se podaci u posebne zapisnike mjerena, pa se na osnovi tih brojčanih podataka obavljaju sva potrebna računanja i izrađuje plan ili karta u određenom mjerilu. Primjenom elektroničkih tahimeta u izmjeri (tzv. elektronička tahimetrija), elektroničkih računala i elektroničkih crtača mogu se sve operacije od izmjere do izradbe plana u znatnoj mjeri automatizirati. Tada se brojčani podaci unose u poseban zapisnik pa se čitačem prenose na bušene trake ili kartice, ili se direktno na terenu prenose pomoću posebnog registratora na bušene papirne trake ili magnetske vrpce (automatska registracija podataka), koje se iskorištavaju za dalju automatsku obradu podataka.

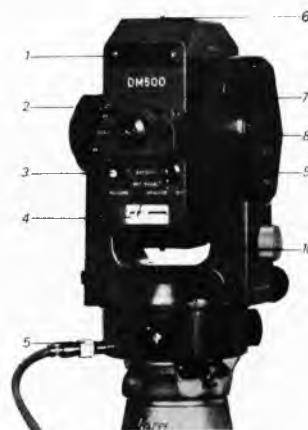
Pri *grafičkoj izmjeri* (topografska izmjeri) plan ili karta izrađuju se paralelno s mjeranjima. Za tu svrhu upotrebljava se geodetski stol i instrument (*kipregel*) s priborom. Za grafičko realiziranje pravca viziranja služi brid metalnog lineala. Instrument ima funkciju tahimetra.

**Elektronički tahimetri** sadrže elektronički daljinomjer, a u nekim konstrukcijama elektronički uređaji služe i za očitavanje, odnosno registraciju očitavanja krugova. Elektronički tahimetri mogu biti kombinirani ili integrirani instrumenti. U njih se danas ugrađuje elektrooptički fazni daljinomjer sa svijetlećom diodom (GaAs); frekvencija je nosećeg vala u infracrvenom području.

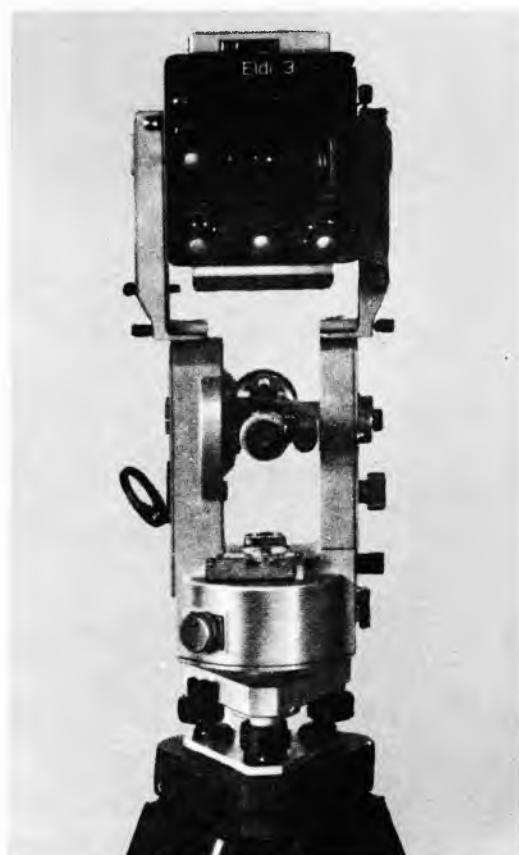


Sl. 65. Optički dio elektroničkog daljinomjera DI-10 na durbinu teodolita T2

**Kombinirani elektronički tahimetri** sastavljeni su od osnovnog instrumenta teodolita s dodatnim elektroničkim daljinomjernim uređajem. Na taj način moguće je svaki optički teodolit pretvoriti u elektronički tahimetar. Elektronički daljinomjerni uređaj sastoji se od dva dijela: optičkog, za emisiju i prijam signala (tzv. glava za viziranje), i elektroničkog mjerilog uređaja, s pločom za upravljanje i očitavanje rezultata. Oba dijela su ili povezana kabelom (npr. DI 10, Wild, sl. 65), ili se nalaze u jednom mehaničkom sklopu (npr. DM-500, Kern, sl. 66). Optički dio ili čitava cijelina mogu se stavljati na durbin teodolita (npr. DI 10, Wild; DM-500, Kern;

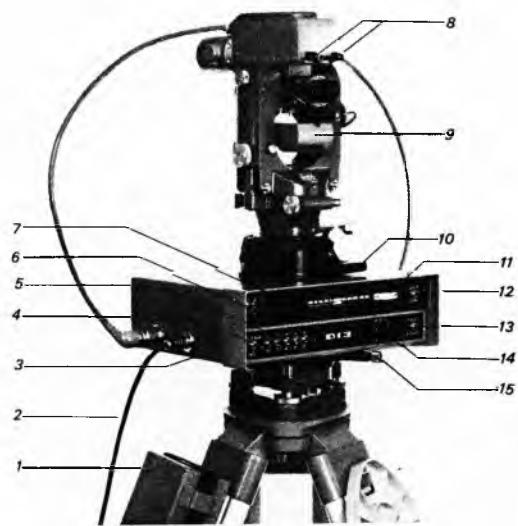


Sl. 66. Elektronički tahimetar DM 500 (elektronički daljinomjerni dio kao dodatak durbinu teodolita DKM 2-A).  
1 ekran za dužine, 2 polugica za stelanje, 3 dugme za start, 4 galvanometar, 5 priključak na bateriju 12V, 6 vizir, 7 vijci za justiranje, 8 priključni most dodatka, 9 preklopka, 10 vizir

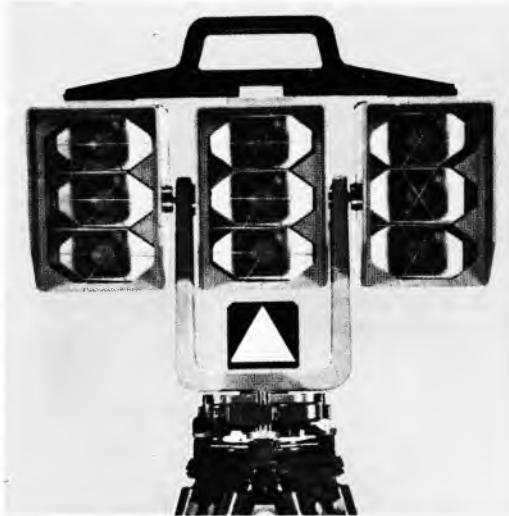


Sl. 67. EI DI-3 na alhidadi teodolita Th 42

SDM-1, Sokkisha; MND 2 Nikon; Geodimetar 12, AGA), ili na alhidadu teodolita (npr. EL DI-3, Opton, sl. 67; Aksuranger MK-1, Carol and Reed; CD 6, Telurometar). Posebne je konstrukcije instrument DI-3, Wild, koji ima optički dio na durbinu, a elektronički se stavlja na podnožni dio teodolita i sastavlja u cijelinu s teodolitom (sl. 68).



Sl. 68. Distomat DI-3 s teodolitom T1-A. 1 baterija NiCd 12V/7Ah, 2 dovodni kabel, 3 preklopka: metar-stopa i stupanj-grad, 4 preklopka za prijenos vertikalnog kuta u računalo, odnosno za poništenje upisa, 5 polugice za upis vertikalnog kuta, 6 preklopka: kosa dužina, horizontalna dužina, visinska razlika, 7 ekran, 8 stezaljke za vizirnu glavu, 9 protuteg, 10 ručka za prenošenje mjerne jedinice, 11 galvanometar za registraciju intenziteta signala i napona baterije, 12 glavni prekidač, 13 preklopka za mjerjenje udaljenosti, odnosno testiranje napona baterije, 14 preklopka za izbor mjerila, 15 kočnica mjerne jedinice



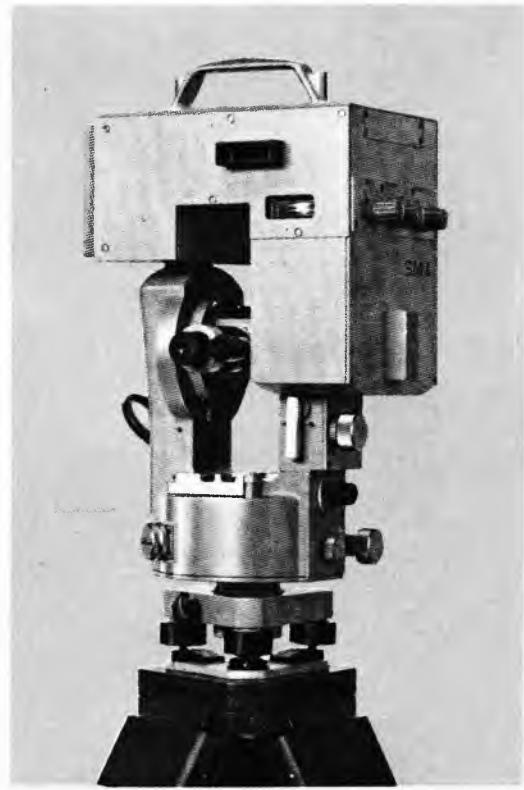
Sl. 69. Reflektor na cilju sa 9 prizama

*Tahimetar Distomat DI-10.* Izvor je svjetlosti svijetleća dioda (GaAs), valna duljina 875 nm, otvor snopa 15', doseg sa jednom prizmom  $\sim 600$  m, sa tri prizme  $\sim 1200$  m, a sa devet prizama (sl. 69)  $\sim 2000$ . Osnovna je merna frekvencija 14,9854 MHz (12°C, normalni tlak), a merna jedinica 10 m. Mjerjenje fazne razlike provodi se kontinuiranom promjenom frekvencije, počevši s frekvencijom 10% nižom od osnovne mjerne frekvencije. Srednja je pogreška  $\pm 5... \pm 6$  mm do duljina od 1 000 m, a za duljinu veće od 1 000 m  $\pm 1... \pm 2$  cm, uz optimalne uvjete. Optički dio ima masu 3,8 kg, a elektronički dio s baterijom 12 V (na posebnom nosaču) 14,3 kg.

Ima tahimetara (DM-500) koji imaju mogućnost priključka elektroničkog računala na teodolit, pomoću kojeg se računaju duljine, visinske razlike, korekture, koordinate novih točaka i elementi za iskolčenje. U nekim tahimetrima, kao što je npr. Distomat DI-3 (sl. 68) ugradeno je elektroničko računalo pomoću kojeg se može, 4...5 s nakon unošenja očitanja, dobiti na ekranu podatak o mjerenoj dulžini ili visinskoj razlici.

**Integrirani tahimetri** imaju ugrađen elektronički daljinomjer pa je objektiv turbina istodobno i objektiv optičkog dijela za odašiljanje i primanje signala. Optički sustav je prema tome koaksijalan.

Dvije su osnovne izvedbe: a) s optičkim očitavanjem, pomoću mikroskopa, horizontalnog i vertikalnog kuta (npr. SM4 i SM11, Opton) i b) automatski se mjeri duljine i kutovi, pa se digitalno registriraju na ekranu (npr. Reg Elta 14, Opton; Geodimetar 710, AGA; SDT-1, Sokkisha). Takvi su instrumenti potpuno automatizirani i imaju ugrađena računala, memorije za registriranje mjerjenih podataka s mogućnošću registracije podataka na papirne ili magnetske trake. Integrirani elektronički tahimetri omogućuju potpunu automatizaciju geodetskih radova, ali su zbog složene građe skupi



Sl. 70. Elektronički tahimetar SM4

pa je njihova primjena ekonomična samo za veća područja izmjere s relativno malo stajališta instrumenta. Zbog vrlo brzog razvoja takvih instrumenata smatra se da se moraju amortizirati otrplike za četiri godine.

*Integrirani tahimetar SM 4* (sl. 70). Elektronički merni dio, teodolit s mikroskopom i baterija čine kompaktnu cijelinu mase 7,8 kg. Mjerjenje duljine traje 5 s i potpuno je automatizirano s automatskom korekturom nulte točke i atmosferskih utjecaja. Elektronički dio građen je kao u EL DI 3 (sl. 67).

*Integrirani tahimetar SM 11* ima ugrađen elektronički daljinomjer analogne konstrukcije kao i Reg Elta 14. Masa instrumenta sa stativom je 21 kg. Za očitavanje horizontalnih i vertikalnih kutova služi skalni mikroskop s ugrađenim kompenzatorom za vertikalni krug.

*Reg Elta 14* (sl. 71) je elektronički tahimetar s registracijom podataka na bušenu papirnu vrpcu. Nadesno od turbine nalazi se na njegovu nosaču ekran sa 6 brojčanim mje-

sta na kojem se mogu po izboru očitavati: duljina, horizontalni i vertikalni kut (uz automatsku kompenzaciju). Na istoj strani alhidade na donjem dijelu nalazi se brojčanik za upis podataka u odgovarajućim kodovima za programiranje pri obradi podataka mjerena. Svi se podaci mogu registrirati na vrpce. Nakon viziranja i namještanja preklopke na odgovarajuću vrijednost (koja odgovara izmjerenoj temperaturi i tlaku zraka), mjerjenje duljine traje 10s, a uz registraciju horizontalnog i vertikalnog kuta oko 30s.

Za mjerjenje horizontalnog i vertikalnog kuta (interval  $10^{\circ}$ ) ugrađeni su kodirani sustavi. Osnovni dio sustava je mehanički element kvačilo, koje ima dvije identične ploče sa 400 zubaca. Uključenjem ploča zatvoren je i strujni krug za mjerjenje. Razdvajanjem obiju ploča moguće je alhidadu zakretati i ponovo uključiti kvačilo za svaki puni iznos grada. Koaksijalno s pločom kvačila, s obzirom na odgovarajuću okretnu os, položena je ploča s kodovima koji zamjenjuju brojke gradusne podjele. Kut se mjeri u dvije faze. Najprije se alhidada zakrene za puni iznos grada i uključi kvačilo, a zatim se točno vizira uključujući mehanički mikrometar s klinom. Iznos pomaka registrira se također u kodiranom obliku i očitava elektrooptički.

Svjetleća dioda (GaAs) je izvor svjetlosti za mjerjenje duljina, valna duljina 910nm. Doseg je 2km, a srednja pogreška mjerena  $\pm 5 \dots \pm 10$ mm. Uz instrument na stativu može se postaviti i priključiti elektroničko računalo Eltac.

*Geodimetar 710* (sl. 72) je kombinacija elektroničkog teodolita s digitalnim očitavanjem, elektroničkog daljinomjera i računala s memorijom. Izvor je svjetlosti plinski laser snage



Sl. 72. Elektronički tahimetar s registracijom podataka Geodimetar 710

1mW. Modulator je Kerrova ćelija. Divergencija snopa može se mijenjati od  $0,2 \dots 10\text{ m km}^{-1}$ . Osnovna je mjerna frekvencija  $\sim 30\text{ MHz}$  (mjerna jedinica 5m). Doseg je s refleksnim folijama  $\sim 100$ m, s plastičnim reflektorom  $\sim 300$ m, sa jednom prizmom  $\sim 1700$ m, sa tri prizme  $\sim 3,5$ km, sa šest prizama  $\sim 5$ km. Točnost je  $\pm (5\text{ mm} + 10^{-6}D)$ .

Instrument ima automatsku kompenzaciju promjene temperature i tlaka zraka, nagiba glavne osi do  $\pm 1,5'$ , te kompenzator za vertikalni krug. Mjerjenje traje  $\sim 15$ s. Na ekranu se digitalno očitava prema izabranom programu: visinska razlika i horizontalni kut, horizontalna duljina (do 4,7km) i horizontalni kut, ili kosa duljina i vertikalni kut (sve izraženo u  $2 \times 7$  brojaka). Točnost je očitanja vertikalnog kuta  $10^{\circ}$ , a horizontalnog  $5^{\circ}$ . Sve informacije mogu se registrirati na vrpce radi automatske obrade podataka. Dio s pokaznom pločom i računalom odvojen je od teodolita koji se nalazi na stativu. Teodolit i tahimetar imaju  $\sim 14$ kg, a cijeli uređaj  $\sim 27$ kg.

Elektronički tahimetri imaju slijedeće prednosti prema optičkim tahimetrima: znatno veći doseg mjerena (i do 10 puta), imaju visoku i homogenu točnost mjerena duljina u čitavom mernom području ( $\pm 1$ cm), veću brzinu mjerena, mogućnost automatske registracije podataka, na mjerjenje manje utječu vegetacija, promet i sl.

## LABORATORIJSKI MJERNI INSTRUMENTI I UREĐAJI

Kako bi se pri mjerjenjima geodetskim instrumentima i pri borom postigla potrebna točnost i ekonomičnost mjerjenja, potrebni su ne samo pravilan izbor mjernih metoda i instrumenata već i provjera i rektifikacija instrumenata, posebno prije mjerjenja, ali često i za vrijeme te nakon izvrsenih mjerjenja. Djelomično se instrumenti provjeravaju na terenu, no posebno značenje imaju provjere i ispitivanja u mernom laboratoriju. Za tu svrhu postoje različiti instrumenti i uređaji, kojima se vrlo detaljno ispituju i uspoređuju točnosti pojedinih instrumenata. U laboratoriju nemaju utjecaja atmosferske prilike na točnost ispitivanja, kao pri mjerjenjima na terenu.

**Kolimator** ima vrlo važnu primjenu za ispitivanje i rektifikaciju instrumenata s durbinima zbog jednostavnosti ispitivanja i brzine rada. Pomoću njegova objektiva projicira se vizurna marka u optičku neizmjernost. Kolimator se sastoji od cijevi u kojoj je na jednom kraju smješten objektiv, a na drugom kraju staklena pločica s nitnim križem ili markom u žarišnoj ravnini objektiva koja je osvijetljena rasvjetnim uređajem. Žarišna duljina objektiva kolimatore u geodetskom laboratoriju iznosi  $0,5 \dots 2$ m.

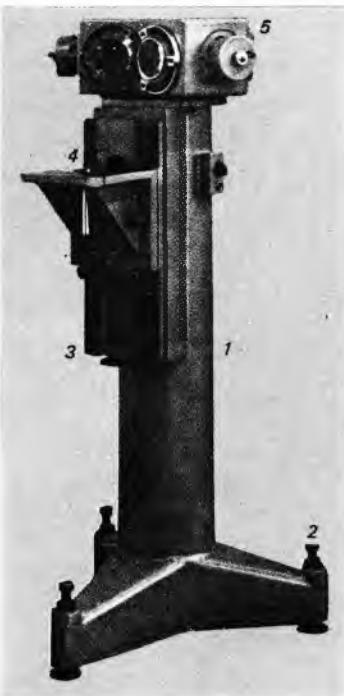
Za primjenu kolimatora pri ispitivanjima instrumenata s durbinom bitno je svojstvo optičke kombinacije kolimator –

Sl. 71. Elektronički tahimetar s registracijom podataka Reg Elta 14



durbina: paralelnost kolimacijskih osi kolimatora i durbina nakon viziranja pomoću durbina.

Kolimator ili slog dvaju kolimatora primjenjuje se za ispitivanje i rektifikaciju glavnog uvjeta nivela, libele ili kompenzatora vertikalnog kruga teodolita, pogreške kolimacijske osi, ekscentričnosti alhidade, multiplikacijske konstante optičkih daljinomjera, ishodišnog položaja dijagrama, ispitivanje točnosti podjele kruga (sl. 73) itd.



Sl. 73. Uredaj s kolimatorima za ispitivanje podjele kruga teodolita. 1 nosač, 2 podnožni vijci, 3 vodilica podnožne ploče instrumenta, 4 podnožna ploča, 5 kućište kolimatora

Znatnu primjenu pri ispitivanjima u laboratoriju imaju *komparatori* različitih konstrukcija za ispitivanje podjele nivelmanjskih letava, ili razmaka marki i ekscentričnosti bazisne letve, zatim uređaji za ispitivanje geodetske vizurne linije durbina, točnosti viziranja itd.

LIT.: N. Čubranić, Viša geodezija, Zagreb 1954. — S. Macarol, Praktična geodezija, Zagreb 1961. — Jordan-Eggert-Kneissl, Handbuch der Vermessungskunde, Bd. II. 1963, Bd. III. 1956, Bd. VI. 1966. — E. Gigas, Physikalisch-Geodätische Messverfahren, Bonn 1966. — M. Janković, Inženjerska geodezija, Zagreb 1968. — П. Закамов, Инженерная геодезия, Москва 1969. — Г. П. Левчук, Курс инженерной геодезии, Москва 1970. — Б. А. Литвинов, В. М. Лобачев, Н. Н. Воронков, Геодезическое инструментоведение, Москва 1971. — B. Adolfsson, The use of electronic distance and direct reading tacheometers and survey systems based on them, Stockholm 1972. — F. Deumlich, Instrumentenkunde der Vermessungstechnik, Berlin 1972. — G. Strasser, Die elektronischen Kurzdistanzmesser, Wien 1972. — H. Zetsche, Elektrooptische Nahbereichsentfernungsmesser, Bonn 1973. — Z. Narobe, Teoretske osnove i praktična primjena žiroteodolita, Zagreb 1975. — V. Petković, Elektromagnetski daljinomjeri i njihova primjena u geodeziji, Zagreb 1975.

D. Benčić

**GEODETSKI KOORDINATNI SUSTAVI**, sustavi pravaca i ravnina za određivanje položaja točke u ravnini, matematički definiranoj zakrivljenoj plohi ili u prostoru. U geodeziji se upotrebljavaju: koordinatni sustavi na nebeskom svodu (nebeski koordinatni sustavi), koordinatni sustavi na Zemljinu elipsoidu ili Zemljinoj kugli, koordinatni sustavi u ravnini i koordinatni sustavi u prostoru.

**Nebeski koordinatni sustavi.** Nebeska kugla (sféra) zamišljena je kugla u svemiru koja ima središte u središtu Zemlje, ali je tako velikog polumjera da pravci povučeni iz različitih to-

čaka unutar kugle (na Zemlji ili u Sunčevu sustavu) do površine nebeske kugle imaju isti smjer. Pravac koji spaja oko promatrača s nebeskim tijelom prodire kroz površinu nebeske kugle u točki koja označuje prividni položaj nebeskog tijela. Ta točka prodora ujedno je i smjer u kojem se vidi promatrano nebesko tijelo. Da se točno odredi smjer nebeskog tijela i opiše njegovo prividno gibanje po nebeskoj kugli, definiraju se na njoj točke, lukovi i krugovi koji su osnova nebeskih koordinatnih sustava, a to su horizontski, ekvatorski i eklipistički koordinatni sustav.

**Horizontski koordinatni sustav.** Vertikala, koja pada u smjer djelovanja sile teže na mjestu promatrača, osnova je horizontskog koordinatnog sustava. Vertikala prolazi kroz nebesku kuglu u dvije točke. *Zenit*  $Z$  (sl. 1) nalazi se iznad glave promatrača, a *nadir*  $Z_1$  na suprotnoj je strani nebeske kugle. *Horizont* je krug na nebeskoj kugli koji je presjecište te kugle s ravnom okomitom na vertikalu koja prolazi mjestom promatrača. Pravac koji prolazi sjevernim i južnim polom Zemlje a prolazi kroz površinu nebeske kugle zove se *svjetska os PP<sub>1</sub>*. Ona je os rotacije Zemlje, a točke  $P$  i  $P_1$  označuju *sjeverni i južni nebeski pol*.

**Nebeski meridian** na mjestu promatrana najveća je kružnica na nebeskoj kugli koja prolazi kroz zenit, nadir, sjeverni i južni pol ( $ZSP_1Z_1NP$ , sl. 1). Najveća kružnica na nebeskoj kugli koja prolazi promatranim nebeskim tijelom, zenitom i nadirom, a okomita je na horizont, naziva se *vertikalnim krugom nebeskog tijela*. A ako je ta kružnica okomita na nebeski meridian, to je *prvi vertikal nebeskog tijela*.

Položaj nebeskog tijela u horizontskom koordinatnom sustavu određen je dvjema horizontskim koordinatama: visinom  $v$  i azimutom  $\alpha$ . Visina nebeskog tijela  $T$  određena je kutom  $TOH$  što ga čini njegov smjer  $OT$  s ravninom horizonta na mjestu promatrana. Visina se iskazuje kutom  $0^\circ \dots +90^\circ$  kad je tijelo iznad horizonta, a kutom  $0^\circ \dots -90^\circ$  kad se tijelo nalazi ispod horizonta. Često se umjesto visine upotrebljava *zenitna duljina*  $z$  koja je komplement visine, jer je  $z = 90^\circ - v$ . Iskazuje se kutom  $0^\circ \dots 180^\circ$  od zenita do nadira. Kut koji čini ravnina meridijana na mjestu promatrana i vertikalni krug (kut  $SOH$ ) zove se *azimut*. Broji se na horizontu počevši od meridiana (točka  $S$ ) u smjeru kazaljke na satu kutom  $0^\circ \dots 360^\circ$ .

Horizontske koordinate mijenjaju se s promjenom mesta promatrana, ali i uz stalno mjesto promatrana one se stalno mijenjaju zbog prividne dnevne vrtnje nebeske kugle koja rotira zajedno sa Zemljom.

**Ekvatorski koordinatni sustavi.** Položaj nebeskog tijela u tim sustavima određen je ekvatorskim koordinatama koje se definiraju pomoću satnog kuta ili pomoću rektascenzije, pa zbog toga postoje dva ekvatorska koordinatna sustava. U oba sustava položaj nebeskog tijela određen je s obzirom na *nebeski ekvator*. To je kružnica određena presjecištem nebeske kugle s ravninom koja prolazi mjestom promatrana i okomita je na svjetsku os (sl. 2). Kružnica na nebeskoj kugli koja prolazi promatranim tijelom i nebeskim polovima a okomita je na nebeski ekvator zove se *satna kružnica* ili *kružnica deklinacija*.

U prvom sustavu položaj nebeskog tijela određen je satnim kutom  $\tau$  i deklinacijom  $\delta$ . *Satni kut* nebeskog tijela  $T$  (sl. 2) jednak je kutu između ravnine satnog kruga i ravnine meridijana na mjestu promatrana. Broji se obično od meridijana u smjeru dnevne prividne vrtnje nebeske kugle ( $0^\circ \dots 360^\circ$ ). Iskazuje se obično u satima i dijelovima sata umjesto u stupnjevima i njegovim dijelovima, pa je  $360^\circ$  jednako  $24h$  ( $1h = 15^\circ$ ,  $1\text{ minuta} = 15'$ ,  $1s = 15''$ ). *Deklinacija* je nebeskog tijela kut njegova smjera s ravninom ekvatora. Umjesto deklinacije upotrebljava se *polna duljina p*, koja je jednaka kutnoj udaljenosti tijela od sjevernog nebeskog pola, pa je  $p = 90^\circ - \delta$ . Deklinacija i polna duljina mijere se na ravnini satnog kuta; deklinacija počevši od ekvatora do polova ( $0^\circ \dots \pm 90^\circ$ ), a polna duljina od sjevernog do južnog pola ( $0^\circ \dots 180^\circ$ ).

U drugom sustavu položaj nebeskog tijela određen je rektascenzijom  $\alpha$  i deklinacijom  $\delta$ . *Rektascenzija* nebeskog tijela na nebeskoj kugli jest kut između satnog kruga nebeskog tijela i ravnine satnog kruga koji prolazi točkom nebeskog ekvatora u kojoj se nađe središte Sunca u trenutku kad astronomski