

upotrebljavaju za dekorativne boje. Telur služi i za vulkanizaciju guma. Elementarni telur i teluridi nekih metala primjenjuju se kao katalizatori u organskoj sintezi i pri preradi nafte.

Osnovno perspektivno područje primjene telura temelji se na njegovim poluvodičkim svojstvima i aktivnosti s obzirom na različite vrste elektromagnetnog zračenja. Telur zato služi za izradbu fotooptornika, fotoosjetljivih slojeva televizijskih ekrana, u dozimetriji, u prijamnicima infracrvenog zračenja itd. Teluridi se upotrebljavaju kao materijal za izradbu termogeneratora, koji mogu raditi i pri visokim temperaturama, te su našli primjenu u vojne svrhe i u tehnici svemirskih letova.

TELUROVI SPOJEVI

Telurovi su spojevi otrovni, a posebno se opasnim smatra telurovodik i telur(VI)-fluorid. S telurom i njegovim spojevima smije se raditi samo u zatvorenom zaštitnim kutijama (boksovima) s dobrom ventilacijom.

Telurovi spojevi šire nepodnošljivo neugodan zadah koji se upija u kožu i vrlo se sporo uklanja.

Telur(IV)-oksid, telur-dioksid, TeO_2 , najvažniji je telurov spoj. To je bijeli prah praktično netopljiv u vodi, lako topljiv u alkalijama i kloridnoj kiselini, a teže u nitratnoj i sulfatnoj kiselini. Sintetski oksid kristalizira tetragonalno, gustoća mu je $5,87 \text{ g/cm}^3$. Nastaje izgaranjem telura u struji zraka ili kisika. Pri zagrijavanju s ugljenom ili u struji vodika lako se reducira do elementarnog stanja. Preparativno se dobiva oksidacijom telura nitratnom kiselinom i hidrolizom solno-kiselih otopina. Telur(IV)-oksid se upotrebljava za izradbu halkogenidnih stakala koja propuštaju infracrveno zračenje. Osim toga, služi u kemijskoj industriji kao katalizator reakcija oksidacije i hidrogenacije.

Telur(VI)-oksid, telur-trioksid, TeO_3 , pojavljuje se u dvije kristalne modifikacije. α -modifikacija je smeđe boje, lako topljiva u jakim alkalijama, a teško u vreloj vodi, dok je β -modifikacija siva, inertna i teško se otapa u vodi i alkalijama. Termički je taj oksid nestabilan i razgrađuje se na temperaturi višoj od 400°C na TeO_2 i kisik. Može se dobiti samo posredno pri razgradnji teluratne kiseline, pri čemu se pod različitim uvjetima razgradnje dobivaju različite modifikacije.

Telurovodik, H_2Te , bezbojan je i otrovan plin. Može se dobiti djelovanjem razrijeđenih kiselina na teluride metala ili elektrolizom sumpornokiselih otopina na telurovoj katodi. Njegova topljivost u vodi slična je topljivosti sumporodika, a njegova vodena otopina ponaša se kao slaba kiselina.

Teluritna (telurasta) kiselina, H_2TeO_3 , nije poznata u izoliranom stanju, a vjerojatno nastaje pri otapanju telur(IV)-oksida u vodi. Takva vodena otopina reagira slabo kiselo. Soli teluritne kiseline, *teluriti*, opće su formule $x\text{MeO} \cdot y\text{TeO}_2$, a mogu biti bazni ($x > y$) i kiselni ($x < y$). Teluriti alkalijskih metala lako su topljivi u vodi, dok se teluriti teških metala u vodi teško otapaju.

Teluratna (telurova) kiselina, H_6TeO_6 , dobiva se djelovanjem jakih oksidacijskih sredstava na elementarni telur ili telur(IV)-oksid, uz naknadnu obradbu otopine koncentriranom nitratnom kiselinom. Javlja se u obliku na zraku postojanih bezbojnih kristala, kubične ili monoklinske kristalne modifikacije. Pri zagrijavanju dehidratira i prelazi u telur(VI)-oksid. Kiselina je dobro topljiva u vodi i njezine vodene otopine imaju svojstva slabe anorganske kiseline. Gradi soli *telurate* s potpunom ili djelomičnom zamjenom vodikovih atoma atomima metala. Najpoznatiji su telurati alkalijskih metala. S halogenim elementima telur lako reagira stvarajući halogenide opće formule TeX_4 (gdje je X atom halogenog elementa).

Teluridi su spojevi telura s elektropozitivnijim elementima, uglavnom s metalima. Po svojoj građi i svojstvima slični su sulfidima i selenidima. Dobivaju se neposrednim stapanjem komponenata u inertnoj atmosferi, djelovanjem telurovodika na metale pri povišenoj temperaturi ili njegovim propuštanjem kroz otopine metalnih soli. Najpoznatiji su teluridi alkalijskih

i zemnoalkalijskih metala, koji se javljaju u prirodi kao telurivi minerali, te teluridi metala cinkove podskupine. To su teluridi cinka, kadmija i žive (ZnTe , CdTe , HgTe) i svi pokazuju poluvodička svojstva. Poluvodiči su i teluridi nekih drugih elemenata (antimona, bizmuta, kositra, galija, indija, talija, silicija, fosfora).

Telur(IV)-klorid, telur-tetraklorid, TeCl_4 , najvažniji je među telurovim halogenidima jer je to polazna tvar za pripremu organotelurovih spojeva. To je žuti prah koji se topi na temperaturi 228°C , a može se dobiti od elemenata direktnom sintezom.

Organotelurovi spojevi. Kemija organotelurovih spojevi snažno se razvila u posljednjih dvadesetak godina. Poznato je mnoštvo lančanih i cikličkih spojeva dvovalentnog i četverovalentnog telura, koji se zbog svog antibakterijskog djelovanja upotrebljavaju za liječenje kožnih bolesti, kao fungicidi i sl.

LIT.: K. W. Bagnall, The Chemistry of Selenium, Tellurium and Polonium. Pergamon Press, Oxford 1975. – B. Đurković, D. Đurković, Metalurgija retnih metala. Građevinska knjiga, Beograd 1976. – K. Zanio, Cadmium Telluride, Semiconductors and Semimetals. Academic Press, New York 1978. – D. Maschewsky, Tellur und Tellur-Verbindungen, u djelu: Ullmanns Encyclopädie der technischen Chemie, Band 22. Verlag Chemie, Weinheim 1982.

Redakcija

TEMELJENJE, gradnja konstruktivnih dijelova, temelja, koji prenose sile građevina na tlo tako da deformacije i pomaci građevine ili njezinih dijelova zbog preokračanja dopuštenog opterećenja ili zbog zbijanja rahlog tla ostanu u granicama koje ne ugrožavaju njezinu stabilnost i funkcionalnost.

Građevina, temelji i tlo konstruktivna su cjelina, pa vrste i način temeljenja ovise o tipu i veličini građevine te o vrsti i svojstvima tla. Sigurnost, funkcionalnost i ekonomičnost građevine ovise ponajviše o ispravnom odabiru vrste temelja i o ispravnom njegovu ostvarenju.

Bitan je preduvjet za uspješno projektiranje bilo koje građevine i njenih temelja poznavanje sastava i svojstava različitih vrsta tala. Takvi se podaci prikupljaju bušenjem tla, indirektnim metodama (geoelektrična, geoseizmička mjerenja) i ispitivanjem fizikalnih svojstava naslaga tla na terenu i uzoraka tla u laboratoriju (v. *Mehanika tla*, TE 8, str. 235). Ti su podaci osnova za odabir najpovoljnijeg tipa temelja i za proračun njegovih dimenzija.

U praskozorje naše civilizacije kada je čovjek izašao iz spilja i napustio nomadski život, nastala je potreba temeljenja pri građenju nastambi, za učvršćenje stupova i poslije, za građenje sojenica redovno u mekom barskom terenu. Od tada datira upotreba pilota (šipova) za sigurno građenje na mekom tlu kojih se tragovi nalaze uz plitke obale mnogih jezera u Europi i svijetu.

Sačuvane velike građevine ranoga povijesnog razdoblja od Indije, Mezopotamije, Egipta, preko Grčke i Rimskog Carstva, srednjeg vijeka i renesanse svjedoče kako je ljudska civilizacija uspješno razvila temeljenje u prvom redu zato što su se građevine tada mogle postaviti na prikladno temeljno tlo. Do naših su se dana sačuvale ili čitave ili u ostacima one građevine koje su bile na dobrom temeljnom tlu, a neuspjela su temeljenja nestala u zaboravu prošlosti. Gradilo se tada pretežno na čvrstom tlu, a već je u starom vijeku razvijena tehnika temeljenja koja je omogućavala građenje u vodi.

Ostalo je, međutim, sačuvano i nekoliko primjera pogrešnog ili neuspjelog temeljenja. Jedan je takav primjer kosi toranj u Pisi (v. *Mehanika tla*, TE 8, str. 235), građen kroz više od 200 godina, počev od 1180, na recentnim nekonsolidiranim naslagama rijeke Arno. Građen je polaganom na masivnom plitkom temelju, kako je nalagalo iskustvo s građenjem drugih zgrada u tom gradu. Toranj je za razliku od ostalih zgrada bio veoma visok, pa se već u početku građenja naginjao i danas je nagnut od vertikale za $\sim 5,4^\circ$ te je blizu kritičnog nagiba kad će se prevrnuti. Administrativni stručnjaci nemaju hrabrosti da prihvate bilo koji od mogućih prijedloga da se taj proces zaustavi. I Venecija, grad na lagunama s mnoštvom velikih palača i crkava iznimne ljepote, građena je na meku i stišljivoj terenu na bezbroj drvenih pilota koji još danas odolijevaju utjecaju vremena. Nenadano se, međutim, usred bijela dana srušio zvonik Sv. Marka ispred Duždeve palače (1902) i malo tko zna da je današnji zvonik tada sagrađen kao vjerna kopija originala.

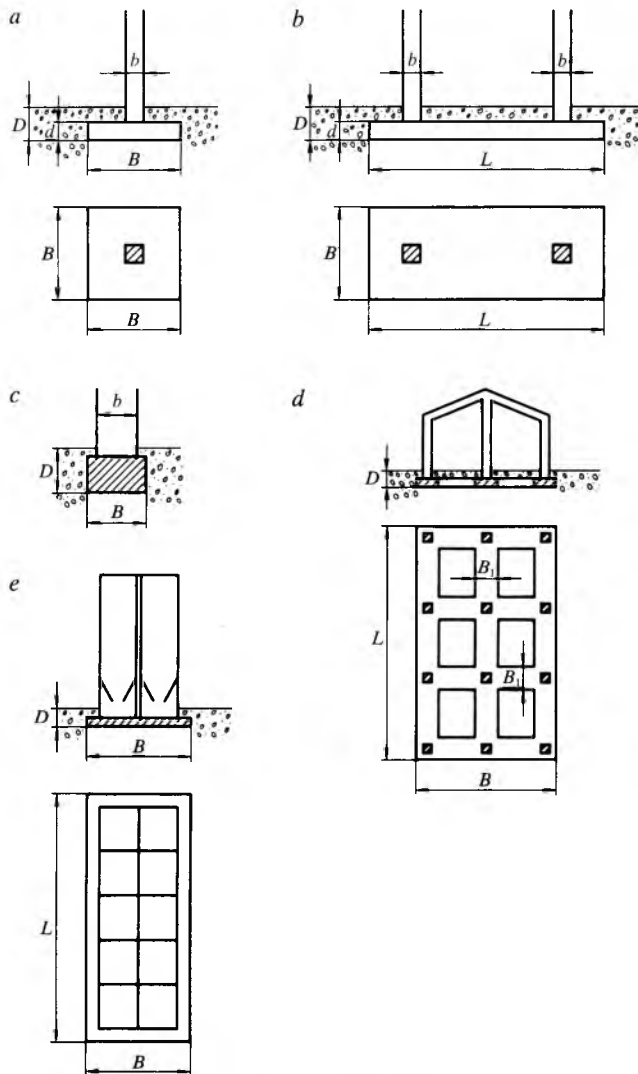
Klasične metode temeljenja bile su do početka industrijske ere plitki temelji na dobrom tlu, drveni piloti za teže građevine na slabu tlu te drveni sanduci i roštilji za temelje građevina u vodi. Industrijska era zahtijevala je, međutim, sve veće i teže građevine, a izbor mjesta prema prikladnosti terena

bio je sve manje moguć, pa su tehničke mogućnosti dopuštale razvoj metoda koje bi svladale prepreke postavljanju težih građevina na tlo manje povoljnih svojstava. Problem je samo u cijeni takva temeljenja koje se danas uspješno primjenjuju za nebodere na tlu koje normalno ne može podnijeti ni opterećenje jednokatnice bez većih slijeganja, ili za platforme za bušenje u moru na dubini većoj od 130 m (platforma Ninian u Sjevernom moru).

Mehanika tla razvila je metode ispitivanja tla, utvrđivanja čvrstoće i deformabilnosti. To je omogućilo proračun posljedica opterećenja tla i deformacija na njega oslonjenih građevina. Numeričke metode računanja pomoću elektroničkih računala dopuštaju primjenu veoma složenih odnosa, što rezultira veoma suptilnim i pouzdanim prognozama ponašanja tla i građevina pod realnim statičkim i dinamičkim opterećenjima. Industrija je razvila građevne strojeve velikih mogućnosti za različite specifične potrebe pomoću kojih se mogu ostvariti temeljenja i u najnepovoljnijim uvjetima. Samo potrebna financijska sredstva ograničavaju danas mogućnost ostvarenja teških i složenih temeljenja.

Temelji se građevina mogu razvrstati u tri velike skupine: plitki, duboki i kompenzirani (plutajući) temelji.

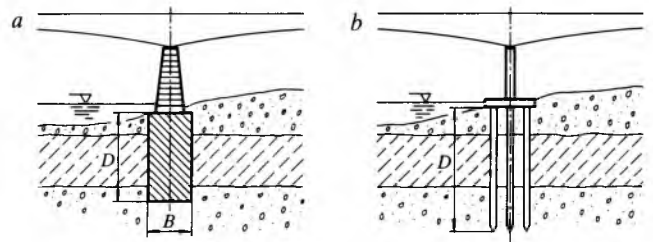
Plitki temelji, koji prenose opterećenje od građevine na malu dubinu ispod površine tla, ostvaruju se kad tlo u maloj dubini može preuzeti opterećenje bez nagibanja ili slijeganja koje građevina ne bi mogla podnijeti. Plitko temeljenje redovno je najjeftinije. Već prema konstrukciji zgrade i svojstvima tla plitki temelji mogu biti: *a*) temeljni samci (sl. 1a), koji se grade ispod svakog konstruktivnog elementa građevine posebno; *b*) temeljni nosači (sl. 1b), koji prenose na tlo sile više stupova zgrade; *c*) temeljne trake (sl. 1c),



Sl. 1. Plitki temelji. *a*) temeljni samac, *b*) temeljna greda, *c*) traka ispod zida, *d*) temelj od ukrženih greda ili roštilj, *e*) temeljna ploča

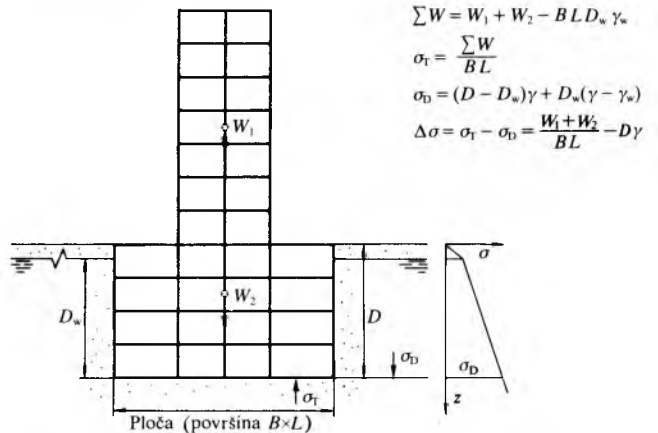
koje se grade ispod uzdužnih ili poprečnih zidova zgrada, odnosno niza stupova; *d*) roštilji (sl. 1d), koji se grade kad zgrada prenosi na tlo veća opterećenja i kad treba da i u temeljima bude konstruktivno povezana u oba smjera; *e*) temeljne ploče (sl. 1e), koje se primjenjuju kad opterećenje građevine prelazi mogućnosti prenošenja sila na trake ili roštilje, pa se ono mora rasporediti po cijeloj površini ispod građevine.

Duboki temelji preuzimaju i izravno prenose opterećenje građevine u veću dubinu gdje se nalazi sloj tla koji može sigurno preuzeti sile građevine. U tu svrhu mogu služiti dvije vrste dubokih temelja: masivni i raščlanjeni. *Masivni* se duboki temelji (sl. 2a) većinom ostvaruju za građevine manje tlocrtne površine a velike težine, kao npr. stupovi i uporišta različitih mostova, tornjeva i sličnih građevina. *Raščlanjeni* duboki temelji (sl. 2b) mogu se primijeniti za temeljenje svih vrsta građevina koje ne bi trebalo dublje ukopavati u teren, a svojstva tla zadovoljavaju u većoj dubini.



Sl. 2. Duboki temelji. *a*) masivni duboki temelj nosnog stupa, *b*) raščlanjeni duboki temelj nosnog stupa

Kompenzirani temelji (sl. 3) primjenjuju se za temeljenje građevina koje leže na tlu nedovoljne nosivosti ili velike stišljivosti, a mogu iskoristiti podzemne prostore. Temelji se u obliku ploče dimenzija $B \times L$ ukopava do dubine D tako da težina iskopanog tla i eventualni uzgon podzemne vode preuzmu dio ukupne težine građevine $W_1 + W_2$, a preostali dio ukupne težine prenosi se na tlo naprezanjem $\Delta\sigma$ u skladu s njegovim svojstvima.



Sl. 3. Kompenzirano temeljenje zgrade na slabu tlu, $\Delta\sigma$ naprezanje tla ispod temelja, W ukupna težina, D_w sloj podzemne vode, γ specifična težina tla, γ_w specifična težina vode

Građenje temelja. Prema načinu građenja mogu se temelji također razvrstati u nekoliko skupina: *a*) temelji građeni u otvorenoj jami, s crpljenjem vode kad je ona iznad njihove razine; takvi temelji mogu biti plitki i duboki; *b*) temelji u zagrađenoj jami, kad oko građevine nema mjesta za kosine iskopa; i oni mogu biti plitki i duboki; *c*) temelji sagrađeni na površini i spuštani na potrebnu dubinu potkopavanjem; to su mahom duboki temelji, otvoreni bunari ili zatvoreni sanduci iz kojih se materijal ispod razine podzemne vode kopa istiskivanjem vode iz radnog prostora komprimiranim zrakom (pneumatski kesoni); *d*) pretfabricirani temelji ili njihovi dijelovi koji se spuštaju u vodu i plutajući dotele na mjesto građenja u dubokoj vodi; *e*) piloti koji se pretfabriciraju i zabijaju na predviđenu dubinu; *f*) piloti koji se izrađuju različitim tehnikama bušenja i betoniraju na mjestu građenja.

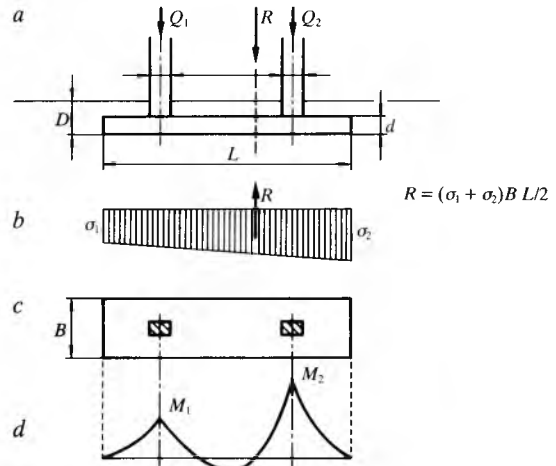
Faktori o kojima ovisi izbor najpovoljnijeg između mogućih načina temeljenja jesu: a) svojstva i vrste tala na mjestu građenja temelja; b) konstrukcijske značajke, veličina i osjetljivost građevine na ukupne i diferencijalne deformacije što nastaju od opterećenja tla kroz ekonomski vijek trajanja građevine; c) deformacije okoliša građevine zbog slijeganja površine tla u širem području, što može oštetiti okolne građevine; d) položaj i kolebanje razine podzemne vode na mjestu građenja, njezin utjecaj na metodu građenja i utjecaj trajne promjene te razine na slijeganje terena u širem području oko građevine.

Prva su dva faktora mjerodavna za izbor dopuštenog opterećenja tla, a ono ne ovisi samo o parametrima čvrstoće tla nego i o slijeganju temelja pod opterećenjem, što uzrokuje deformacije građevine koje moraju ostati u granicama kompatibilnim s njenom funkcijom. Dopušteno opterećenje mora se utvrditi tako da sigurnost protiv sloma bude u granicama propisa i da granične deformacije i ukupno slijeganje građevine ostanu unutar prihvatljivih granica. Deformacije nastale opterećenjem tla građevinom ne ovise samo o intenzitetu opterećenja, nego i o veličini i dubini plohe temelja i o intenzitetu naprezanja koje temelj prenosi na tlo. Ta se činjenica, na žalost, dosta često zanemaruje, iako nije rijedak uzrok neuspjelom temeljenju osjetljivih građevina.

Svojstva tla. Svako je tlo porozan medij koji je nakupina krutih čestica različita oblika i veličine što se međusobno dodiruju u slučajnom rasporedu, a između čestica ostaju prazni prostori, pore. Svojstva tla ovise o poroznosti, koja je omjer između obujma njegovih pora i obujma tla. Što je poroznost manja, veća je čvrstoća na smicanje i manja je deformabilnost, odnosno promjena obujma koja nastaje kad se promijeni opterećenje na tlo i naprezanja koja djeluju u njemu. Kad su pore tla ispunjene zrakom, promjena obujma nastaje istodobno s promjenom opterećenja. Kad su pore ispunjene vodom, koja je mnogo manje deformabilna od skeleta čestica tla, obujam se pri opterećenju ne može promijeniti dok se ne istisne primjerena količina vode iz pora u području promjene naprezanja. To zahtijeva manje ili više vremena, ovisno o opterećenju, poroznosti tla i njegovoj propusnosti. U krupnozrnatom tlu, koje je i veoma propusno za vodu, obujam se mijenja djelovanjem opterećenja, dok se obujam tla male propusnosti za vodu i velike stišljivosti mijenja dugo vremena poslije promjene opterećenja, pa se građevine na takvu tlu sliježu i više godina nakon dovršenja građenja i potpunog opterećenja. Proces istiskivanja vode iz pora i postepenog prilagodavanja strukture tla promijenjenom opterećenju naziva se *konsolidacijom*. Tijekom tog procesa voda preuzima dio opterećenja i u njoj vlada tlak veći od ravnotežnog hidrostatskog tlaka (porni tlak), dok se smanjuju naprezanja što ih preuzima mineralni skelet tla. Kako je čvrstoća na smicanje funkcija efektivnih naprezanja u mineralnom skeletu tla, njegova se čvrstoća tijekom konsolidacije smanjuje, pa to valja uzeti u obzir pri utvrđivanju dopuštenog opterećenja i izbora dimenzija temelja.

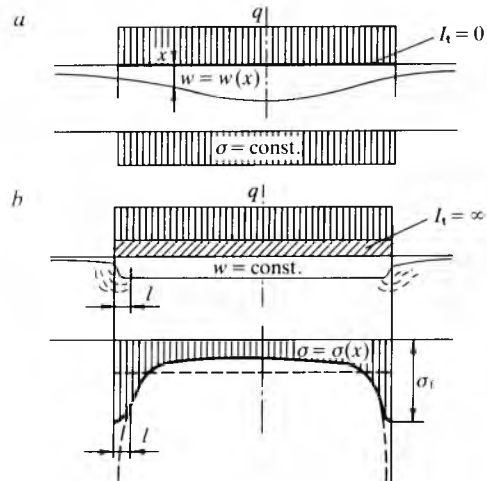
Model tla i građevine. Za racionalno projektiranje temelja valja najprije utvrditi *model tla* na koje će se postaviti građevina. Tome služe rezultati ispitivanja tla na terenu i u laboratoriju. Model shematizira vrste tla i njihov raspored po prostiranju i dubini, zatim mjerodavne parametre čvrstoće i deformabilnosti. Drugi je element u projektiranju *model građevine*, njezina težina i korisni tereti, te njezina krutost ili savitljivost. Na osnovi tih elemenata može se složenim računskim metodama utvrditi interakcija između građevine i temeljnog tla. Pri tom se zahtijeva da u svakoj točki dodira tih dvaju tijela pomak bude jednak. Iz toga slijedi raspodjela naprezanja na plohi temelja koja zadovoljava ravnotežu sila i jednakost deformacije. Takav je račun veoma složen, ali se suvremenim formulacijama svojstava materijala, tla i konstrukcije, pomoću programa za elektroničko računalo, može relativno lako provesti. Iz toga slijede dimenzije temelja, sigurnost protiv sloma tla i slijeganja građevine, ali i sile i deformacije koje valja uzeti u obzir pri dimenzioniranju građevine.

Za jednostavne manje građevine služe jednostavniji postupci. Postoje propisi kojima su utvrđena dopuštena naprezanja za tipične vrste tla prema nekim karakteristikama koje se utvrđuju jednostavnim pokusima na terenu ili u laboratoriju. Pri utvrđivanju naprezanja između temelja i tla zanemaruje se složena interakcija sustava, a zadovoljava se samo ravnoteža sila između građevine i temelja. Za ilustraciju postupka neka posluži jednostavna temeljna greda sa dva stupa (sl. 4). Sile stupova Q_1 i Q_2 daju rezultantu R , a linearna raspodjela reakcije tla daje rubna naprezanja temeljne grede σ_1 i σ_2 pri kojima se ostvaruje ravnoteža s rezultantom opterećenja R .



Sl. 4. Temeljna greda. a pogled i sile, b raspodjela naprezanja na tlo, c tlocrt, d momenti savijanja

Ako je dopušteno opterećenje za vrstu tla na mjestu građenja $q = F_s \sigma_s$ (F_s je faktor sigurnosti), dimenzije su temeljne grede dobro odabrane. Za dimenzioniranje debljine grede i potrebne armature služi linija momenata (sl. 4d). Netočnost takve aproksimacije ne znači mnogo kada se radi o malim temeljima, ali netočnosti, međutim, mogu biti neprihvatljive kad se radi o ekstremima, kako se vidi na sl. 5. Prvi primjer prikazuje potpuno savitljiv temelj s jednolično raspodijeljenim opterećenjem. Taj se temelj potpuno prilagođuje slijeganju tla i reakcija je tla u svakoj točki jednaka opterećenju. Drugi je primjer također temelj s jednolično raspodijeljenim opterećenjem, ali neizmjerne krutosti. Slijeganje je tla zbog krutosti temelja u svim točkama jednako, ali je reakcija tla uz rubove temelja mnogo veća nego u njegovu srednjem dijelu. Jednako opterećenje temelja uzrokuje u ta dva primjera sasvim drugačiju raspodjelu reakcije tla, koja je očigledno ovisna o krutosti temelja. To se ne smije zanemariti kad se radi o temeljima velikih građevina koji su opterećeni velikim silama.



Sl. 5. Slijeganje i raspodjela naprezanja ispod opterećenja temelja. a potpuno savitljivi, b potpuno kruti temelj; σ_1 naprezanje pri kojem nastaje slom u tlu, q opterećenje, w slijeganje, I_1 moment krutosti temelja

Zbog toga račun s pretpostavljenom linearnom raspodjelom reakcije tla odgovara samo za manje temelje.

Dubina temelja. Kriteriji su za izbor dubine temelja dopušteno opterećenje i veličina slijeganja. Kad je dubina temelja veća od 2,0 m, nema drugih uvjeta koje bi valjalo uvažiti, osim za temelje mosnih stupova u rijeci gdje ih erozija može potkopati. I kad su spomenuti uvjeti zadovoljeni, ne valja postaviti temelj na površinu terena. Sezonske promjene vlažnosti tla osjećaju se do određene dubine i one uzrokuju promjene obujma i kolebanje razine terena, što se prenosi i na građevinu. Temelj tada valja postaviti najmanje na dubinu gdje taj utjecaj prestaje, a valja isključiti i površinski, rahliji dio tla koji je isprepleten korijenjem i spletom cjevčica i kanala od djelovanja kukaca, glista i glodavaca. Dubina te zone utvrđuje se ispitivanjem i pregledom na terenu, pa temelje valja postaviti u neporemećen materijal ispod te zone.

Djelovanje mraza u toku zimskih mjeseci također veoma utječe u malo propusnom prašinastom tlu. Pri smrzavanju vode u porama nastaju, zbog većeg obujma leda, vlažna naprezanja u kapilarama tla, što privlači vodu iz veće dubine, pa tijekom zimskih mjeseci nastaju leće leda koje dižu površinu tla. Nakon otapanja u proljeće razvlažuje se tlo i smanjuje njegova čvrstoća. Dubina zone smrzavanja iznosi u kontinentalnom dijelu naše zemlje ~80 cm u nizinskom, do 140 cm u planinskim područjima i do 40 cm u primorskom pojasu. Ta se dubina može smanjiti za 20% kad su temelji na šljunkovitu tlu ili jednoličnu pijesku iznad razine podzemne vode, ili na drugome nekoherentnu tlu barem 2,0 m iznad najviše razine podzemne vode. Temelji na stjenovitu materijalu mogu biti i plići, ali moraju biti dobro drenirani.

Korijenje velikih stabala u blizini temelja može također uzrokovati velike deformacije zbog izvlačenja vlage, pa se okolno tlo skuplja, a temelji nejednolično slijedu. Osim toga, postepeni rast drvene mase korijenja povećava obujam tla, pa se na tim mjestima temelji nejednolično izdižu.

Izraz za naprezanje sloma tla pri graničnom stanju plastičnog sloma tla opterećenog na površini terena, s parametrima čvrstoće (c kohezija, φ kut otpora smicanju), glasi:

$$\sigma_{t0} = c N_c + 0,5 \gamma B N_\gamma, \quad (1)$$

a kad je tlo opterećeno na dubini D ispod površine,

$$\sigma_t = \sigma_{t0} + \gamma D N_q. \quad (2)$$

U tim su izrazima faktori nosivosti tla N_c , N_γ , N_q funkcije parametara čvrstoće tla (c , φ), a γ specifična težina tla i B širina temelja (sl. 6). Iz toga slijedi da naprezanje sloma tla raste s dubinom temelja.

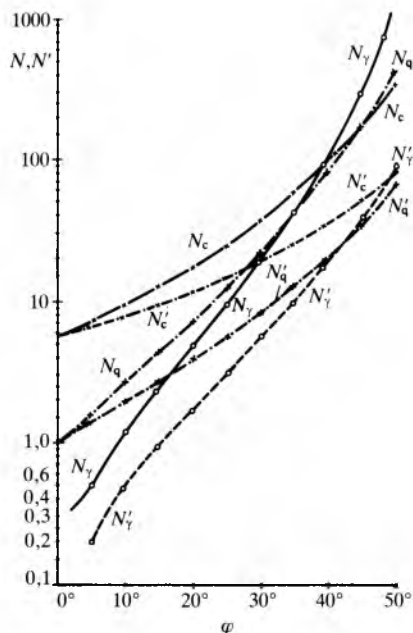
Kad opterećenje tla djeluje u dubini D ispod površine terena, smanjuje se i slijeganje koje nastaje pri jednakom specifičnom opterećenju, jer u toj dubini prirodno djeluje naprezanje γD , pa se dodatno opterećenje od temelja q_0 na površini smanjuje na $q_D = q_0 - \gamma D$, zbog čega je slijeganje manje. Pri tome i modul stišljivosti redovno raste s dubinom tla, pa je i slijeganje dubljeg temelja pri jednakom opterećenju tla manje.

Ima, međutim, primjera kad ukopavanje u veću dubinu može biti i štetno. To se pojavljuje npr. kad tlo nije homogeno, pa u većoj dubini postoje naslage manje čvrstoće i veće stišljivosti. Tada dublji temelj prenosi na te slojeve veće opterećenje, uzrokuje veće deformacije, pa dopušteno naprezanje tla može biti manje. Valja, dakle, pri izboru dubine temelja uvijek uzeti u obzir sve prirodne okolnosti.

Pri temeljenju hidrotehničkih građevina mjerodavna je još i stabilnost tla na učinak uzgona i erozije, pa zbog toga treba dubinu temelja dovoljno osigurati. Dubinu temelja potpornih zidova i građevina na nagnutom terenu valja odrediti i s obzirom na opasnost od klizanja dijela nagnutog terena ispod građevine.

U nekim vrstama jako prekonsolidiranih gлина u aridnim područjima akumulirana je velika reverzibilna energija koja se oslobađa kad se područje navlaži, jer gline veoma upijaju vodu, pa vrlo intenzivno bujaju. Rezultirajuća promjena obujma ovisi o efektivnom naprezanju u tlu i o sezonskim

promjenama vlažnosti, pa temelji u dubini zahvaćenoj tim promjenama u toku sušenja i vlaženja mijenjaju visinski položaj. Kako to redovno nije jednolično, građevine se mogu teško oštetiti. U nekim suptropskim aridnim područjima dubina te zone iznosi i do 6 m, pa pliće temeljenje ne dolazi u obzir.



Sl. 6. Faktori nosivosti N_c , N_γ i N_q prema Terzaghiju. N za opći slom, N' za lokalni slom

Za računanje interakcije između građevine, temelja i tla dugo je vremena tlo modelirano kao tzv. *Winklerov medij*, u kojemu je deformacija u svakoj točki linearna funkcija naprezanja prema izrazu

$$w(x) = \frac{\sigma(x)}{k}, \quad (3)$$

gdje je $w(x)$ vertikalni pomak točke x , $\sigma(x)$ naprezanje u točki x , a k modul reakcije tla (kN/m^3). Pri tome se pretpostavlja da je za modul reakcije tla mjerodavna konstanta tla. Taj je modul nepotpun jer u stvarnim odnosima pomak točke x ne ovisi samo o naprezanju u toj točki, nego i o opterećenju susjednih točaka koje se preko tangencijalnih naprezanja prenose i uzrokuju deformacije u prostoru. Taj modul, iako veoma gruba aproksimacija stvarnosti, još se i danas često primjenjuje u praksi, jer je računski jednostavan i jer se jednostavno primjenjuje pomoću tablica. Danas kad se gotovo svugdje raspolaže elektroničkim računalima velikog kapaciteta, primjena tog modula više nema ni opravdanja ni prednosti.

Umjesto s konstantnim modulom reakcije tla, danas se može računati s modulom stišljivosti tla koji se može mijenjati s dubinom, pa se slijeganje u svakoj točki kontakta između temelja i građevine računa iz izraza

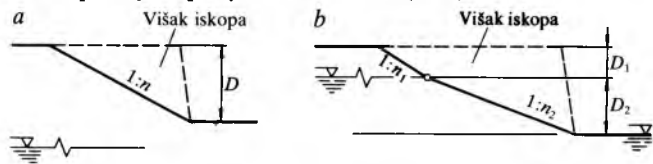
$$w(x) = \int_0^z \frac{\sigma(xk)_z}{M(xz)} dz, \quad (4)$$

gdje je $\sigma(xk)_z$ naprezanje u tlu ispod točke x od opterećenja u točkama k ispod površine temelja u dubini od 0 do z , a $M(xz)$ modul stišljivosti tla u dubini z ispod točke x . Ta formulacija omogućuje mnogo vjernije simuliranje stvarnih deformacija što nastaju zbog opterećenja tla konstrukcijom, a koje se prenosi preko temelja. Račun se provodi metodom konačnih razlika ili metodom konačnih elemenata pomoću programa koji uzima u obzir ovisnost između deformacije temelja i raspodjele reakcije od opterećenja, koja također ovisi o deformacijama $w(x)$.

Duboki masivni temelji mogu se graditi ovisno o lokalnim uvjetima na različite načine: a) iskopani u otvorenoj građevnoj

jami, *b*) iskopani u jami s vertikalnim razuprtim stijenama (žmurje) i zidanjem na površini terena i spuštanjem na potrebnu dubinu potkopavanjem iznutra.

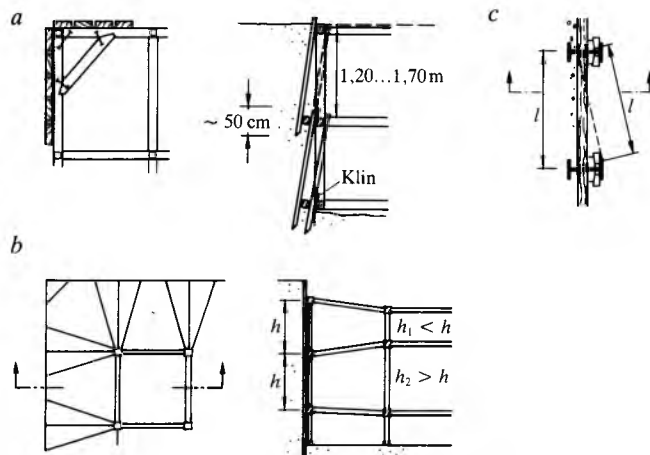
Kopanje dubokog temelja do potrebne dubine u otvorenoj građevnoj jami moguće je kad je prostor oko mjesta građenja slobodan, kad se jama može iskopati s kosinama sa sigurnim nagibom $1:n$, a podzemna se voda može crpljenjem evakuirati bez nepovoljnih posljedica za okoliš (sl. 7).



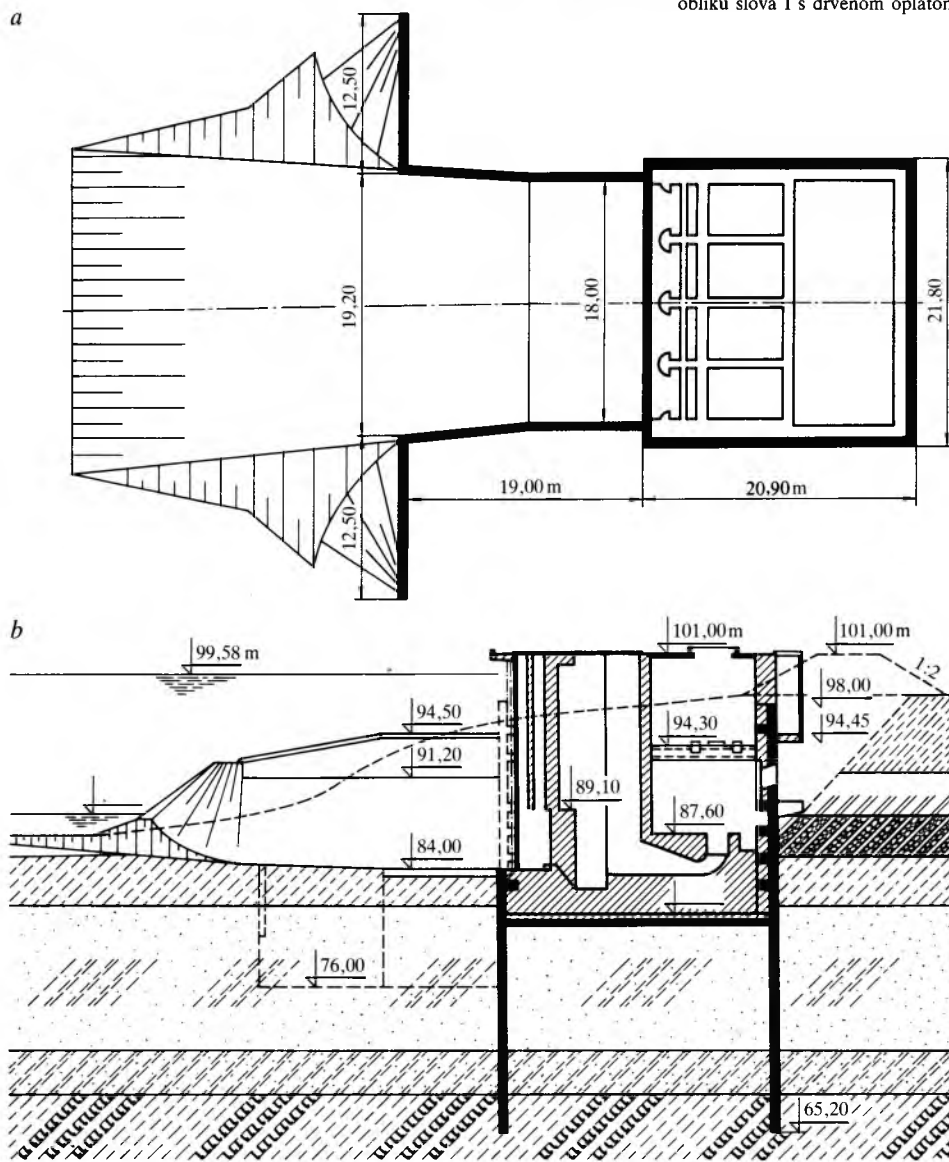
Sl. 7. Iskop otvorene građevne jame s kosinama. *a* dno jame iznad razine podzemne vode, *b* dno jame ispod razine podzemne vode

Kopanje jame do potrebne dubine pod zaštitom žmurja potrebno je kad oko građevine nema slobodnog prostora za kosine otvorenog iskopa ili kad je cijena velikog otvorenog iskopa za dublje temelje veća od cijene jame sa žmurjem. Žmurje oko građevne jame za duboki temelj može se ostvariti na različite načine (sl. 8). Zabijena drvena oplata može se primijeniti samo za manje radove kojima nije potrebna jača mehanizacija. Za veće, mehanizirane radove dolazi u obzir

čelično zabijeno žmurje koje se postepeno, kako napreduje iskop, međusobno razupire. Alternativno mogu se na određenim razmacima zabiti primjereni čelični nosači u obliku slova I između kojih se postepeno, kako napreduje iskop, ugrađuju drvene ili betonske platnice. Duboki temelji nekih poslovnih zgrada u Ljubljani iskopani su na taj način.



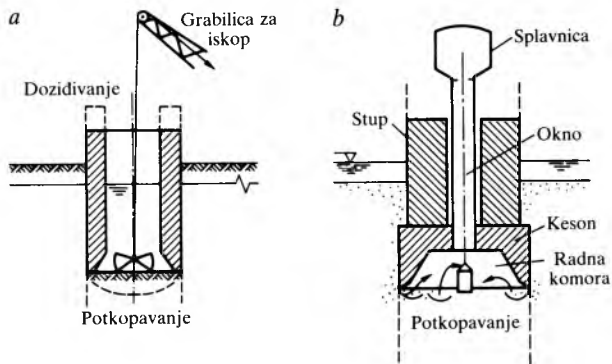
Sl. 8. Razupiranje iskopa građevne jame. *a* zabijena oplata u sipkom tlu, *b* čelično razuprto žmurje (tlocrt i poprečni presjek), *c* zabijeni čelični nosači u obliku slova I s drvenom oplatom



Sl. 9. Tlocrt (*a*) i presjek (*b*) crpne stanice za rashladnu vodu TE Sisak, te kontinuirane betonske dijafragme za osiguranje iskopa građevne jame duboke 26 m

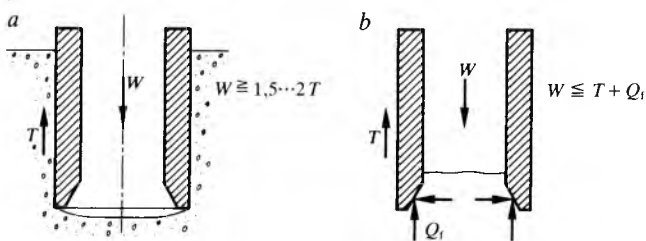
Duboki temelj za crpnu stanicu za rashladnu vodu TE Sisak (sl. 9) iskopan je pod zaštitom kontinuirane armirano-betonske dijafragme, duboke do 26 m i ukliještene u nepropusni sloj čvrste gline, kako bi se građevna jama zaštitila od prodora vode iz naslage pijeska na kojoj je postavljen temelj. Nakon što je dovršen iskop i sagrađeni temelji strojeva i potrebni dovodi i odvodi za pumpe, prednja je dijafragma srušena na dno dovodnog kanala radi zaštite od erozije.

Temelji koji se zidaju na površini i spuštaju na predviđenu dubinu potkopavanjem iznutra mogu biti *bunari* ili *kesoni*. Bunari su dolje otvoreni (sl. 10a), materijal se iz njih kopa u suhove ako se ukopava u nepropusno tlo, ili se iz njih crpi voda pomoću grabilice ako se kopa iz vode.



Sl. 10. Masivni duboki temelji. a bunar, b pneumatski keson

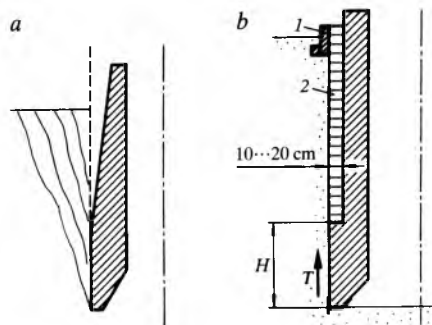
Kesoni imaju na dnu radnu komoru nepropusnu za vodu u koju se ulazi kroz okno iz splavnice iznad površine terena. Splavnica, okno i radna komora pod tlakom su komprimiranog zraka kojim se voda iz radne komore istiskuje do razine noža. Potkopavanjem ispod noža i iskopavanjem materijala iz komore keson i dio temelja iznad njega postepeno se spuštaju do predviđene kote temelja. Iskopani se materijal pomoću dizala izvlači kroz okno u splavicu iz koje se preko komora s dvostrukim zaporom, ispod i iznad materijala, ispušta bez gubitka komprimiranog zraka (sl. 10b). Uvjet je za uspješno spuštanje takvih temelja da njegova težina u svakoj fazi rada bude barem 1,5...2 puta veća od ukupnih sila otpora i trenja na njegovu plaštu. Mora uz to biti zadovoljen i uvjet kojim se treba spriječiti da se nož zbog prevelike težine ne ukopava previše duboko u tlo (sl. 11). Otpor trenja na plaštu rezultat je tlaka tla na plašt, a može se smanjiti na različite načine.



Sl. 11. Ravnoteža sila pri spuštanju bunara. a nož potkopan i bunar se spušta, b nož u ravnoteži nakon spuštanja, W težina, T trenje, Q_1 sila sloma

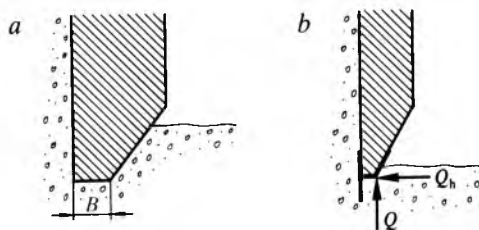
Plašt se može suziti prema gore kako bi se spuštanjem tlak tla smanjio na aktivni tlak i tako smanjio otpor trenja (sl. 12a), ili se po obodu plašta postave mlaznice kroz koje se povremeno ubrizgava voda pod tlakom i tako razrahljuje tlo i smanjuje trenje. Nedostatak je obaju načina da poremećuju tlo oko plašta, što može biti nepoželjno. Tome treba dodati i okolnost da se tijekom spuštanja okno stalno malo naginje, što na jednoj strani plašta povećava tlak na tlo i trenje. Najuspješnijim se pokazalo da se širina gornjeg dijela bunara smanji za 10...20 cm (sl. 12b), pa spuštanjem nastaje slobodan prsten koji se stalno puni suspenzijom od stabilizirana bentonita. Hidrostatski tlak suspenzije uravnotežuje aktivni tlak tla, pa se na tom dijelu plašta trenje sasvim eliminira. Već spomenuti uvjeti ravnoteže zadovoljavaju se izborom visine donjeg dijela plašta, na koji djeluje trenje punom

vrijednošću, i debljinom plašta, što određuje ukupnu težinu bunara.



Sl. 12. Mogućnosti za smanjenje trenja na plaštu bunara. a skošena vanjska ploha plašta, b zračnost s bentonitnom suspenzijom za eliminiranje trenja uz plašt; 1 uvodni zid, 2 bentonitna suspenzija, H visina vodećeg dijela plašta na koji djeluje trenje T

Oblik i dimenzije bunarskog noža utvrđuju se tako da bude zadovoljen drugi spomenuti uvjet kroz sve slojeve različite čvrstoće kroz koje se bunar spušta. Prikladan oblik noža za bunar ili keson koji se spušta kroz tlo male čvrstoće vidi se na sl. 13a; osnovka ima određenu širinu B kako bi se spriječilo nekontrolirano previše duboko prodiranje bunara prilikom spuštanja. Kad se bunar spušta kroz tlo veće čvrstoće, osnovka se pojačava čeličnim nožem od zavarenih limova (sl. 13b). U oba primjera beton se noža pojačava armaturom potrebnom da preuzme horizontalne komponente sile Q na nož i da se premoste opterećenja koja nastaju kad nož naiđe na zapreku.

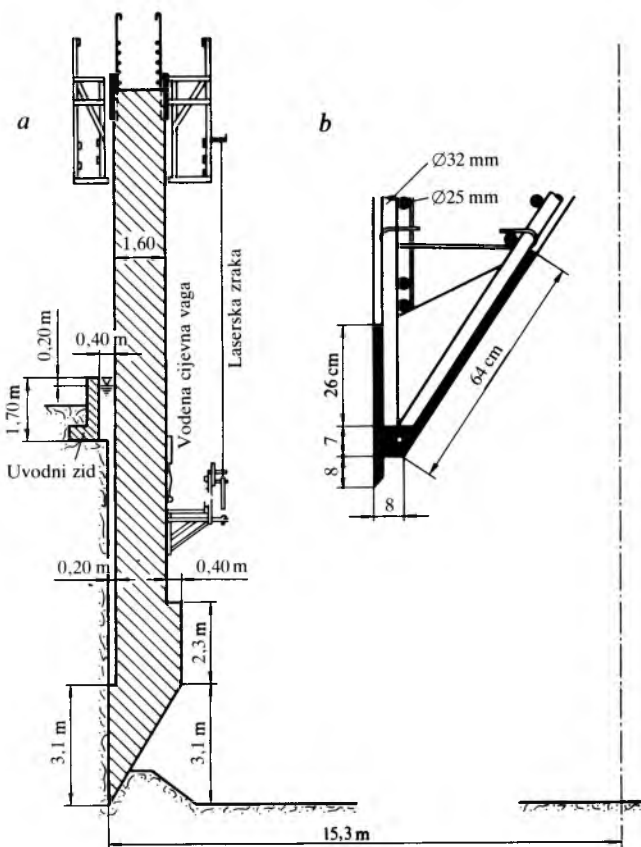


Sl. 13. Oblici bunarskog noža. a nož za spuštanje u meko tlo, b nož pojačan limenom oblogom za spuštanje kroz tvrdo tlo sa zaprekama (panjevi, samci i sl.)

Kad se zbog različitih okolnosti na terenu duboki masivni temelj ne može spustiti na željenu kotu pomoću bunara, može se temelj postaviti na pneumatski keson. Iz njega se voda istisne zrakom, kojemu je tlak nešto veći od hidrostatskoga, do razine noža, pa je materijal uzduž noža uvijek suh i pristupačan. To je veoma korisno kad se temelj spušta kroz tlo sa zaprekama (panjevi, samci i sl.). Keson je sanduk sa stropom i nožem na donjem perimetru. Kroz strop prolaze okna za ulaz radnika i za izvoz iskopanog materijala. Na vrhu su okna splavnice s dvostrukim vratima na ulaznim komorama za radnike i za izvlačenje materijala, tako da okno i komora uvijek ostaju pod zračnim tlakom. Brzina kojom se keson ukopava doseže 1...2 m na dan pri neprekidnom radu u više smjena. Zbog koncentracije dušika apsorbiranog u krvi radnika pri dužem zadržavanju u komprimiranoj atmosferi valja poštivati stroge propise o vremenu rada u kesonu i o trajanju dekompresije pri izlaženju iz kesona. Zato je omjer između trajanja rada pod tlakom većim od 0,3 MPa i odmora takav da je rad s kesonom veoma skup, pa se ne isplati za dubine temelja veće od 30 m ispod razine podzemne vode.

Jedan od najvećih otvorenih bunara spušten je za temeljenje strojarne reverzibilne HE Obrovac na Zrmanji. Agregati turbina-pumpa zahtijevali su temeljenje oko 55 m ispod razine Zrmanje, pa je odlučeno da se iskop i temeljenje strojarne obavi pomoću otvorenog bunara, vanjskog promjera 30,0 m, koji je spušten 60,0 m duboko ispod površine terena. Potanko geološko kartiranje, bušenje i ispitivanje uzoraka u laboratoriju pokazali su da se tlo na mjestu

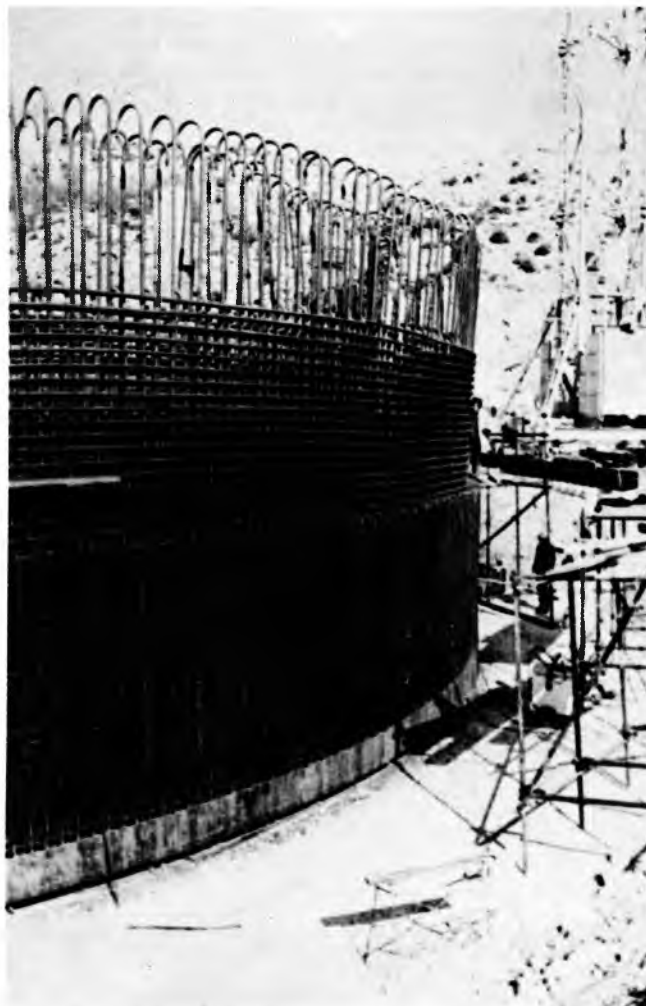
temeljenja sastoji od homogene naslage veoma prekonsolidirane gline velike plastičnosti. Čvrstoća je materijala bila velika, pa su razmotrene dvije varijante temeljenja: kopanje i uzastopno betoniranje zaštitnog obodnog zida (tunelska metoda), te spuštanje cilindričnog plašta bunara, koji se betonira na površini terena i postepeno potkopava dok njegovo dno ne dosegne predviđenu kotu temeljenja. Usporedba troškova i vremena građenja pokazala je da varijanta s bunarom ima veliku prednost pa je ona i odabrana. Poprečni presjek plašta bunara i detalji noža vide se na sl. 14, a oplata i armatura donjeg prstena s nožem na sl. 15. Prvi prsten bunara visine ~5 m betoniran je na površini, a njegov donji rub izrađen je u obliku noža i pojačan čeličnom oblogom radi sigurnog prodiranja u tlo. Vanjski polumjer plašta bunara smanjen je na visini od 3,1 m za 20 cm, kako bi se smanjilo trenje tijekom spuštanja. Taj je prstenasti prostor ispunjen vodenom suspenzijom aktiviranog bentonita (~1,1 t/m³), pa je tako potpuno eliminirano trenje između betonske površine plašta i okolnog terena, dok je hidrostatski tlak isplake sprečavao urušavanje vertikalne stijene okolnog iskopanog terena. Taj je hidraulički omotač jedan od preduvjeta za uspješno spuštanje tako velikog bunara.



Sl. 14. Bunar strojarnice HE Obrovac. a presjek s uređajima za kontrolu, b detalj čelične obloge i armature noža

Pri donošenju konačne odluke o prihvaćanju takva temeljenja strojarnice valjalo je uzeti u obzir i moguće posljedice promjena koje nastaju zbog naprezanja tla oko iskopanog okna, što uzrokuje i promjene obujma tla. To je posebno važno za izbor širine prstena ispunjenoga bentonitnom suspenzijom, da zbog bujanja ne bi granica iskopa ipak došla u kontakt s plaštem bunara i tako se povećalo trenje, što bi moglo spriječiti dalje spuštanje. U tu svrhu provedena su laboratorijska ispitivanja omjera između naprezanja i obujma uzoraka tla te složeni proračuni metodom konačnih elemenata, koji su pokazali da je dovoljna širina prstena ispunjena isplakom od 20 cm, a to se u izvedbi pokazalo točnim.

Prvi je prsten bunara ukopavan u tlo potkopavanjem terena iznutra oko njegova noža, pa je tako nastavljeno



Sl. 15. Armatura i čelična obloga donjega vodećeg bunarskog prstena strojarnice HE Obrovac

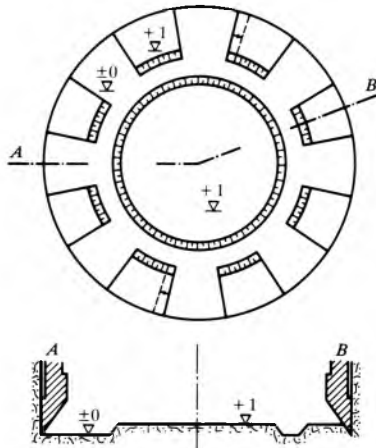
betoniranje plašta bunara da bi njegova površina uvijek bila iznad razine terena. Za betoniranje je odabrana klizna oplata (sl. 16) promjera od 30 m, što je također svojevrsan rekord. Bilo je potrebno posebno hidrauličko postrojenje za jednolično podizanje oplata po cijelom opsegu bunara. Da bi se uspješno spustio bunar do predviđene razine temelja, valjalo je riješiti održavanje pravocrtne izvodnice plašta pri podizanju oplata, jer se njegova os tijekom spuštanja može stalno naginjati unutar stanovitih granica zbog nejednoličnog prodiranja noža pri potkopavanju. To se postiglo pomoću dva samostalna kontrolna uređaja. Jedan je od njih vodena cijevna vaga s osam pokazivača razine, montirana na razini konzole na najdonjem prstenu bunara. Pomoću te vage



Sl. 16. Bunar strojarnice HE Obrovac s kliznom oplatom

kontroliralo se i upravljalo spuštanjem bunara kako bi njegova osnovka što manje odstupala od vodoravne ravnine. Drugi je uređaj osiguravao održavanje ravnih izvodnica cilindričnog plašta bunara, što nije bilo moguće kontrolirati niti pomoću viskova zbog stalnog nagibanja osnovke i osi bunara, a niti geodetskim motrenjem izvana. Zato su na gornjem rubu prvog prstena postavljena četiri lasera i tako učvršćena da je njihova zraka bila okomita na osnovku bunara, odnosno paralelna s njegovom osi. Zrake su služile kao stalni reperi za centriranje oplata, koja je tako klizanjem napredovala uvijek paralelno s idealnom osi bunara i osiguravala cilindričan oblik plašta.

Materijal se na dnu bunara kopao pomoću bagera žličara, utovarivao u čelične sanduke i dizao na površinu dizalicom. Da bi se osiguralo jednolično spuštanje, kopali su se usjeci



Sl. 17. Shema potkopavanja bunarskog noža strojarne HE Obrovac pomoću bagera



Sl. 18. Kapanje usjeka oko noža za spuštanje bunara strojarne HE Obrovac pomoću bagera



Sl. 19. Potkopani nož istiskuje preostale potporne klinove u bunaru strojarne HE Obrovac

uz rub noža, naizmjenice na osam nasuprotnih mjesta (sl. 17, 18 i 19), koji su postepeno proširivani dok se nije slomio preostali materijal i bunar se utisnuo dublje u tlo. Tada je iskopan materijal iz srednjeg dijela dna bunara i postupak se ponavljao dok bunar nije dosegao predviđenu kotu temelja. Tada je najprije u prsten oko plašta utisnut gust plastičan cementni malter da bi se bunar učvrstio u okolno tlo. Zatim se oprezno, također naizmjenično, ukopao usjek ispod noža i konačno betonirao prsten armirane konstrukcije dna temelja.

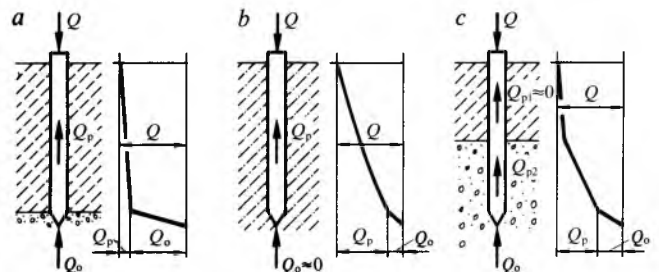
Težina se tog pothvata može ocijeniti kad se uoči da je ukupna masa bunarskog plašta, visokog 60 m, u konačnoj fazi spuštavanja iznosila ~20000 t, a da za uspješnu kontrolu potkopavanja i spuštavanja trenje na plaštu ne bi smjelo iznositi više od polovice težine plašta. Tim se uvjetima moglo udovoljiti jedino prstenom od bentonitne suspenzije oko plašta i strogom kontrolom vertikalnosti bunarske osi tijekom spuštavanja, kako plašt ne bi nalegao na teren, što bi povećalo trenje i otpor spuštanju te nedopušteno opterećivalo betonski cilindar plašta. Vrlo savjesnim radom tehničkog osoblja spriječene su sve moguće havarije.

Iskopavanje 43000 m³ čvrsta glinovita materijala iz okna trajalo je 120 dana, pa je za nešto više od četiri mjeseca takvo temeljenje uspješno dovršeno.

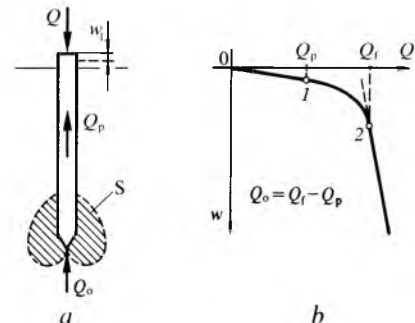
Piloti (šipovi) (v. *Piloti*; TE 10, str. 280) služe od najstarijeg doba za temeljenje na mekom tlu, prenoseći sile građevine u veću dubinu u jednoličnom tlu ili u dublji sloj veće čvrstoće u slojevitom tlu. Do prije jednog stoljeća to su bili mahom drveni piloti, dok je u novije doba razvijeno više raznovrsnih postupaka za brzu i sigurnu izvedbu pilota od betona, armiranog betona i čelika.

Piloti prenose silu u tlo: a) kao stupovi kad prolaze kroz meki sloj do čvrste podloge, b) trenjem na plaštu po cijeloj dubini kad su ugrađeni u homogeni sloj tla i c) trenjem u donjem dijelu plašta kad gornjim dijelom prolaze kroz meki sloj (sl. 20). Kad je pilot opterećen silom Q koja se povećava, pilot se postepeno utiskuje u tlo, pa raste otpor smicanja uz plašt i ispod osnovke pilota (sl. 21). Već pri malom ukupnom slijeganju w_1 pilotne glave djeluje puno trenje uz plašt, nakon čega pilot naglje prodire i aktivira otpor smicanja uz osnovku, koji se prevladava negdje oko točke 2 u dijagramu Q, w (sl. 21), kad i malo povećanje sile Q uzrokuje jako prodiranje pilota, pa je njegova moć nošenja premašena.

Ponekad se iz dijagrama Q, w pokusnog opterećenja ne može dosta pouzdano utvrditi sila sloma ili ona u pokusu nije



Sl. 20. Prenošenje sile pilota u tlo. a) na vrhu pilota (djeluje kao stup), b) na plaštu pilota, c) na plaštu pilota u donjem sloju veće čvrstoće



Sl. 21. Slijeganje glave pilota pri povećanju opterećenja. a) pilot (S zona plastičnog sloma), b) ovisnost slijeganja o opterećenju

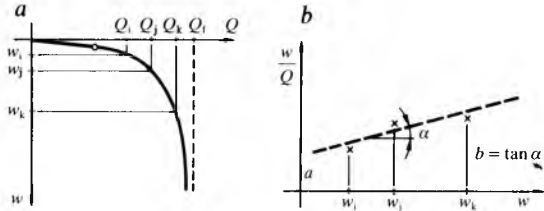
dostignuta. Tada pomaže aproksimativna ekstrapolacija osnovana na pretpostavci da je dio krivulje od točke *l* do kraja hiperbola kojoj asimptota odgovara vrijednosti sile sloma Q_f . Hiperbola se može prikazati izrazom

$$Q_f = \frac{w}{a + bw}, \quad (5)$$

pa je

$$\frac{w}{Q_f} = a + bw, \quad (6)$$

gdje su *a* i *b* parametri pravca na sl. 22b. Kako je umnožak *bw* u tom izrazu pri graničnoj sili Q_f velik prema parametru *a*, može se parametar *a* zanemariti, pa je granična sila sloma određena pokusnim opterećenjem $Q_f = 1/b$.



Sl. 22. Utvrđivanje sile sloma pilota Q_f . a) dijagram slijeganja pri pokusnom opterećenju, b) ovisnost slijeganja *w* i specifičnog slijeganja w/Q .

Sila sloma pilota Q_f utvrđuje se u praksi na dva načina: a) pomoću dinamičkog otpora prodiranju za vrijeme zabijanja pretfabriciranih pilota i b) računom sile sloma pomoću geotehničkih podataka o tlu, otpora trenja uz plašt i parametara čvrstoće tla oko osnovke pilota. Prva je metoda manje pouzdana zbog razlike između dinamičkog otpora pilota i njegova otpora pri statičkom opterećenju kojemu je redovno podvrgnut. U praksi se često zbog tih razlika stvarna nosivost pilota provjerava pokusnim opterećenjem nekoliko pilota do iscrpljenja nosivosti (Q_f na sl. 21).

Dopušteno opterećenje pilota jednako je računskoj sili sloma podijeljenoj faktorom sigurnosti koji prema propisima iznosi $F_s = 3$. Valja uočiti da piloti koji silu prenose u tlo preko plašta i osnovke pri radnom opterećenju angažiraju najvećma trenje na plaštu, dok je silu koju preuzimaju osnovkom redovno malena. Faktor je sigurnosti za iscrpljenje trenja na plaštu ~ 1 , a za iscrpljenje otpora pod osnovkom mnogo veći od 3.

Valja još napomenuti da silu koju može prenijeti grupa *m* + *n* pilota nije aritmetički zbroj nosivosti pojedinih pilota, nego ga valja smanjiti faktorom redukcije, koji ovisi o

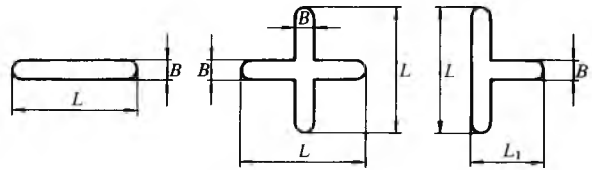


Sl. 23. Stroj za izvedbu pilota tipa Franki

rasporedu, broju i razmaku između pilota ispod jednog od temelja. Jedino ako je razmak *s* između pojedinih pilota kružnog presjeka promjera *B* veći od $s = 1,57 Bmn/(m + n - 2)$, faktor je redukcije jednak jedinici. Kad piloti prenose silu na osnovku bez trenja na plaštu, najmanji razmak među njima treba da je veći od $s = 2B$. U stručnoj literaturi ima različitih izraza za računanje faktora redukcije.

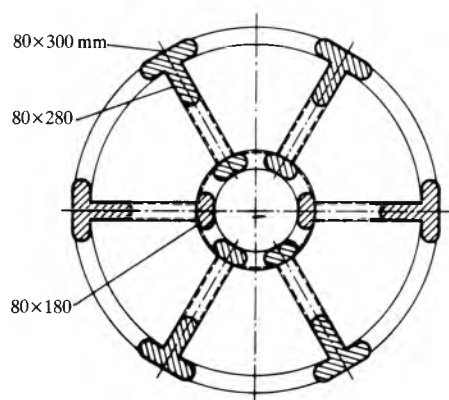
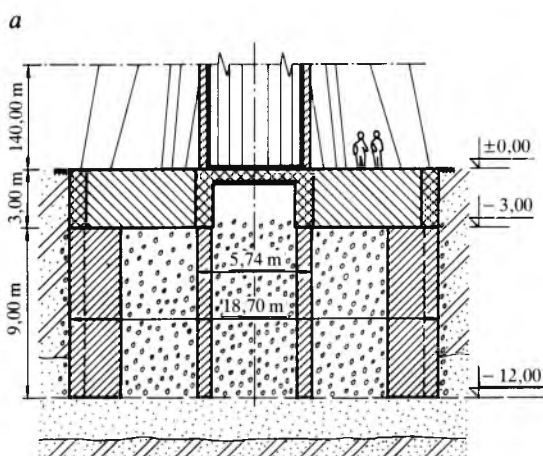
Piloti za temeljenje velikih građevina mogu biti zabijeni gotovi piloti i bušeni piloti betonirani u tlu. Zabijeni gotovi piloti mogu biti od drva s okovom šiljka i glave, pretfabricirani od armiranog ili prednapetog betona, ili čelični od različitih valjanih profila ili cijevi. Zabijeni piloti mogu se ugraditi i tako da se u tlo zabije limeni kalup koji ostaje u tlu. Kad je kalup zabijen, ispuni se betonom bez armature ili s njom, prema karakteristikama opterećenja. Mogu se piloti ugraditi i tako da se u teren zabije cijev potrebnog promjera u koju se zbija beton uz istodobno izvlačenje cijevi. U nas se često primjenjuju tako građeni piloti tipa *Franki* (sl. 23). Takvi piloti imaju veoma hrapavu vanjsku površinu, zbijaju tlo oko sebe i imaju velik otpor trenja na plaštu. Najveći promjer zabijenih pilota iznosi do ~ 50 cm, pa to ograničuje i dopuštenu silu pilota koja može doseći do 850 kN.

Piloti mnogo većeg promjera mogu se izraditi bušenjem. Jedan od načina da se iskopani otvor zaštiti od zarušavanja jest ugrađivanje limene obložne kolone koja se prilikom ispunjavanja betonom postepeno izvlači za ponovnu upotrebu (piloti *Benoto*). Drugi je način da se izbuši rupa bez zaštitne cijevi, a urušavanje se tla sprečava ispunjavanjem otvora suspenzijom bentonita u vodi pogodne gustoće. Zatim se pomoću lijevka ugrađuje beton i zbija pervibratorom, a može se ugraditi i potrebna armatura. Posebni strojevi za bušenje omogućuju izradbu pilota velikog promjera, čak do 2 m, pa pojedini pilot može preuzeti veoma velike sile (i do 20000 kN). Posebnim se strojevima za bušenje mogu izraditi i piloti izdužena i pravokutna presjeka, te presjeka u obliku slova X i T (sl. 24). Takvi armirani piloti mogu preuzeti i velike momente savijanja.



Sl. 24. Različiti tlocrtni presjeci bušenih pilota

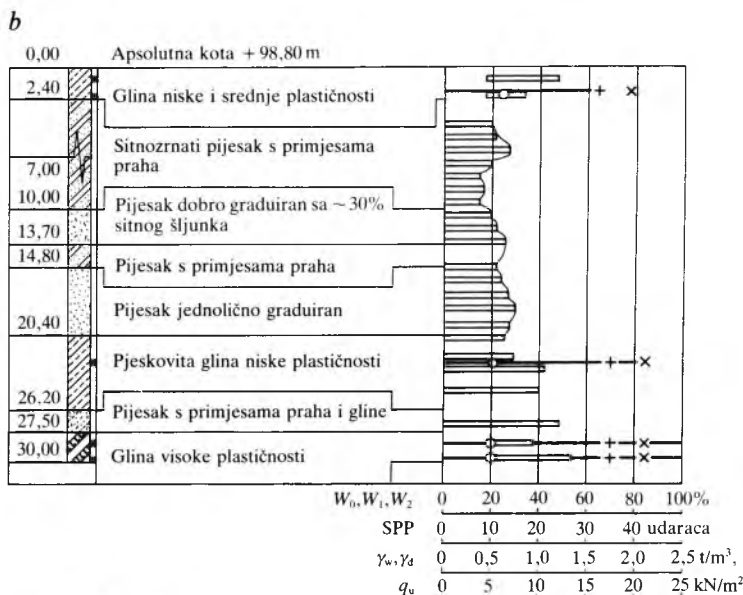
Bušeni piloti bez obloge, poprečnog presjeka u obliku slova I i T, upotrijebljeni su za temeljenje dimnjaka termoelektrane u Sisku, visokog 140 m. Masa je armiranobetonskog dimnjaka 4100 t. Sondiranjem je terena utvrđeno da se tlo ispod dimnjaka sastoji od rastresita do srednje zbijena pijeska do dubine od 20,4 m, koji leži na debeloj naslagi pliocenske gline polučvrsta konzistentnog stanja. Za izbor temeljenja tako visoke građevine bio je mjerodavan kriterij slijeganja, a pri plitkom temeljenju ono bi bilo nedopustivo veliko. Zato je odlučeno da se dimnjak postavi na duboki temelj od bušenih pilota. Iz dobivenih geotehničkih parametara svojstava tla proračunano je da bi opterećenje sloma tla na dubini od 12 m, predviđenoj za temeljenje osnovke pilota, iznosilo oko 9500 kN/m². Za provjeru tog rezultata izrađen je pokusni pilot presjeka u obliku slova I, s dimenzijama 50 × 120 cm, koji se opterećen sa 6500 kN/m² slegao svega 20 mm. S tim je podacima temelj projektiran i ostvaren kako je prikazano na sl. 25. Cilindar dimnjaka promjera 5,4 m ima šest rebara u donjem dijelu. Cilindar se oslanja na armiranobetonski prsten promjera 5,74 m, širine 0,8 m i debljine 3,0 m. Šest rebara dimnjaka također se oslanja na armiranobetonski prsten vanjskog promjera 18,7 m, a oba su prstena spojena sa šest armiranobetonskih rebara. Vanjski prsten leži na šest bušenih pilota presjeka u obliku slova T, a unutrašnji na šest bušenih pilota presjeka u obliku slova I. Svi su piloti bušeni 12 m duboko ispod površine terena i osnovke im leže u sloju srednje zbijena pijeska. Svaki vanjski pilot prenosi maks-



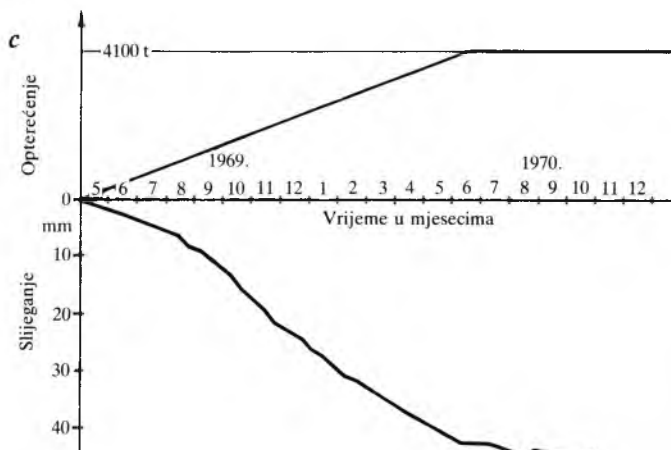
malnu silu od 7900 kN pri specifičnom opterećenju tla od 1780 kN/m², pa je faktor sigurnosti za slom tla ispod osnovke veći od 5. Unutrašnji pilot prenosi maksimalnu silu od 1500 kN, uz opterećenje tla od 2150 kN/m² i s faktorom sigurnosti od 5,5. Na osnovi geotehničkih podataka proračunano je slijeganje dimnjaka približno 55 mm. Nakon dovršenja dimnjaka izmjereno je slijeganje od prosječno 42 mm.

Temeljenje u dubokoj vodi ili moru često je veoma složen zadatak koji zahtijeva maštu i snalažljivost da bi se našlo sigurno i ekonomično rješenje. Ponekad je najprikladnije cijelu građevinu ili njen dio s temeljem sagraditi u doku ili na navozu tako da nakon porinuća može plutati. Kad je konstrukcija, najčešće od armiranog betona, gotova, ona se porine i dotegli na mjesto građenja, gdje se postepenim opterećivanjem spusti na dno. Temelj se može koncipirati kao bunar ili kao pneumatski keson, da bi se ukopao do dubine gdje se nalazi dovoljno čvrsto tlo. Tako su sagrađeni temelji nekih velikih mostova preko rijeka u vodi dubokoj i više od 30 m (most preko Mississippija kod New Orleansa u SAD).

Kad je voda veoma duboka i mirna, a tlo već na dnu može preuzeti opterećenje, dovoljno je nasloniti građevinu na izravnanu površinu dna. Tako je temeljena platforma za naftu Ninian u Sjevernom moru blizu Shetlandskih otoka. Morsko dno 136 m ispod razine mora na mjestu građenja sastoji se od zbijena pijeska pa temelj nije trebalo ukopavati. Konstrukcija platforme od armiranog betona sagrađena je na navozu i spuštena u more, pa je plutajući dotegljena na mjesto građenja. Tu je kontrolirano punjena morem dok nije sjela na dno (sl. 26 i 27). Temeljna ploča, visoka 1,4 m, ima četiri koncentrična prstena s dijafragmama od armiranog betona, koje pod vlastitom težinom prodiru u pijesak i tako odmah osiguravaju stanovit bočni otpor horizontalnim silama valova. Osim toga, osam radijalnih dijafragma dijeli osnovku na 33



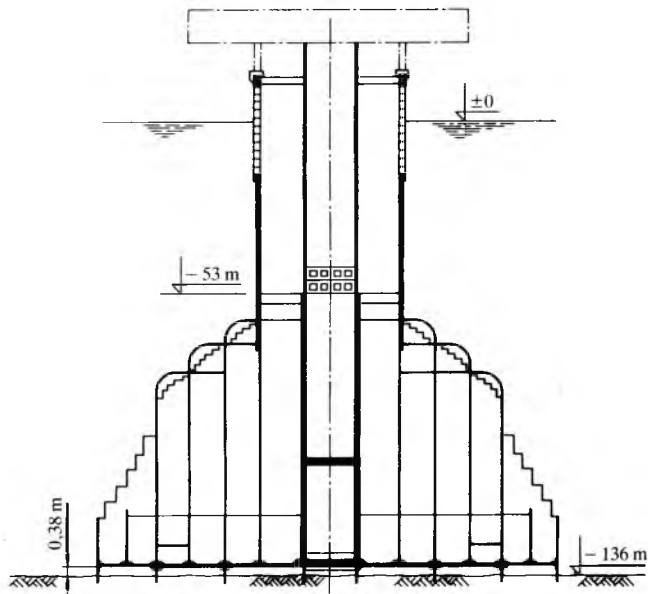
- Aksijalna čvrstoća (q_u)
- ▬ Standardni penetracijski pokus (SPP)
- ▭ Atterbergove granice (W_L, W_P)
- Prirodna vlažnost (W_0)
- +
 Suha gustoća (γ_d)
- ×
 Vlažna gustoća (γ_w)



Sl. 25. Temelj dimnjaka TE Sisak. *a* poprečni presjek i tlocrt, *b* sastav i svojstva tla, *c* opterećenje temelja za vrijeme građenja i slijeganje temelja dimnjaka

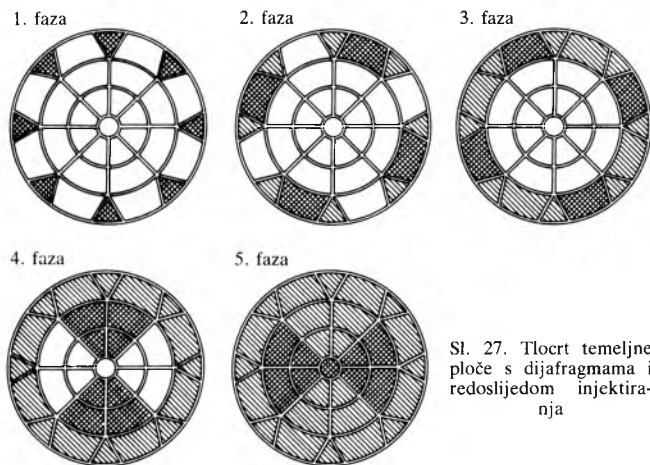
ćelije koje se pojedinačno mogu ispuniti injektiranjem cementne suspenzije. Nakon što se platforma punjenjem morem opteretila i dijafragma prodrle u pijesak, ostao je slobodan prostor od ~40 cm između morskog dna i donje plohe temelja. Taj je prostor valjalo ispuniti kako bi se uspostavio tijesan kontakt između osnovke konstrukcije i morskog dna radi potpunog i jednoličnog prenošenja vertikalnih naprezanja od težine konstrukcije i drugih opterećenja (vjetar, valovi) na temeljno tlo.

Nakon dugotrajnog ispitivanja odobrena je kao najpovoljnija masa za injektiranje prostora između morskog dna i temelja smjesa portland-cementa i elektrofilitarskog pepela suspendirana u morskoi vodi. Pošto je platforma spuštena na mjesto i balastom dovoljno opterećena, dopremljen je brod sa 3000 t cementa, 1200 t elektrofilitarskog pepela, opremljen svim uređajima za doziranje, miješanje suspenzije i pumpanje. Brod je bio usidren i vezan za platformu. Pumpe na brodu spojene su pomoću crijeva s uređajima za injektiranje koji su smješteni u srednjem oknu platforme. Uređaj za injektiranje nalazio se na dubini od 53 m ispod razine mora, kako bi



Sl. 26. Poprečni presjek platforme Ninian

stupac suspenzije do priključaka za injektiranje na osnovi temelja kompenzirao tlak mora u toj dubini. Tu je smještena još miješalica za ponovno miješanje smjese, a ispod nje, u dva kata, po 8 klipnih pumpa za tlak do 4,0 MPa i većeg kapaciteta za tlak do 1,0 MPa. Odatle je smjesa kroz cijevi pumpana do osam mjesta koja su istodobno injektirana u svakoj fazi rada (sl. 27). Cijela je osnovka injektirana u pet faza. Kako je masa punila pojedine prostore, more je iz njih ispušteno kroz posebne cijevi, koje su bile zatvorene ventilima kad je iz njih počela izlaziti nerazrijeđena smjesa. Tada je injektiranje nastavljeno dok nije dosegnut granični tlak od 1,0 MPa u srednjim i 1,0...2,0 MPa u vanjskim ćelijama. Prilikom injektiranja ćelija u vanjskom prstenu ronionci su kontrolirali brtvenje dijafragme oko vanjskog ruba temelja. Tijekom 7 dana neprekidnog rada sve su ćelije ispunjene, a ukupni je potrošak mase iznosio 4900 m³ cementa i pepela.



Sl. 27. Tlocrt temeljne ploče s dijafragmama i redoslijedom injektiranja

S obzirom na značenje kvalitete ispune za sigurnost gotove platforme sve su faze rada rigorozno kontrolirane i dokumentirane, a uzorci su smjese ispitivani, što je bila osnovna dokumentacije za konačno preuzimanje gotove platforme i njenu predaju u eksploataciju.

LIT.: K. Terzaghi, Theoretical Soil Mechanics. J. Wiley & Sons, New York 1943. – F. Verić, Proračun plošnih temeljnih konstrukcija na uslojenom tlu (disertacija). Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb 1976. –

E. Nonveiller, Mehanika tla i temeljenje građevina. Školska knjiga, Zagreb 1981. – E. Nonveiller i dr., Gründungsschacht 60 m tief als Brunnen abgesenkt. Bauingenieur, Berlin 1982. – S. Polić, Numerički informatički aspekti problema deformacije elastične ploče na elastičnom poluprostoru (disertacija). Prirodoslovno-matematički fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb 1984.

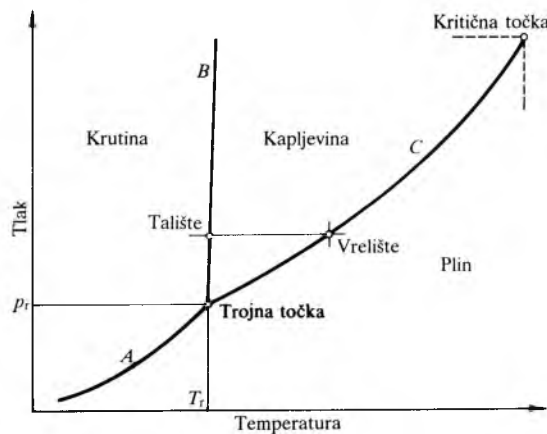
E. Nonveiller

TEMPERATURA MJERENJA, TEMELJNA,
postupci za što točnije određivanje temperature.

Termodinamička temperatura. Međunarodno normirana fizikalna veličina termodinamička temperatura (*T*) i njezina međudržavno određena mjerna jedinica kelvin (K) temelj su svih temperaturnih iskaza. Termodinamička se temperatura definira jednadžbom stanja idealnih plinova, povezanošću topline i rada u Carnotovu kružnom procesu, jednadžbama statističke termodinamike ili na koji drugi način, ali takav da njezino mjerenje ne ovisi o termometrijskom sredstvu. Tako npr. iz jednadžbe stanja idealnog plina $pV = kNT$ proizlazi idealizirana mjerna jednadžba:

$$T = \frac{pV}{kN} = \text{const.} \times pV, \tag{1}$$

gdje je *p* plinski tlak, *V* plinski obujam, *N* brojnost istovrsnih plinskih jedinki, a *k* Boltzmannova konstanta.



Sl. 1. Položaj trojne točke i drugih čvrstih temperaturnih točaka u faznom dijagramu. A krivulja sublimiranja, B krivulja taljenja (skrućivanja), C krivulja isparivanja (kondenzacije)

Međudržavnim sporazumom prihvaćeni su 1967. definicija, naziv i znak za jedinicu termodinamičke temperature kelvin. To je jedna od sedam osnovnih jedinica SI (v. *Metrologija, zakonska*, TE 8, str. 500). Kelvin je definiran tako što je vodi u trojnom stanju (sl. 1) pridijeljena termodinamička temperatura $T_t(\text{H}_2\text{O}) = 273,16 \text{ K}$. Sastav vode propisan je međunarodnim dogovorom o udjelima vodikovih i kisikovih izotopa. Broj 273,16 definicijska je konstanta, tj. bespogrešan broj koji potječe iz povijesnog razvoja termometrije. Jedinica kelvin definirana je jednadžbom

$$K = \frac{T_t(\text{H}_2\text{O})}{273,16} \tag{2}$$

ili iskazom: kelvin je 273,16-i dio termodinamičke temperature vode u trojnom stanju. Iz definicije je očito da se suvremena termometrija temelji na jednoj ishodišnoj termometrijskoj točki, a ne na dvije kao u prošlosti (vrelište i ledište vode). Temperatura $T_t(\text{H}_2\text{O})$ ostvaruje se s ponovljivošću $\pm 0,05 \text{ mK}$ u staklenoj ćeliji (sl. 2) koja se u pravilu drži u ledenoj kupelji, tj. na temperaturi koja se od temperature trojne točke vode razlikuje za $\sim 0,1 \text{ K}$. Ćelija je od stakla, lijevanog kremenja ili kovine (v. sl. 11), a prilikom upotrebe stavlja se u Dewarovu posudu s mješavinom vode i nastrugana leđa. Ona je za vrhunska mjerenja pogodna dva do tri dana pošto