

# Potporne građevine i građevne jame

---

**Roje-Bonacci, Tanja**

**Authored book / Autorska knjiga**

*Publication status / Verzija rada:* **Published version / Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)**

*Publication year / Godina izdavanja:* **2005**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:123:662722>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-30**



*Repository / Repozitorij:*

[FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split](#)



UNIVERSITY OF SPLIT

  
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Tanja Roje-Bonacci

# POTPORNE GRAĐEVINE I GRAĐEVNE JAME



GRAĐEVINSKO-ARHITEKTONSKI FAKULTET  
SVEUČILIŠTA U SPLITU



IGH d.d.  
Zagreb



SPLIT, 2005.

***TISKANJE OVOG UDŽBENIKA POTPOMOGLI SU:***

**Hrvatska komora arhitekata i inženjera u graditeljstvu**, suizdavač

CONEX ST, Split

Geotechnik, Varaždin

Hidroprojekt ING

Hrvatska udruga za mehaniku tla i geotehničko inženjerstvo

Konstruktor, Split

Ministarstvo znanosti, obrazovanja i športa

Montmontaža – Hidroinženjering, Split

Werkos, Osijek

Zákládaní staveb, Zagreb, Prag

na čemu im se autor najtoplije zahvaljuje

Tanja Roje-Bonacci

# POTPORNE GRAĐEVINE I GRAĐEVNE JAME



GRAĐEVINSKO-ARHITEKTONSKI FAKULTET  
SVEUČILIŠTA U SPLITU



IGH d.d. Zagreb

SPLIT 2005.

**NAKLADNIK:****Građevinsko-arhitektonski fakultet Sveučilišta u Splitu**

ul. Matice hrvatske 15, 21000 SPLIT

**SUNAKLADNIK:****Institut građevinarstva Hrvatske d.d.**

ul. Janka Rakuše 1, 10000 ZAGREB

**UREDNIK:**

prof. dr. sc. Slobodan Šestanović

**RECENZENTI:**

Prof. dr. sc. Davorin Kovačić, Varaždin

Prof. dr. sc. Predrag Miščević, Split

Prof. dr. sc. Mensur Mulabdić, Osijek

**LEKTOR:**

mr. sc. Dunja Bonacci-Skenderović, prof

**TEHNIČKO UREĐENJE, CRTEŽI I PRIJELOM TEKSTA:**

Prof. dr. sc. Tanja Roje-Bonacci

Objavljivanje ovog udžbenika odobrio je Senat Sveučilišta u Splitu na svojoj 33. sjednici odlukom br.: 01-1-33/1-10/1-2005 od 20. lipnja 2005.

CIP – Katalogizacija u publikaciji

Sveučilišna knjižnica u Splitu

UDK 624.13(075.8)

ROJE-Bonacci, Tanja

Potporne građevine i građevne jame/

Tanja Roje-Bonacci. – Split : Građevinsko-arhitektonski fakultet Sveučilišta;  
Zagreb : Institut građevinarstva Hrvatske, 2005. – (Udžbenici Sveučilišta u Splitu =  
Manualia Universitatis studiorum spalatensis)

Bibliografija. – Kazalo.

ISBN 953-6116-32-4 (Građevinsko-arhitektonski fakultet)

111227054

**Kopiranje ove knjige ili njenih dijelova u bilo kojem obliku i bilo kojim sredstvom nije  
dozvoljeno bez pismene dozvole nakladnika. Sva autorska prava su pridržana!**

Tiskara Poljica, 21315 Dugi Rat

Naklada: 500 primjeraka

## Sadržaj

0	Povijest .....	1
1	Općenito .....	7
1.1	prikaz nekih potpornih građevina i njihova namjena .....	7
1.2	vrste potpornih građevina .....	16
2	Opterećenja .....	21
2.1	Općenito .....	21
2.2	Tlak mirovanja .....	24
2.3	Granična stanja plastične ravnoteže .....	27
2.3.1	Rankineova teorija graničnih stanja plastične ravnoteže .....	28
2.3.2	Coulombova teorija bočnog zemljanog pritiska .....	37
2.4	Rasprava o stvarnim opterećenjima na potporne građevine .....	46
2.4.1	Opterećenje tlom .....	46
2.4.2	Ostala opterećenja .....	49
2.5	Primjena EUROKODA 7 u projektiranju potpornih građevina .....	54
2.5.1	Općenito .....	54
2.5.2	Potporne građevine .....	62
3	Potporni zidovi .....	67
3.1	Općenito .....	67
3.2	Posebna opterećenja na potporne zidove .....	72
3.2.1	Opterećenja sredstvima za zbijanje .....	72
3.2.2	Opterećenje nezbijenim nasipom .....	74
3.3	Dimenzioniranje potpornih zidova .....	76
3.3.1	Proračun na prevrtanje .....	78
3.3.2	Proračun na klizanje .....	79
3.3.3	Provjera nosivosti tla ispod temelja i diferencijalnog slijeganja .....	81
3.3.4	Provjera globalne stabilnosti potpornog zida .....	83
3.4	O izvedbi potpornih zidova .....	85
3.4.1	Kampadna izvedba .....	85
3.4.2	Drenaža .....	85
3.4.3	Površinska odvodnja .....	90
3.5	Masivni, gravitacijski potporni zidovi .....	92
3.5.1	Oblikovanje i primjena .....	92
3.5.2	Dimenzioniranje .....	93
3.5.3	Izvedba .....	94
3.6	Olakšani potporni zidovi .....	101

3.6.1	Oblikovanje i primjena.....	101
3.6.2	Zid s konzolom.....	101
3.6.3	Zid sa zategom .....	103
3.7	Tankostijeni, armirani potporni zidovi .....	107
3.7.1	Oblikovanje i primjena.....	107
3.7.2	Dimenzioniranje.....	108
3.7.3	Izvedba.....	109
4	Ojačano tlo .....	111
4.1	Općenito.....	111
4.2	Potporne građevine od armiranog tla .....	113
4.3	Gradiva .....	116
4.3.1	Armature .....	116
4.3.2	Nasipni materijal .....	122
4.3.3	Lica građevina od armiranog tla.....	122
4.4	Dimenzioniranje potpornih građevina od armiranog tla .....	126
4.4.1	Općenito.....	126
4.4.2	Oblikovanje klizne plohe unutar građevine i način djelovanja armature.....	127
4.4.3	Proračuni .....	130
4.5	Izvedba potpornih građevina od armiranog tla .....	135
5	Podupore uspravnih iskopa .....	139
5.1	Općenito.....	139
5.2	Privremene građevine za osiguranje uspravnog iskopa u tlu (podgrade) ...	141
5.2.1	Proračun podgrada .....	141
5.2.2	Izvedba.....	155
5.3	Trajne podupore opterećene tlom i vodom (zagatne stijenke) .....	161
5.3.1	Proračun i dimenzioniranje .....	167
5.3.2	O izvedbi zagatnih stijenki .....	170
5.4	Oslonci.....	184
5.4.1	Kosnici i razupore .....	184
5.4.2	Zatege, sidreni blokovi i sidreni zidovi .....	186
5.4.3	Geotehnička sidra.....	187
5.4.4	Građevine za preuzimanje vlačnih sila.....	189
6	Zagati .....	191
6.1	Općenito.....	191
6.2	Nasuti zagati.....	194
6.2.1	Općenito.....	194
6.2.2	Proračun nasutih zagata.....	195
6.2.3	Izvedba nasutih zagata .....	197

6.3	Zagati od drvenog i čeličnog žmurja .....	199
6.3.1	Drveni zagati.....	199
6.3.2	Zagati od čeličnog žmurja.....	201
6.3.3	Dimenzioniranje zagata od drvenih i čeličnih platica .....	207
6.3.4	Izvedba zagata od drvenih i čeličnih platica .....	209
6.4	Ostale vrste zagata.....	210
7	Sidrene potporne građevine i sidra.....	213
7.1	Općenito .....	213
7.2	Sidra .....	215
7.2.1	Vrste sidara i način prijenosa sila u tlo .....	216
7.2.2	Izvedba sidara .....	229
7.2.3	Zaštita trajnih sidara od korozije.....	230
7.3	Sidrene građevine .....	235
7.3.1	Općenito.....	235
7.3.2	Proračun sidrenih potpornih građevina .....	240
7.3.3	Izvedba potpornih sidrenih građevina.....	241
8	Građevna jama.....	243
8.1	Općenito .....	243
8.2	Zaštita građevnih jama pri iskupu bez podzemne vode .....	247
8.2.1	Plitke građevne jame – iskopi za kanale i plitke temelje.....	247
8.2.2	Iskopi s poduporom .....	253
8.3	Zaštita građevnih jama od oborinske i podzemne vode.....	263
8.3.1	Zaštita od oborinske vode .....	263
8.3.2	Zaštita širokih iskopa od podzemne vode .....	265
8.3.3	Zaštita iskopa u ograničenom prostoru pri visokoj podzemnoj vodi.....	281
8.4	Građevne jame za temeljenje u mirnoj i tekućoj vodi.....	292





## 0 POVIJEST

Potporne građevine su stare koliko i graditeljstvo. Građene po iskustvu, neke su trajale duže, a neke su nestale u povijesti. Suhozidi ili gomile potporne su građevine kojima obiluje mediteranska obala. To je spomenik ljudskoj upornosti i trudu da se sačuva ono malo plodne zemlje i prehrani stanovništvo. Građeni bez veziva, potpuno propusni za vodu, odolijevaju stoljećima i vrše zadanu ulogu. Obrambeni zidovi oko gradova i naselja drugi su vid spomenika ovim građevinama, koje se još i danas može naći svugdje po svijetu od Dubrovnika i Stona u Hrvatskoj do Velikog Zida u Kini.



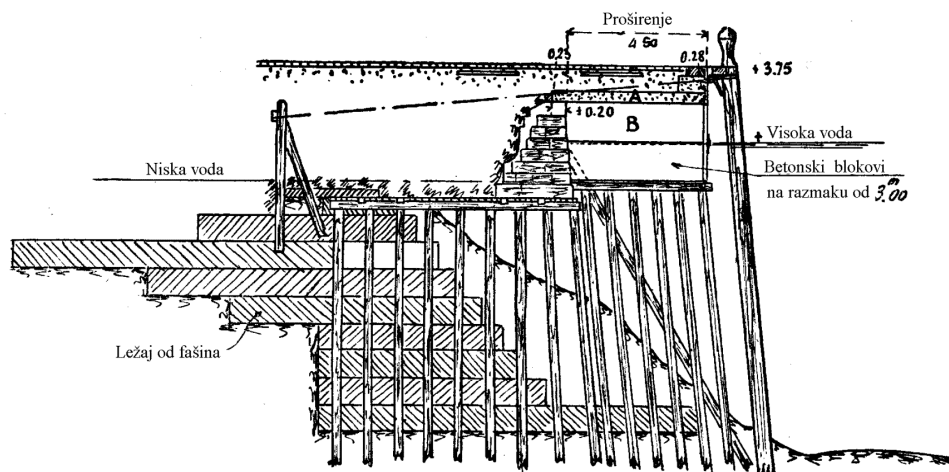
Slika 0.1 Suhozid

Industrijska revolucija krajem 18. i početkom 19. stoljeća stavlja sve veće zahtjeve pred graditelje. U takvom okruženju pojavljuju se, s jedne strane umjesto svestranih višenamjenskih genija, usmjereni tehnički obrazovani pojedinci (inženjeri) koji su sposobni zadovoljiti narasle graditeljske potrebe ranog industrijskog društva. Istovremeno se razvijaju novi materijali i nove tehnologije koje će omogućiti graditeljske zahvate prema zahtjevima vremena. Kamen i opeku postepeno zamjenjuju proizvodi i smjese na bazi cementa, a drvo kao klasični građevinski materijal prepušta mjesto lijevanom željezu, čeliku i aluminiju. Pojava parnog stroja omogućuje razvoj kompresora, crpki, nabijača, ostalih građevinskih i drugih strojeva, dekovilskih vlakova i slično. Dolazi do naglog razvoja željeznice kao glavnog prijevoznog sredstva na kopnu. Duboki temelji izvode se pomoću kesona, a građevne jame se izvode metodom zamrzavanja tla (Njemačka 1883.

prema Shulze, 1978.). Reprezentativne građevine prestaju biti umjetnička djela te postaju konfekcija koja zadovoljava potrebe sve većeg broja raznih društvenih slojeva, ne samo vladara i aristokracije. U tom okruženju treba promatrati i razvoj potpornih građevina u estetskom, konstruktivnom i upotrebnom smislu.

Parni je stroj naglo izmijenio veličinu teretnih i putničkih brodova. Dubine pristana u lukama morale su biti znatno povećane. Pristani u lukama, koji su u osnovi potporne građevine, doživjeli su nagli preobražaj i razvoj. Na slici 0.2 prikazan je pristan u Rotterdamu. Stari pristan (19. st. ili ranije) zidan je u opeci na drvenim pilotima i podlozi od fašina (vrsta armiranog tla funkcionalno slična današnjim gabionima). Pristan je povišen i pomaknut u vodu za 4,5 m početak 20. stoljeća. Time je povećan gaz ispred njega. Na nove drvene pilote položeni su betonski blokovi i izvedena kolosječna konstrukcija. (Pristan se danas nalazi u stambenoj četvrti Rotterdama).

Novi, tehnološki razvijeni i sve moćniji strojevi omogućili su brzi razvoj novih tehnologija i novih vrsta potpornih građevina kakve danas poznajemo. Tehnologija s kraja 20. stoljeća potpuno je izmijenila dio građevina koje se odnose naročito na izvedbu građevnih jama. Nove tehnologije izvedbu su nevjerovatno ubrzale i olakšale ljudski rad, ali je filozofija opterećenja i stabilnosti građevine ostala ista.



Slika 0.2 Obalni zid u Rotterdamu (Proudon, 1936.)

Povećana nosivost brodova i pojava željeznice postavljaju potpuno nove zahtjeve na luke. Željeznički kolosijeci i staze dizalica često neposredno leže na zidovima pristana. Opterećenja naglo rastu. Otvoreni skladišni prostori za rasute terete zahtijevaju velike površine i znatno opterećuju obalne zidove. Filozofija luke se mijenja.

U 20. stoljeću promjene idu još brže. Sredina i kraj 20. stoljeća i armirani beton, visokovrijedni čelik, injektiranje i druge nove tehnologije, dalje proširuju mogućnosti u razvoju mašte građevinskog inženjera, kada su u pitanju potporne građevine. Kraj 20. stoljeća i početak novog tisućljeća započinju s potpuno novim

tehnologijama i materijalima kao što su prskani beton, armiran vlaknima, mlazno injektiranje sa i bez, armiranja, tkani i netkani geotekstili, karbonska vlakna i niz drugih proizvoda od plastičnih masa. Zahtjevi glede veličine brodova, a time i pristana kao i skladišnih prostora, prostora za kontejnere, koji su hit kraja 20. stoljeća, rastu. U velikim gradovima, u nedostatku prostora, gradi se u dubinu. Veliki gradovi niz svojih komunalnih i infrastrukturnih potreba rješavaju u podzemlju. Za takvo građenje, građevne jame više nisu improvizirani prostori već ozbiljne geotehničke građevine.

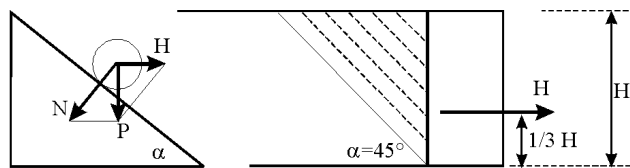
Proračuni složenih potpornih građevina (na pr. obalnih zidova, pristana u lukama) samo su djelomično mogli biti provedeni. Naglo se razvijaju metode grafostatike kao najbrže i relativno precizno rješenje za proračune. Uz sav trud inženjera nije bilo mogućnosti precizno ručno provesti u potpunosti proračune takvih složenih građevina. Poznavanje gradiva bilo je skromno, više iskustveno nego provjereno. Česte su bile havarije. U području proračuna i dimenzioniranja potpornih građevina, računalna tehnika je dozvolila upotrebu potpuno novih metoda proračuna, omogućila istraživanja varijantnih rješenja, ubrzala proračune i oslikala rezultate. Ispitivanje materijala i sofisticirane metode za dokazivanje kakvoće gradiva, kako prije ugradnje tako i nakon ugradnje u građevinu, donijeli su potpuno novu dimenziju u moderno građenje.

Ono što se uopće nije promijenilo od trenutka prvog proračuna potpornih građevina je potreba poznavanja svojstava, kako gradiva od kojeg se potporna građevina izvodi, tako i tvari (pretežito tla, ali i vode ili neke druge) koja na nju vrši opterećenje ili joj se odupire. I najsloženiji numerički modeli počivaju na ispravnom odabiru parametara tla, a što ostaje i dalje najsloženiji dio posla za geotehničkog inženjera.

Počeci proračuna potpornih građevina sežu u 18. stoljeće (Timošenko, 1965.). Javljaju se prve hipoteze o teoriji bočnog pritiska na zidove i prva laboratorijska modeliranja, a sve sa svrhom racionalnijeg dimenzioniranja ovih građevina. Prvi takvi pokušaji nalaze se u knjizi Belidora iz 1729. godine «La Science des Ingenieurs» (prema Timošenko 1965.). On je odredio vrijednost vodoravne komponente sile kugle koje se kotrlja niz kosinu, potrebne da bi kugla ostala u ravnoteži kao:

$$H = P \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad (0.1)$$

pri čemu je  $\alpha$  kut nagiba kosine niz koju se kugla kotrlja (slika 0.3). Na tom razmatranju razradio je veličinu bočne sile koja pritišće potporni zid opterećen prizmom tla. Belidor je uočio da postoji trenje između klina tla koji kliže i tla koje je stabilno što smanjuje vodoravnu silu na potporna građevinu. Na kraju zaključuje da je raspodjela bočnog pritiska na potporna građevinu linearna, raste s dubinom, a sila, izazvana takvim pritiskom, ima hvatište u donjoj trećini visine zida tj. u težištu dijagrama pritiska. Svojim proračunima on je potvrdio da se tadašnji iskustveni principi izgradnje potpornih zidova dobro uklapaju u njegova teoretska rješenja.



Slika 0.3 Vodoravna sila koja pritišće zid (Belidor, 1729.)

Slijedeći korak učinio je francuski vojni inženjer C. A. Coulomb (1736.-1806.), ponukan praktičnim zadacima izgradnje obrambenih zidova. Godine 1773. razradio je teoriju bočnog pritiska na potporni zid. Izučavao je bočni pritisak na zid u slučaju kada se on pomiče u odnosu na tlo. Kada se zid udaljava od tla koje pridržava, smanjuje se bočni pritisak na neku najmanju vrijednost. Kada zid gura tlo iza sebe, javlja se najveći bočni pritisak na zid, kao otpor tla vodoravnom pomaku zida. Coulombovo grafičko rješenje i Culmannov poligon sila, koriste se i danas kao brza grafička metoda za pronalaženje najmanje i najveće bočne sile koja djeluje kao rezultanta pritiska odnosno otpora na potporni zid. Coulombov veliki teoretski doprinos je i određenje granične vrijednosti čvrstoće na smicanje u tlu. On je uočio da neka tla imaju određenu vlačnu čvrstoću tj. da mogu preuzeti posmično naprezanje i kada je normalno naprezanje jednako nuli. Ovo je kasnije omogućilo razvoj teorije graničnog stanja plastične ravnoteže.

Pojednostavnjenje Coulombove metode izveo je Poni, krajem 18. stoljeća, da bi olakšao njenu praktičnu upotrebu.

Slijedeći korak u izučavanju potisaka tla na potporne zidove učinio je sredinom 19. stoljeća britanski inženjer W. Rankine (1857.) u radu «On the Stability of Loose Earth». On je koristio Mohrovu teoriju kružnica naprezanja u ravnini za analizu ravninskog stanja naprezanja u tlu. Pri tom je pretpostavio da je stanje naprezanja dva međusobno okomita smjera u vodoravnoj ravnini identično. Osim rješenja pritiska na potpurnu građevinu s vodoravnom površinom tla iza nje dao je rješenje i za nagnute površine terena. Teorija je općenita i vrijedi za sve slučajeve vodoravnih pritiska na uspravnu ravninu, od najmanjeg do najvećeg mogućeg pritiska. Rješenja se dobivaju u kombinaciji s Coulombovim graničnim pravcem vrijednosti čvrstoće za smicanje. Tako je nastao Mohr-Coulombov zakon koji i danas tvori okosnicu geostatičkih proračuna potpornih građevina.

Sve ove teorije nastale su iz potrebe proračuna potpornih zidova. Međutim već u to doba bilo je i drugih potpornih građevina (zagatne stijenske, regulacijske građevine, pristani za brodove, zagati i slično) koje su se izvodile iskustveno. Naglim razvojem industrije, naročito industrije čelika, betonskog željeza i čeličnih profila, potporne građevine su dobile mogućnost brzog i naglog razvoja.

Na slici 0.4 prikazan je potporni zid složene geometrije i složene strukture, kakvu je moguće izvesti s današnjim gradivima i strojevima. Na slici se vide kontrafori s prednje strane, jer zid pridržava zasjek visine  $H=12.0$  m (7.0 m, donja etaža; 5.0 m, gornja etaža). Između svaka dva kontrafora nalazi se ploča. Svaki kontrafor i svaka ploča donje etaže pričvršćeni su sidrima. Glave sidara vide se pri vrhu donje etaže, a

po sredini ploča između kontrafora i na krilnim pločama kontrafora vide se procjednice (barbakane). Procjednice su izvedene i na gornjem dijelu potpornog zida.



Slika 0.4 Potporni zid visine  $H = 7.0\text{m} + 5.0\text{m}$  (osobna arhiva)

**POTPORNA GRAĐEVINA JE SVAKI GRAĐEVINSKI ZAHVAT KOJI OSIGURAVA SIGURNO I STABILNO VANJSKO LICE TLA, NAGNUTO POD STRMIJIM NAGIBOM OD ONOG, KOJI JE MOGUĆ BEZ TOG ZAHVATA.**



# 1 OPĆENITO

## 1.1 PRIKAZ NEKIH POTPORNIH GRAĐEVINA I NJIHOVA NAMJENA

Potporne građevine služe za osiguranje stabilnost pri naglim promjenama visine u tlu. Prirodna promjena visine terena proizlazi iz mogućeg stabilnog nagiba određene padine. Ukoliko je potrebno promjenu visine izvesti na kratkom potezu, koji bi zahtijevao nagib površine terena strmiji od onoga koji može stabilno, trajno stajati bez podgrade, potrebno je predvidjeti POTPORNU (zaštitnu) građevinu. Takve građevine mogu biti trajne ili privremene. Ako su privremene, za trajno rješenje mora postojati neka druga građevina koja će preuzeti pritiske onog dijela tla koji nije stabilan. Privremene potporne građevine sastavni su dio velikih građevnih jama.

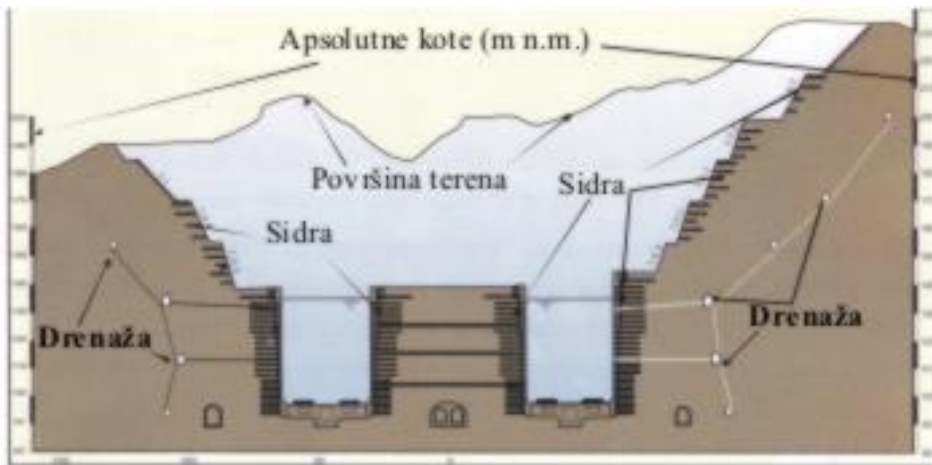
Potporne građevine su sastavni dio i mnogih gospodarskih građevina koje služe u različite svrhe. Na primjer, to su potporni (pridržavaju nasip) i uporni (pridržavaju zasjek) zidovi na cestama, pristani u lukama, zidovi brodskih prevodnica, zidovi suhih dokova, upornjaci mostova, bazeni crpnih stanica, osiguranja predusjeka tunela, dijelovi skladišta za rasute terete i sl. Na slici 1.1 prikazana je potporna građevina usjeka za građevnu jamu pri izvedbi brodske prevodnice uz branu Tri Klanca na rijeci Yangtze u Kini (1993.-2003.).



Slika 1.1 Građevna jama sa sidrenim pokosom, brana Tri Klanca

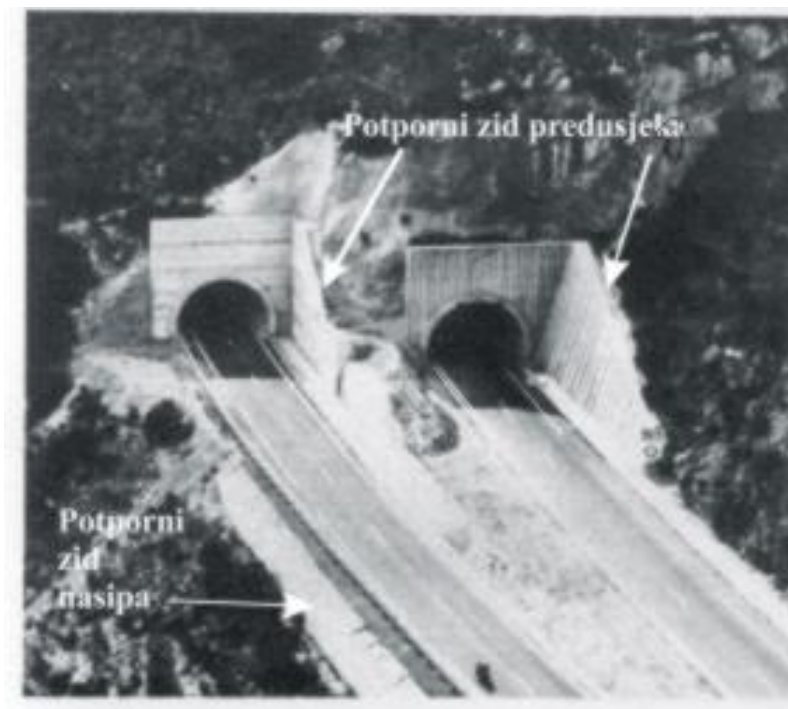
Na slici 1.2 shematski je prikazana zaštita pokosa usjeka za brodsku prevodnicu uz branu Tri Klanca. Ukupna visina višeg zasjeka je oko 140.0 m , CTGPC (2002.).





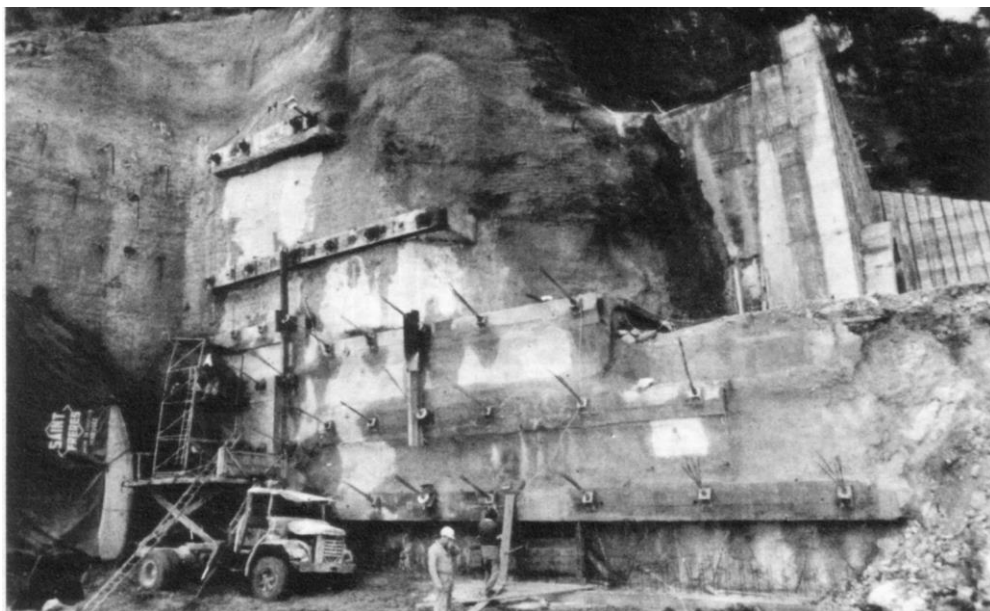
Slika 1.2 Osiguranje usjeka za brodsku prevodnicu na brani Tri Klanca

Kod izgradnje prometnica, potporne građevine pridržavaju strme zasjeka u prirodnim padinama i nasipe. Konstruktivno i računski to su slične građevine, ali se razlikuju bitno po tome što je kod prirodne padine tlo zadano, a kod nasipa se kakvoća tla može propisati. Na slici 1.3 prikazan je izlaz iz tunela na autocesti gdje se vide potporni zidovi predusjeka i potporni zid koji pridržava nasip.



Slika 1.3 Potporni zidovi na autocesti

Razlika u koncepciji ovih dviju vrsta potpornih građevina prilično je očita usporede li se slike 1.3 i 1.4. Na slici 1.3 vidljivo je konačno estetsko oblikovanje koje je vrlo važno kod izgradnje cesta. Na slici 1.4 vidi se potporni zid predusjeka tunela u izgradnji. Radi se o lijevoj tunelskoj cijevi kojoj je predusjek sidren. U gornjem desnom uglu vidi se portalni zid desne tunelske cijevi.



Slika 1.4 Zaštita predusjeka tunela u izgradnji

Slično je i s potpornim građevinama u skladištima rasutih tereta. Tamo je potrebno, s geotehničkog stajališta, utvrditi svojstva materijala kojeg građevina podržava da bi se mogli izračunati bočni pritisci na potpornu građevinu.

Potporne građevine se primjenjuju prilikom izgradnje infrastrukturnih građevina u velikim gradovima. To se naročito odnosi na prostor za podzemnu željeznicu, ali sve više i za podzemna parkirališta, trgovačke centre, razna skladišta i slično. U gusto izgrađenim gradskim jezgrama potporne građevine dolaze do punog izražaja. Na nekoliko slijedećih slika daju se primjeri potpornih građevina izvedenih u sklopu građevnih jama u gusto naseljenim gradskim jezgrama. Uočljiva je raznolikost tehnologija, načina podupiranja odnosno ideja pojedinog graditelja, ali i izvođača koji primjenjuje svoju tehnologiju.

Prilikom izvedbe građevnih jama uvijek se javlja potreba izvedbe izvjesne vrste potpornih građevina. Potporne građevine koje tvore građevnu jamu mogu biti privremene ili se mogu konstruktivno uklopiti u buduću građevinu. Manje zahtjevniji zasjeci kratkog trajanja štite se raznim vrstama OPLATA koje se podupiru kosnicima ili pridržavaju drvenim i/ili čeličnim razuporama. Za složenije, dublje građevne jame u ograničenom prostoru, izvode se razne vrste ZAGATNIH STIJENKI: ŽMURJE, DIJAFRAGME (sl. 1.5 i 1.6) BERLINSKO ZIĐE (sl. 1.7), nizovi PILOTA, MLAZNO INJEKTIRANI STUPNJACI i td. Zasječeni i/ili

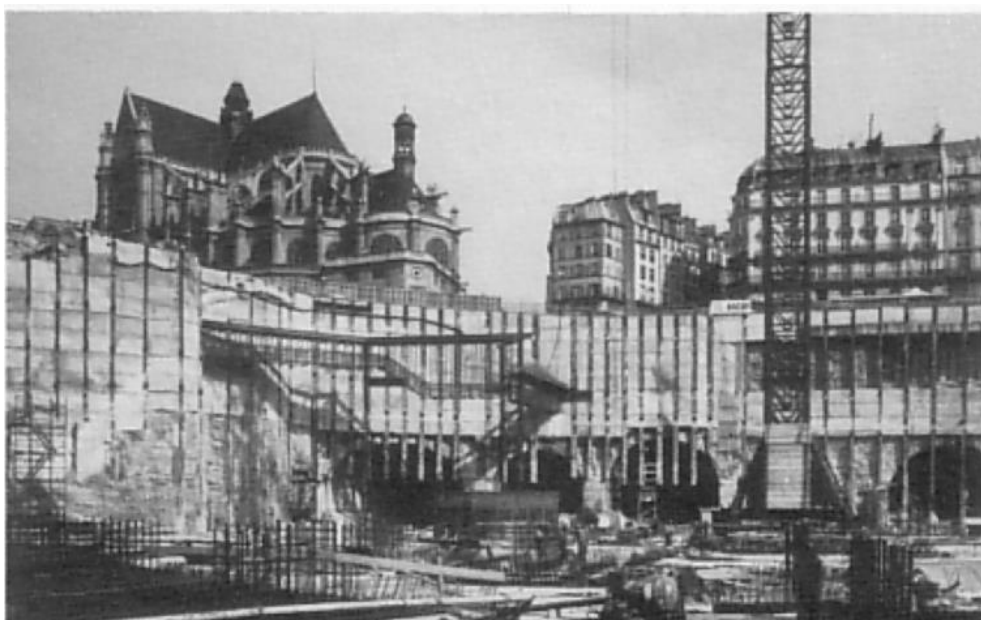
nezasječeni piloti velikog promjera, učvršćeni sidrima, primjenjuju se često za osiguranja dubokih zasjeka. Jedan od njih prikazan je na slici 1.8.



Slika 1.5 Građevna jama podzemne željeznice u Hong-Kongu (Gardey, 1978.)



Slika 1.6 Građevna jama stanice podzemne željeznice u Parizu (Hallos, 1979.)



Slika 1.7 Građevna jama stanice podzemne željeznice u Parizu (Hallos, 1979.)



Slika 1.8 Sjeverni portal tunela Strahov (Zakladani Staveb, 1989.)

Najsloženije građevne jame su one kojima dno iskopa seže duboko ispod razine podzemne vode. Potporne građevine, koje štite ovakve građevne jame, opterećene su hidrostatičkim tlakom. Za zaštitu ovih građevnih jama koriste se žmurja, zagatne stijenke i armirano betonske dijafragme. One mogu biti dijelovi građevnih jama a, ujedno i dijelovi budućih građevina. To su neprekinute građevine, izvedene u tlu ili zabijene u tlo. Tehnološki ih ima mnogo vrsta.

U potporne građevine mogu se ubrojiti i razne vrste ZAGATA, koji su opterećeni pretežito hidrostatičkim tlakom odnosno vodom od koje štite građevnu jamu. To mogu biti nasipi s nepropusnom jezgrom, nasipi s nepropusnim ekranima (glina, asfalt, beton), čelično žmurje u obliku sanduka ispunjeno tlom ili neka slična

građevina. Glavna im je zadaća zaštita gradilišta od površinske (mirne ili tekuće) vode. S obzirom na neke posebnosti ovih geotehničkih građevina biti će im posvećeno posebno poglavlje. Na slici 1.9 prikazana je građevna jama zaštićena zagatom.



Slika 1.9 Građevna jama na morskoj obali zaštićena zagatom (Martin, 1980.)

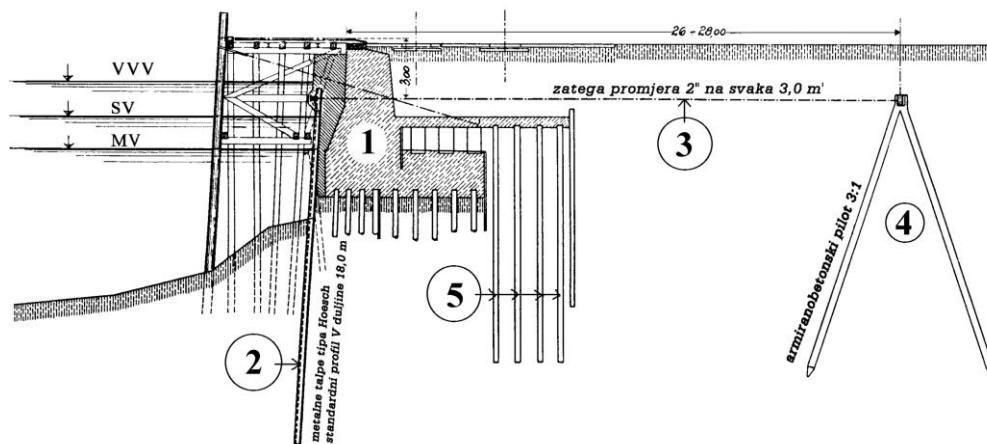
POTPORNE GRAĐEVINE preuzimaju opterećenja od tla, vode ili nekog drugog materijala koji se nalazi u njenom zaleđu i na nju se oslanja. Najčešće je to tlo, prirodno ili nasuto, voda ili neka druga tvar koju građevina pridržava. Kad god je to moguće nastoji se potpornu građevinu **ne opteretiti** hidrostatičkim tlakom, jer on uzrokuje veliko vodoravno opterećenje.

Da bi se moglo projektirati i izvoditi složene geotehničke građevine, kao što su potporne građevine, potrebno je prethodno upoznati njihove pojedinačne sastavne dijelove. Stoga će u nastavku biti opisani načini projektiranja i proračuna svake pojedine vrste potpornih građevina u osnovnim oblicima. Raznolikost oblikovanja potpornih građevina prepuštena je inženjerima na slobodnu volju.

Kako su potporne građevine neizostavni, ali ne i jedini dio građevnih jama, u poglavlju o građevnim jamama bit će govora i o ostalim građevinskim zahvatima

nužnim da bi ove, istina privremene, ali često veoma zahtjevne građevine mogle biti učinkovite i zadovoljiti u potpunosti svoju namjenu.

Na slici 1.10 prikazan je primjer složene potporne građevine (prva polovina 20. stoljeća), sastavljene od masivnog betonskog potpornog zida (1), zagatne stijenke od čeličnih platica tipa Hoesch (1937.), (2), zatega na međusobnoj udaljenosti od 3,00 m (3), sidrene građevine na čeličnim pilotima (4), i niza dubokih temelja u obliku pilota (5). Slika prikazuje crtež (poprečni presjek) iz projekta rađenog rukom.



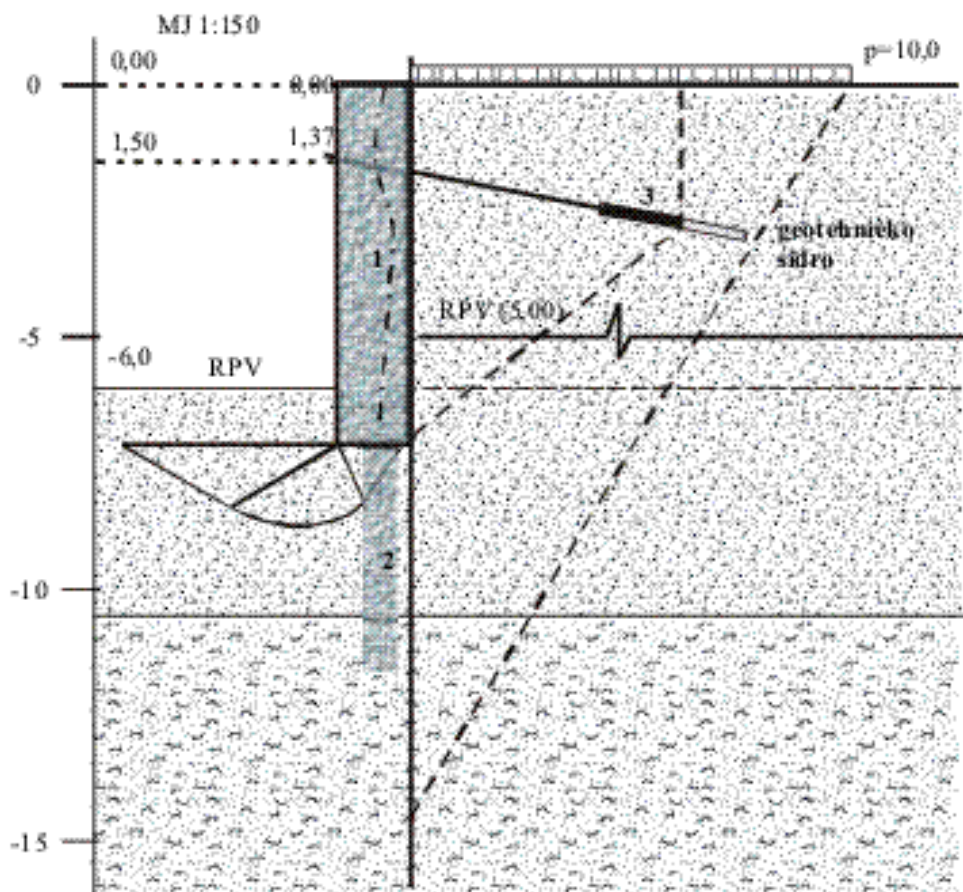
Slika 1.10 Složena potporna građevina upotpunjena dubokim temeljenjem na pilotima (Hoesch, 1937.)

Građevina sa slike 1.10, u dijelu koji se odnosi na potporni dio, tipičan je primjer složene geotehničke potporne građevine iz doba kada je čelik bio vrlo čest građevinski materijal, a masivni beton tek na početku upotrebe. Današnja tehnološka dostignuća omogućila bi ostvarenje mnogo jednostavnije, elegantnije i lakše građevine.

Na slici 1.11 prikazan je poprečni presjek potporne građevine iz projekta s početka ovog stoljeća. Crtež je rađen računalom. U izvornom projektu on je sastavni dio crteža na kojem je prikazan geotehnički proračun. Razlika u grafičkom prikazu je očita, ali i u pojednostavljenju same građevine. Ono što se sa crteža ne vidi je jednostavnost i brzina izvođenja potporne građevine pomoću novih tehnologija. Na slici 1.11 je s 1 označena zagatna stijenka izvedena mlaznim injektiranjem niza stupnjaka (nosivi dio građevine), s 2 nastavak zagatne stijenke izveden mlazno injektiranim neprekinutim platnima (vododrživa dio građevine) i 3 geotehničko sidro, duljine 8,00 m, injektirano na dužini od posljednja tri metra.

Slike 1.10 i 1.11 pokazuju, da je filozofija složenih potpornih građevina ostala vrlo slična, ali su se materijali i tehnologije izvođenja u, povijesno gledano, vrlo kratkom vremenskom razmaku bitno izmijenile. Razlika u vremenu potrebnom da se građevine izvedu, u organizaciji gradilišta, u dopremi materijala potrebnih za

građenje, ljudskom radu i mnogim drugim čimbenicima, koji ulaze u cijenu građevine, nije za usporedbu.



Slika 1.11 Primjena suvremene tehnologije: 1 mlazno-injektirani stupnjaci  $\Phi=150$  cm s preklapom od 20 cm; 2 mlazno-injektirane lamele  $d=40$  cm; 3 sidro, (Keller, 2003.),

Uvijek valja imati na umu da su potporne građevine u izravnom dodiru s tlom te su trajno izložene vlazi. Svi metalni dijelovi ovih građevina stoga su izloženi koroziji, a drveni truljenju. Pri dimenzioniranju, a pogotovo pri, analizi trajnosti ovih građevina tu činjenicu treba uzeti ozbiljno u obzir. Kod upotrebe, armiranog betona, ako nije moguće izvesti dobru hidroizolaciju, treba veliku pažnju posvetiti koroziji armature. Kod trajnih potpornih građevina treba razmisliti, koliko je armatura izložena koroziji, siguran sastavni dio nosive konstrukcije.



## 1.2 VRSTE POTPORNIH GRAĐEVINA

Potporne građevine mogu biti samostalne ili sastavni dio građevine. To su geotehničke građevine jer temeljno preuzimaju opterećenja od tla. Mogu se izvoditi od svih do sada poznatih materijala koji se upotrebljavaju u građevinarstvu i najrazličitijim raspoloživim tehnologijama.

Dvije su osnovne vrste potpornih građevina: 1) one koje pridržavaju zasjeka u prirodnom tlu i 2) one koje pridržavaju nasipe. Ovisno o tome pridržavaju li prirodno tlo ili nasip, ovise vrste istražnih radova koje je potrebno izvesti da bi se dobili podaci potrebni za projektiranje. Autohtono se tlo iza i ispod budućeg zida mora detaljno ispitati. Za svaku potpornu građevinu potrebno je izraditi projekt.

Istražni radovi i vrste laboratorijskih ispitivanja, koje je potrebno izvršiti prije izrade geostatičkih proračuna i dimenzioniranja, ovise o porijeklu opterećenja koje djeluje na potpornu građevinu. Pridržava li potporna građevina zasjek u autohtonom tlu, opterećena je tlom onakvim kakvo je ono u prirodi. Tada je potrebno dobro upoznati sastav i svojstva tog prirodnog tla. Nema mnogo načina da se svojstva takvog tla poboljšaju. Potporna građevina treba biti dimenzionirana na opterećenja koja će takvo tlo proizvesti.

Pridržava li potporna građevina nasipe, može se odabrati materijal zasipa iza građevine i propisati njegova geotehnička svojstva. U tom se slučaju radi o kontroliranom materijalu te se on može odabrati tako da ima što povoljnija svojstva. Na taj se način utječe na ekonomičnost gradnje. Isto vrijedi i za potporne građevine koje pridržavaju rasute terete i slično.

Prema načinu oblikovanja i prijenosu sila u tlo razlikuje se nekoliko vrsta potpornih građevina: MASIVNI POTPORNI ZID, ZID OD ARMIRAMOG TLA, ZAGATNA STIJENKA, SIDRENA GRAĐEVINA, ZAGAT i njihove kombinacije.

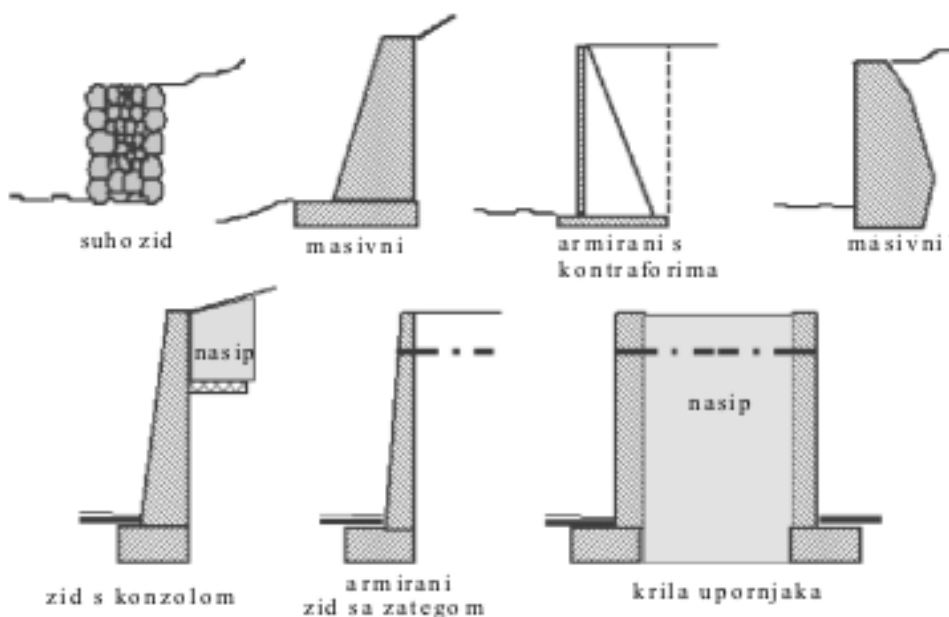
Prema Eurokodu 7 potporne su građevine podijeljene na tri osnovne skupine: GRAVITACIJSKI ZIDOVI, ZAGATNE STIJENE i SLOŽENE POTPORNE GRAĐEVINE, koje uključuju građevine nastale kombinacijom prethodnih dviju vrsta i sve ostale potporne građevine koje ne spadaju u gornje dvije skupine.

Zajedničko im je svojstvo da su opterećene jednostrano, bočnim pritiscima od tla i/ili vode (moguće i nekih drugih tvari). Za potporne građevine opterećene bočnim pritiskom tla, ovisno o dozvoljenoj veličini i smjeru pomaka klina tla iza građevine, bočno opterećenje može biti u rasponu od najvećeg - PASIVNOG do najmanjeg - AKTIVNOG.

Bitna je razlika u načinu preuzimanja vodoravnih sila po pojedinim vrstama potpornih građevina slijedeća:

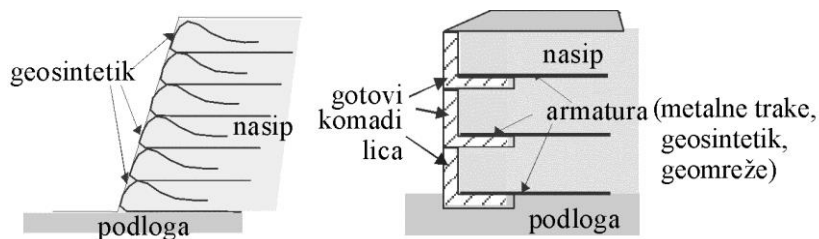
POTPORNI ZIDOVI, bez obzira na oblik i vrstu gradiva, sile preuzimaju pretežito svojom masom (gravitacione građevine). To su krute građevine. Za savladavanje većih visina dodaju im se sidra, zatege, razupore i kontrafori. Ako su sastavni dio građevine, mogu kasnije zatege biti zamijenjene dijelovima građevine u koje je zid uklopljen. Građevine složene na taj način mogu u cijelosti preuzeti i

ulogu potpornog zida. Raznim tehničkim zahvatima, drenažama i sl. sprečava se utjecaj hidrostatskog tlaka na potporne zidove. **POTPORNI ZIDOVI** imaju **TEMELJ** i svi proračuni koji vrijede za proračun temelja, vrijede i za proračun temelja potpornih zidova.



lika 1.12 Nekoliko tipova potpornih zidova

Potporni zid od **ARMIRANOG TLA** je građevina uklopljena u nasip i s njime čini jednu cjelinu. Kao cjelina djeluje kao gravitacijski savitljivi potporni zid. Nasip u području armiranja izvodi se od nekoherentnih materijala da se izbjegne utjecaj hidrostatskog pritiska. Vlačne sile preuzima, kako mu i ime kaže, "armaturom" koja se u tlo ugrađuje tijekom izvedbe. Lice građevine zaštićeno je posebnim komadima ili gradivom koje ujedno može biti i armatura. Nema posebno oblikovanog temelja, ali podliježe provjeri dodirnih pritisaka.



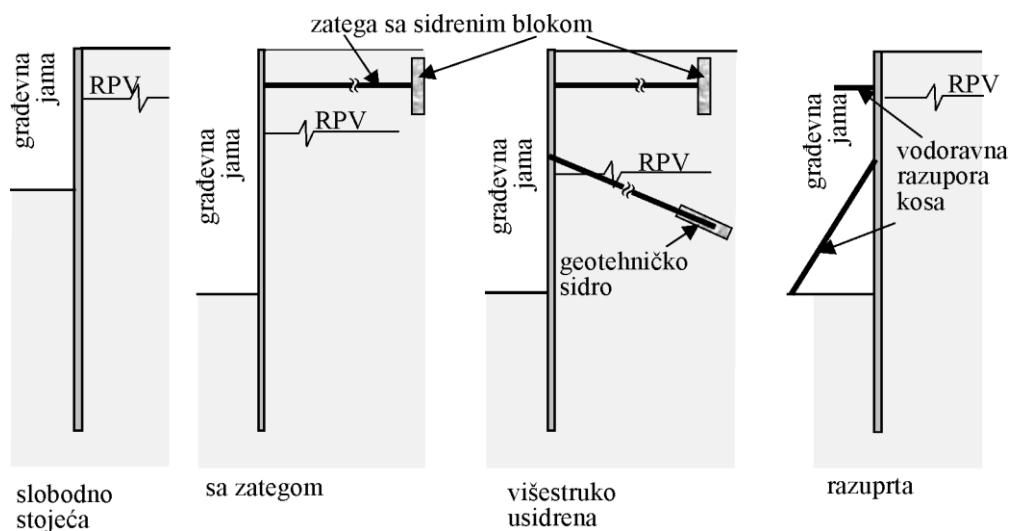
Slika 1.13 Dva primjera armiranog tla

ZAGATNE STIJENKE su savitljive građevine koje prenose opterećenje u tlo pomakom (zbijanjem ili razrahljenjem tla) koji izazove deformacija savitljive stijenke. Deformacija aktivira otpor tla u području u kojem je zagatna stijenska ugrađena ili zabijena u tlo. Zagatne stijenske su upete u tlo i njihov je proračun i dimenzioniranje sličan proračunu savitljivog temelja na elastičnoj podlozi. Pri tom treba voditi računa da dio tla djeluje kao opterećenje, s **AKTIVNIM TLAKOM ILI TLAKOM MIROVANJA**, što ovisi o ostvarenim pomacima, dok se dio opterećenja preuzima **AKTIVIRANJEM PASIVNOG OTPORA**. Puno aktiviranje pasivnog otpora zahtjeva veliku deformaciju tla i konstruktivnog elementa koji se na tlo oslanja, što može dovesti do nedopustivo velikog pomaka građevine. Stoga pri proračunu ovih građevina treba uskladiti dozvoljene vrijednosti deformacije i veličinu aktiviranog pasivnog otpora.

Razlikuju se dvije vrste ovakvih građevina:

- **VODONEPROPUSNA ZAGATNA STIJENKA**, koja preuzima opterećenje **HIDROSTATSKIM TLAKOM**. Zabijena je u tlo po cijelom tlocrtu kojeg štiti do potrebne dubine. Izvodi se od najrazličitijih vrsta materijala od drvenih platica (talpi), predgotovljenih AB elemenata preko čeličnih platica do armiranobetonskih elemenata izvedenih u tlu. Mora biti vododrživa.
- **BERLINSKI ZID** zabijen u tlo na određenim mjestima, opterećenje od tla preuzima samo do dubine iskopa i nije opterećen hidrostatskim tlakom. Osnovni dijelovi su piloti - vodilice (čelični I profili, AB piloti zabijeni ili izvedeni u tlu i slično) i platice koje se spuštaju između pilota tijekom iskopa. Platice mogu biti drvene, čelične ili tvornički izrađene AB.

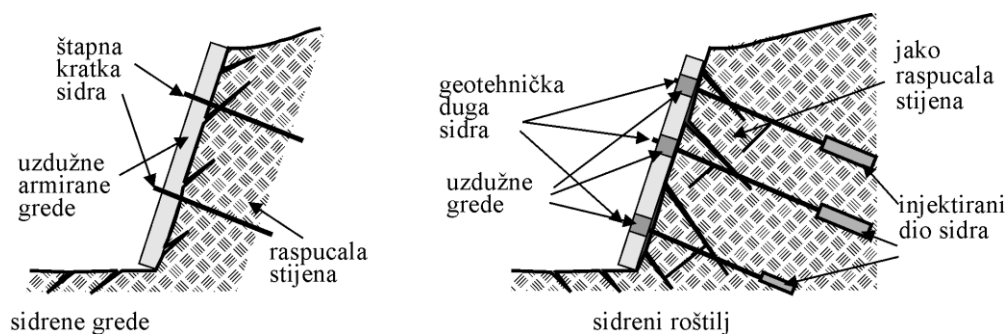
Armiranobetonske zagatne stijenske najčešće su sastavni dio buduće građevine dok su sve druge vrste uglavnom privremene građevine.



Slika 1.14 Nekoliko primjera zagatnih stijenki

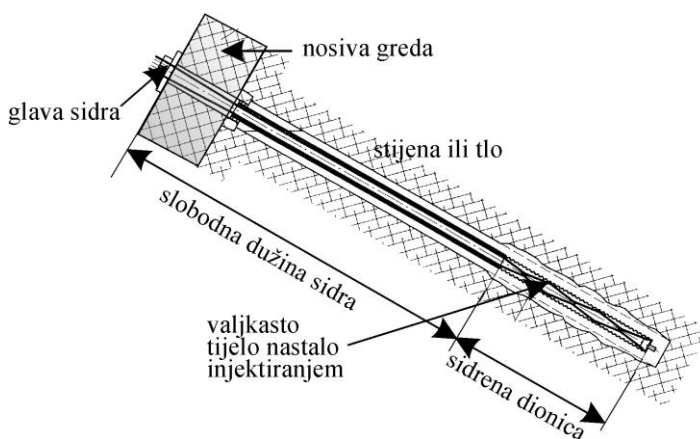
**SIDRENE GRAĐEVINE** opterećenja preuzimaju sustavom sidara učvršćenih iza potencijalnog kliznog klina. Sidra su nosivi elementi ugrađeni u unaprijed izvedene bušotine u tlu. Ima ih raznih vrsta, ovisno o namjeni. Različita su sidra koja se ugrađuju u stijensku masu od onih koja se ugrađuju u tlo. Funkcija im je slična. Povezuju vanjsko lice tla sa stabilnom masom u zaleđu. Uz sidra može na površini tla postojati nosiva građevina. Površinsku nosivu građevinu mogu tvoriti pojedinačni blokovi, grede, ploče i ljske. Opterećenje je uvijek od tla dok je vodi omogućeno slobodno istjecanje na površinu. Na taj način nema mogućnosti pojave hidrostatskog tlaka. U ovu grupu mogu se svrstati i tzv. iglane ili čavlane građevine. One se sastoje od većeg broja sidara i površinske građevine. Neki autori iglane građevine svrstavaju u ojačana tla, zajedno s armiranim tlom.

Sidrene građevine **NEMAJU TEMELJA**, odnosno mogu imati pojedine stope koje preuzimaju dio vlastite težine građevine. Oblik im je uvijek prilagođen obliku pokosa kojeg pridrđavaju. Najčešće se izvode za osiguranje zasjeka u stijenskim masama.



Slika 1.15 Sidrene grede i sidreni roštilj

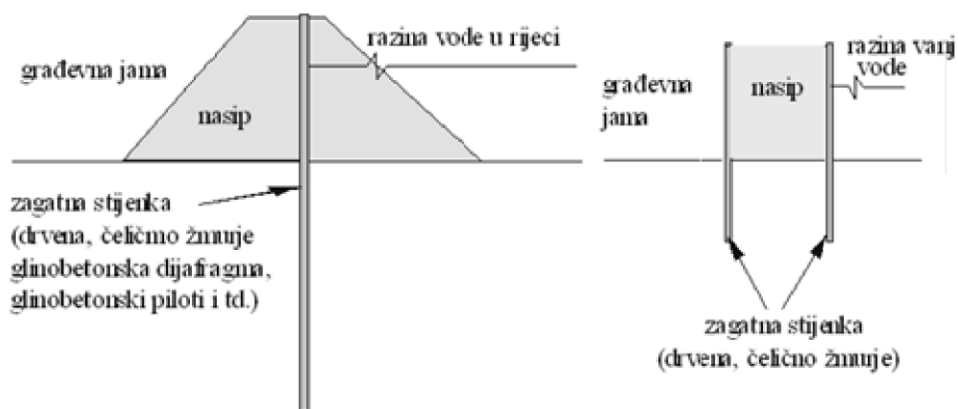
Osnovni nosivi dio sidrenih građevina su **SIDRA**. Na slici 1.16 prikazano je geotehničko sidro.



Slika 1.16 Primjer geotehničkog sidra od čelične užadi

Sidra ima raznih tipova i vrsta te zahtijevaju poseban osvrt, pa će im biti posvećeno posebno poglavlje. Sidra su odavno poznati građevni elementi, koji opterećenja prenose na zatezanje. Tehnološkim razvojem, način ugradnje i pričvršćenje u tlo proširili su mogućnosti primjene sidara.

ZAGATI služe za izvedbu građevnih jama u vodi. Zadatak im je omogućiti rad u suhoj građevnoj jami. Preuzimaju pritisak vode. Spadaju u posebno složenu vrstu potpornih građevina. Nasip je često sastavni dio zagata. Zagati se bitno razlikuju od ostalih potpornih građevina. Zato se spominju posebno. Mogu se oblikovati kao potporni zidovi, armirano tlo, zagatne stijenke i kao kombinacija dijelova zagatnih stijenki i nasipa. To su vrlo zahtjevne i složene geotehničke građevine, koje inženjeru dozvoljavaju veliku slobodu u izboru oblika i materijala za izvedbu. Kod velikih građevnih jama pojedini zagati su zasebne geotehničke građevine i kao takve ih treba i projektirati u svakom smislu.



Slika 1.17 Dva shematska primjera zagata

Raznolikost oblika i materijala je tolika da je vrlo teško nabrojiti sve mogućnosti. Daljnjim razvojem tehnologije, kako strojeva tako i građevinskih materijala, potporne građevine čeka razvoj neslućenih mogućnosti.

## 2 OPTEREĆENJA

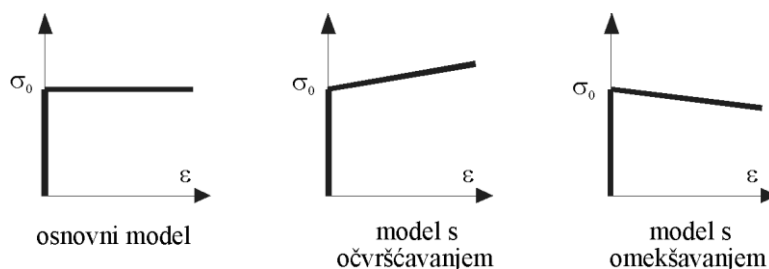
### 2.1 OPĆENITO

Proračun potpornih građevina provodi se u tri koraka. Prvo je potrebno odrediti bočne pritiske na cjelovitu građevinu i nju dimenzionirati tako da bude stabilna i sigurna. Ovo je geotehnički proračun. Zatim je potrebno dimenzionirati pojedine nosive dijelove potpornih građevina. Ovi proračuni mogu spadati u područje drvenih, metalnih, zidanih, betonskih, armiranobetonskih, a u novije doba i vrlo složenih i sofisticiranih građevina sa svim svojstvima koje pojedino gradivo ima. Konačno je potrebno provjeriti stabilnost potporne građevine zajedno s okolnim tлом kao cjelinom. Ovaj treći korak spada u geotehničke proračune analiza stabilnosti.

Potporne građevine preuzimaju bočne pritiske od tla, vode i/ili neke druge tvari koju podupiru. Stoga je potrebno poznavati te bočne pritiske, da bi se moglo proračunati opterećenja na potpornu građevinu, odrediti nosivi sustav i projektirati njezine dimenzije.

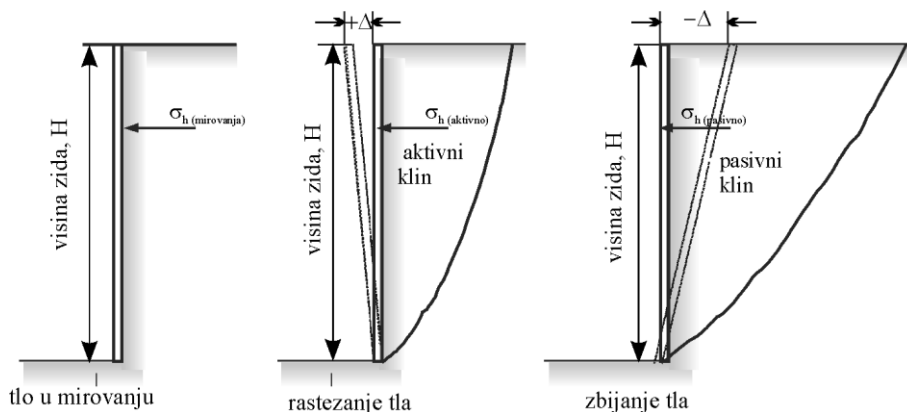
Tlo je tvar vrlo složenog ponašanja. To je razlog zbog kojeg je u oblikovanju matematičkih i fizikalnih modela tla, potrebno teoriju prilagoditi razmatranom slučaju. Za neke slučajeve, zadovoljavajuće rezultate daje teorija elastičnosti. Za izučavanje loma u klasičnoj mehanici tla, koristi se teorija graničnih stanja plastične ravnoteže.

Na slici 2.1 prikazani su modeli tla kojima se koristi teorija graničnog stanja plastičnog loma. Pretpostavka je da se do trenutka dok naprezanje ne dosegne kritičnu vrijednost,  $\sigma_0$ , ne pojavljuje nikakva deformacija. Nakon dosizanja kritične vrijednosti naprezanja, dolazi do loma, naprezanje više ne može rasti, a deformacija raste do trenutka promjene geometrije, koja pokrenuto tijelo dovodi u stanje ravnoteže.



Slika 2.1 Model odnosa naprezanje-deformacija, temelj teorije graničnih stanja plastične ravnoteže

Odnos uspravnog i vodoravnog naprezanja u tlu je promjenjiv, u zavisnosti od veličine i smjera deformacije. Objasnjenje je dao Rankine (1857.) u teoriji plastičnog sloma. Na slici 2.2 prikazan je potrebni smjer pomaka i plohe sloma, za odgovarajuće Rankinovo granično (lomno) stanje naprezanja.



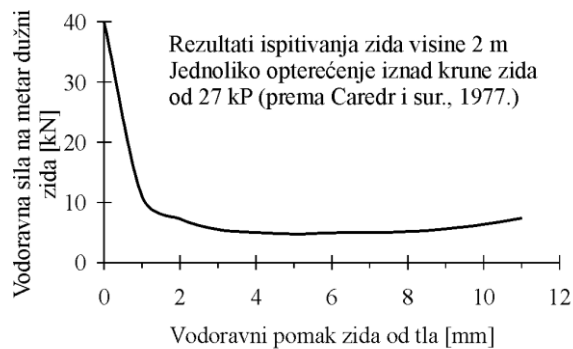
Slika 2.2 Smjer ploha sloma za odgovarajuće pomake u tlu prema Rankinovoј teoriji graničnog stanja plastične ravnoteže

Suvremena rješenja sve više uključuju Rankinovu teoriju preko modela tla u rješavanju zadataka vezanih uz proračune potpornih građevina. Ta rješenja su bliža teoriji elastičnosti i prihvaćaju deformacijska svojstva tla ne kao konstante, već kao promjenjive veličine koje slijede prirodno ponašanje tla pod opterećenjima (nelinearni modeli). Deformacijska svojstva i teoriju graničnih stanja moguće je putem konstitutivnih jednadžbi uklopiti u složene geotehničke proračune koji koriste numeričke analize. Granična stanja plastične ravnoteže osnivaju se na poznavanju Mohr-Coulombovog zakona, odnosno poznavanju parametara čvrstoće na smicanje, (kohezija,  $c$ , i kut unutrašnjeg trenja,  $\phi$ ). Bez poznavanja ovih parametara, rješenja pomoću ove teorije nisu moguća.

Današnje računarske mogućnosti omogućuju korištenje i drugih modela kao na primjer modela s očvršćivanjem ili omekšavanjem, a najčešće linearnoelastičnih-idealno plastičnih modela bez ili s omekšavanjem odnosno očvršćivanjem.

Masa tla može se pokrenuti kada se izvode uspravni ili strmo nagnuti iskopi u tlu. Tada se odstranjuje dio tla i na toj strani nestaje oslonca, pa naprezanje okomito na ravninu lica iskopa ima vrijednost,  $\sigma_{\perp}=0$ . Ukoliko se želi spriječiti promjena geometrije, pokrenutoj masi je potrebno dati oslonac koji će preuzeti opterećenje tlom i spriječiti pomak. Taj oslonac je **POTPORNA GRAĐEVINA**. Želi li se izgraditi nasip na ograničenom prostoru, nedovoljnom da nagib pokosa bude stabilan, on se može izgraditi tako da mu se dio nožice i pokosa zamjeni **POTPORNOM GRAĐEVINOM**. Obje gore navedene građevine biti će opterećene **AKTIVNIM TLAKOM** onda i samo onda ako se tlu iza podupore omogući makar i mali pomak. Na slici 2.3 prikazano je opadanje vrijednosti sile pritiska na poduporu, u slučaju vodoravnog pomaka podupore, za aktivno granično stanje.

Masa tla se može pokrenuti i kad se na nju građevinom vrši pritisak. Tada se zbija dio tla do trenutka dok bočni pritisak ne dostigne graničnu vrijednost,  $\sigma_h=\sigma_{h\text{ maks}}$ . Takvo stanje, pri kojem se građevinom djeluje na tlo na način da se dovede u stanje sloma, naziva se pasivno stanje otpora jer je tlo pasivni učesnik u pomacima kojima se odupire.

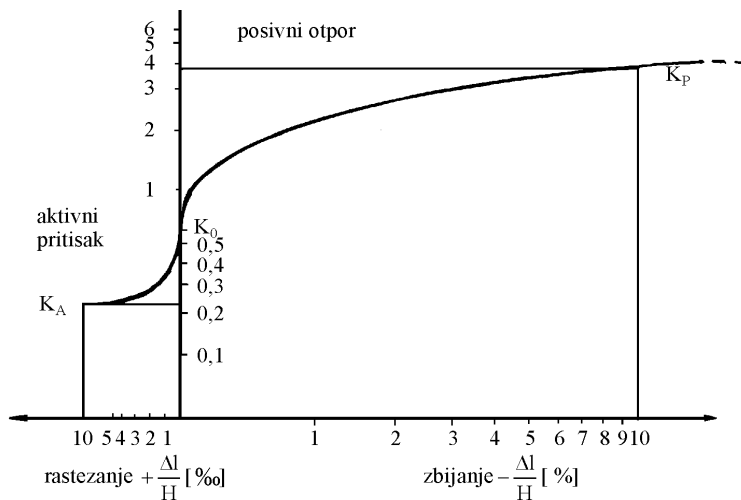


Slika 2.3 Ovisnost veličine bočne sile o vodoravnom pomaku zida od tla (Mesri, 1992.)

**AKO NEMA POMAKA NEMA NI GRANIČNOG STANJA LOMA.**

Aktivni tlak i pasivni otpor dva su krajnja slučaja bočnih naprezanja u tlu.

Pri vodoravnoj deformaciji u tlu, veličina koeficijenta bočnog tlaka ovisi o veličini i smjeru deformacije. Za postizanje pune vrijednosti koeficijenta aktivnog pritiska dovoljna je vrlo mala deformacija, tj. vrlo malo rastezanje, da bi koeficijent postigao punu vrijednost. Za aktiviranje pune vrijednosti pasivnog otpora potrebna je znatno veća tlačna deformacije tj. značajno zbijanje tla. Na slici 2.4 prikazan je odnos koeficijenata bočnog tlaka za aktivno stanje,  $K_A$ , za stanje mirovanja  $K_0$ , i za pasivno stanje  $K_P$ .



Slika 2.4 Odnos koeficijenata bočnog tlaka za granična stanja ravnoteže i stanje mirovanja (Reimbert, 2001.)

Iz slike 2.4 jasno je da su deformacija građevine, njena krutost, smjer pomaka ali i još neka svojstva, vrlo bitni za ponašanje odnosno veličinu bočnog pritiska na potpornu građevinu.



## 2.2 TLAK MIROVANJA

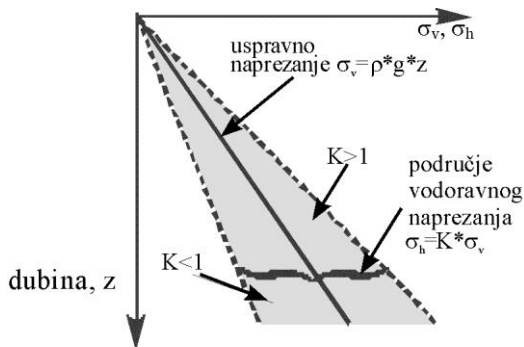
Mehanika tla daje teoretsko rješenje za odnose naprezanja u tlu, na dubini  $z$ , uslijed vlastite težine tla. Glavna naprezanja, uspravno i vodoravno, međusobno su zavisna. Ova su dva naprezanja, za tlo vodoravne površine, međusobno povezana koeficijentom bočnog tlaka mirovanja,  $K_0$  na način iskazan jednadžbom 2.1.

$$\sigma_h = K_0 * \sigma_v \quad (2.1)$$

Mnogo češće nego je to stvarno u praktičnim proračunima provedeno, potporna građevina mora preuzeti bočni tlak, a da pri tome ne dođe do nikakvog pomaka. To se odnosi na potporne zidove podrumskih prostorija, zagatne stijenke koje štite postojeće temelje i/ili podrumске zidove i slično. Kod ovakvih potpornih građevina **ne smije se pojaviti pomak**, jer dolazi do oštećenja upravo onoga što se želi zaštititi ili izgraditi. Tada se proračun provodi uzimajući u obzir stanje mirovanja, a odnos vodoravnog i uspravnog naprezanja vezan je koeficijentom tlaka mirovanja,  $K_0$ .

Koeficijent bočnog tlaka,  $K$ , koji povezuje veličine glavnih naprezanja nije jednoznačan i teško ga je odrediti. Razni autori predložili su približne vrijednosti ili izraze za koeficijent tlaka mirovanja,  $K_0$ . Izrazi i vrijednosti dani su u tabeli 2.1

U prekonsolidiranim tlima koeficijent bočnog tlaka mirovanja može biti veći od 1 (vidi tablicu 2.2), tj. vodoravno naprezanje u stanju mirovanja je veće od uspravnog. Ovo je posljedica svojstva tla da “pamti” povijest opterećenja. Za vodoravno uslojeno tlo ovaj je odnos prikazan na slici 2.5. Javlja se ne samo u tlu već i u stijenskim masama u područjima reversnih rasjeda.



Slika 2.5 Područje vrijednost vodoravnih naprezanja za stanje mirovanja

Kad iza podupore površina tla nije vodoravna, proračun postaje još složeniji. Kosina tla iza podupore uzrokuje povećani bočni pritisak u stanju mirovanja jednako kao i za slučaj, kada se podupora može pomaknuti. Uočivši ovu pojavu, priručnik za projektiranje potpornih zidova (US Army Corps of Engineers, 1989.) upućuje na jednadžbu, koja se nalazi u uputama «Danish Code» (Danski geotehnički institut, 1978.). I ovaj se izraz nalazi u tabeli 2.1.

Istraživanja su pokazala da je razlika u vrijednostima računatim prema izvornom i pojednostavnjenom Jákyevom izrazu, za kutove unutarnjeg trenja  $\varphi'$  između  $20^\circ$  i  $45^\circ$ , od 9 % do 16 % što nije zanemarivo. Tumačenje prihvatljivosti pojednostavljenog Jákyevog izraza leži u činjenici da je greška u određivanju vrijednosti kuta unutarnjeg trenja  $\varphi'$  daleko veća.

Tabela 2.1 Koeficijent bočnog tlaka mirovanja prema nekim autorima

Tlo	Teorija	Autor	$K_0$
normalno konsolidirano	plastičnosti	Jáky (1944.) ( za rahli pijesak)	$(1 - \sin \varphi') \frac{\left(1 + \frac{2}{3} \sin \varphi'\right)}{(1 + \sin \varphi')}$
		Jáky (1944.) pojednostavnjena	$1 - \sin \varphi'$
		Danski geotehnički institut (1978.) (nagnuta površina tla iza podupore za kut $\beta$ )	$(1 - \sin \varphi')(1 + \sin \beta)$
		Brooker i Ireland (1965.) (daje rezultate sličnije teoretskoj Jákyevoj jednadžbi)	$0,95 - \sin \varphi'$
		Šuklje (1979.)	nekoherentno tlo; $< 0,5$ koherentno tlo; $> 0,5$
prekonso- lidirano		Mayne i Kulhway (1982.) (OCR = $\sigma_p' / \sigma_{v0}$ , Roje-Bonacci, 2003.)	$(1 - \sin \varphi') OCR^{\sin \varphi}$
		Terzaghi (1920.)	$0,4 - 0,5$
zbijeni pijesak		Sherif i sur. (1982.) $\rho_{komp}$ – zbijena gustoća; $\rho_{min}$ – minimalna gustoća.	$(1 - \sin \varphi') - 5,5 \left[ \frac{\rho_{komp}}{\rho_{min}} - 1 \right]$
	elastičnosti	Moroto i Muramatsu (1987.): $E_h$ i $E_v$ moduli elastičnosti tla u vodoravnom (h) i uspravnom (v) smjeru	$\sqrt{\frac{E_h}{E_v}}$
		Tschebotarioff (1973.) (v, Poissonov koeficijent)	$\frac{v}{1 - v}$ ( $v_{max} = 0,5$ )

Posebna istraživanja provedena su za slučajeve potpornih zidova iza kojih se nalaze nasipi. Kada se nasipi ugrađuju ispravno, zbijaju se u slojevima. Kako bi se mogli zbiti, koriste se različiti strojevi za zbijanje. Utjecaj različitih strojeva pokazao je različite vrijednosti dodatnog bočnog opterećenja na zid. O ovim će pritiscima više biti govora kod gravitacionih potpornih zidova ispred nasipa.

U literaturi se mogu naći i preporuke za tipične vrijednosti koeficijenta,  $K_0$ , te se jedna takva grupa vrijednosti daje u tabeli 2.2.

Tabela 2.2 Tipične vrijednosti koeficijenta tlaka mirovanja,  $K_0$  (Craig, 1997.)

Vrsta tla	$K_0$
zbijeni pijesak	0,35
rahli pijesak	0,60
normalno konsolidirana glina	0,5-0,6
prekonsolidirana glina (OCR=3,5)	1,0
jako prekonsolidirana glina (OCR=20)	3,0

### 2.3 GRANIČNA STANJA PLASTIČNE RAVNOTEŽE

Bit metode graničnih stanja plastične ravnoteže sastoji se u tome, da se pronade ploha (slika 2.2), po kojoj će se pod određenim uvjetima (promjena geometrije ili promjena opterećenja), dogoditi plastifikacija do loma u tlu. Tada se dio tla, koji po toj plohi gubi vezu sa preostalim tlom, smatra krutim tijelom. Daljnji postupak sastoji se u primjeni opće poznatih statičkih metoda za određivanje ravnoteže u sustavu krutih tijela. Pri tom u račun ulaze tri poznate jednadžbe ravnoteže:

$$\begin{aligned}\Sigma X &= 0 \\ \Sigma Y &= 0 \\ \Sigma M &= 0\end{aligned}\quad (2.2)$$

i zakon loma, koji je u tlu određen Mohr-Coulombovim zakonom čvrstoće na smicanje:

$$\tau' = c' + \sigma_n' \operatorname{tg} \varphi' \quad (2.3)$$

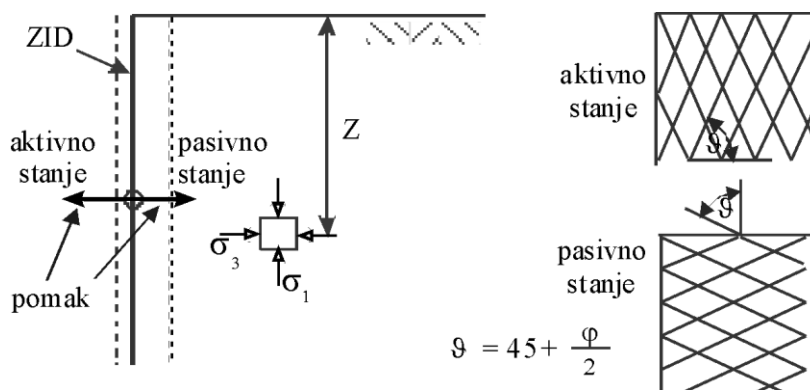
Dva su autora ključna za temeljnu razradu metode graničnih stanja plastične ravnoteže. O obojici je već nešto rečeno. To su Rankine i Coulomb. Rankine je 1857. godine dao teoretsko rješenje za bočna naprezanja u tlu uslijed vodoravnih deformacija za beskonačni poluprostor omeđen vodoravnom ravninom. Kasnije je dopunio rješenje i za slučaj kada je ravnina koja omeđuje poluprostor nagnuta. Njegovo se rješenje temelji na poznavanju zakona čvrstoće na smicanje (jed. 2.3) i uspravnog naprezanja,  $\sigma_v$  (koje ovisi o gustoći tla,  $\rho$ ) u promatranoj točki na dubini,  $z$ . Coulomb (1773.) je dao rješenje za određivanje kliznog tijela iza potpornog zida koje daje najmanje odnosno najveće opterećenje na potporni zid ovisno radi li se o aktivnom ili pasivnom stanju naprezanja. Metoda je grafička. Potrebno je poznavati čvrstoću na smicanje iz jednadžbe 2.3 i gustoću tla,  $\rho$ .

Parametri čvrstoće na smicanje,  $c$ ,  $i$ ,  $\varphi$ , i gustoća tla, određuju se u laboratoriju i/ili iz podataka terenskih pokusa (penetracije, krilna sonda). Kada potporna građevina pridržava prirodno tlo, potrebno je u laboratoriju ispitati neporemećene uzorke uzete tijekom terenskih istražnih radova. Kada se na potporna građevinu oslanja nasip, potrebno je propisati njegove osobine. Zatim je potrebno izraditi umjetne uzorke koji će imati osobine propisane za nasip. Takvi se umjetni uzorci izrađuju u Proctorovom uređaju (Proctor, 1933.), nakon što je određena optimalna vlažnost i odgovarajuća najveća suha gustoća. Tlo se u Proctorov uređaj ugrađuje s optimalnom vlažnošću i zbija po standardnom ili modificiranom Proctorovom postupku (ovisno kako će se ugrađivati). Od tako zbijenog tla oblikuju se uzorci za određivanje gustoće, parametara čvrstoće na smicanje, koeficijenta procjeđivanja i modula stižljivosti budućeg nasipa.

Rezultati se koriste za određivanje Mohr-Coulombovog zakona čvrstoće na smicanje za tlo kojim je potporna građevina opterećena. Bez ovih podataka nije moguće ući u razmatranje teorije graničnih stanja plastične ravnoteže ni drugih svojstava budućih nasipa.

### 2.3.1 Rankineova teorija graničnih stanja plastične ravnoteže

Na slici 2.6 grafički je prikazana Rankineova teorija primijenjena na potporne građevine, kojom je moguće odrediti odnose naprezanja u dva granična stanja.



Slika 2.6 Skica vodoravne ravnine i pomaka uspravnog zida za Rankineovu teoriju graničnih stanja plastične ravnoteže

Pretpostavke pod kojima vrijedi ova teorija su slijedeće:

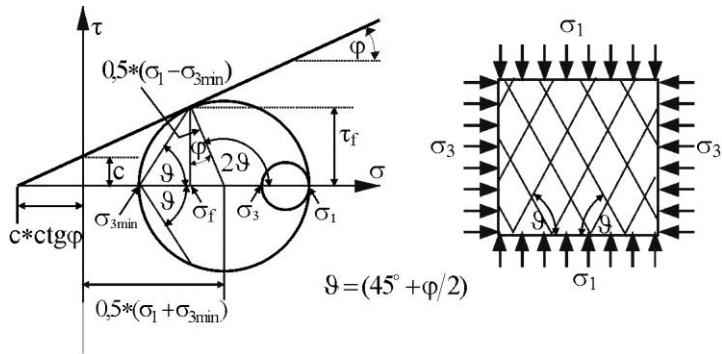
1. Površina tla je vodoravna;
2. Podupora je uspravna;
3. Pomak u tlu je vodoravan (rastezanje ili zbijanje);
4. Nema trenja između tla i podupore.

Ako u vodoravnom smjeru tlu nestaje oslonca, dolazi do sloma po kritičnom kliznom klinu. Kada se klin pridrži građevinom ona prihvaća najmanje moguće bočno opterećenje. Takvo je stanje Rankine nazvao **AKTIVNO STANJE GRANIČNE RAVNOTEŽE** (sl. 2.2 u sredini)

U drugom slučaju granično stanje nastaje kada građevina zbijat tlo. Pri tom tlo u graničnom stanju pruža najveći mogući otpor takvom naprezanju. To stanje Rankine je nazvao **PASIVNO STANJE GRANIČNE RAVNOTEŽE** (slika 2.2 desno).

Granična stanja mogu se prikazati Mohrovim krugovima kao na slikama 2.7 i 2.8. Na tim se slikama jasno uočava smjer plohe sloma koji je također prikazan i na slici 2.6. Teorija vrijedi za beskonačni poluprostor omeđen vodoravnom površinom.

Ako se iz primarnog stanja naprezanja na nekoj dubini  $z$ , gdje vladaju uspravno efektivno naprezanje,  $\sigma'_1 = (\rho * g * z) - u$ , i vodoravno efektivno naprezanje,  $\sigma'_3 = \sigma'_1 * K_0$ , pređe u stanje aktivne granične ravnoteže, kako je to prikazano na slici 2.7, može se iz geometrijskih uvjeta, prikazanih Mohr-Coulombovim zakonom, odrediti vrijednost koeficijenta bočnog tlaka,  $K_A$ .

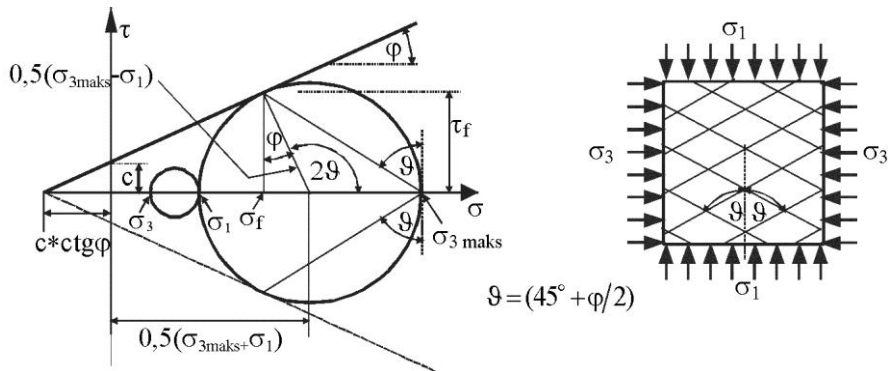


Slika 2.7 Lom uslijed rastezanja tla i smanjenja  $\sigma_3$  na minimum

Izraz za,  $K_A$ , u takvim uvjetima glasi:

$$K_A = \text{tg}^2(45^\circ - \varphi/2) \quad (2.4)$$

Ako se iz primarnog stanja naprezanja na nekoj dubini  $z$ , gdje vladaju uspravno efektivno naprezanje,  $\sigma'_1 = (\rho * g * z) - u$ , i vodoravno efektivno naprezanje,  $\sigma'_3 = \sigma'_1 * K_0$ , pređe u stanje pasivne granične ravnoteže, kako je to prikazano na slici 2.8, može se iz geometrijskih uvjeta, prikazanih Mohr-Coulombovim zakonom, odrediti vrijednost koeficijenta bočnog tlaka,  $K_P$ .



Slika 2.8 Lom uslijed zbijanja tla i povećanja  $\sigma_3$  na maksimum

Izraz za,  $K_P$ , u takvim uvjetima glasi:

$$K_P = \text{tg}^2(45^\circ + \varphi/2) \quad (2.5)$$

Pasivno se granično stanje u tlu javlja kod sidrenih blokova i zidova za zatege, uz upeti dio zagatnih stijenki, u nasutim branama na uzvodnoj strani iza vodonepropusnih ekrana ili jezgre tj. svugdje gdje je tlo pritisnuto ili stlačeno.

Iz geometrijskih uvjeta na slikama 2.7 i 2.8 moguće je povezati vodoravna naprezanja  $\sigma_h$  i uspravna naprezanja  $\sigma_v$  kako je to prikazano jednadžbama 2.6 i 2.7.

$$\sigma_A = K_A * \sigma_v - 2c\sqrt{K_A} \quad (2.6)$$

$$\sigma_p = K_p \cdot \sigma_v + 2c\sqrt{K_p} \quad (2.7)$$

Za poznate vrijednosti parametara čvrstoće na smicanje moguće je za odabrane visine denivelacije tla izračunati vrijednosti aktivnog tlaka i pasivnog otpora kako je to prikazano na slici 2.9a i 2.9b.

Ako se odabere za,  $\sigma_A = 0$ , iz jednadžbe 2.6 se dobiva da je:

$$K_A \cdot \rho \cdot g \cdot z_0 = 2 \cdot c \cdot \sqrt{K_A} \quad (2.8)$$

iz čega proizlazi da je:

$$z_0 = \frac{2 \cdot c}{\rho \cdot g \cdot \sqrt{K_A}} \quad (2.9)$$

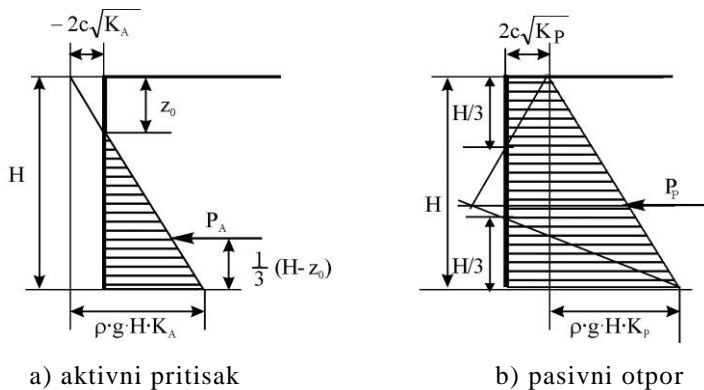
Iz jednadžbe 2.9 proizlazi da u koherentnim tlima postoji određena visina do koje je moguće uspravno zasjeci, a da pri tome ne dođe do urušavanja, klizanja ili odrona. Proračun aktivnog tlaka u takvim tlima dat će i visinu zasjeka do koje je ukupna sila aktivnog tlaka jednaka nuli tj.:

$$E_A = \int_0^H \sigma_A \cdot dz = 0 \quad (2.10)$$

Uz pretpostavku linearne raspodjele aktivnog tlaka po dubini, ukupna visina zasjeka do koje je teoretski vrijednost ukupne sile aktivnog tlaka jednaka nuli, ( $E_A=0$ ), iznosi:

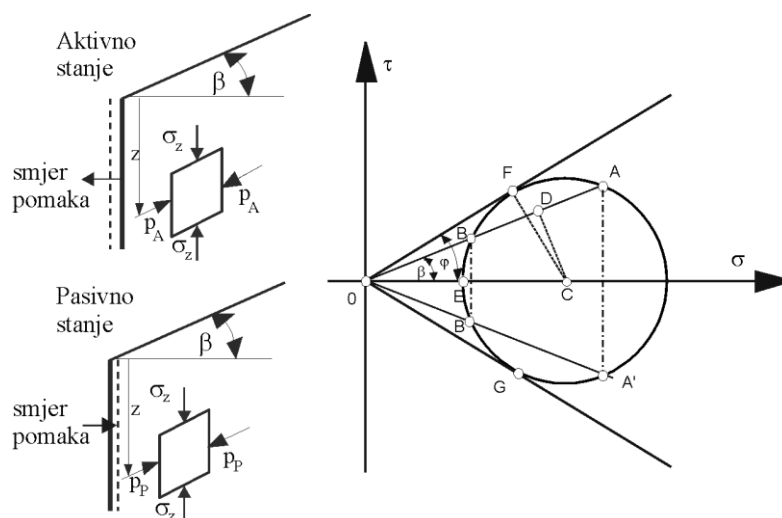
$$H_0 = 2z_0 = \frac{4 \cdot c}{\rho \cdot g \cdot \sqrt{K_A}} \quad (2.11)$$

Ovo je samo teoretski ispravno. U praktičnoj primjeni ovakvi se zasjeci koriste samo kod privremenih zahvata u tlu. Nakon nekog vremena, a uslijed pojave vlačnih naprezanja u kritičnom kliznom klinu, koji se oblikuje iza zasjeka, doći će do pojave deformacije koja će uvjetovati pojavu rezidualne čvrstoće na smicanje (Roje-Bonacci, 2003.).



Slika 2.9 Raspodjela aktivnog tlaka i pasivnog otpora u koherentnom materijalu

Rankine je prva rješenja dao za vodoravnu površinu tla. Pritom tvrdi da je ukupna sila pritiska,  $P_A$ , odnosno otpora,  $P_P$ , uvijek usporedna s površinom tla. Kasnije je ovo proširio i na nagnutu površinu tla iza zida, kako je to prikazano na slici 2.10 za nekoherentno tlo i translatorsni pomak zida. Analizom slike 2.10 (Roje-Bonacci, 2003.) dobiju se izrazi za koeficijent aktivnog tlaka i pasivnog otpora, pomoću kojih se mogu vršiti proračuni bočnih naprezanja na potpornu građevinu s nagnutom površinom tla iza podupore.



Slika 2.10 Granično stanje ravnoteže u tlu s nagnutom gornjom površinom (Craig, 1997.)

Za aktivni pritisak izraz za koeficijent bočnog tlaka glasi :

$$K_A = \frac{\cos \beta - \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \varphi}}{\cos \beta + \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \varphi}} \quad (2.12)$$

dok za pasivni otpor izraz za koeficijent bočnog tlaka iznosi:

$$K_P = \frac{\cos \beta + \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \varphi}}{\cos \beta - \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \varphi}} \quad (2.13)$$

REZIDUALNA čvrstoća na smicanje odlikuje se bitno manjom kohezijom,  $c$ , te će se na površini tla pojaviti vlačne pukotine. Njihova se dubina vremenom povećava i dolazi do promjene uvjeta ravnotežnog stanja te do otkidanja kritičnog kliznog klina. Stoga za trajne potporne građevine nije preporučljivo ukupnu silu aktivnog tlaka u koherentnim materijalima računati kao:

$$E_A = \int_0^H \sigma_A * dz \quad (2.14)$$



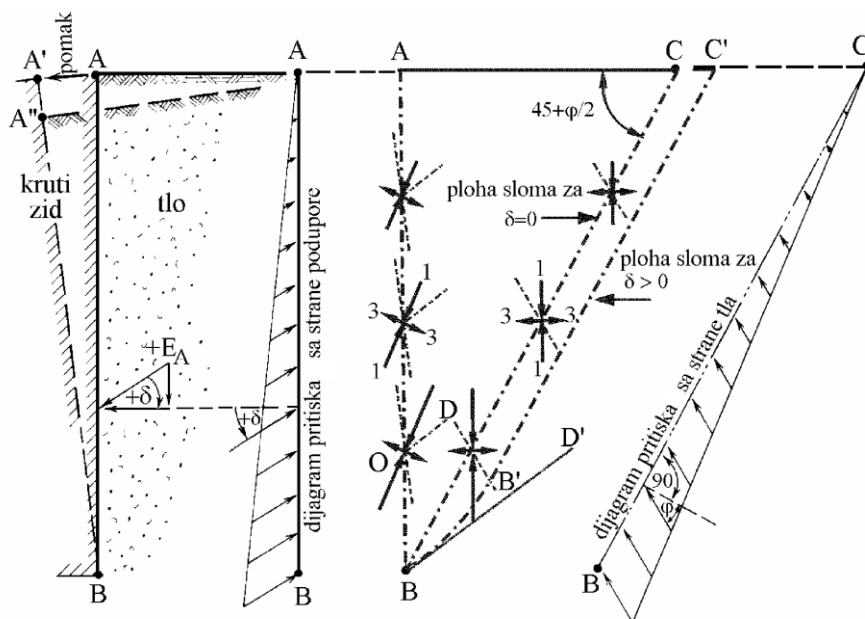
jer u tom slučaju dio dijagrama koji odgovara vlačnim napreznjima umanjuje ukupnu vrijednost aktivnog pritiska. U tom slučaju aktivni pritisak predstavlja ukupnu površinu pozitivnog dijela dijagrama:

$$E_A = \int_{z_0}^H \sigma_A * dz \quad (2.15)$$

Rankine je 1857. godine razmatrao svoju teoriju za slučaj stabilnosti nevezanog tla. Kasnije je teorija proširena i na koherentna tla, za koja se također može dobiti rješenja za aktivno i pasivno granično stanje kao što je to prethodno pokazano.

### 2.3.1.1 Utjecaj trenja između podupore i tla iza nje

U svojim analizama Rankine je zanemario trenje između potporne građevine i tla. Upravo iz tog razloga se pokazalo, da tvrdnja o smjeru pritisaka na zidove nije istinita jer je značajan utjecaj trenja između građevine i tla. To trenje dovodi do skretanja smjera pritiska na potpornu građevinu. Uvažavajući elipsu napreznja (Šimić, 2002.) u točki, moguće je za svaki poznati par napreznja,  $\sigma_1$  i  $\sigma_3$ , odrediti smjer i veličinu bilo kojeg napreznja koje djeluje na bilo koju ravninu koja prolazi kroz promatranu točku. Temeljem tih analiza određena je veličina i smjer napreznja na kliznoj prizmi za aktivno i pasivno stanje. Ovaj je utjecaj prikazan na slici 2.11 (Tschebotarioff, 1973.) za aktivno stanje napreznja, kada se potporna građevina pomiče na način da se zaokreće oko najniže točke, B.



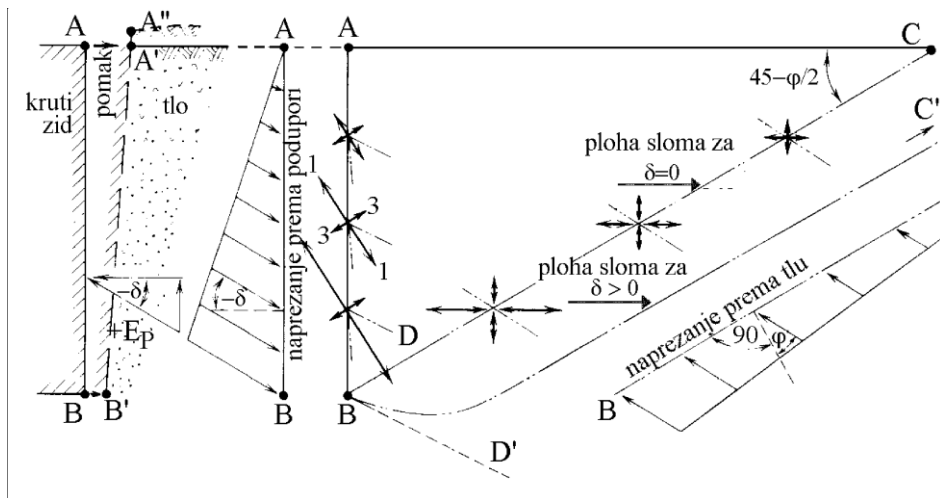
Slika 2.11 Utjecaj trenja na oblik plohe sloma za aktivno stanje napreznja (Tschebotarioff, 1973.)

U tom slučaju klin tla mora kliznuti naniže (do točke A") po stražnjem licu stijenke podupore. Pri tom se aktivira trenje između podupore i tla. Na slici 2.11 su prikazani dijagrami naprezanja na obje stranice prizme tla, koja se oslanja na poduporu: onoj prema podupori i onoj prema tlu. Uočljivo je da trenje dovodi do zakretanja smjera klizne plohe u dnu potporne konstrukcije (tangenta B, D'). Klizna ploha više nije trokutasta već iz pravca pod kutom određenim pomoću Rankineovog stanja naprezanja ( $\theta=45^\circ+\varphi/2$ ), prelazi u krivulju koja prolazi kroz najnižu točku podupore na način da tangira pravac pod kutom jednakim kutu trenja između zida i tla. Za aktivno stanje to je kut,  $+\delta$ . Na slici su označene i klizne plohe za Rankineovo stanje naprezanja na ravnoj kliznoj plohi prema tlu kao i one, koje odgovaraju plohi uz stijenkku na koju djeluje trenje. laboratorijski model ovakve klizne plohe prikazan je na slici 2.12.



Slika 2.12 Laboratorijski model s rekonstruiranom kliznom plohom pri zaokretu podupore oko točke B, aktivno stanje (model autora)

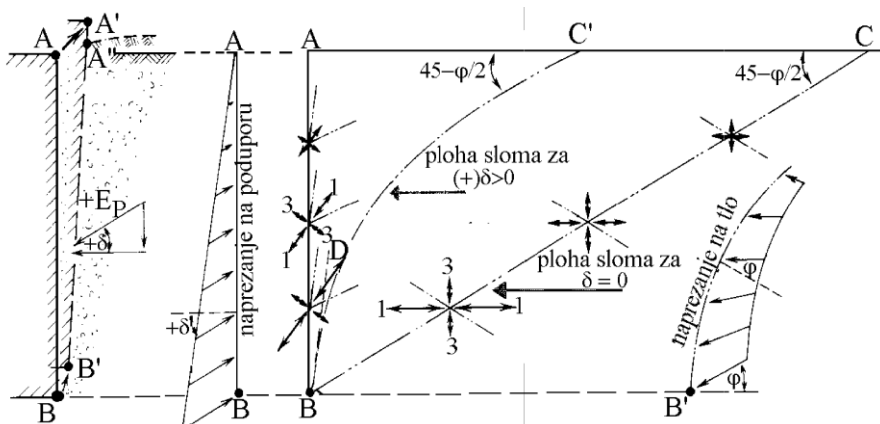
Na slici 2.13 (Tschebotarioff, 1973.) prikazan je oblik plohe sloma za slučaj pasivnog stanja granične ravnoteže pri pomicanju podupore vodoravno, prema tlu, bez pomicanja u uspravnom smjeru. Pri konstrukciji smjera plohe sloma i određivanju veličine naprezanja, također je korištena elipsa naprezanja. Uočljivo je zakretanje plohe sloma na dnu podupore na način da dno plohe završava tangencijalno prema pravcu nagnutom pod kutom trenja između podupore i tla. Za ovakav pomak taj kut ima vrijednost,  $-\delta$ . Na slici su prikazane i plohe sloma za Rankineovo pasivno granično stanje naprezanja na ravnoj plohi prema tlu, kao i plohe sloma na plohi uz poduporu.



Slika 2.13 Utjecaj trenja na oblik plohe sloma za pasivno stanje naprezanja

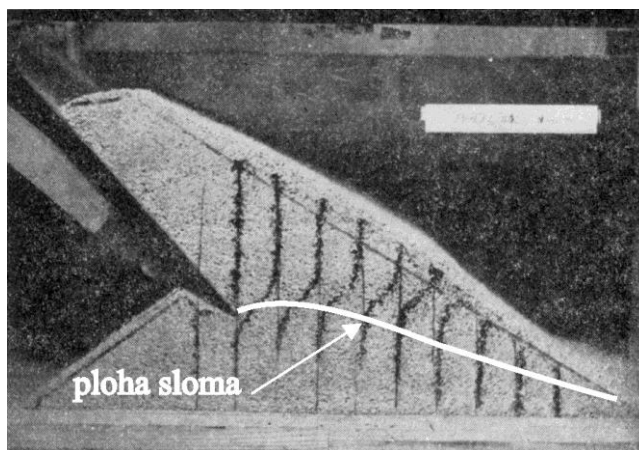
Na slici 2.14 (Tschebotarioff, 1973.), prikazan je oblik plohe sloma za slučaj pasivnog stanja granične ravnoteže, kada se podupora podiže prema gore u odnosu na prvobitni položaj. Krivulja postaje konkavna. Ovakav slučaj javlja se kod zoniranih nasutih građevina, kada je jezgra na nizvodnoj strani u padu u smjeru nizvodnog pokosa. Hidrostatski tlak tada nastoji podignuti lice jezgre. Slično se može dogoditi i kod glinobetonских protufiltracionih dijafragmi koje štite od procjeđivanja duboke građevne jame kao dijelova zagata ili općenito elemenata zaštite od procjeđivanja u pokosima zasjeaka.

Slično bi se moglo pokazati i za stanje aktivnog tlaka u slučaju da potporni zid tone, tj. pomiče se prema dolje. Ploha sloma je i u takvom slučaju konkavna (Tschebotarioff, 1973.; Caquot i Kérisel, 1967.).



Slika 2.14 Ploha sloma za pasivno stanje, kada se zid pomiče k tlu i prema gore

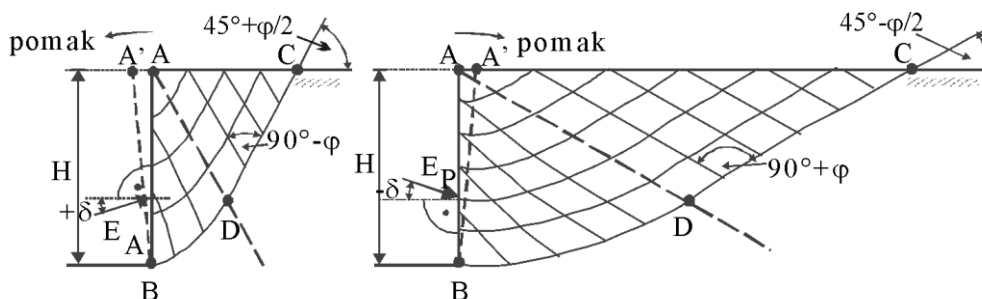
Ispitivanjem utjecaja kose glinene jezgre, opterećene hidrostatskim tlakom, na potpornu (nizvodnu) zonu nasute brane, na modelima, Nonveiller (1957.) je dobio konkavne plohe sloma. U tom slučaju glinena jezgra se izdiže, gura potpornu zonu, javlja se pasivni otpor i nastaje konkavna ploha sloma. Na slici 2.15 prikazan je jedan rezultat tog modelskog ispitivanja.



Slika 2.15 Konkavna ploha sloma na modelu brane (Nonveiller, 1957.)

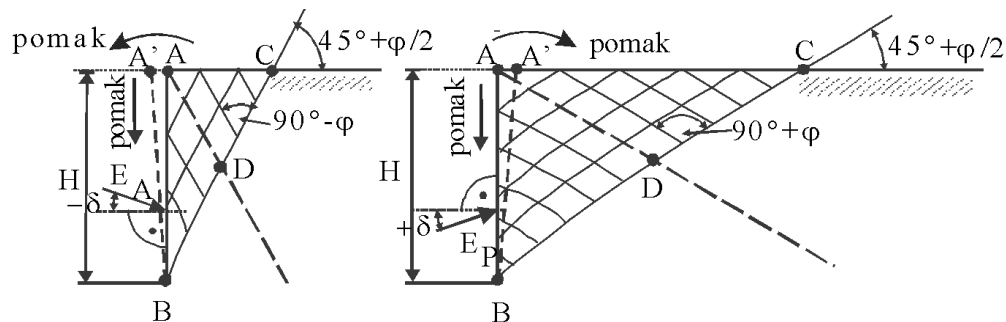
Oblik plohe sloma je tijesno vezan uz oblik raspodjele i veličinu bočnih pritisaka koje tlo predaje na potpornu građevinu. Stoga o tome treba voditi računa. To naročito vrijedi prilikom korištenja Rankineovih rješenja. Kako pri proračunu aktivnih pritisaka utjecaj trenja smanjuje vrijednost pritiska na zidu to je proračun za takve slučajeve na strani sigurnosti. Slučaj je obrnut za stanje pasivnog sloma, kada utjecaj trenja povećava vrijednost pasivnog otpora.

Uvažavajući teoretska rješenja sa slike 2.11 i 2.13, na slici 2.16 prikazane su kritične klizne plohe za slučaj kada podupora zaokreće oko točke B za aktivno i pasivno stanje. Na crtežima se uočava klin unutar kojeg vrijedi Rankineova teorija graničnih stanja (između točaka A, C i D), kao i područje uz poduporu koje se ponaša nešto drugačije.



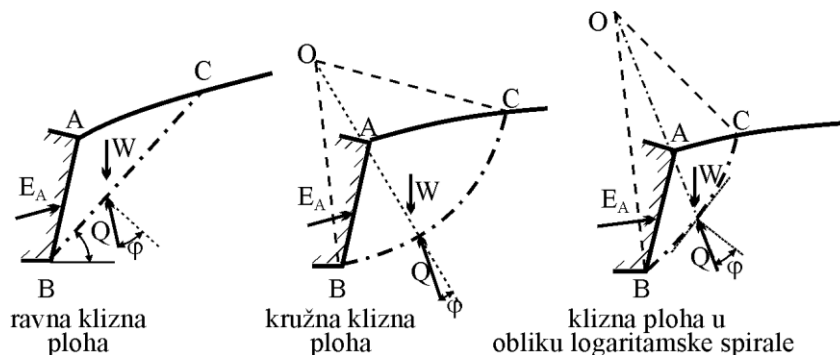
Slika 2.16 Plohe sloma za čisto zakretanja podupore oko točke B (Kézdi, 1969.)

Na slici 2.17 prikazane su kritične klizna plohe kada osim što zaokreće, podupora tone u odnosu na klizni klin, za aktivno i pasivno stanje. I ovdje je uočljivo područje za koje vrijedi Rankineova teorija (trokut A, C i D). Razlika u veličini kliznih klinova sa slika 2.16 i 2.17 je očita.



Slika 2.17 Plohe sloma pri zakretanju i tonjenju podupore (Kézdi, 1969.)

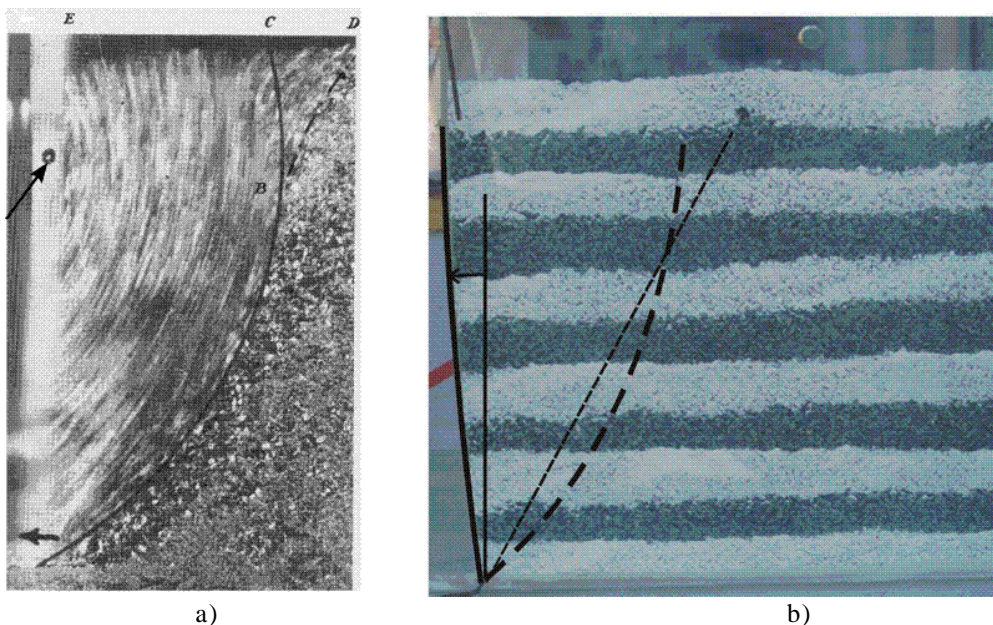
Na slici 2.18 prikazane su kritične klizne plohe koje se najčešće koriste u praksi za proračun bočnih pritisaka na potporne građevine. Ovo je naročito značajno za koherentne materijale, koji mogu biti strmo nagnuti iza podupore, te na nju vršiti znatan pritisak u trenutku sloma.



Slika 2.18 Najčešći oblici ploha sloma u proračunima (Kézdi, 1969.)

Tri prikazana oblika, geometrijski su jednostavna za određivanje POVRŠINE kliznog tijela, a što je potrebno za određivanje težine tla za meter dužni podupore i TEŽIŠTA lika omeđenog kliznom plohom. Ova su dva podatka nužna za grafostatičke analize bočnih pritisaka na potporne građevine. Valja se prisjetiti da su grafostatičke metode dugo vremena davale najbrža i dovoljno točna rješenja za razna dimenzioniranja u statici pa tako i za dimenzioniranja potpornih građevina.

Na slici 2.19 prikazana je: a) ploha sloma dobivena u laboratoriju na modelu od pijeska pri okretanju podupore oko točke O (Tschebotarioff, 1973.) i b) ploha sloma pri savijanju uspravne podupore zbog njene male krutosti (rezultati ispitivanja autora, 2004.)

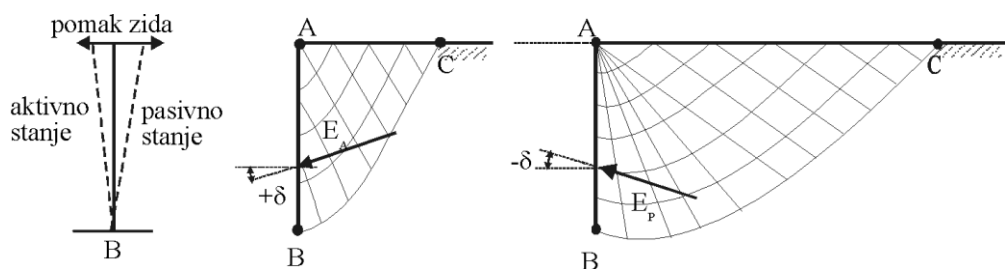


Slika 2.19 Ploha sloma a) uslijed okretanja podupore oko točke O označene strelicom (Tschebitarioff, 1973.) i b) ploha sloma pri savijanju uspravne podupore zbog male krutosti (ispitivanja autora, 2004.)

### 2.3.2 Coulombova teorija bočnog zemljanog pritiska

Teorija se osniva na analizi opterećenja uspravne stijenke masom tla iza nje. Coulomb je bio svjestan da slom u tlu, u tom slučaju nastaje po zakrivljenoj plohi, ali je izvršio pojednostavljenje i analizirao silu koju na uspravnu stijenku predaje prizma tla. Zadatak rješava analitički, derivirajući izraz za bočnu silu  $E$ , (jednadžba 2.20) tako da dobije kritičnu vrijednost. U izvornom radu Coulomb 1773.godine razmatra nekoherentni materijal i ne uzima trenje između tla u stijenke. Teorija je dopunjena uvrštavanjem trenja između stijenke i tla, a zbog jednostavnijeg proračuna, potrebnog za nalaženje kritične klizne plohe, u upotrebu je ušla grafička metoda pomoću Culmann-ovog, verižnog poligona sila (Culmann, 1866.).

Na slici 2.20 prikazan je oblik pomaka za koji Coulomb vrši proračun kao i odgovarajuće kritične klizne plohe. Kad se podupora udaljava od tla nastaje aktivno stanje granične ravnoteže. Tlo se rasteže u vodoravnom smjeru, a bočni otpor na strani podupore pada na nulu. Kada se podupora oslanja na tlo i zbija ga do mjere u kojoj se pojavljuje takav bočni pritisak pri kojem dolazi do sloma u tlu zbog povećanja bočnih naprezanja, nastaje pasivno stanje granične ravnoteže. Plohe sloma su u oba slučaja zakrivljene pri dnu podupore, kao na slici 2.20.

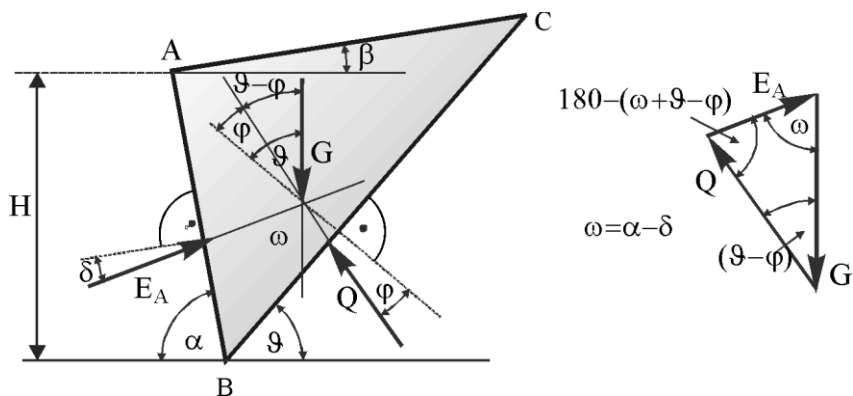


Slika 2.20 Pomak i oblik kliznog klina za Coulombova stanja granične ravnoteže

### 2.3.2.1 Aktivno stanje

Iako je ova teorija starija od Rankineove, razumljivija je kada se prethodno objasni Rankineovo tumačenje. Coulomb ju je razvio izučavajući praktične primjere potpornih zidova vojnih utvrda u Africi.

Na slici 2.21 prikazana je prizma tla pridržana poduporom AB. Odstrani li se podupora, prizma tla ABC će kliznuti duž linije AC. Ako je pomak linije AB dovoljno mali, da se tlo ne uruši, već da se samo osloni na poduporu AB, na njoj će se pojaviti reaktivno naprezanje koje se može prikazati silom,  $E_A$ . Uzimajući u obzir trenje između podupore i materijala iza nje, javit će se zakretanje sile,  $E_A$ , u odnosu na okomicu na liniju AB pod kutom,  $+\delta$ . U razmatranom slučaju materijal je bez kohezije. Na slici su prikazane sve sile i kutovi potrebni da se zadatak riješi grafički. Metoda nije potpuno egzaktna jer se vrši analiza ravnoteže sila, ali ne i momenata.



Slika 2.21 Grafički prikaz za Coulombovo rješenje aktivnog pritiska na poduporu A-B za nekoherentno tlo

Na slici 2.21,  $G$ , je težina promatrane prizme tla,  $Q$ , reakcija tla na ravninu (B-C) tj. na plohu sloma po kojoj se odvaja klin tla, a,  $E_A$ , sila aktivnog pritiska. Uz pretpostavku da se aktivni pritisak na stijenu (A-B) raspodjeljuje linearno, može

se izračunati vrijednost ordinate,  $e_A$ , aktivnog pritiska na dubini  $H$ , pomoću jednadžbe:

$$E_A = \int_0^H e_A * dz \quad (2.16)$$

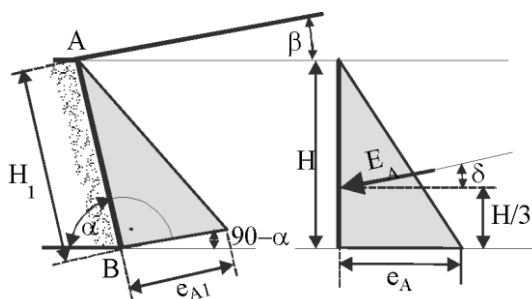
pri čemu je:

$$e_A = \sigma'_h = \sigma'_v * K_A \quad (2.17)$$

bočno efektivno naprezanje na dubini,  $z$ , dobiveno iz izraza (2.1). Tada se za ordinatu,  $e_A$ , aktivnog pritiska na dubini  $H$  može pisati:

$$e_A = \frac{2 * E_A}{H} \quad (2.18)$$

Hvatište sile  $E_A$  nalazi se u težištu trokuta tj. na,  $H/3$ , od dna podupore (A-B), a računska raspodjela na poduporu A-B svodi se na uspravnicu, kako je to prikazano na slici 2.22.



$$E_A = \frac{e_{A1} * H_1}{2}, \quad \text{odnosno} \quad E_A = \frac{e_A * H}{2}$$

Slika 2.22 Raspodjela aktivnog pritiska na poduporu (A-B)

Iz grafičke konstrukcije na slici 2.21 vidi se da je veličina sile,  $E_A$ , ovisna o sljedećim veličinama:

$$E_A = E_A(H, \varphi, \rho, \delta, \vartheta, \alpha, \beta) \quad (2.19)$$

Kako se za zadane veličine traži kritični klizni klin, (na slici 2.21 određen kutom  $\vartheta$ ), koji daje najveću silu pritiska na zid, tako se iz uvjeta:

$$\frac{\partial E}{\partial \vartheta} = 0 \quad (2.20)$$

dobiva izraz za koeficijent aktivnog tlaka  $K_A$  prema oznakama na slici 2.21:

$$K_A = \frac{\sin^2(\alpha + \varphi)}{\sin^2 \alpha * \sin(\alpha - \delta) * \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) * \sin(\varphi - \beta)}{\sin(\alpha - \delta) * \sin(\alpha + \beta)}} \right]^2} \quad (2.21)$$



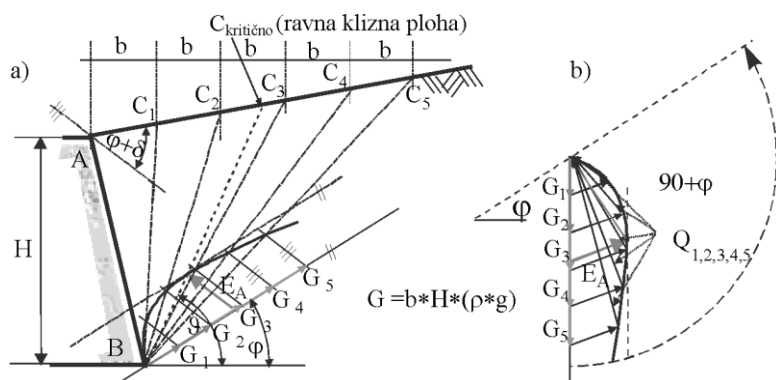
Temeljem ove jednadžbe načinjene su tablice vrijednosti za  $K_A$  (Scot, 1969.; Tschebotarioff, 1973.; Nonveiller, 1979.), koje omogućavaju brzo i jednostavno proračunavanje vrijednosti iz jednadžbe 2.21.

Danas je vrlo jednostavno proračunati vrijednosti,  $K_A$ , pomoću bilo kakvog tabličnog proračuna (Excel ili slično). Kako izraz iz jednadžbe 2.21 ne ovisi o koheziji, to izraz vrijedi i za koherentne materijale.

Klasično grafičko rješenje dalje se temeljilo na konstrukciji Culmannovog poligona sila kako je to prikazano na slici 2.23.

Ukoliko se pripadni poligon sila sa slike 2.23b) zaokrene u smjeru obrnuto od kretanja kazaljke na satu za kut  $90+\varphi$ , dobiti će se poznata Culmannova grafička konstrukcija za određivanje kritične klizne plohe za razmatrani slučaj. Kritična će klizna ploha biti ona, koja daje najveću silu aktivnog pritiska  $E_A$ , za odabrani slučaj potporne građevine i odabrani materijal tla. Konstrukcija je prikazana na slici 2.23 a).

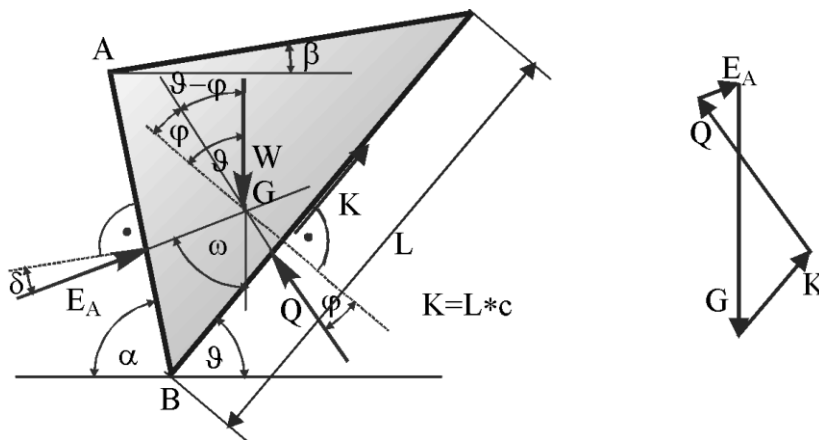
Na slici 2.23,  $G$ , su težine prizmi aktivnih klinova, a  $E_A$  najveća sila aktivnog pritiska na poduporu. Točka u kojoj paralela s pravcem otklonjenim pod kutom  $\varphi$  od osi apscisa tangira krivulju koja spaja točke poligona sila,  $G$ ,  $Q$  i  $E_A$ , je točka kroz koju prolazi kritična ploha,  $C_{\text{kritično}}$ , aktivnog pritiska. Ova ploha ide od dna potporne konstrukcije do površine terena i zatvara s osi apscisa kut,  $\vartheta$ . Ova konstrukcija nema rješenja ako je kut nagiba terena,  $\beta$ , strmiji od kuta unutarnjeg trenja,  $\varphi$ . Kako se radi o nekoherentnom materijalu to je i fizikalno nemoguće.



Slika 2.23 Culmannova konstrukcije najveće sile aktivnog pritiska za slučaj  $c=0$

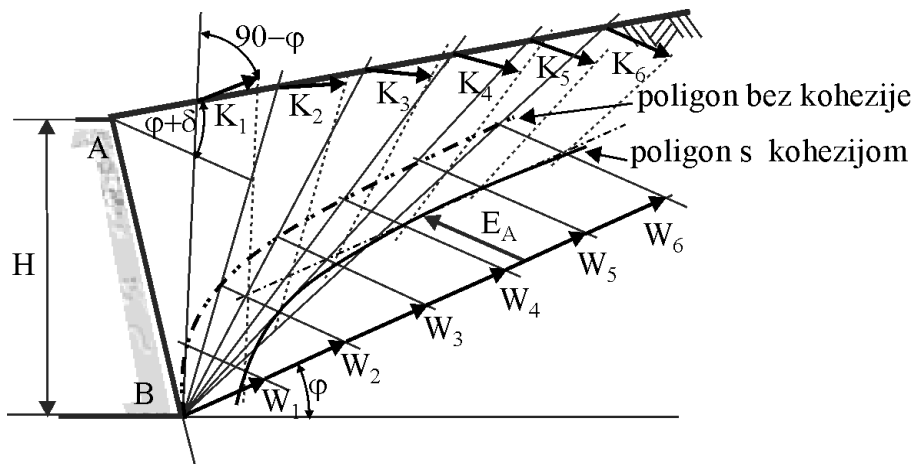
Korištenjem jednadžbe 2.18 može se odrediti raspodjela naprezanja na poduporu. Pri grafičkom postupku ova raspodjela i nije toliko bitna jer se u daljnjem postupku opet koriste sile kao dijelovi grafostatičkih proračuna pomoću kojih se vrše dimenzioniranja na pr. potpornih zidova. Raspodjela naprezanja zanimljiva je kod lomljenih ploha podupore, stepenasto poredanih dijelova gravitacionih zidova (gabioni) i armiranog tla, gdje je potrebno odrediti dijelove pritiska koji djeluju na pojedinu plohu za koju se vrši proračun.

U slučaju da se iza potporne građevine nalazi koherentno tlo, grafička je konstrukcija nešto složenija. Prizma tla prikazana je na slici 2.24.



Slika 2.24 Prizma tla i poligon sila za koherentno tlo ( $c > 0$ )

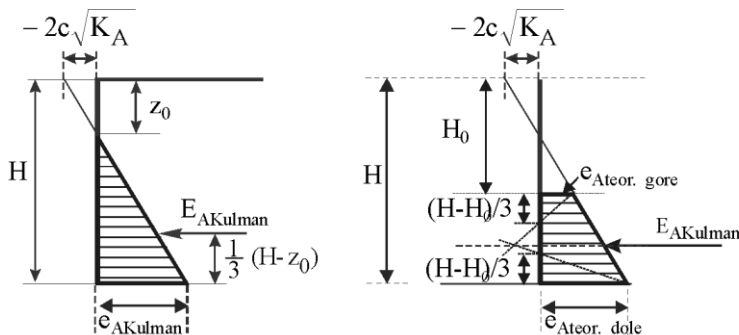
Culmannova grafička konstrukcija prikazana je na slici 2.25



Slika 2.25 Culmannova linija za koherentno tlo iza potpornog zida

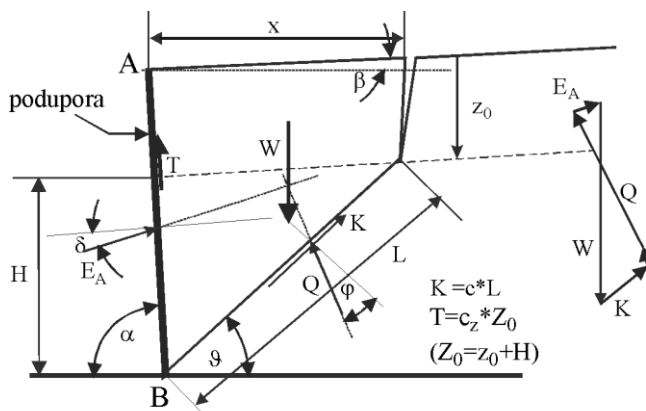
Uvrsti li se vrijednost za silu aktivnog tlaka,  $E_A$ , u jednadžbu 2.18 dobiva se vrijednost bočnog tlaka,  $e_A$ , na dnu podupore, u točki B. Pri tom je pitanje što je veličina,  $H$ ? Je li to ukupna visina podupore umanjena za  $z_0$  iz jednadžbe 2.9 ili je to ukupna visina umanjena za,  $H_0$  iz jednadžbe 2.11? Ako je to  $(H - H_0)$  onda više raspodjela naprezanja nije trokutasta već je trapezna pa ne vrijedi izraz 2.18. Teoretski je ispravno da sila aktivnog pritiska u koherentnom tlu, koja se dobije Culmannovom grafičkom konstrukcijom, nastaje integracijom dijagrama bočnog

naprezanja,  $e_A$  od,  $H_0$  do,  $H$ , koji je trapeznog oblika. Prema tome se vrijednost  $e_A$  ne može odrediti iz jednadžbe 2.18. Provede li se proračun analitički, uvažavajući jednadžbe 2.21 za,  $K_A$ , i 2.6 za,  $e_A$ , ( $\sigma_A$ ), dobit će se različite vrijednosti od onih pomoću Culmannove grafičke konstrukcije. Objašnjenje je dato na slici 2.26.



Slika 2.26 Raspodjela naprezanja za koherentno tlo korištenjem Culmannove grafičke metode i stvarna teoretska raspodjela

Ukupna sila aktivnog pritiska dobivena grafičkom metodom po Culmannu, u sebi sadrži ukupnu negativnu površinu koja nastaje uslijed smanjenja pritiska uzrokovanog kohezijom, kako je to pokazano na slici 2.9a), te je manja nego ukupna sila za Rankineov slučaj. Popravak se provodi analizom stabilnosti prizme tla nakon što je nastala vlačna pukotina kao na slici 2.27. Pri tom se dubina pukotine  $z_0$  određuje tako da se izračuna ona dubina na kojoj je aktivni pritisak iz izraza 2.6 jednak nuli.



Slika 2.27 Aktivni klin u koherentnom materijalu s vlačnom pukotinom na izlazu kritičnog kliznog klina iz tla i poligonom sila (prema Coulombovom rješenju)

Kohezija uzrokuje pojavu sila,  $K$ , na dodiru klin-tlo, a sila,  $T$ , na dodiru klin - podupora je rezultat adhezije između tla i potporne konstrukcije. Pritom je,  $c_z$ , adhezija između zida i tla. Ova se sila često zanemaruje jer je vrlo mala.

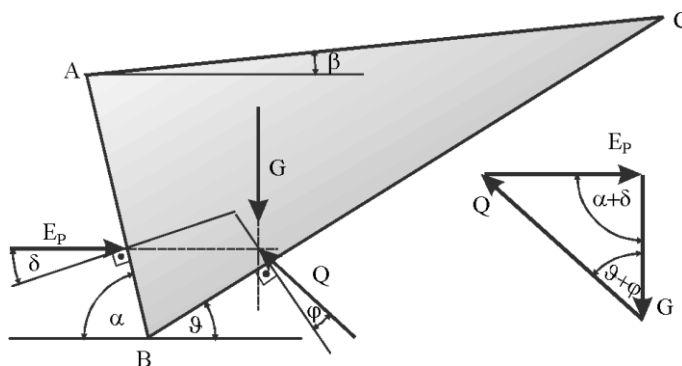
Temeljem jednadžbe 2.11 može se izračunati teoretska visina zasjeka, u koherentnom tlu, koji može izvjesno vrijeme (do pojave vlačne pukotine) stajati, uspravno zasječen, bez potporne konstrukcije. Teoretski je do te dubine suma bočnih naprezanja jednaka nuli. Ta se dubina u literaturi najčešće označava kao  $H_0$ .

Grafička konstrukcija pomoću Culmannovog poligona razvijala se dalje ne način da se mogla upotrijebiti za višeslojno tlo. Za svaki se sloj radi zasebna grafička konstrukcija, a dijagrami bočnih pritisaka se zbrajaju. U dijagrame se mogla uklopiti i vanjska sila koja djeluje iza zida unutar kliznog klina. Ako takva sila djeluje izvan kritičnog kliznog klina ali dovoljno blizu njega, može pomaknuti ravninu kritičnog kliznog klina. Konstrukcija se može upotrijebiti za lomljenu stražnju površinu podupore itd. Kod svih ovih grafičkih konstrukcija ostaje pitanje raspodjele bočnog naprezanja iza podupore, a o kojoj ovisi položaj rezultante ovih sila. Ove su grafičke konstrukcije bile vrlo dugo u upotrebi i davale su prihvatljive rezultate na razini točnosti ulaznih podataka.

Osim Culmannove grafičke konstrukcije koristile su se konstrukcije još nekih autora (Poncelet, 1840.; Engesser, 1880.; Jáky, 1946.). Za proširenje saznanja preporuča se Kézdi (1969.).

### 2.3.2.2 Pasivno stanje

Pasivno stanje nastaje kada iz nekog razloga dođe do zbijanja tla. Pojednostavljeni proračunski model prikazan je na slici 2.28.



Slika 2.28 Pasivni klin i poligon sila za slučaj pasivnog otpora u tlu

Iz geometrijskih odnosa sa slike 2.28 može se dobiti izraz za koeficijent pasivnog otpora  $K_P$ :

$$K_P = \frac{\sin^2(\alpha - \varphi)}{\sin^2 \alpha * \sin(\alpha + \delta) * \left[ 1 - \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) * \sin(\varphi + \beta)}{\sin(\alpha + \delta) * \sin(\alpha + \beta)}} \right]^2} \quad (2.22)$$

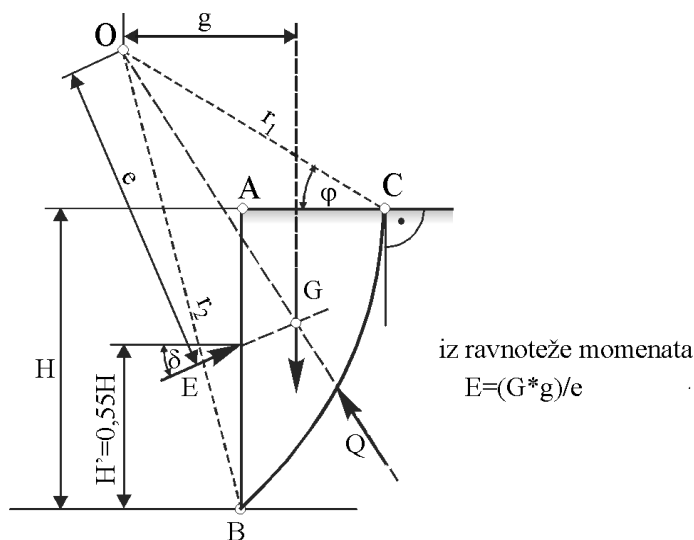
Grafičkom konstrukcijom sličnoj onoj sa slike 2.23, može se odrediti najmanja sila pasivnog otpora  $E_p$ .

Slično grafičko rješenje može se dobiti po istom principu i za klin pasivnog otpora u koherentnom materijalu.

### 2.3.2.3 Zakrivljeni oblici kritičnih kliznih ploha

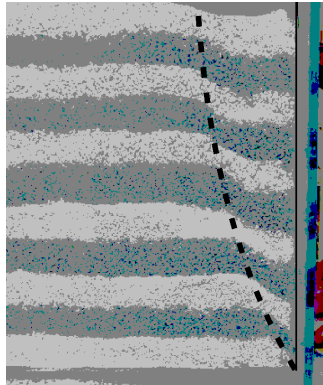
Slika 2.18 prikazuje tri najčešće korištena oblika kliznih ploha za račun najvećeg aktivnog pritiska i najmanjeg pasivnog otpora na podupore. Coulomb se koristi ravnim kliznim plohama zbog jednostavnosti proračuna, svjestan svoje pogreške. Neki autori dali su rješenje koristeći dijelove kružnice, logaritamske spirale i kombinirane linije kao klizne plohe. Rješenje za pojedinu odabranu plohu uglavnom je jednostavno grafostatički rješivo, ali se uvijek javlja pitanje određenja KRITIČNE KLIZNE PLOHE tj. one koja daje najveći aktivni pritisak i najmanji pasivni otpor.

Na slici 2.29 prikazana je klizna ploha oblika logaritamske spirale. Ovakva se ploha oblikuje pri zaokretu podupore oko točke A.



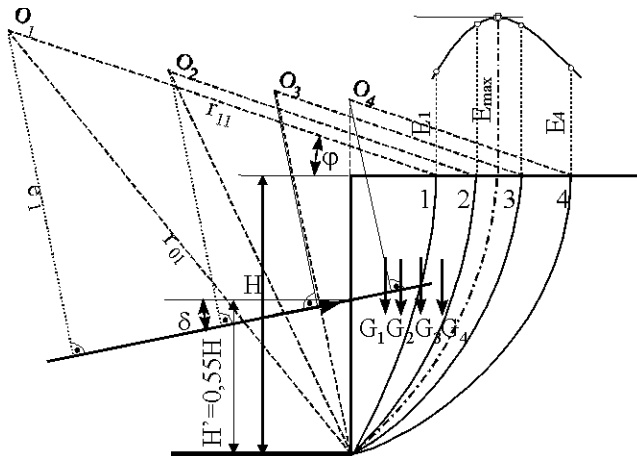
Slika 2.29 Određivanje aktivnog pritiska na poduporu za kliznu plohu nastalu zakretanjem podupore oko točke A

Na slici 2.30 prikazan je slučaj klizne plohe nastale zakretanjem podupore oko točke A na modelu od sitnog šljunka.



Slika 2.30 Laboratorijski model oblikovanja klizne plohe pri zaokretu podupore oko točke A sa slike 2.29

Da bi se utvrdila najveća vrijednost moguće sile aktivnog pritiska potrebno je izraditi niz ovakvih proračuna za niz kliznih ploha te izraditi grafičku konstrukciju prikazanu na slici 2.31. Iz takve se konstrukcije dobiva kritična klizna ploha i najveća vrijednost sile aktivnog pritiska. Ove konstrukcije korisne su za dimenzioniranje potpornih zidova, ali poteškoća nastaje kada je potrebno rekonstruirati dijagram pritiska na stražnje lice zida. Taj dijagram sigurno nije linearna funkcija već ima neki zakrivljeni oblik. Danas se proračuni vrše analitički, raznim numeričkim postupcima.



Slika 2.31 Određivanje najveće sile aktivnog pritiska na zid za kliznu plohu oblika logaritamske spirale

## 2.4 RASPRAVA O STVARNIM OPTEREĆENJIMA NA POTPORNE GRAĐEVINE

### 2.4.1 Opterećenje tlom

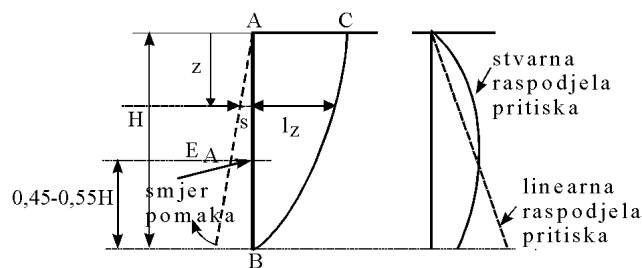
Potporne su građevine prvenstveno opterećene klinom tla iza sebe. O veličini pomaka ovisi hoće li taj klin biti u aktivnom stanju granične ravnoteže ili će možda na potpornu građevinu prenositi neko veće opterećenje. Potporne se građevine nastoje oblikovati na način da im se omogući ona deformacija koja će osigurati opterećenje klinom tla u aktivnom stanju granične ravnoteže jer je to najmanje moguće opterećenje, te je s toga građevina najekonomičnija.

Teoretski se može pokazati da pritisak na potpornu građevinu, s linearnom raspodjelom, odgovara slučaju kada podupora zaokreće oko donje točke (u crtežima 2.12 i dalje, B). Tada se tlo, koje se nalazi u klinu iza podupore, nalazi u približno jednakom stanju naprezanja tj. cijeli je klin u stanju sloma. Sličan je slučaj i s translatornim odmicanjem podupore od tla. U oba slučaja javlja se rastezanje u tlu.

Ako nema jednolike raspodjele naprezanja, jer je onemogućena nekim drugačijim pomakom, očito je da će raspodjela pritisaka iza podupore biti drugačija. Najjednostavniji primjer dan je na slici 2.33. Tu podupora zaokreće oko gornje točke (na slici A). Ako se usvoji da je relativna deformacija,  $\varepsilon$ , funkcija veličine pomaka i dužina dijela kliznog tijela na kojem se taj pomak događa, može se uz oznake na slici 2.32 pisati:

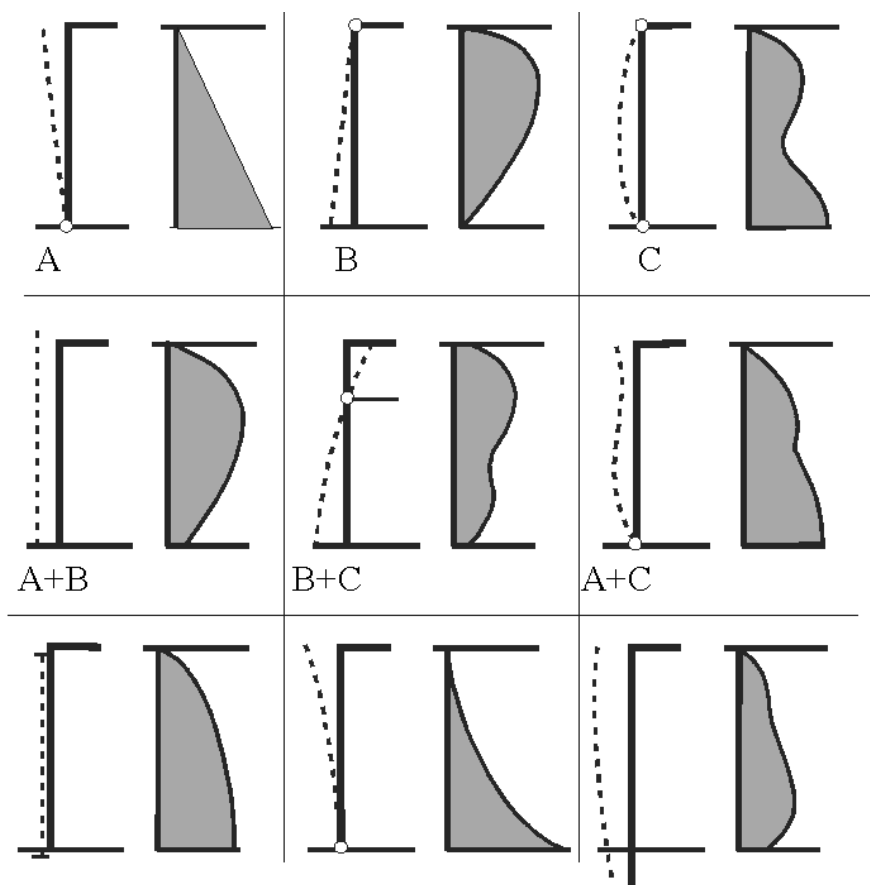
$$\varepsilon(z)=s/l_z \quad (2.23)$$

Iz izraza 2.23 jasno je da na mjestu oko točke A sa slike 2.32 nema deformacije jer je pomak,  $s=0$ . U točki B, kada je  $l_z=0$ , relativna deformacija je teoretski,  $\varepsilon=\infty$ . Ako je bočno naprezanje vezano s deformacijom očito je da na mjestu gdje nema pomaka tlak mora biti jednak tlaku mirovanja, koji je veći od aktivnog tlaka. Stoga raspodjela naprezanja slijedi krivulju na desnoj strani slike 2.32.



Slika 2.32 Preraspodjela pritiska na poduporu u ovisnosti o deformaciji

Na slici 2.33 prikazano je nekoliko dijagrama raspodjele pritisaka na poduporu ovisno o njenom načinu deformiranja.



Slika 2.33 Nekoliko primjera raspodjele naprezanja na podupore ovisno o njejoj deformaciji (Kézdi, 1969.)

Dubrova (1963.) je, za krute gravitacione potporne zidove izučavala utjecaj pomaka na raspodjelu pritisaka na podupore (Harr, 1977.). Rezultati njenog istraživanja su prikazani na slici 2.34.

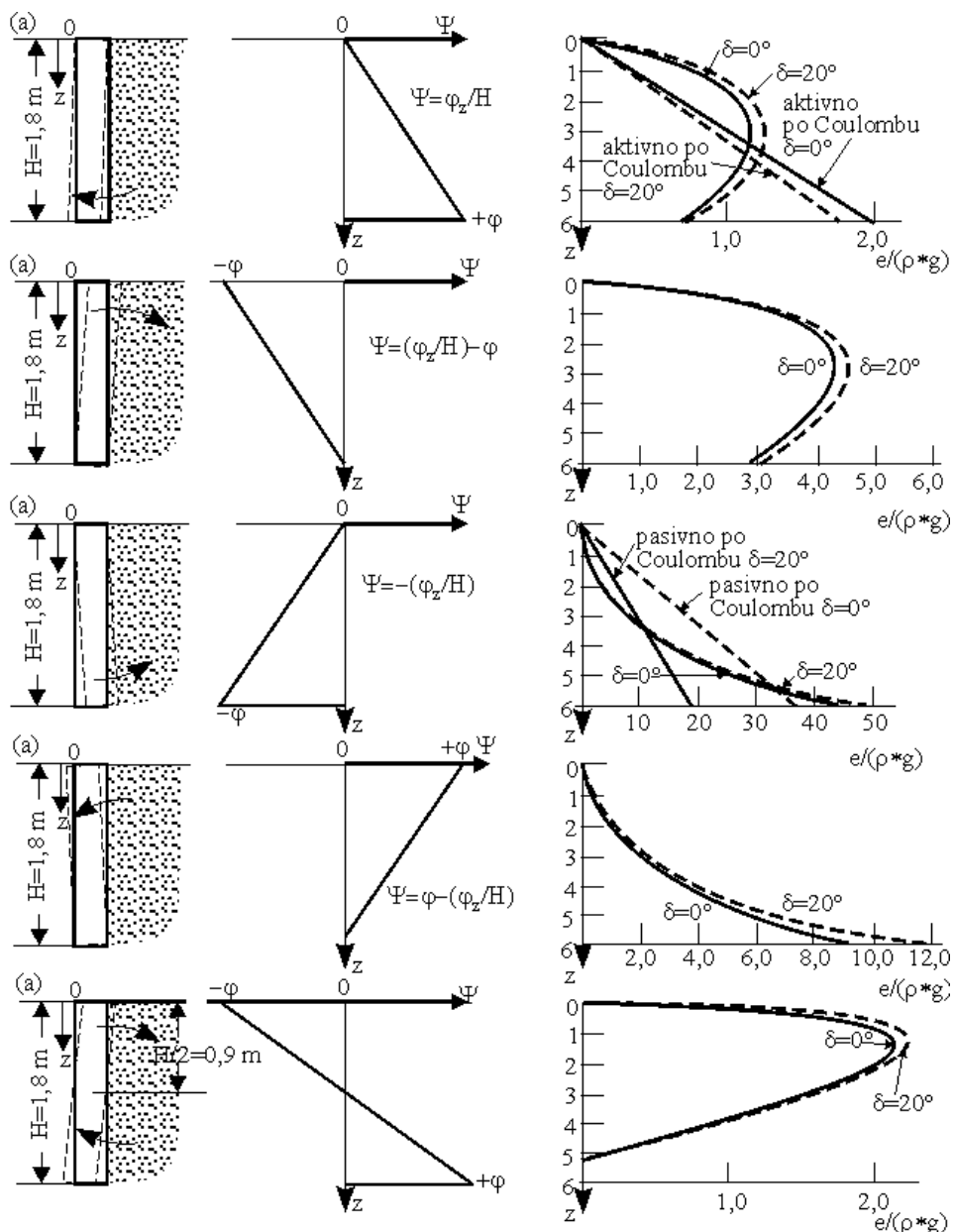
Polazeći od Coulombovog rješenja za ravne klizne plohe, Dubrova tvrdi, da se ovisno o veličini deformacije, ( $\varphi$ ), po dubini,  $z$ , ( $\varphi_z$ ) mijenja kut,  $\Psi$ , nagiba klizne plohe po dubini (visini). Za razne pomake zida ona daje funkciju promjene tog nagiba s dubinom. (oznake su izvorne prema literaturi pa mogu dovest do zabune)

Iz takve se analize promjene nagiba kliznog klina dobiva vrijednost raspodjele pritiska,  $e(z)$ , na kruti potporni zid. Analizira se stanje sa ( $\delta > 0$ ) i bez ( $\delta = 0$ ) trenja između zida i tla te se konačno dobiva izraz za pritisak na zid,  $e$ , kao:

$$e(z) = \frac{z * \rho * g \cos \Psi}{(1 + 1,2 \sin \Psi)^2 \cos \delta} \left[ \cos \Psi - z \left( \frac{d\Psi}{dz} \right) \right] \quad (2.24)$$



Na slici 2.34 prikazane su promjene nagiba kuta kliznih ploha,  $\Psi$ , po dubini i normalizirani dijagrami raspodjele pritiska na zid ( $e/(\rho \cdot g)$ ) za nekoliko mogućih oblika pomaka zida i za vrijednosti kuta trenja između zida i tla  $\delta=0$  i  $\delta=20^\circ$ .



Slika 2.34 Raspodjela pritiska na podporu u zavisnosti o pomaku i kutu trenja između tla i zida (Dubrova, 1963.)

Iz navedenog je jasno da opterećenje tlo na potporne građevine nije uopće jednostavno odrediti. Ni numeričke metode ne daju gotova i savršena rješenja, ali stavljaju na raspolaganje šire mogućnosti istraživanja i provjere većeg broja scenarija, koji mogu dovesti do sigurnijih i ekonomičnijih rješenja.

## **2.4.2 Ostala opterećenja**

Na potporne građevine osim pritiska tla djeluje još niz opterećenja koje je potrebno uzeti u obzir prilikom proračuna. Najčešće je to opterećenje vodom koje u tlu ima uvijek u nekom obliku. Hidrostatički se tlak kod nekih potpornih građevina može odstraniti određenim tehničkim zahvatima, drenažama, ali ne uvijek.

Niz vanjskih sila djeluje na potporne građevine ovisno o njihovoj namjeni. To mogu biti opterećenja od kranskih staza, vozila raznog tipa, sile od privezanih brodova, opterećenja od susjednih građevina i čitav niz drugih opterećenja. Nastavno će biti opširnije opisani neki češći slučajevi.

### **2.4.2.1 Opterećenje vodom**

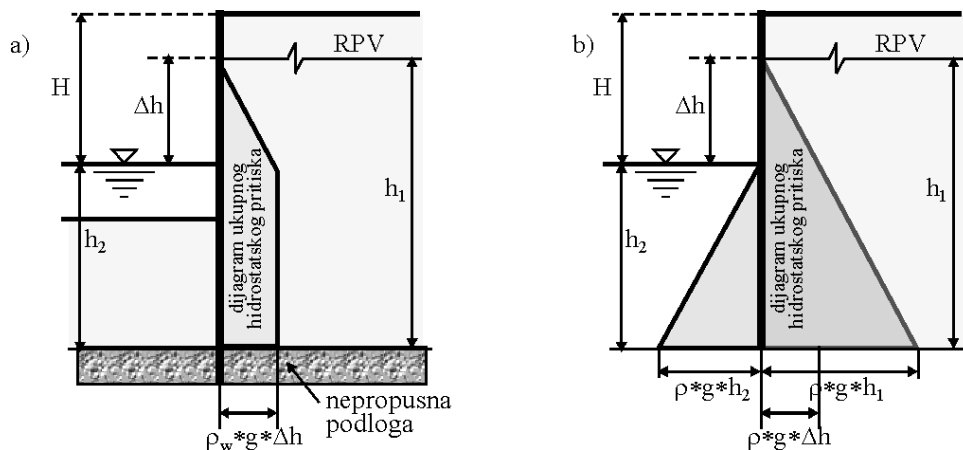
Voda na potporne građevine djeluje hidrostatičkim i hidrodinamičkim tlakom. Oni se javljaju u nekoliko slučajeva:

- 1) kada je razina podzemne vode u tlu iznad dna temelja potpornog zida;
- 2) kada kod naglog pljuska procjedna voda zaostane iza potporne građevine jer ne može dovoljno brzo oteći;
- 3) kada potporna građevina štiti građevnu jamu koja se nalazi ispod razine podzemne vode;
- 4) kada potporna građevina štiti građevnu jamu koja se nalazi u dubokoj vodi.

U svim gore navedenim slučajevima na podupore djeluje hidrostatički tlak. To nije zanemarivo opterećenje. Iz tog se razloga, kada god je moguće, nastoji raznim tehničkim zahvatima odstraniti utjecaj hidrostatičkog tlaka. Postoji niz vrsta gradiva za potporne zidove koji mogu osigurati gotovo potpunu vodopropusnost. U tim je slučajevima rješenje nametnuto samo od sebe. Kod drugih vrsta gradiva, koja su nepropusna za vodu, utjecaj hidrostatičkog tlaka se odstranjuje ugradnjom raznih tipova drenaža.

Kod svih potpornih građevina koje štite građevne jame od prodora podzemne ili otvorene vode, podupore moraju preuzeti opterećenja hidrostatičkim tlakom.

Na slici 2.35 prikazan je utjecaj hidrostatičkog tlaka na slobodno stojeću zagatnu stijenk. Kako se voda nalazi s obje strane podupore, utjecaj ovih pritisaka se zbraja, te ostaje ukupni pritisak kako je prikazano na slici. Ipak postoji razlika.



Slika 2.35 Utjecaj hidrostatskog pritiska na zagatnu stijenku a) zabijenu u nepropusnu podlogu, b) zabijenu u propusno tlo

Na poduporu na slici 2.35b) djeluju hidrodinamičke sile, jer voda uslijed razlike potencijala teče kroz tlo. Pri tom dolazi do promjene efektivnih napreznja, jer se mijenja veličina pornih pritisaka. Da bi se račun mogao provesti, potrebno je poznavati strujno polje koje je za slučaj sa slike 2.35 b) prikazan na slici 2.36. Rezultati se koriste u jednadžbi 2.25, da bi se izračunali efektivni pritisci u okolini podupore.

$$\sigma' = \sigma - u \quad (2.25)$$



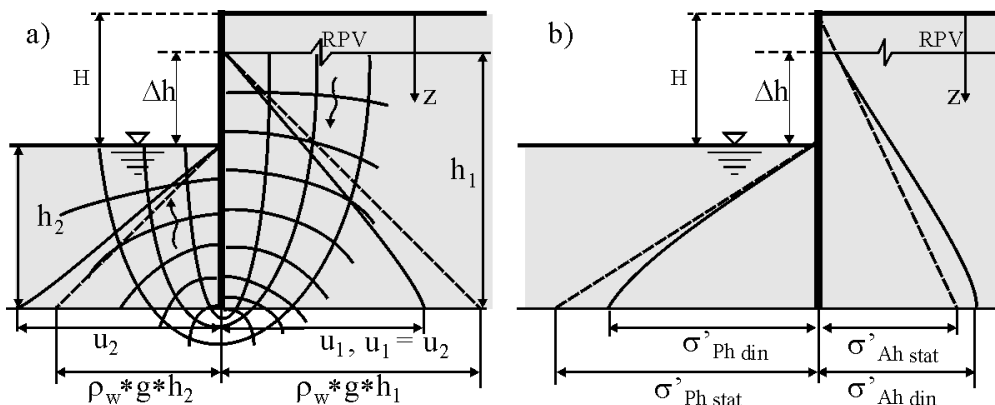
$$i = \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad (2.26)$$

$$i_{izl} = \frac{\Delta h_{(1-0)}}{\Delta l_{(1-0)}}$$

Slika 2.36 Strujna mreža iza zagatne stijenske

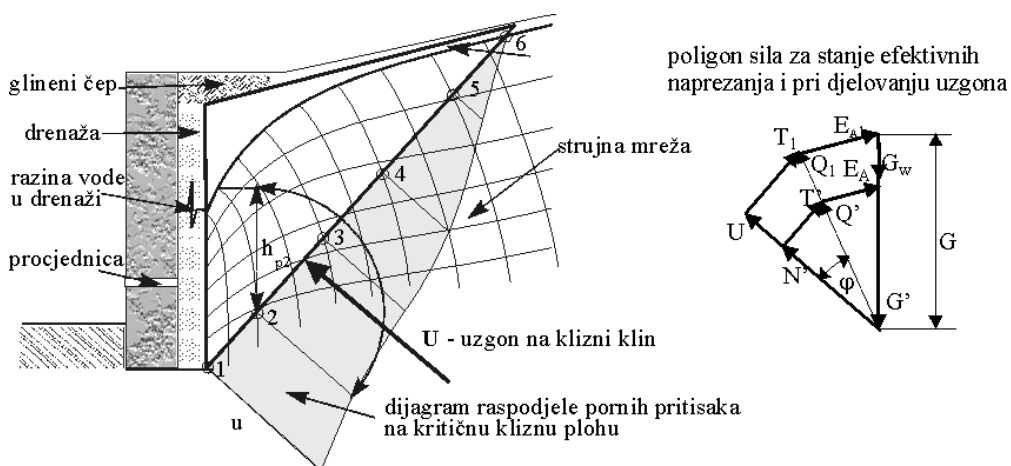
Poznavajući potencijalno strujno polje moguće je odrediti veličine i smjerove hidrauličkih gradijenata, potrebnih da se izračunaju veličine efektivnih napreznja na pojedinim dubinama, z, oko podupore, na koju djeluju hidrodinamičke sile. Za zagatnu stijenku sa slike 2.35b, zabijenu u propusno tlo, prikazana je na slici 2.37

raspodjela hidrodinamičkih pritiska (slika 2.37a) i raspodjela bočnih, efektivnih napreznja uz zagatnu stijenku (slika 2.37b). Uočljivo je odstupanje od hidrostatskog stanja.



Slika 2.37 Dijagram hidrodinamičkog tlaka u usporedbi s hidrostatskim a) i njegov utjecaj na promjenu bočnih efektivnih napreznja b)

Kod naglih pljusкова također se javlja tečenje u tlu iza podupora. Ovo tečenje utječe na efektivna napreznja u klinu tla koji se oslanja o poduporu. Ovom učinku vode veliku je pažnju posvetio Terzaghi, 1972. Na slici 2.38 prikazan je utjecaj pljuska na aktivni klin tla, u slučaju dobre i ispravne drenaže iza potpornog zida. Ovaj detalj je vrlo važan kod projektiranja ovakvih građevina, premda se o njemu uglavnom nikada ne vodi računa.



Slika 2.38 Utjecaj hidrodinamičkog pritiska na kritični klizni klin pri naglom pljusk

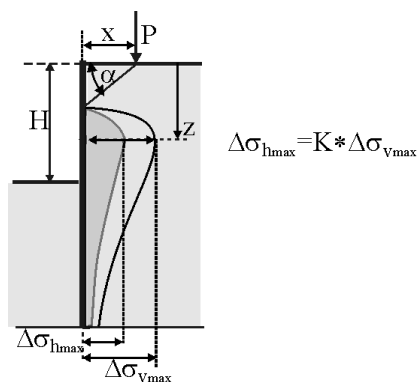
Uzgon sa slike 2.38 potpuno mijenja raspored sila koje djeluju na potporni zid.

### 2.4.2.2 Uspravne sile

Uspravne sile mogu djelovati na samu potpornu građevinu (stupovi građevine koja se na poduporu oslanja, rasvjetni stupovi i sl.). U tom slučaju se u ukupnom računu zbrajaju s težinom podupore. Treba provjeriti mogu li izazvati slijeganje podupore i time izmijeniti raspored bočnih pritisaka.

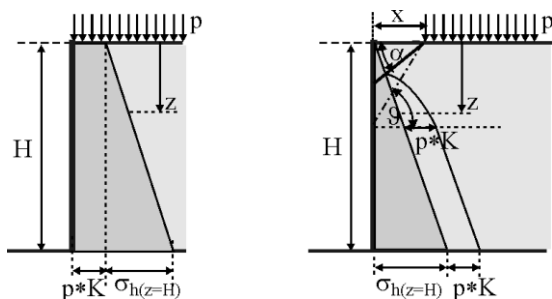
Uspravne sile mogu djelovati unutar kritičnog kliznog klina i povećati ukupni pritisak na poduporu. Ako je uspravna sila izvan kritičnog kliznog klina a dovoljno blizu njemu, također može dodatno opteretiti poduporu.

Najjednostavniji način uključivanja uspravnih sila, linijskih sila i uskih, trakastih, uspravnih opterećenja, je proračun dodatnih naprezanja po dubini uz poduporu uslijed djelovanja sile pored nje. Na taj se način dobije uspravno naprezanje koje se množi s koeficijentom bočnog tlaka,  $K$ , koji za određeni slučaj ulazi i inače u proračun. Postupak je prikazan na slici 2.39.



Slika 2.39 Proračun utjecaja uspravnih sila na poduporu

Isti se postupak može provoditi za utjecaj temelja susjednih građevina koje se nalaze u blizini potpornih građevina. Za plošna opterećenja koja djeluju odmah iza podupore ili na udaljenosti dovoljnoj da na nju imaju utjecaj, može se provesti sličan postupak. Ovaj je utjecaj prikazan na slici 2.40.



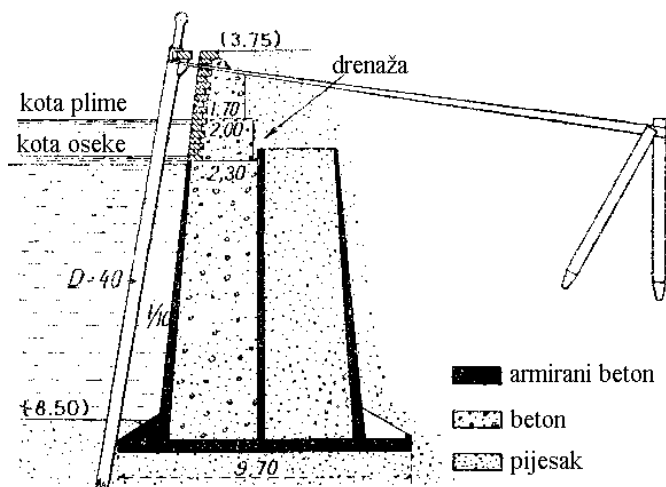
Slika 2.40 Utjecaj plošnog uspravnog opterećenja na poduporu

Ako plošno opterećenje djeluje uz rub podupore, potrebno ga je uzeti u račun od vrha podupore u punom iznosu, pomnoženog s koeficijentom bočnog tlaka. Ako djeluje na nekoj udaljenosti,  $x$ , od podupore, tada se njegov puni utjecaj osjeća tek ispod dubine gdje pravac usporedan s kritičnom kliznom plohom, povučen iz točke na udaljenosti,  $x$ , od podupore, siječe poduporu (slika 2.40).

### 2.4.2.3 Vodoravne sile

Vodoravne sile se javljaju kod pristana za brodove uslijed priveza broda, te prislanjanja broda pri pristajanju. U takvim slučajevima se izravno na poduporu javlja sila kada se brod nasloni na nju. Vodoravne sile od polera na koje je brod privezan moraju se rješavati posebnim, dodatnim proračunom i dijelovima građevine za preuzimanje tih sila, ovisno o tipu potporne građevine.

Vodoravne sile javljaju se na lukobranima uslijed udara valova. Proračuni ovih sila podliježu zakonima hidraulike mora i spadaju u posebna opterećenja za koja se izvode posebni proračuni. Mogu se javiti na potpornim zidovima uz ceste uslijed udara vozila u zaštitne ograde i u još nekim okolnostima.



Slika 2.41 Pristan u Rotterdamu, posebni sustav za prihvaćanje vodoravne sile od priveza broda (Prudon, 1935.)

### 2.4.2.4 Pridržanja

Pridržanja mogu biti vodoravna, kada je riječ o zategama i nekim vrstama sidara ili kosa. Koso pridržanje najčešće se izvodi sidrenjem u dublje slojeve tla u zaleđu potporne građevine. Veličine sila u pridržanjima ovise o dozvoljenim pomacima, prednaprezanju, samonaprezanju i slično. Bez obzira na smjer ovih sila za njih je potrebno osigurati ispravan ležaj i ispravan prijenos tih sila na poduporu. Najizraženiji su slučajevi sidrenih građevina, kod kojih su sidra glavni prenosnici sila, a vanjski dijelovi podupore služe samo za raspodjelu sila na pridržanu plohu.

## 2.5 PRIMJENA EUROKODA 7 U PROJEKTIRANJU POTPORNIH GRAĐEVINA

### 2.5.1 Općenito

Projektant mora poznavati odgovarajuće propise jer projekti potpornih građevina podliježu Zakonu o gradnji i nizu ostalih zakona i propisa. Približavanjem Europskoj zajednici i izlaskom na vanjska tržišta, potrebno je poznavati europske norme (Eurokod) za projektiranje, koje uvode nov način projektiranja, bitno različit od onog u nas do sada uobičajenog (Babić i sur., 1995.; Szavits-Nossan i Ivšić, 1994.; Szavits-Nossan i sur., 2002.).

Zato se u ovoj knjizi daju osnove europske regulative, te pristup projektiranju po Eurokodu. Budući da potporne građevine pripadaju područje geotehnike, najveća pozornost bit će posvećena Eurokodu 7 koji obrađuje tu oblast, a koji je preveden i na hrvatski jezik. Iako on još nije obavezan za projektante, prema važećim zakonima, dobro se s njim upoznati jer uvodi neke vrlo zanimljive i prihvatljive novine u projektiranje, a koje su prisutne i u važećem Zakonu o gradnji.

Prema Zakonu o gradnji objavljenom u Narodnim novinama, broj 175, 2003. (članak 7), "građevina se mora projektirati i izgraditi tako da tijekom gradnje i uporabe predvidiva djelovanja ne prouzroče:

- rušenje građevine ili njezinog dijela,
- deformacije nedopuštenog stupnja,
- oštećenja građevinskog dijela ili opreme uslijed deformacije nosive konstrukcije ili,
- nerazmjerno velika oštećenja u odnosu na uzrok zbog kojeg su nastala."

Također se građenjem i uporabom građevine ne smije ugroziti pouzdanost drugih građevina, stabilnost tla na okolnom zemljištu, prometne površine, komunalne i druge instalacije i dr.

Ispunjenje zahtjeva iz Zakona o gradnji odnosi se na planiranje, projektiranje, gradnju, i održavanje građevine. Osim toga, potrebna je kontrola nad svojstvima, ponašanjem i uporabom građevnih materijala. Postupak osiguranja kakvoće mora biti definiran za projektiranje, proizvodnju i izvedbu.

Osnovni zahtjevi u Zakonu o gradnji preneseni su iz Interpretativnog dokumenta ID1 (mehanička otpornost i stabilnost), na temelju kojega je nastala skupina europskih pravilnika, Eurokodova, koji u tehničkom smislu određuju mjerodavne i obvezatne uvjete za razradu "Strukturnih Eurokodova". U ID1 se navodi da osnovni zahtjevi moraju biti zadovoljeni tijekom "ekonomski opravdanog radnog vijeka" građevine.

Eurokod tretira građevinu kao nešto što ima svoj vijek trajanja. Taj vijek trajanja je zapravo ekonomska kategorija. S GRAĐEVINOM SE POSTUPA KAO S PROIZVODNOM KOJI NE TRAJE VJEČNO, VEĆ ODREĐENO UPORABNO VRIJEME.

Zakon o gradnji u članku 65. predviđa projektirani vijek uporabe građevine.

U skladu s predviđenim ekonomski opravdanim radnim vijekom obavljaju se: istraživanja sa svrhom da se odrede osobine tla, izbor odgovarajućih građevnih materijala, postupak projektiranja, građenja i nadzora. Ekonomski opravdani radni vijek ne može se ni zamisliti bez prosudbe o izboru materijala.

### **2.5.1.1 Granična stanja**

Osnovni su zahtjevi u primjeni Eurokoda, povezani s odgovarajućim graničnim stanjem. Određenjem graničnih stanja, uvode se mjere pouzdanosti u inženjerstvo. U projektiranju i građenju ne mogu se izbjeći stanovite nesigurnosti. Subjektivne se nesigurnosti mogu umanjiti osiguranjem kakvoće. Za objektivne se nesigurnosti, u procesu projektiranja određuju faktori, koji će osigurati tražene stupnjeve pouzdanosti građevine. Svi Eurokodovi, pa tako i Eurokod 7 imaju pristup proračunima koji se temelji na **PARCIJALNIM FAKTORIMA SIGURNOSTI** za opterećenja i za sva svojstva gradiva od kojih se predmetna građevina izvodi. Parcijalni se faktori vežu uz određeno granično stanje.

U fazi projektiranja, da bi se odredilo stanje građevine u odnosu na neko granično stanje, primjenjuju se odgovarajući proračunski modeli koji se, ako je potrebno, mogu dopuniti rezultatima probnog opterećenja.

Osnovna je podjela na:

- **krajnje granično stanje;**
- **granično stanje uporabivosti.**

Krajnje granično stanje je stanje sloma ili nestabilnosti građevine (ili njezinih dijelova) u bilo kom obliku, koje može ugroziti sigurnost ljudi i/ili samu građevinu. Granično stanje uporabivosti nastaje kad građevina ne može više služiti predviđenoj svrsi zbog:

- prevelikih deformacija, pomaka, progiba i sl., pri čemu se misli i na ometanje rada strojeva i tehnoloških procesa vezanih uz tu građevinu;
- vibracija koje ometaju rad ljudi, oštećuju građevinu ili njezine dijelove.

Ovdje će se izložiti preporuke za projektiranje geotehničkih građevina prema, Eurokodu 7, u koje spadaju potporne građevine.

### **2.5.1.2 Projektni zahtjevi i projektne okolnosti**

Građevinu treba projektirati u suglasju s općim načelima iz Eurokoda 1: Osnove projektiranja i djelovanja na konstrukcije – 1. dio: Osnove projektiranja. Pritom je nužno identificirati složenost svakog geotehničkog projekta. U tom smislu Eurokoda 7 predviđa dvije mogućnosti:

- jednostavne, manje zahtjevne građevine za koje je moguće na osnovi iskustva i kvalitativnih istražnih radova osigurati temeljne zahtjeve uz zanemarivanje opasnosti za vlasništvo i živote;
- sve ostale geotehničke građevine.



## GEOTEHNIČKI RAZRED

Eurokod 7, predviđa da se prije pristupa projektiranju građevina odrede geotehnički projektni zahtjevi. To se može učiniti tako da se buduća građevina svrsta u pripadni GEOTEHNIČKI RAZRED. Predviđena su tri geotehnička razreda. Pri tom se u obzir uzima: značenje i veličina građevine, njen utjecaj na okolinu (rizik za okolinu), uvjete tla i vode, seizmičnost i sl. Može se dogoditi da u kasnijim fazama projektiranja treba promijeniti početno odabranu kategoriju, a moguće je i to da se pojedini dijelovi iste građevine svrstaju u različite kategorije.

### Prvi geotehnički razred

Ovdje spadaju potporni zidovi ili iskopi kod kojih visinska razlika ne prelazi 2,0 m, manji iskopi za drenaže i polaganje cijevi. Pojava podzemne vode se ne očekuje do dubine iskopa.

### Drugi geotehnički razred

Ovdje spadaju uobičajene vrste građevina koje zahtijevaju kvantificirane geotehničke podatke, ali ne zahtijevaju više od rutinskih postupaka u ispitivanju tla.

### Treći geotehnički razred

U njega su svrstane sve građevine koje ne pripadaju u prvi i drugi razred. To su velike i neuobičajene građevine, s velikim rizikom, te građevine u predjelima s velikom opasnošću od djelovanja potresa. Za ove građevine treba provjeriti sve najnepovoljnije moguće projektne okolnosti.

Svrstavanjem građevine u geotehničke razrede, mogu se jednostavnije definirati odnosi investitor-projektant-izvođač, jer su u kategorijama navedeni minimalni zahtjevi koji uvjetuju razinu istražnih (geotehničkih), projektantskih, građevinskih i ostalih radova.

## PROJEKTNE OKOLNOSTI

To su sva predvidivo moguća stanja opterećenja za vrijeme izvođenja i korištenja građevine, za koja treba dokazati da će se građevina ponašati u skladu s kriterijima za zadano granično stanje.

Projektna okolnost mora obuhvatiti:

- opće stanje temeljnog tla, (geološke, geotehničke, hidrogeološke i druge podatke);
- razne prirodne procese i pojave, (poplave, potresi, erozija i sl.);
- opterećenja.

Za ocjenu stanja, odnosno prekoračenja graničnog stanja, treba odrediti dopuštene deformacije i pomake, te utjecaj nove građevine na već postojeće. Projektne okolnosti mogu biti trajne, povremene (za vrijeme gradnje ili popravljanja) i izvanredne.

Pri projektiranju u obzir treba uzeti sve relevantne projektne okolnosti. PROJEKTNI ZAHTJEVI se sastoje u tome da za svaku projektnu okolnost treba dokazati kako neće biti prijeđene granice odgovarajućeg graničnog stanja. Zadovoljenje projektnih zahtjeva može se dokazati:

- proračunom;
- usvajanjem propisanih mjera;
- primjenom modela i probnih opterećenja;
- pomoću metode opažanja.

Eurokodom se uzima u obzir činjenicu da se sve projektne okolnosti ne mogu opisati i dokazati proračunom. Mnogi su se postupci i detalji izvedbe u inženjerskoj praksi pokazali dovoljno pouzdanima, prije svega na osnovi iskustva, mjerenja, praćenja konstrukcije tijekom izvođenja i slično. Eurokod nastoji takve iskustvene i slične metode, zajedno s onim računskima, uklopiti u dokazivanje stabilnosti ili uporabivosti građevine.

### **2.5.1.3 Trajnost**

U IDI se predviđa da osnovni zahtjevi moraju biti zadovoljeni tijekom "ekonomski opravdanog radnog vijeka građevine". Trajnost građevine treba shvatiti kao razdoblje zadovoljenja osnovnih zahtjeva.

Na osnovi očekivanih unutarnjih i vanjskih djelovanja okoline treba ocijeniti njihov utjecaj na trajnost građevine i mjere zaštite, odnosno treba predvidjeti odgovarajuća svojstva ugrađenih materijala.

### **2.5.1.4 Provjera graničnih stanja (proračun) primjenom parcijalnih faktora**

U proračunima se koriste modeli, koji uključuju sve bitne utjecaje na građevinu. Modeli moraju biti dovoljno precizni da se može predvidjeti ponašanje građevine kad se uzmu u obzir norme koje pri građenju treba zadovoljiti i stupanj pouzdanosti informacija na kojima se proračun temelji. Treba razmotriti i slučajeve kad je potrebno odstupiti od stanja (npr. opterećenja) i djelovanja koja su u proračunu predviđena. Treba odrediti međusobno djelovanje tla i građevine. Kad god je to moguće, rezultate proračuna treba usporediti s opažanjima na već izvedenim građevinama. Projektiranje pomoću proračuna uključuje:

- odabir proračunskog modela;
- odabir opterećenja i pomaka koji djeluju na tlo i građevinu, svojstva tla i ostalih materijala;
- dimenzije;
- ograničenja, na pr. prihvatljiva slijeganja, naginjanja i sl.

Odabrani model mora moći dobro opisati granično stanje tla za promatrani slučaj. Ako za takav slučaj nema provjerenog modela, u analizama ostalih graničnih stanja treba primijeniti takve faktore da, promatrani slučaj bude dovoljno malo vjerojatan.

## Projektne veličine

Projektne veličine su: opterećenja, nametnuti pomaci, svojstva tla i materijala, dimenzije i ograničenja, u projektним modelima pri projektiranju pomoću proračuna. Svaka projektна veličina ulazi u proračun sa svojim stupnjem (faktorom) sigurnosti, a to se odnosi i na proračunski model.

### NEMA GLOBALNOG FAKTORA SIGURNOSTI!

Pri odabiru projektних veličina, treba voditi računa o posljedicama postizanja graničnog stanja, mogućnosti nepovoljne kombinacije parametara, pouzdanosti pokusa za njihovo mjerenje te traženoj kakvoći izvedbe i kontrole.

## Proračunski model

Proračunski model je najčešće analitički model s mogućim pojednostavljenjima, koja moraju biti na strani sigurnosti i u skladu s opažanjima na izvedenim objektima i/ili pouzdanijim proračunskim modelima.

## Opterećenja

Opterećenja na građevinu su sile, pritisci, slijeganja i predviđene deformacije izazvane raznim utjecajima izvana (temperatura, vjetar i sl.). Opterećenja su u proračunima uvijek poznate veličine, a prema trajanju mogu biti:

- stalna (G, npr. od vlastite mase);
- povremena (Q, pokretna opterećenja, snijeg i vjetar);
- izvanredna (A, potresi, udari vozila).

Opterećenja imaju stalan položaj za različite okolnosti (G) ili promjenljiv (Q i A). Zbog svojstava tla važno je razlikovati i povremena opterećenja, (primjerice vjetrom) pri kojima tlo može imati i povećanu čvrstoću i krutost; kratkotrajna, kad treba uzeti u obzir mogućnost porasta pornih tlakova i dugotrajna opterećenja.

Za geotehničko su projektiranje svojstvena djelovanja: mase tla, vode i stijena, tlakova u pornoj vodi (od stalne razine i procjeđivanja), od nasipavanja i iskapanja, od opterećenja prometom, bujanje i stezanje, dugotrajnih pomaka zbog konsolidacije, pomaka i ubrzanja prouzročenih eksplozijom, potresa i dinamičkog opterećenja, leda, napregnutih sidara, i sl.

Trajanje opterećenja je bitno, pogotovo kad je povezano sa svojstvima materijala kao što je konsolidacija sitnozrnih tala. Za izvanredna opterećenja pretpostavljaju se prosječne vrijednosti.

## Određivanje projektних veličina

U geotehničkim je građevinama često prisutna voda, kao vanjska i/ili podzemna, sa stalnom i promjenljivom razinom. Zbog toga u obzir treba uzimati opterećenja od djelovanja vode i to:

- kod graničnih stanja s ozbiljnim posljedicama (obično krajnjeg graničnog stanja) projektne vrijednosti pornih tlakova i sila strujnog tlaka treba uzeti za najnepovoljnije vrijednosti koje se mogu pojaviti u ekstremnim slučajevima;

- kod graničnih stanja s manje ozbiljnim posljedicama (obično graničnog stanja uporabivosti) projektne vrijednosti zbog djelovanja vode određuju se kao najnepovoljnije u normalnim uvjetima.

Projektne vrijednosti opterećenja,  $F_d$ , procjenjuju se ili određuju obzirom na svojstveno opterećenje,  $F_k$ , prema izrazu:

$$F_d = F_k \cdot \gamma_F \quad (2.26)$$

gdje je,  $\gamma_F$ , *parcijalni faktor sigurnosti za promatrano opterećenje*. Svojstvene vrijednosti opterećenja, kod potpornih građevina, određene su u Eurokodovima za konstrukcije.

Na taj se način ne određuju projektne vrijednosti pritiska tla za geotehničke proračune. Pritisци od tla proračunavaju se sa projektним vrijednostima gustoće tla i ostalih parametara geotehničkih materijala kako je opisano u 8. poglavlju Eurokoda 7. Na kraju ovog poglavlja priložena je tabela parcijalnih faktora za granična stanja nosivosti.

Parcijalni faktor sigurnosti, za granično stanje uporabivosti je,  $\gamma_F = 1$ . Manje vrijednosti ovog faktora posljedica su mogućnosti preraspodjele opterećenja na temelje kod statički neodređenih sustava. Kod statički određenih sustava i kod neodređenih s malom mogućnošću preraspodjele opterećenja treba uzeti,  $\gamma_F = 1,5$ . Za izvanredna opterećenja,  $\gamma_F$ , je uvijek jednak 1,0.

Pri određivanju projektних vrijednosti svojstava gradiva treba uzeti u obzir moguću razliku između svojstava gradiva ustanovljenih in situ i u laboratoriju, krutost i krutost tla i stijena te moguće vremenske učinke.

Projektne vrijednosti svojstava gradiva,  $X_d$ , mogu se određivati izravno ili prema svojstvenim vrijednostima,  $X_k$ , pomoću jednadžbe:

$$X_d = X_k / \gamma_m \quad (2.27)$$

gdje je,  $\gamma_m$ , *parcijalni faktor sigurnosti svojstva gradiva*. Svojstvene vrijednosti svojstava tla i stijena moraju se procijeniti uzimajući u obzir njihov utjecaj na ponašanje građevine tijekom radnog vijeka. Posebno su važni i geološki podaci te podaci o sličnim, već izvedenim građevinama.

Svojstvenu vrijednost treba, odrediti tako, da je vjerojatnost pojave nepovoljnijeg svojstva, za isto granično stanje, manja od 5%. U geotehničkoj praksi najčešće nema dovoljno podataka da se statističkom obradom dođe do svojstvenih vrijednosti. Schneider, (1997.) preporuča izraz za svojstvene vrijednosti:

$$X_k = (X_m - 0,5 \cdot \sigma) = X_m (1 - 0,5 V) \quad (2.28)$$

gdje je,  $X_m$ , srednja vrijednost promatranog svojstva tla,  $\sigma$ , standardna devijacija, a koeficijent varijacije,  $V = \sigma / X_m$ . Izraz  $(1 - 0,5V)$  naziva se koeficijent homogenosti. Prema Maslovu i sur., 1975., ovakvi se izrazi mogu koristiti dok je,  $V < 30\%$ . Za veće vrijednosti koeficijenta varijacije,  $V > 30\%$ , potrebno je obilježiti

preraspodijeliti na način da određene vrijednosti s kojima se vrši proračun pripadaju (statistički) istom osnovnom skupu ( $V < 30\%$ ), za kojeg onda vrijedi računsko obilježje.

Veće ili manje vrijednosti faktora, sigurnosti uzimaju se u slučaju povećane ili smanjene sigurnosti svojstava gradiva. Za granična stanja, uporabivosti i izvanredne okolnosti su vrijednosti,  $\gamma_m = 1$ , a za objekte u izgradnji, čije rušenje neće ugroziti život ljudi, ili neće imati neke druge značajnije posljedice, mogu se uzeti vrijednosti iz pripadne tablice u Eurokodu 7.

U dimenzije spadaju: visine, nagibi i raspored slojeva, razina podzemne vode, konture iskopa, nasipa, temelja i sl. Najčešće se uzimaju stvarne dimenzije, dok se u nekim slučajevima, za krajnja granična stanja, uzimaju najnepovoljnije dimenzije.

Ograničenje je dopuštena vrijednost apsolutne ili relativne deformacije za odgovarajuće granično stanje.

Projektiranje uz pomoć proračuna omogućava, da se ustanovi osjetljivost proračunskog modela na variranje pojedinih projektnih vrijednosti. U projektne su vrijednosti uključeni elementi sigurnosti, pa se primjerice parametarskom analizom može odrediti utjecaj svake pojedine vrijednosti na ukupnu sigurnost građevine. Takav je pristup bitno drugačiji od dosadašnjega, kada su svi pojedinačni utjecaji bili prekriveni zajedničkim faktorom sigurnosti.

Proračunom se određuju projektne veličine  $E_{d;U}$ , koje su posljedica opterećenja.  $E_{d;U}$  je funkcija projektne veličine opterećenja  $F_d$ , svojstava gradiva  $X_d$  i dimenzija  $a_d$ , odnosno:

$$E_{d;U} = E(F_d, X_d, a_d) \quad (2.29)$$

Projektne se veličine  $F_d$ ,  $X_d$  izračunavaju iz svojstvenih veličina  $F_k$ , prema jednadžbi 2.27 i  $X_k$  prema jednadžbi 2.28 a  $a_k$  prema jednadžbi:

$$a_d = a_k \pm \Delta a \quad (2.30)$$

gdje su,  $\gamma_F$ ,  $i$ ,  $\gamma_m$ , parcijalni faktori sigurnosti za pojedino opterećenje, odnosno svojstvo materijala, dok je,  $\Delta a$ , dodatak u dimenziji. Veličine,  $\gamma_F$ ,  $i$ ,  $\gamma_m$ , ovise i o tipu graničnog stanja (za granično je stanje uporabivosti,  $\gamma_m = 1,0$ ).

Za krajnje granično stanje, tj. stanje loma ili nestabilnosti građevine (ili njezinih dijelova), koje može ugroziti sigurnost ljudi i/ili samu građevinu, treba biti:

$$E_{d;U} \leq R_{d;U} \quad (2.31)$$

gdje je,  $R_{d;U}$ , računaska otpornost izražena kao:

$$R_{d;U} = R(F_d, X_d, a_d) \quad (2.32)$$

$$F_d = \gamma_F * F_k \quad (2.33)$$

$$X_d = X_k / \gamma_m \quad (2.34)$$

$$a_d = a_k \pm \Delta a \quad (2.35)$$

Više nema odabira jednoznačnog faktora sigurnosti za neku građevinu u vrijednosti od 1,2; 1,3 ili čak 6. Nesigurnosti su locirane po mjestima nastajanja, pa proračunski modeli mogu stvarno opisati pojavu koju modeliraju, tj. može se izolirati utjecaj svake promjenjive u modelu.

Za granično stanje uporabivosti potrebno je proračunom odrediti projektnu veličinu,  $C_{d,S}$ , koja može biti prevelika deformacija, kad građevina više ne može služiti predviđenoj namjeni. To može biti i preveliki utjecaj vibracija, buke i drugih smetnji koje ometaju rad ljudi, oštećuju građevinu ili njezine dijelove i onemogućuju njenu upotrebu u punoj namjeni. Za to se stanje traži da je:

$$E_{d,S} \leq C_{d,S} \quad (2.36)$$

pri čemu je  $E_{d,S}$  proračunska vrijednost učinka djelovanja pri graničnom stanju uporabivosti:

$$E_{d,S} = E(F_k, X_k, a_k) \quad (2.37)$$

Geotehničko projektiranje po Eurokodu 7, sastoji se od niza pretpostavljenih projektnih okolnosti za pojedina granična stanja (loma i pomaka), koja daju najnepovoljniji utjecaj za pojedino granično stanje. Treba paziti da se opterećenja, koja se iz fizikalnih razloga ne mogu istodobno pojaviti, ne pojave u istoj projektnoj okolnosti.

Nizanjem projektnih okolnosti stvara se projektni scenarij. Za svaku okolnost treba obrazložiti ulazne parametre (opterećenja, svojstva tla, geometrijske podatke i sl.), ustanoviti projektne zahtjeve, odabrati metodu proračuna i pokazati da će projektnim zahtjevima biti udovoljeno. S obzirom na više očekivanih projektnih okolnosti, projektant će, možda i nesvjesno, odabirati oprobana rješenja, što sve zajedno vodi u određeni konzervativizam. Osim toga, geotehničke su građevine često podloga, za razne druge konstrukcije, te stoga imaju "dvostruku odgovornost".

#### **2.5.1.5 Projektiranje pomoću propisanih mjera, probnog opterećenja i metode opažanja**

U nekim slučajevima nema proračunskih modela, ili nisu potrebni, već se postupa prema propisanim mjerama. To je, primjerice slučaj, kod projektiranja, uobičajenih, često konzervativnih detalja izvedbe te specifikacije i kontrole materijala, mjera zaštite i održavanja, pri projektiranju zaštite protiv smrzavanja, kemijskog ili biološkog razaranja.

Pri projektiranju se može oslanjati i na rezultate probnog opterećenja, i ispitivanja na modelima, ali tada treba voditi računa o:

- razlikama u tlu, u pokusu i kod građevine,
- brzini izvođenja pokusa, posebice ako je trajanje probnog ispitivanja znatno kraće od opterećenja građevine,
- utjecajima mjerila, posebice ako je riječ o malim modelima, gdje je važna razina naprezanja i odnos veličina čestica tla.

Budući da nije uvijek moguće predvidjeti ponašanje geotehničkih građevina, može se pomoći metodom opažanja. To je postupak, kojim se projekt ispravlja, dopunjuje i mijenja usporedno s građenjem, stoga prije početka gradnje treba:

- odrediti granice ponašanja građevine;
- predvidjeti, s velikom vjerojatnošću, da će ponašanje građevine ostati unutar zadanih granica;
- osigurati promatranje građevine kako bi se moglo pravodobno intervenirati;
- predvidjeti razne moguće ishode, kojima se treba prilagoditi, ako ponašanje prijeđe dopuštene granice.

### **2.5.1.6 Geotehnički projektni izvještaj**

Osim, u nas uobičajenoga, geotehničkog izvještaja, Eurokod 7 predviđa i tzv. geotehnički projektni izvještaj, koji može biti vrlo kratak, ali treba sadržavati:

- opis lokacije i njezine okoline;
- opis temeljnog tla;
- opis buduće građevine i opterećenja;
- projektne vrijednosti svojstava tla i stijena (s obrazloženjima, ako je potrebno), proračune i rezultate provjere sigurnosti i uporabivosti građevine;
- zahtjeve u vezi sa sigurnošću;
- detaljan plan nadzora, i potrebne provjere za vrijeme gradnje i zahtjeve u vezi s održavanjem.

Prema važećem Zakonu o gradnji iz 2005. godine, geotehnički projektni izvještaj treba biti sastavni dio glavnog projekta. Investitoru treba dostaviti izvadak iz geotehničkog projektnog izvještaja sa zahtjevima za opažanjima i održavanjem građevine.

## **2.5.2 Potporne građevine**

### **2.5.2.1 Definicija potpornih građevina**

Prijedlog Eurokoda 7 određuje potporne građevine kao one koje podupiru tlo, neke druge slične materijale ili vodu. Građivo (tlo) je poduprto ako uz pomoć potporne građevine stoji pod strmijim nagibom nego što bi stajao da takve građevine nema. Potpornim se građevinama smatraju svi tipovi potpornih zidova i svi tipovi podgrada čiji su nosivi elementi povezani s tlom i/ili stijenom.

Potporne se građevine prema Eurokodu 7 dijele u tri osnovne skupine:

1. Gravitacijski potporni zidovi;
2. Zagatne stijenske, tankostijene građevine zabijene ili izvedene u tlu;
3. Složene potporne građevine.

Osim tih osnovnih skupina, moguće su razne njihove kombinacije.

### **2.5.2.2 Granična stanja za potporne građevine**

Za sve tipove potpornih građevina treba analizirati slijedeće slučajeve:

- opću stabilnost;
- lom konstrukcijskih elementa, kao što je zatega, podupora, armatura, sidro i sl., te vezu između takvih elemenata;
- pomak potporne građevine koji može utjecati na njegovu upotrebnu vrijednost ili funkcionalnost na njemu temeljene konstrukcije;
- neprihvatljivo procurivanje kroz zid ili ispod njega;
- iznošenje čestica tla iz zida ili zasipa;
- opasne promjene razine podzemne vode;
- nedopuštene vibracije.

Za gravitacijske i složene potporne zidove treba razmotriti još i slijedeća granična stanja:

- slom temeljnog tla;
- klizanje po dodiru temelj-tlo;
- prevrtanje zida.

Za zagatne stijenke treba razmotriti još i slijedeća granična stanja:

- zaokretanje ili translaciju;
- slom uslijed poremećaja uspravne ravnoteže sustava.

Treba predvidjeti i projektne okolnosti u kojima će se pojavljivati razne kombinacije navedenih graničnih stanja.

### **2.5.2.3 Opterećenja, geometrijski podaci i projektne okolnosti**

#### **A) Opterećenja;**

##### **A1) Od zasipnog materijala**

Masa zasipnog materijala određuje se iz gustoće tla budućeg zasipa, koju treba provjeriti tijekom građenja.

##### **A2) Površinska opterećenja**

U ova opterećenja ulaze obližnje zgrade, vozila, parkirana ili u pokretu, dizalice, složeni i rasuti tereti, kontejneri i svi ostali vanjski tereti koji mogu utjecati na potpornu građevinu.

Posebnu pažnju treba posvetiti opetovanom opterećenju šinskim vozilima u zaleđu građevine.

Projektne vrijednosti opterećenja trebaju biti u skladu s preporukama danim u Eurokodu 1.



### A3) Od vode

Gustoća vode ovisna je o temperaturi, kemijskom sastavu, primjesama (suspendiranim česticama), što treba uzeti u obzir pri projektiranju.

### A4) Udari valova

Projektne se vrijednosti udara valova određuju na osnovi lokalnih klimatskih i hidrauličkih uvjeta.

### A5) Sile u pridržanjima (zatege, sidra)

Sile u potpornjima, razuporama, zategama i sidrima u proračunu se tretiraju kao i opterećenja, te se smatraju neovisnima o odzivu (deformaciji) razmatranog sustava. Kod sidara i zatega u obzir treba uzeti moguću preopterećenost zbog prednaprezanja i učinak popuštanja.

### A5) Udari

Projektne vrijednosti treba odrediti na temelju energije koju pri udaru apsorbira potporna građevina.

Za bočne udare se može predvidjeti povećana krutost tla iza građevine. Treba provjeriti i mogućnost pojave likvefakcije iza zagatne stijenke, uslijed bočnog udara.

Posebni proračun provodi se na udar leda.

### A6) Temperaturni učinci.

Treba razmotriti ekstremne promjene temperature u prostoru i vremenu. Posebno na taj utjecaj treba razmotriti zatege i podupore. Učinci požara obrađeni su u dijelu Eurokoda o gradivima, koji se odnose na projektiranje građevina otpornih na požar.

Posebno treba provesti proračun ako se očekuje zaleđivanje slobodne vodene površine koja je u dodiru s građevinom.

Pri projektiranju drenaže treba spriječiti nastajanje leća leda u zasipu.

## **B) Geometrijski podaci.**

### B1) Oblik građevine i okolnog tla

Geometrijski podaci temelj su projektiranja. Oni se iskustveno pretpostavljaju, a zatim proračunski provjeravaju, prihvaćaju ili mijenjaju. Treba predvidjeti geometriju okolnog tla u području koje utječe na potporna građevinu kao i moguća nasipavanja, podlokavanja i slično.

Geometriju treba posebno razmotriti, ako se u račun uzima učinak pasivnog otpora u temeljnom tlu ispred građevine.

### B2) Razine vode

Projektne vrijednosti geometrijskih podataka koji određuju razinu vodnog lica i razinu podzemne vode, treba odrediti na osnovi lokalnih podataka hidrauličkih i hidroloških mjerenja. Treba uzeti u obzir promjenu razine površinske i podzemne vode, arteške i subarteške pritiske te strujne tlakove, ukoliko utječu na građevinu.

### **C) Projektne okolnosti**

Prema preporukama Eurokoda 7, za određivanje graničnih stanja, u projektним okolnostima treba razmatrati promjenjivost u prostoru i vremenu:

- svojstava tla;
- razine podzemne vode i pornih tlakova;
- opterećenja i njihovih kombinacija;
- iskopa, podlokavanja i erozije ispred potporne građevine;
- ugradnje zasipa i nasipavanje iza potporne građevine;
- učinak budućih građevina i dodatnih opterećenja ako je moguće;
- učinke pomaka temeljnog tla, ulegnuća, djelovanja leda itd.

Projektne okolnosti se vežu za odgovarajuće granično stanje, krajnje granično stanje ili granično stanje uporabivosti. Razlikuju se po veličini opterećenja, razini podzemne vode i sl.

#### **2.5.2.4 Projektiranje za krajnje granično stanje**

Pri projektiranju za krajnje granično stanje treba, u projektним okolnostima primijeniti opterećenja prema 2.5.2.3. Treba provjeriti sve mjerodavne oblike graničnih stanja. Stanja su nastavno navedena

- ukupna stabilnost;
- slom tla ispod temelja, nosivost i klizanje;
- zaokretni slom zagatnih stijenki;
- uspravni slom zagatnih stijenki;
- slom dijelova potpornih građevina;
- slom čupanjem sidara i zatega.

#### **2.5.2.5 Projektiranje za granično stanje uporabivosti**

Za ovo se stanje provjerava kako da mogući pomaci građevine ostanu unutar zadanih ograničenja. Ograničenja se određuju na temelju ponašanja sličnih potpornih građevine u istim ili sličnim uvjetima. Ukoliko procijenjeni pomaci nadmašuju 50% ograničenja tada treba provesti detaljnu računsku provjeru za slučajeve:

- ako su susjedne zgrade posebno osjetljive na pomake;
- ako zid pridržava više od 6,0 m tla niske plastičnosti ili 3,0 m tla visoke plastičnosti;
- ako je zid pridržan mekom glinom ili leži na njoj;
- ako nema sličnih iskustava.

Pri proračunu konstrukcijskih elemenata na granično stanje uporabivosti, uzimaju se karakteristične vrijednosti svojstava tla.

Tabela 2.3 Parcijalni faktori za granična stanja nosivosti u trajnim i privremenim projektnim situacijama

Slučaj	Djelovanja ( $\gamma_F$ )			Svojstva temeljnoga tla ( $\gamma_m$ )			
	Stalna		Promjenljiva	tan $\varphi$	c'	c <sub>u</sub>	q <sub>u</sub> <sup>a</sup>
	Nepovoljna	Povoljna	Nepovoljna				
Slučaj A	[1,00]	[0,95]	[1,50]	[1,1]	[1,3]	[1,2]	[1,2]
Slučaj B	[1,35]	[1,00]	[1,50]	[1,0]	[1,0]	[1,0]	[1,0]
Slučaj C	[1,00]	[1,00]	[1,30]	[1,25 1]	[1,6]	[1,4]	[1,4]

<sup>a</sup> tlačna čvrstoća tla ili stijene

Slučaj A – koristiti samo kada je kritičan utjecaj uzgona;

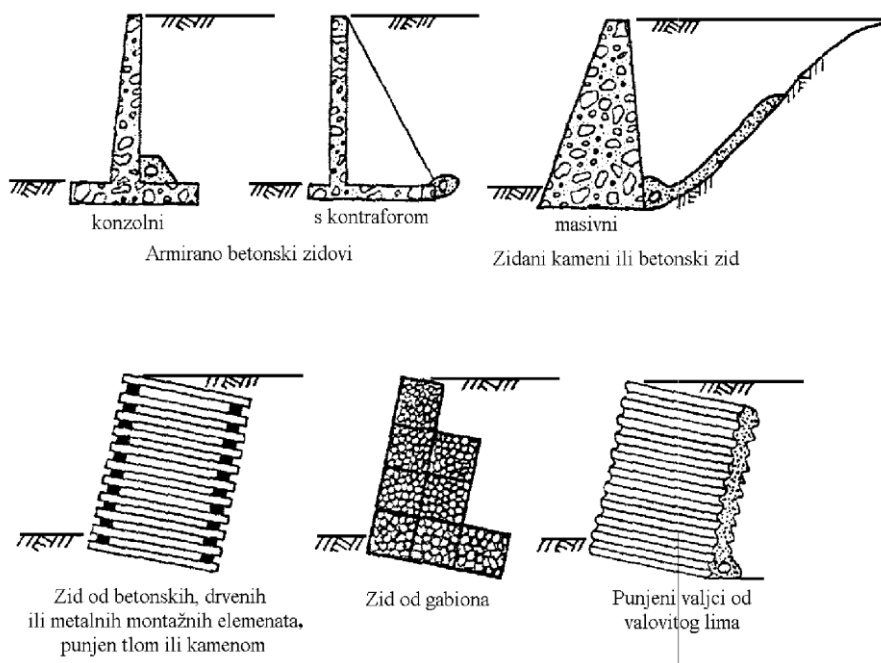
**Slučaj B – koristiti za proračune nosivih dijelova temelja ili potpornih građevina;**

Slučaj C – koristi se za proračune stabilnosti kosina gdje se ne pojavljuju nosivih dijelovi. Može biti kritičan i za dimenzioniranje nosivih dijelova temelja i potpornih građevina, a ponekad i za njihovu čvrstoću.

### 3 POTPORNİ ZIDOVI

#### 3.1 OPĆENITO

Potporni su zidovi shematski prikazani na slici 3.1. Ovo su samo neke od velikog broja mogućnosti, koje se javljaju u građevinskoj praksi. Izvode se od svih do danas poznatih građevinskih materijala; betona, armiranog betona, klesanog i pritesanog kamena, opeke, montažnih elemenata, gabiona ispunjenih kamenom ili šljunkom, drvenih, betonskih ili metalnih rešetkastih sanduka ispunjenih kamenom, te pomoću svih do sada poznatih graditeljskih tehnologija. Mogu biti sastavljeni od niza dijelova, koji svaki za sebe ima neke posebnosti. Osnovno što ih razlikuje od ostalih potpornih građevina je to da imaju temelj.

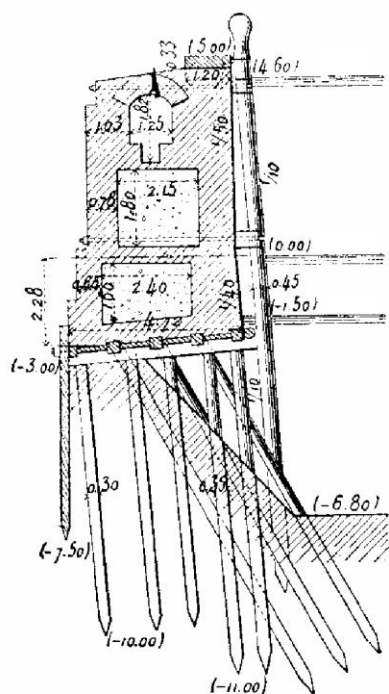


Slika 3.1 Nekoliko vrsta gravitacijskih potpornih zidova

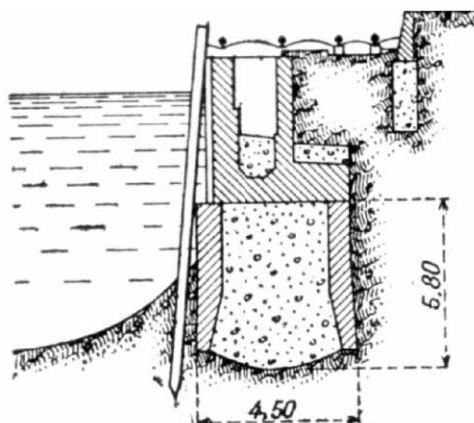
Temelj je dio potpornog zida koji leži na tlu. Zidovi na slici 3.1 ili imaju posebni temelj ili svom svojom širinom leže izravno na tlu. Na taj način oni sva opterećenja (vlastitu težinu i sve vanjske sile) prenose izravno na temeljnu plohu. Temelj je nešto širi od samog zida ako je nosivost tla nedovoljna. Time se vrši preraspodjela naprezanja na dodirnoj plohi temelj – tlo. Proširenja s unutrašnje strane zida mogu biti potrebna radi ugradnje drenaža, što ne mora biti potrebno iz statičkih razloga.

Temelji potpornih zidova dimenzioniraju se kao svaki drugi temelj bilo koje građevine. Pri tom je to najčešće obično plitko temeljenje, ali može biti i neka vrsta dubokog temeljenja, što ovisi o stanju podtemeljnog tla na mjestu izvođenja.

Kada se mora temeljiti na izrazito lošem tlu nastaju vrlo složene građevine. Na slici 3.2 prikazana su dva, duboko temeljena, masivna potporna zida.



Pristan u Bremenu temeljen na drvenom roštilju i pilotima (Prudon, 1936.)



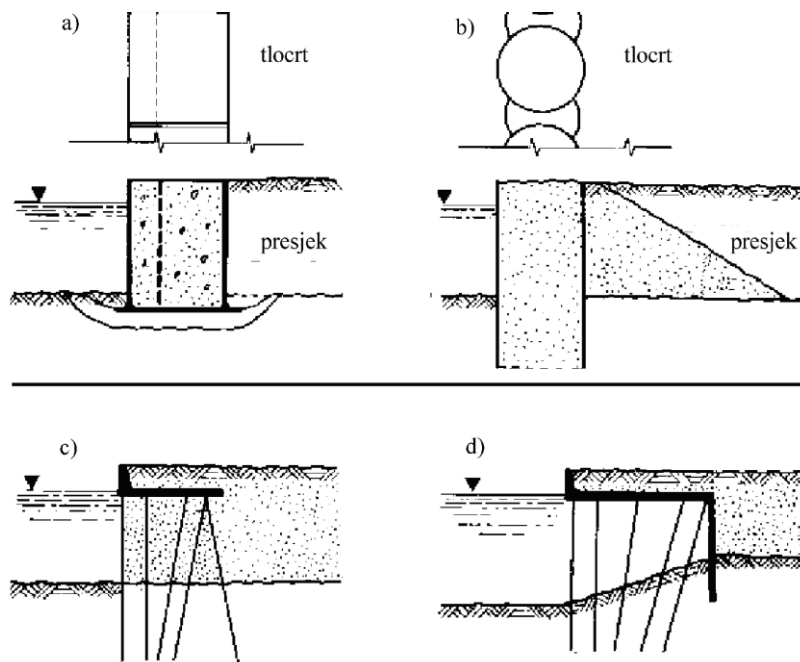
Pristan u Hamburgu temeljen na bunaru (mjere u metrima), (Prudon, 1935.)

Slika 3.2 Masivni, gravitacijski potporni zidovi na dubokim temeljima

DUBOKO TEMELJENJE često se javlja kod upornjaka mostova koji su također vrsta potpornih zidova, ali i kod pristana u lukama kako je to prikazano na slikama 3.2 i 3.3.

Neki autori upornjake mostova smatraju posebnom vrstom potpornih zidova i razmatraju ih odvojeno kao poseban tip zida, upravo zbog česte potrebe posebnih zahvata ispod temeljene plohe. Možda bi ih u tom smislu bilo bolje svrstati u POSEBNE GEOTEHNIČKE GRAĐEVINE, s posebnim potrebama u smislu proračuna, projektiranja i dimenzioniranja. Za ovakve potporne zidove nema jednoznačnih rješenja, već svako ovisi o konkretnom stanju na lokaciji, kako glede podtemeljnog tla tako i glede zahtjeva građevine kojoj služi.

Sličan je slučaj i s pristanima u lukama. Općenito su to potporni zidovi ili šire potporne građevine, ali zbog posebnih zahtjeva nema za njih općeg rješenja. Na slici 3.3 dan je primjer nekoliko obalnih građevina iz kojih se vidi njihova složenost.



Slika 3.3 Primjeri obalnih građevina: a) obalni zid od plivajućih sanduka punjenih betonom ili zasipom (trajna građevina); b) obalni zid od čelija izrađenih od čeličnog žmurja punjenih zasipom (trajna ili privremena građevina); c) pristan s odignutom platformom s zagatnom stjenkom od čeličnog žmurja; d) pristan s odignutom platformom na pilotima, s otvorenim licem prema vodi (Tschebotarioff, 1973.)

Potporni zidovi su sastavni dijelovi raznih građevina. Mogu biti kako je već rečeno, krila upornjaka mostova, zaštite predulaza u tunele, ali i valobrani, zidovi brodskih prevodnica, suhih dokova i niza drugih građevina koje se izvode u zasjecima, u usjecima ili uz nasipe.

Potporni zidovi iza sebe nose opterećenje od prirodnog tla, kada pridržavaju usjeke i/ili zasjeke, ili opterećenje nasipom. U oba slučaja površina terena u njihovom zaleđu može biti vodoravna ili nagnuta pod određenim kutom. Na vodoravnu površinu može doći dodatno opterećenje dok na kosinu uglavnom ne dolaze dodatni tereti. Kada su opterećeni prirodnim tlom potrebno je poznavanje geotehničkih svojstava tog tla. Kada su opterećeni nasipima, geotehnička svojstva nasipa se mogu propisati i kontrolirati. Bitna je razlika u načinu izvođenja potpornih zidova koji štite usjeke od onih koji nose nasipe. Detaljnije će se o tome iznijeti u poglavlju o izvođenju.

Prema tipu se potporni zidovi mogu podijeliti na:

- masivne, gravitacijske;
- olakšane, gravitacijske, lagano armirane;
- tankostijene, armirane.

MASIVNI, GRAVITACIJSKI POTPORNİ ZİDOVI velikih su dimenzija. Kod većih visina, dimenzije postaju ograničavajući čimbenik. Stoga se iznalaze razni načini za savladavanje većih visina.

OLAKŠANI POTPORNİ ZİDOVI nešto su lakši od masivnih. Mogu imati štedne otvore (slika 3.2) ili mogu oblikovno biti prilagođeni tako da mogu nositi zadano opterećenje. U ovu skupinu spadaju zidovi s konzolom i zidovi sa zategom.

TANKOSTJENI, armirani potporni zidovi imaju proširenu, armiranu temeljnu stopu na unutrašnjoj strani i/ili na vanjskoj strani, što ovisi o slobodnom prostoru. Uz to mogu imati rebra ili kontrafore.

**Potporni zidovi se u principu dimenzioniraju na aktivni pritisak, jer se smatra da mogu podnijeti deformaciju koja će takvo stanje u tlu izazvati. Ako to nije moguće treba ih dimenzionirati na pritisak mirovanja.**

U tabeli 3.1 prikazani su rezultati istraživanja više autora, koji su (uglavnom na modelima) istraživali kolika je potrebna veličina pomaka da bi se ostvario najmanji mogući pritisak na potporni zid (Duncan i sur., 1990.)

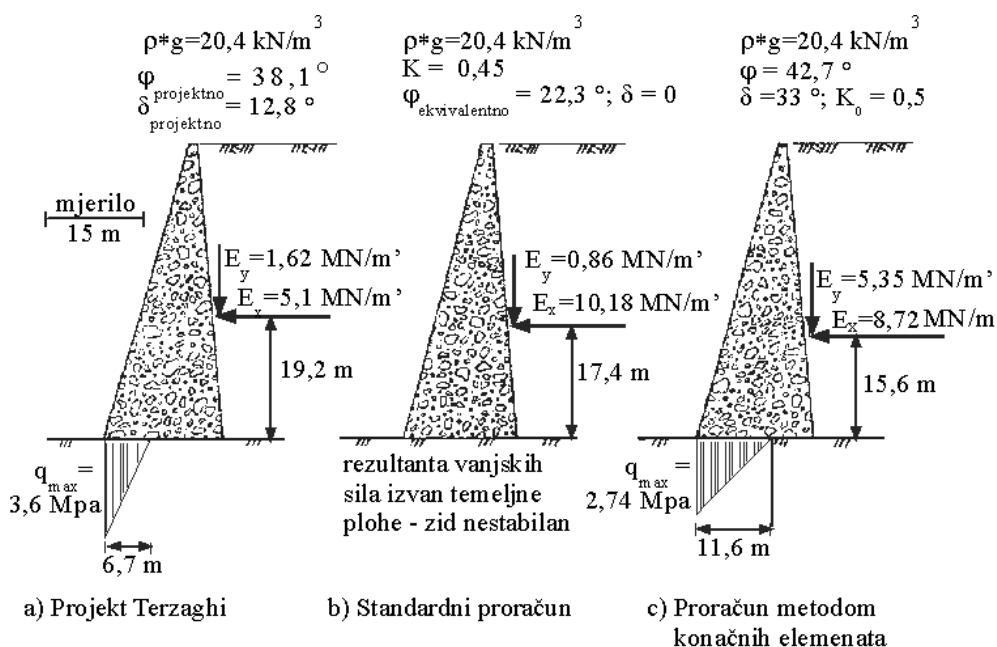
Tabela 3.1 Pomak potreban za postizanje punog aktivnog pritiska (Duncan i sur., 1990.)

Izvor	Visina zida (H)	Zasip	Zbijeno	Način pomaka	Veličina relativnog pomaka, $a^*/H$ , potrebna za puni aktivni pritisak
Broms i Ingelson (1971.)	2,7	pijesak	da	rotacija	0,0003
Broms i Ingelson (1972.)	8,7	pjeskoviti šljunak	da	rotacija	0,0009 do 0,0024
Carder i sur. (1977.)	2,0	pijesak	da	translacija	0,0020
Carder i sur. (1980.)	10,0	prašinstva glina	da	rotacija	0,0009
Matsumoto i sur. (1978.)	10,0	prašinstva pijesak	da	rotacija	0,006 do 0,008
Matsumoto i sur. (1978.)	1,2	pijesak	da	rotacija	0,003 do 0,005
Sherif i sur. (1984.)	1,2	pijesak	da	rotacija	0,0005
Sherif i sur. (1984.)	1,5	pijesak	ne	rotacija	0,0005
Terzaghi (1934.)	1,5	pijesak	da	rotacija	0,0011
Terzaghi (1934.)	1,5	pijesak	da	translacija	0,0011
Terzaghi (1934.)	1,5	pijesak	ne	rotacija	0,002
Terzaghi (1936.)	1,5	pijesak	da	rotacija	0,002
Terzaghi (1936.)	1,5	pijesak	da	rotacija	0,005
Terzaghi (1936.)	1,5	pijesak	da	translacija	0,001
Terzaghi (1936.)	1,5	pijesak	da	translacija	0,005* <sup>1</sup>

\*a veličina pomaka vrha zida; H visina zida;

\*<sup>1</sup> Pomak za postizanje raspodjele pritiska po trokutu s težištem u donjoj trećini zida

Da dimenzioniranje potpornih zidova nije ni jednostavno ni jednoznačno najbolje pokazuje analiza 46 m visokog potpornog zida brane Comerford na rijeci Connecticut, koji stoji još i danas (Duncan i sur., 1990.). Zid je projektirao K. Terzaghi oko 1928. godine, a rad o njemu je objavio 1934. godine. Zid je temeljen na čvrstoj stijeni. Duncan uspoređuje Terzaghijev proračun: a) s proračunom b) po klasičnoj metodi, opterećenjem tlakom mirovanja i s c) proračunom provedenim metodom konačnih elemenata. Na slici 3.4 prikazani su rezultati ove analize.



Slika 3.4 Rezultati usporednih proračuna Terzaghijevog zida visine  $H = 46 \text{ m}$  iz 1928. godine (Duncan i sur., 1990.)

Autor pokazuje da proračun pri opterećenju tlaka mirovanja ne zadovoljava uvjete stabilnosti. Naime u tom slučaju smatra se da nema pomaka zida te da nema ni trenja između zida i tla iza njega. Trenje između zida i tla igra međutim ključnu ulogu u dimenzioniranju masivnih potpornih zidova. Ono izaziva posmično naprezanje koje daje takav moment na prevrtanje, koji stabilizira zid. Ovo se trenje redovito javlja iza zidova koji pridržavaju nasipe, što je jedno od objašnjenja stabilnosti zida brane Comerford.

Objašnjenje je slijedeće:

Nasip se, i nakon najboljeg mogućeg zbijanja, sliježe u vremenu dovoljno da izazove trenje o zid potrebno za pojavu dodatnog posmičnog pritiska koje u ukupnom sustavu uravnoteženja daje pozitivan moment na prevrtanje i time dodatno stabilizira zid

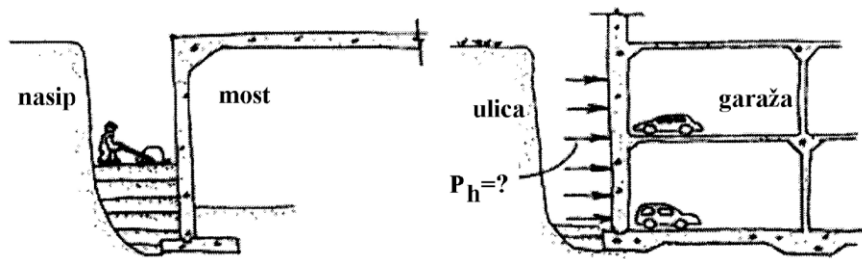


## 3.2 POSEBNA OPTEREĆENJA NA POTPORNE ZIDOVE

### 3.2.1 Opterećenja sredstvima za zbijanje

U poglavlju 2 bila su prikazana opterećenja koja djeluju na sve potporne građevine. Neke od njih su iz razloga namjene i/ili načina izvođenja, dodatno opterećena prilikom izvedbe.

Potporni zidovi gotovo uvijek nose iza sebe zasip i/ili nasip. Tehnologija izvođenja potpornih zidova je takva da se iza njih mora izvesti barem drenažni zasip, koji se mora pravilno ugraditi. To je moguće izvesti jedino ugradnjom u slojevima uz zbijanje. Ako potporni zidovi nose nasip, onda je tek zbijanje slojeva tla prilikom ugradnje nužno, da bi nasip bio pravilno izveden. Na mnogo mjesta zasip služi da bi tlo u zaleđu zida bilo povezano sa samim zidom. Da bi se postigla što bolja veza potrebno je i to vrlo pažljivo, nabijanje tla pri ugradnji. Na slici 3.5 prikazane su takve građevine.

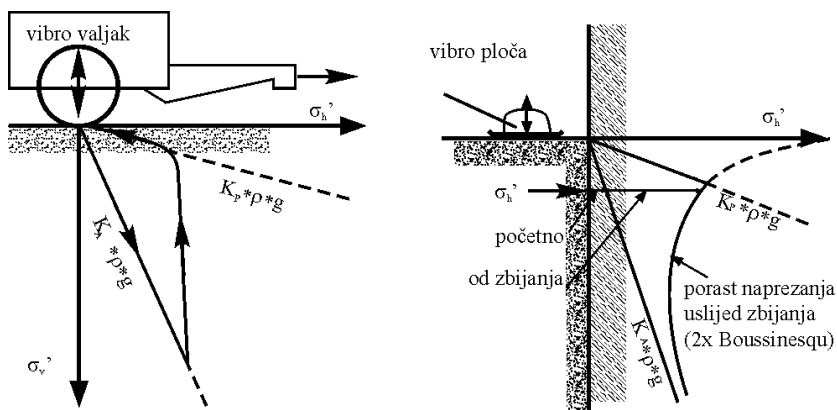


Slika 3.5 Primjeri zbijanja tla u slojevima iza potpornih zidova

Prilikom ugradnje zasipa i/ili nasipa, potpornom se zidu mora približiti neko sredstvo za zabijanje (žaba, vibro ploča, valjak i vibro valjak i sl.). Oni svojim djelovanjem utječu na dodatne vodoravne pritiske na potporni zid. Ovi pritisci nisu zanemarivi, a njima se već duži niz godina bave brojni inženjeri u području geotehnike (Whiffin, 1954.; Broms 1971.; Duncan i Seed, 1986.; Peck i Mesri, 1987. i drugi).

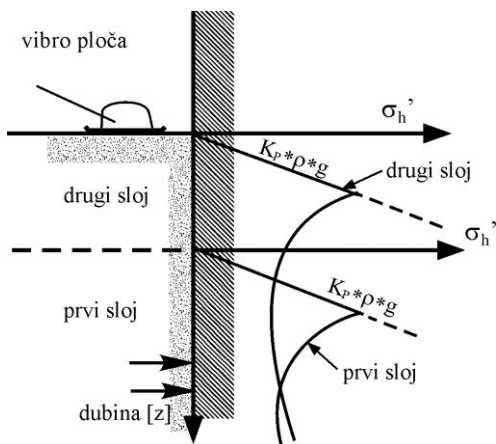
Pokazalo se da su ovi pritisci, u području djelovanja sredstava za zbijanje, veći i od pritisaka izazvanih tlakom mirovanja, tj. da se približavaju vrijednosti pasivnog otpora. To je dosta logično ako se razmotri mehanizam zbijanja. Prilikom zbijanja statički i dinamički se djeluje na tlo tako da se ono zgušnjava. Tom prilikom ono se nastoji premjestiti bočno, van područja djelovanja dodatnog uspravnog naprezanja, što u području nepomičnog zida ima za posljedicu vodoravno zbijanje. Usvoji li se Rankineova teorija, vodoravno zbijanje je izravno uzrok povećanju vodoravnog pritiska, tj. pojavi pasivnog otpora. To znači da su ovi zidovi za vrijeme građenja opterećeni velikim vodoravnim pritislima koje se ne smije zanemariti. Uvažavajući sliku 2.3 u poglavlju 2, ovo se dešava ukoliko nema pomaka zida, jer pri već malom pomaku, pritisak naglo opada. Ako pomaka nema, na zid i nakon završetka zbijanja djeluje povećani pritisak, uzrokovan neelastičnim svojstvima tla (Clough i Duncan, 1991.).

Na slici 3.6 prikazan je utjecaj vibro valjka i vibro ploče na tlo prilikom zbijanja.



Slika 3.6 Skica utjecaja vibro valjka i vibro ploče na podlogu pri zbijanju

Kako se zbijanje izvodi u slojevima, to u svakom sloju dolazi do povećanih bočnih pritisaka na podporu. Taj učinak prikazan je na slici 3.7.

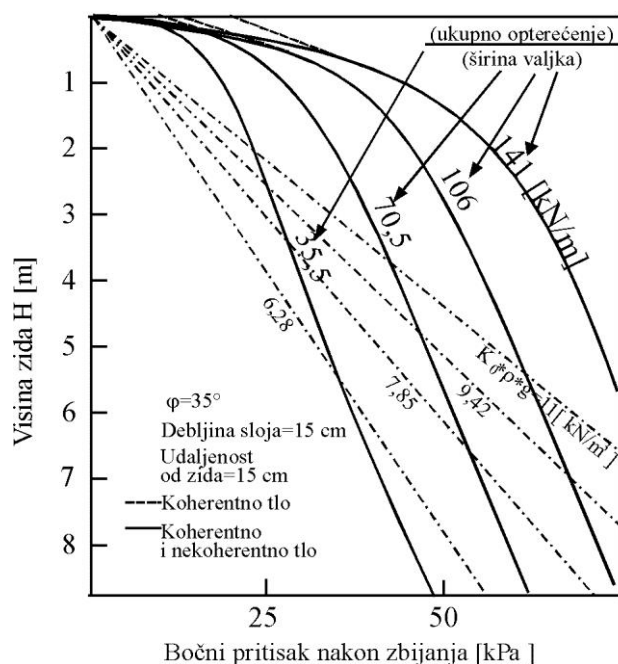


Slika 3.7 Utjecaj zbijanja vibro pločom u slojevima zasipa iza potpornog zida na povećanje vodoravnog pritiska

Djelovanjem sredstava za zbijanje mnogo su se bavili Duncan i Seed (1986.). Razradili su metodu proračuna temeljem analize histereze vodoravnih naprezanja, (skica na slici 3.6 za valjak). Williams i sur. (1987.) su iskoristili Duncanov analitički postupak pomoću kojeg su izradili kompjuterski program EPCOMP2. Pomoću njega su izradili grafikone i tablice za proračun rezidualnih pritisaka nastalih zbijanjem uz potporne zidove.

U radu Clougha i Duncana (1991.) nalaze se dijagrami za proračun dodatnih pritisaka uslijed djelovanja sredstava za zbijanje. Isti dijagrami mogu se naći i u radu Duncana i Williamsa (1991.). Za detaljnije podatke o proračunima, preporuča se prethodno spomenuta literatura.

Na slici 3.8 prikazan je dijagram utjecaja za vibro valjak prema Williamsu i sur. (1987.). Napominje se da dijagram NE SLUŽI ZA PRORAČUN već samo kao ilustracija utjecaja zbijanja na potporni zid.



Slika 3.8 Primjer odnosa tlaka mirovanja i pritiska valjka pri zbijanju nasipa iza potpornog zida (Duncan i sur., 1991.)

### 3.2.2 Opterećenje nezbijenim nasipom

Na potporne zidove osim pritisaka sredstava za zbijanje djeluju i sile od zbijanja nasipa uslijed vlastite težine. Ukoliko se nasip ne zbija, već ugrađuje čeonim zatrpavanjem, vremenom će se on zbiti pod vlastitom težinom i vršiti na zid veći pritisak od aktivnog. Ovo je naročito opasno za tankostijene, armirane zidove. U trenutku prihvaćanja većih pritisaka od računskih, područja, u kojima vladaju vlačna naprezanja, djeluju na način da armatura preuzima naprezanja, ali se javljaju pukotine u betonu. Pri maloj deformaciji nosača (u ovom slučaju ploče ili konzole), naprezanja se smanjuju, ali se nakon nekog vremena postupak ponavlja. Ovaj proces izaziva otvaranje pukotina u betonu, kroz koje ulazi vlaga i počinje proces korozije. Nakon određenog vremena nasip se stabilizira, prestaje se slijegati i ne izaziva više povećane pritiske, ali u betonu ostaju trajne pukotine i progresivni proces korozije.

Ovakvi zidovi redovito nemaju hidroizolaciju sa strane tla, te se armatura stalno nalazi u vlažnoj sredini. Ako još nije ispravno izvedena površinska odvodnja i drenaža iza zida, može se dogoditi da na zid počne djelovati hidrostatički tlak. Tada postoji velika opasnost od rušenja ovakvih zidova. Ako su, statički gledano, čiste konzole i imaju najveći moment na presjeku između konzole-zida i gornje plohe temelja, ovakva je opasnost još veća.

Na slici 3.9 prikazan je jedan ovakav potporni zid koji je iz sigurnosnih razloga poduprt betonskim blokovima.



Slika 3.9 Betonski blokovi kao podupore nestabilnom konzolnom zidu (dokumentacija autora)

### 3.3 DIMENZIONIRANJE POTPORNIH ZIDOVA

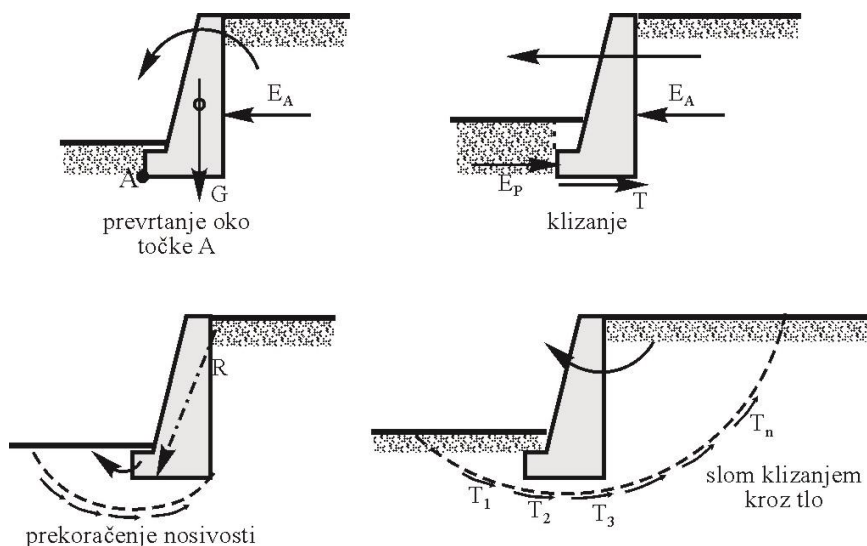
U ovom poglavlju obradit će se onaj dio dimenzioniranja potpornih zidova koji je zajednički za sve zidove bez obzira na vrstu. Posebnosti svakog od njih obradit će se uz opis pojedine vrste zida.

Dimenzionirati potporni zid znači provjeriti nekoliko stanja stabilnosti, isključivo u području mehanike tla. Temelj proračuna je određivanje FAKTORA SIGURNOSTI  $F_S$  za svako stanje stabilnosti.

FAKTOR SIGURNOST JE, OPĆENITO, OMJER RASPOLOŽIVE STATIČKE VELIČINE, I STATIČKE VELIČINE POTREBNE DA BI SUSTAV BIO U RAVNOTEŽI. Faktor sigurnosti NE MOŽE biti manji od  $F_S=1$ , jer se u tom slučaju promatrani sustav RUŠI.

U ovom se poglavlju neće govoriti o dimenzioniranju betonskih presjeka, iako i to treba proračunati u ukupnom projektu potpornog zida. Na slici 3.10 prikazana su četiri moguća mehanizma sloma kod gravitacijskih potpornih zidova.

Zid je redovito potrebno proračunati na prevrtanje oko točke A, na klizanje, a temelj na nosivost i slijeganje. To su uglavnom ekscentrično opterećeni temelji pa opasnost od sloma leži na strani vanjskog lica zida. Rijetko kada je moguće postići da rezultanta ukupnih sila na plohu temelj-tlo leži u sredini presjeka temeljne plohe.



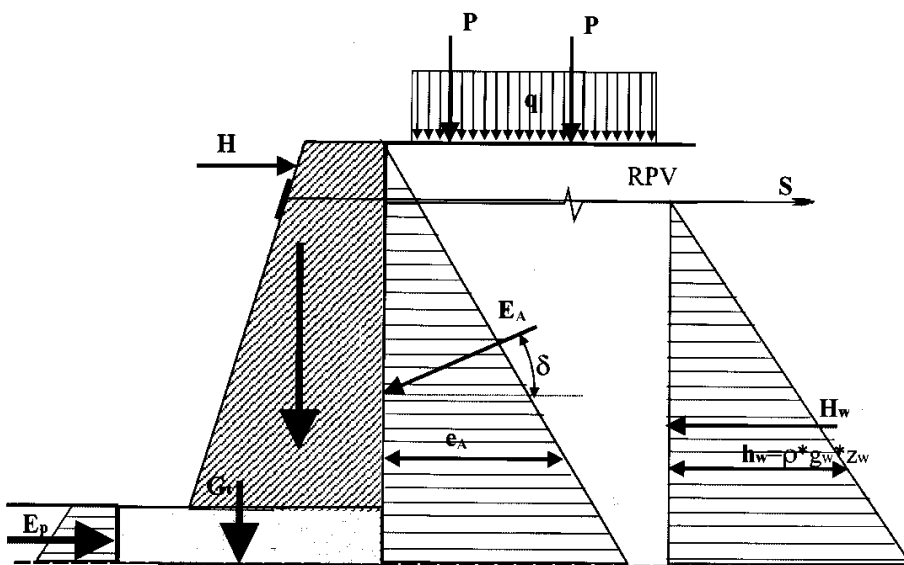
Slika 3.10 Mogući mehanizmi sloma za koje treba provesti proračun potpornog zida

Uz proračun nosivosti, treba provesti i proračun ukupnog i diferencijalnog slijeganja kao za svaki drugi temelj. Diferencijalno slijeganje može prouzročiti nepoželjno veliko naginjane potpornog zida oko vanjske točke temelja (slika 3.10 točka A), koje uslijed promjene geometrije smanjuje sigurnost na prevrtanje.

Proračun na opći slom klizanjem kroz tlo, provodi se samo onda kada postoji opravdana sumnja da bi do takvog sloma moglo doći. To je nužno provesti, ako se potporni zid koristi kao jedan od zahvata pri stabilizaciji klizišta. Također je potrebno provesti takav proračun, ako se utvrdi da je ispod sloja tla, na kojem leži temelj zida, sloj tla lošijih geotehničkih svojstava.

U poglavlju 2 opisana su opterećenja koja djeluju na sve potporne građevine pa tako i na potporne zidove. Na slici 3.11 nabrojena su gotovo sva opterećenja (osim uslijed zbijanja), koja ulaze u proračun potpornog zida i provjeru na prevrtanje, klizanje i nosivost podtemelnog tla, kao i osnovne mjere zida:

- | Djelujuće sile:   | Osnovne mjere:          |
|---|-------------------------|
| 1. aktivni pritisak, $E_A$ ;  | H-visina zida           |
| 2. hidrostatički tlak, $H_w$ ;  | b-širina temeljne stope |
| 3. hidrodinamički tlak U;   |                         |
| 4. vanjske, vodoravne sile, V;  |                         |
| 5. dodatni tereti na površini (koncentrirani, P, linijski, P' i površinski, q); |                         |
| 6. vlastita težina, G i težina temelja, $G_t$ ;                                 |                         |
| 7. pridržanje u zatezi, S;  |                         |
| 8. pasivni otpor, $E_P$ ;   |                         |
| 9. trenje na plohi temelj-tlo, T.   |                         |



Slika 3.11 Opterećenja i otpori koji ulaze u proračun potpornog zida

Potporni zidovi ovog tipa NE DIMENZIONIRAJU SE NA HIDROSTATSKI PRITISAK. Utjecaj podzemne i procjedne vode se odstranjuje drenažom. Ona se sastoji od posebno ugrađenih vodopropusnih slojeva i cijevi. Taj sustav

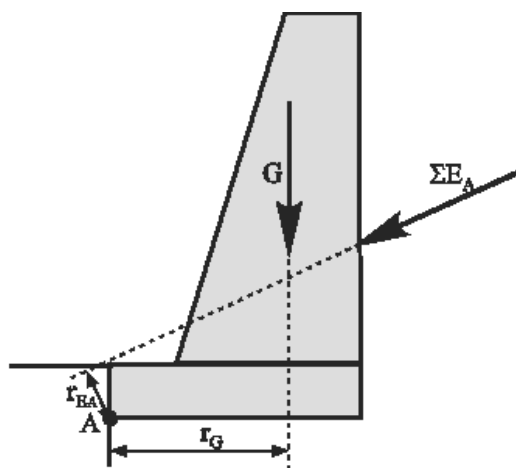
onemogućava stvaranje hidrostatičkog pritiska iza zida. U iznimnim slučajevima treba dodati utjecaj hidrodinamičkih sila na klizni klin kako je to pokazano u poglavlju 2. Potporni zidovi se osiguravaju od utjecaja hidrostatičkog tlaka i posebno, za tu svrhu, izvedenim otvorima po cijeloj širini, tzv. barbakanama ili procjedicama.

### 3.3.1 Proračun na prevrtanje

Temeljna je pretpostavka, da se zid može dovoljno pomaknuti da na njega djeluje AKTIVNI PRITISAK. To znači da se svi utjecaji od raznih opterećenja iza zida svode na aktivno stanje, primjenom metoda opisanih u poglavlju 2. Zid se promatra kao kruto tijelo koje se može prevrtati oko točke "A" sa slike 3.12.

Temelj proračuna na prevrtanje oko točke "A" je proračun faktora sigurnosti  $F_{sp}$ . U slučaju proračuna potpornog zida na prevrtanje, to je omjer MOMENATA sila otpora prevrtanju s obzirom na točku "A" i MOMENATA aktivnih sila s obzirom na istu točku. PRORAČUN SE PROVODI ZA 1 m DUŽINI POTPORNOG ZIDA za slučaj ravninskog stanja deformacija. U drugim je slučajevima potrebno računati pojedinu dionicu kao cjelinu.

Slika 3.12 prikazuje djelujuće sile pri provjeri zida na prevrtanje.



Slika 3.12 Sile i njihovi krakovi, potrebni za proračun zida na prevrtanje

Izraz za faktor sigurnosti na prevrtanje iznosi:

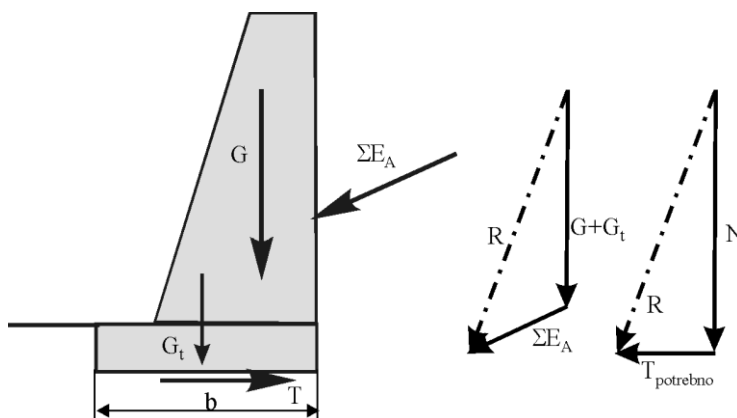
$$F_{sp} = \frac{G * r_G}{(\sum E_A) * r_{E_A}} \quad (3.1)$$

Za primjer na slici 3.12 potrebno je provjeriti i prevrtanje zida oko vanjske rubne točke na razini plohe na kojoj zid leži na temelju, ako je na tom mjestu radna reška. U tom slučaju radna reška ne preuzima (računski) vlačna naprezanja čak i ako je u nju konstruktivno ugrađena vezna armatura.

### 3.3.2 Proračun na klizanje

Slijedeći proračun je kontrola zida na klizanje, na dodirnoj plohi između temelja i tla. Pri tom se postavlja pitanje koeficijenta trenja između tla i zida. Kod nekoherentnih materijala to može biti kut unutarnjeg trenja materijala ispod temelja  $\varphi$ , ili manji od njega ( $2/3 \varphi$ ). Poteškoća ostaje u koherentnom materijalu, jer je manji kut trenja u koherentnom materijalu, nego na dodirnoj plohi između temelja i tla, tako da klizanje nastaje u tlu, a ne na dodirnoj reški. Stoga je proračun potrebno provesti s kutom unutarnjeg trenja materijala temeljnog tla. Tako dobiveni koeficijent trenja je uglavnom mali pa je faktor sigurnosti na klizanje uvažavajući samo kut trenja  $\varphi$ , često nemoguće zadovoljiti bez posebnih zahvata, za razliku od faktora sigurnosti na prevrtanje koji je za istu geometriju uglavnom zadovoljavajući.

Slika 3.13 prikazuje djelujuće sile pri provjeri zida na klizanje.



Slika 3.13 Sile potrebne za proračun zida na klizanje

Izraz za proračun faktora sigurnosti na klizanje glasi:

$$F_{sk} = \frac{T_{mog.}}{T_{pot.}} \quad (3.2)$$

Pri tome je za nekoherentne materijale:

$$T_{moguće} = N * tg\Psi \quad (3.3)$$

pri čemu je  $tg\Psi \leq tg\varphi$ , a  $N$  zbroj svih uspravnih sila ili svih sila okomitih na plohu temelj-tlo, ako ona nije vodoravna.

Za koherentno tlo potrebno je uvrstiti adheziju između temelja i tla na način:

$$T_{moguće} = \alpha * c * b + N * tg\Psi \quad (3.4)$$

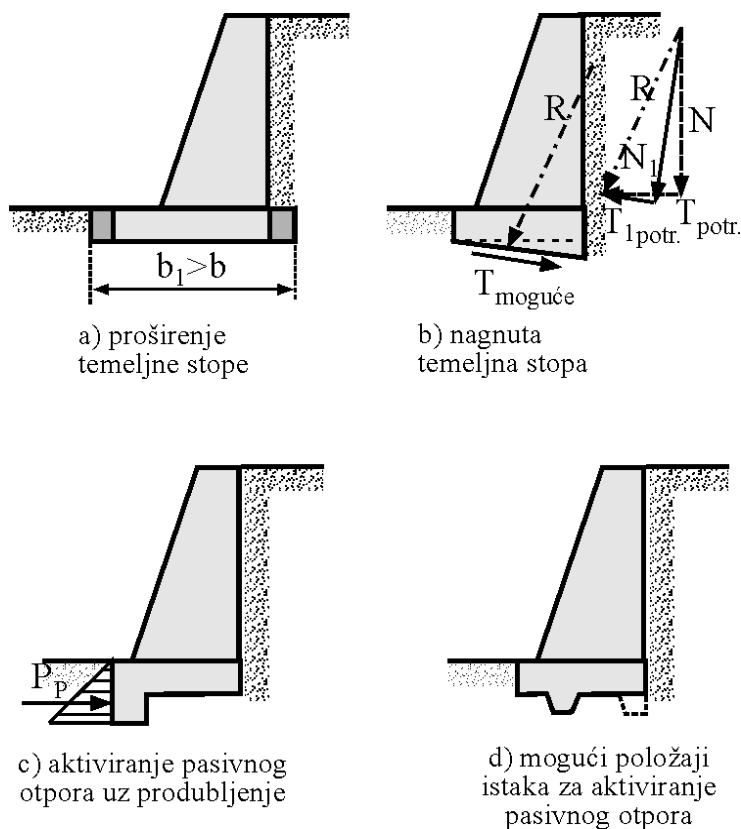
pri čemu je,  $c$ , kohezija;  $\alpha * c$ , adhezija;  $b$ , širina temeljne stope.



Koeficijent,  $\alpha$ , manji je od jedinice. Kreće se prema raznim autorima od  $\alpha=0,25$  za gline s vrijednošću  $c_u = 200$  kPa do  $\alpha=1$ , za gline s vrijednošću  $c_u=50$  kPa.

Faktor sigurnosti na klizanje dosta je teško zadovoljiti. On mora biti  $F_{sk} \geq 2$  za glinenu podlogu ili  $F_{sk} \geq 1,5$  za nekoherentnu podlogu. Postoji više tehničkih rješenja da bi se traženi faktor sigurnosti zadovoljio. Najjednostavnije je proširenje temeljne stope. Povećava se težina temelja i ploha nalijeganja. Ovo nije uvijek dostatno.

Na slici 3.14 prikazano je nekoliko primjera oblikovanja temeljne stope potpornog zida, sa svrhom povećanja sigurnosti na klizanje.



Slika 3.14 Zahvati na temeljnoj stopi sa svrhom povećanja faktora sigurnosti na klizanje

Prilikom primjene postupka skošenja temeljne stope, treba voditi računa da ne dođe do klizanja tla sa strane lica zida naročito ako je zid na nagnutom terenu. Provjeru nosivosti ovakvog temelja treba provesti kao za temelj na kosini (Roje-Bonacci i Mišćević, 1997.). Ova opasnost uglavnom prijete uvijek jer je temelj ekscentrično opterećen i to upravo prema vanjskom rubu, gdje je mali nadsloj i opasnost od sloma tla veća. Metoda skošenja stope korisna je kada je zid temeljen

na stijeni. Tada uglavnom nosivost nije upitna, a mala je mogućnost i klizanja stijene ispod temelja. Jedino je važno provjeriti smjer pada i pružanje pukotina, da po njima ne dođe do klizanja.

Jedan od postupaka je uključivanje u proračun sile pasivnog otpora, koji se javlja ispred temelja. Aktiviranje pasivnog otpora moguće je tamo gdje je dozvoljen izvjestan pomak. Pomak koji izaziva puni pasivni otpor, mnogo je veći od onoga koji je dovoljan da izazove puni aktivni tlak. Stoga se postavlja pitanje funkcionalnosti i upotrebljivosti građevine, ako se aktivira puni pasivni otpor. Relativno veliki pomak bi mogao ugroziti stabilnost zida te se preporuča u proračun uvrstiti samo dio pasivnog otpora ( $1/2$  do  $2/3 P_p$ ). U tabeli 3.2 dane su vrijednosti potrebnog pomaka da bi se aktivirao puni pasivni otpor, dobivene ispitivanjima uglavnom na modelima.

Tabela 3.2 Pomak potreban za postizanje punog pasivnog otpora (Duncan i sur., 1990.)

istraživač	visina zida H [m]	zasip	zbijeno	način pomaka	veličina relativnog pomaka, $a^*/H$ , potrebna za puni pasivni otpor
Broms i Ingelson (1971.)	2,7	pijesak	da	rotacija	0,003
Carder i sur. (1977.)	1,0	pijesak	da	translacija	0,025
Carder i sur. (1980.)	1,0	prašinasta glina	da	rotacija	0,132
Tcheng i Iseux (1972.)	3	pijesak	da	rotacija	0,02 do 0,06
Terzaghi (1934.)	1,5	pijesak	da	rotacija	0,001

$a^*$  veličina pomaka vrha zida; H visina zida;

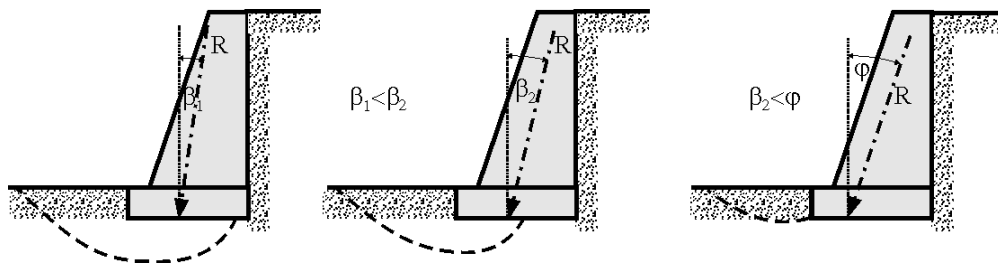
Može se uočiti da su ovo pomaci za jedan red veličina veći od onih potrebnih za aktiviranje punog aktivnog tlaka. Iz tih razloga ne preporuča se aktiviranje punog pasivnog otpora, već samo jednog njegovog dijela (uključivanjem određene vrijednosti faktora sigurnosti za ukupnu silu pasivnog otpora  $P_p$ ;  $1/3 < F_s < 1/2$ )

Proširenje stope je ograničeno, na pr. raspoloživim prostorom. Ako ni jedna metoda ne pomogne potrebno je izmijeniti koncepciju zida (dodati zategu, sidro ili izmijeniti vrstu zida).

### 3.3.3 Provjera nosivosti tla ispod temelja i diferencijalnog slijeganja

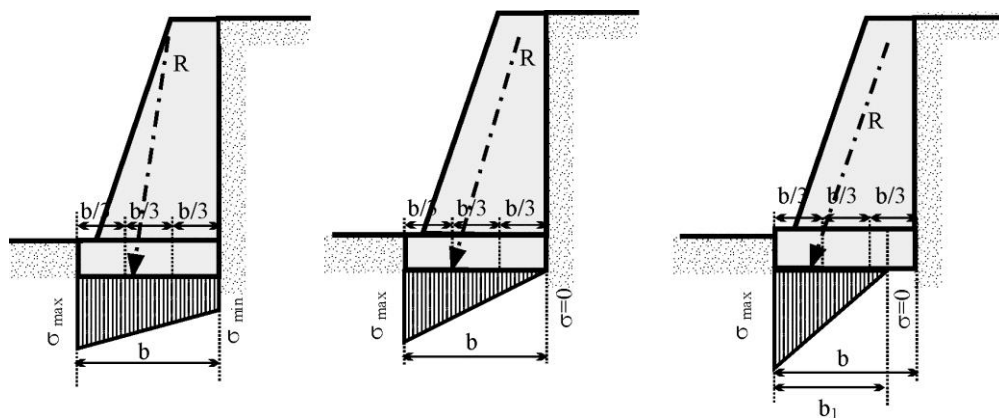
Slom tla ispod temelja nastati će uslijed prekoračenja njegove nosivosti. Temelji potpornih zidova uvijek su opterećeni ekscentrično, a rezultanta svih sila je uvijek pod nekim nagibom,  $\beta$ , u odnosu na uspravnu liniju. Upravo ovisno o tom nagibu javlja se određeni mehanizam klizanja temeljnog tla uslijed prekoračenja njegove nosivosti. Na slici 3.15 prikazani su ovi mehanizmi u ovisnosti o nagibu rezultante,  $\beta$ .

Ekscentrični položaj rezultante uvjetuje nejednoliku raspodjelu naprezanja ispod temelja.



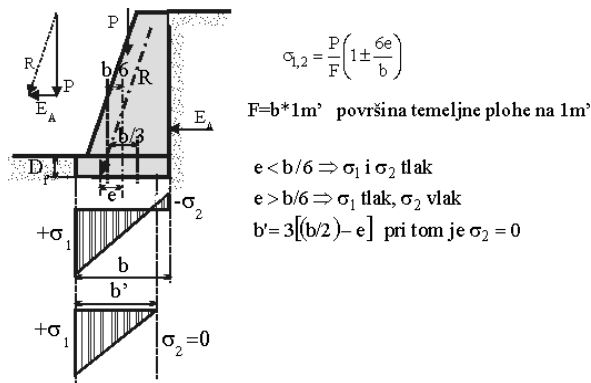
Slika 3.15 Plohe sloma ispod temelja u zavisnosti o nagibu rezultante

Dok se rezultanta nalazi u jezgri presjeka, javlja se pritisak, različitog intenziteta, na oba ruba temeljne plohe. Temelj je potrebno tako projektirati da ova neravnomjernost bude što manja. To je međutim vrlo teško postići. Ako već to nije moguće postići, treba nastojati da na unutarnjem rubu temeljne plohe naprezanje u tlu bude jednako nuli. To će se desiti onda kada je rezultanta na rubu jezgre presjeka. Ukoliko se dogodi da rezultanta sila izađe izvan jezgre presjeka, samo će dio temelja prenositi opterećenje na tlo. Između temeljne plohe i tla ne mogu se ostvariti vlačna naprezanja, tako da taj dio temelja uopće ne nosi. Tada je potrebno izvršiti tzv. REDUKCIJU TEMELJNE PLOHE, te na novu računsku površinu preračunati naprezanja na dodiru temelj-tlo.



Slika 3.16 Moguće raspodjele naprezanja na plohi temelj – tlo

Redukcija temeljne plohe prikazana je na slici 3.17.



Slika 3.17 Redukcija širine temeljne stope za potrebu ponovljenog proračuna dodirnog naprezanja na temeljnu plohu

Nakon što su provedeni proračuni naprezanja na plohi temelj – tlo provodi se proračun dozvoljene nosivosti podtemelnog tla, kao za svaki drugi temelj i uspoređuje s potrebnim pritiscima zida. Ako proračun ne zadovoljava potrebno je promijeniti dimenzije temelja, zida ili dubinu temeljenja. Pri tom je dubina temeljenja,  $D_f$ , dubina plohe temelj – tlo na vanjskoj strani zida.

Za većinu temelja potpornih zidova potrebno je izvršiti i proračun slijeganja i diferencijalnog slijeganja kao za svaki drugi temelj. S obzirom na raspodjelu dodatnih pritisaka na plohu temelj – tlo, to se uglavnom uvijek radi o diferencijalnom slijeganju, koje izaziva zaokretanje temelje prema vanjskom licu oko točke A (slika 3.12). Temeljem rezultata diferencijalnog slijeganja treba provjeriti utjecaj diferencijalnog slijeganja na promjenu geometrije zida i moguće smanjenje stabilnosti na prevrtanje oko točke A (slika 3.12).

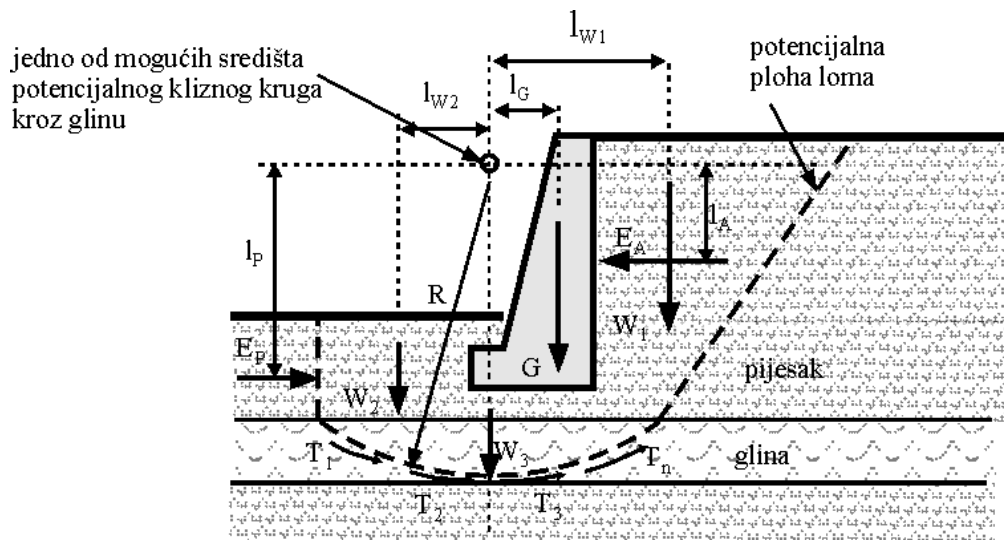
### 3.3.4 Provjera globalne stabilnosti potpornog zida

Postoje uvjeti u tlu kod kojih je nužno provjeriti globalnu stabilnost potpornog zida kao cjeline, uključujući i okolno tlo, na klizanje. Jedan od tipičnih slučajeva je pojava tla lošijih svojstava ispod sloja podtemelnog tla. Mehanizam klizanja i osnove proračuna dani su na slici 3.18.

Proračun najgrublje može izgledati tako da se provjeri ravnoteža momenata sustava kako je to prikazano jednačinom 3.5.

$$F_s = \frac{\sum M_m}{\sum M_p} = \frac{E_P \cdot l_P + \sum T \cdot R + W_2 \cdot l_{W2}}{G \cdot l_G + W_1 \cdot l_{W1} + E_A \cdot l_A} \quad (3.5)$$

pri čemu je,  $M_m$ , mogući moment otpora sustava, a,  $M_p$ , potrebni moment otpora da bi sustav bio u ravnoteži. Ovaj proračun se može provesti i bilo kojom poznatom drugom metodom za proračun stabilnosti kosina.



Slika 3.18 Geometrija za provjeru globalne stabilnosti gravitacijskog potpornog zida

U gornji proračun moguće je uključiti i sile otpora (N i T), na kliznoj plohi iza zida kao one koje daju otporni moment. Bez njih je proračun na strani sigurnosti.

### **3.4 O IZVEDBI POTPORNIH ZIDOVA**

Za sve potporne zidove vrijede neke opće zakonitosti u izvedbi, koje će biti iznesene u ovom poglavlju. To se odnosi na kampadnu izvedbu potpornih zidova, ugradnju drenaže kod vodonepropusnih, ali i vodopropusnih građevina i površinsku odvodnju.

#### **3.4.1 Kampadna izvedba**

Kampadna izvedba potpornih zidova vrlo je važan način gradnje kako kod iskopa tako i kod monolitne izvedbe pojedinih dijelova zidova.

Betonske i armiranobetonske potporne zidove ne treba u komadu izvoditi u dužinama većim od 4,0 m. Preporučljivo je na svaka 4,0 m dužine zida, izvesti ne samo radnu rešku već stvarnu rešku koja će dozvoliti određene uzdužne deformacije izazvane temperaturnim promjenama i nekim drugim uzrocima. U protivnom slučaju zidovi će na razmacima od približno 4,0 m dobiti pukotine po cijeloj visini. Ova zakonitost nije vezana na visinu potpornog zida kao ni na to da li je gravitacijski ili tankostijeni armiranobetonski. Zaključak je donesen temeljem iskustva i opažanja velikog broja takvih potpornih zidova.

Kampadna izvedba nužna je kada se izvode zidovi za zaštitu usjeka i/ili zasjeka. Iskop treba izvršiti u dužini predviđenoj projektom. Kolika će biti duljina kampada, zavisi o proračunima stabilnosti nepodgrađenog dijela pokosa iskopa (preporuča se do 4,0 metra). U račun stabilnosti nepodgrađene dionice uzima se svodno djelovanje tla u vodoravnom smjeru.

Na iskopanoj dionici treba izvesti zid, po mogućnosti u punoj visini, a novu kampadu započeti ne neposredno uz ovu u izvedbi. Iskop i zidanje se rade na preskok, prvo u neparnim kampadama (1., 3., 5. itd.). Po njihovom završetku se između njih izvode parne kampade. Pri tom valja biti vrlo oprezan, jer su to radovi koji mogu ugroziti ljudske živote. Kada se ova zakonitost ne poštuje, dolazi do odrona nepodgrađenih dionica iskopa predviđenih za ugradnju potpornog zida.

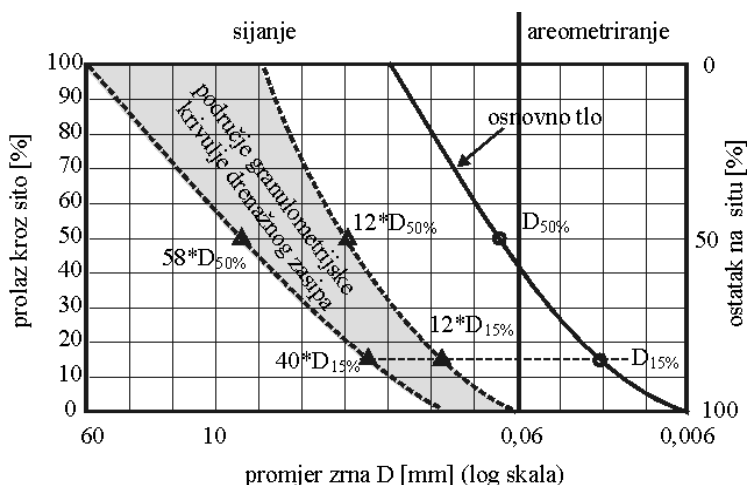
Može se izvoditi i samo dio zida do određene visine, ali takvu izvedbu treba računski dokazati da nije opasna u smislu moguće pojave odrona nepodgrađenog dijela zasjeka.

#### **3.4.2 Drenaža**

Glede propusnosti za vodu bitno se razlikuju dva tipa potpornih zidova. Jedni su vodopropusni (gabioni, zidovi od montažnih elemenata i sl.) te se u njihovom zaleđu ne može ostvariti hidrostatički tlak. Drugi su nepropusni za vodu (betonski, armiranobetonski i sl.). Nađe li se voda u njihovom zaleđu, na njih će djelovati hidrostatički tlak. Kako ovo mogu biti vrlo velike sile, a zidovi nisu računati na djelovanje hidrostatičkog tlaka, to je nužno osigurati da se taj utjecaj onemogućiti. To se postiže raznim vrstama DRENAŽA.

Drenaža je dio građevine koji omogućuje prikupljane i kontroliranu i nesmetanu odvodnju procjedne i podzemne vode u željenom smjeru. Sastoji se od nekoliko dijelova od kojih svaki ima svoju svrhu. Prvi dio prikuplja vodu, tj. svojom relativno velikom propusnošću u odnosu na tlo iz kojeg voda dolazi, omogućuje slobodan ulazak vode i nagli pad potencijala. Taj dio se sastoji od drenažnog zasipa nekoherentnim materijalom ( $D_{maks.} = 30 \text{ mm}$ ), širokog granulometrijskog sastava. Granulometrijski sastav odabire se tako da se krivulju odredi po filtarskom pravilu u odnosu na osnovno tlo. Granulometrijski sastav filtra mora biti takav da spriječi iznošenje čestica iz osnovnog tla u drenažni zasip. Ako dođe do iznošenja čestica iz osnovnog tla, dolazi do smanjenja filtarskih sposobnosti drenažnog sloja, a to se mora spriječiti.

Na slici 3.19 prikazan je dijagram za određivanje područja unutar kojeg se mora nalaziti granulometrijska krivulja drenažnog zasipa temeljem filtarskog pravila prema USBR (Earth manual, 1974.). U tabeli 3.3 dane su vrijednosti kojima se množe promjeri zrna  $D_{15\%}$  i  $D_{50\%}$  da bi se dobio raspon unutar kojeg se mora nalaziti granulometrijska krivulja drenažnog sloja prema nekim drugim autorima.

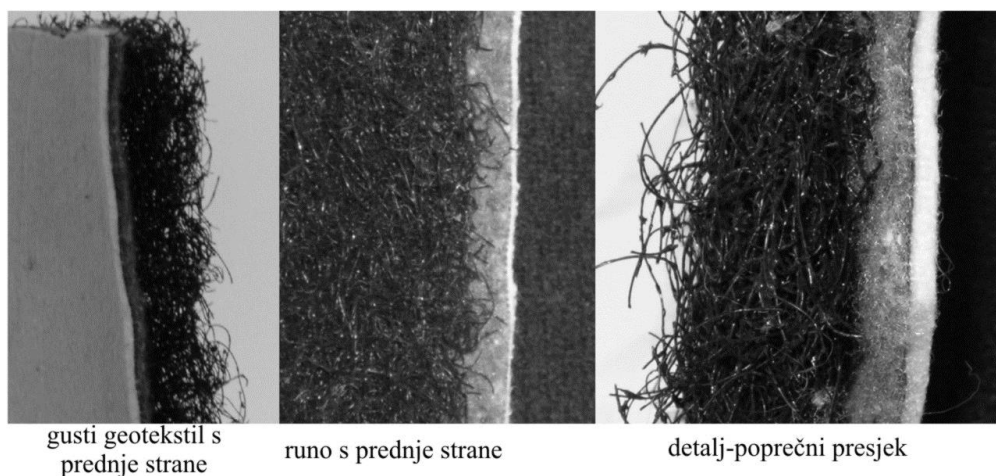


Slika 3.19 Dijagram za određivanje granulometrijskog sastava filtra prema USBR

Tabela 3.3 Kriteriji za određivanje područja kojeg mora zadovoljiti dobro graduirana granulometrijska krivulja drenažnog zasipa prema filtarskom pravilu (Nonveiller, 1983.)

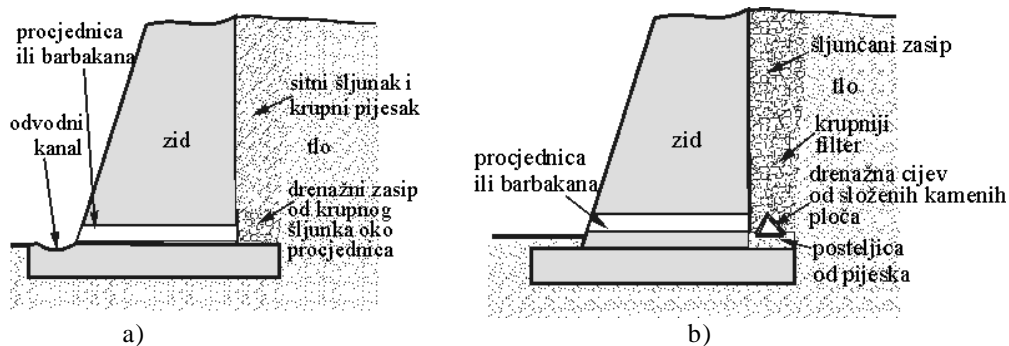
Za promjer zrna $d$ mjerodavnog sloja	Faktor(n) povećanja za promjer zrna filtarskog sloja $D = d \cdot n$			
	USBR	Bertram	USCE	Turnbull
15%	12-40	25	4-20	4
50%	12-52		25	
85%	$D_{15\%} \geq 4d_{50} \geq 5d_{85\%}$			

Geotekstili su dopunili i proširili tehnologiju izrade drenaža. Filtarski se sloj može zamijeniti slojem geotekstila položenim na otvoreni iskop ili kraj nasipa, prije ugradnje drenažnih slojeva. Geotekstil treba odabrati tako, da se tokom trajanja građevine ne začepi sitnim frakcijama materijala iz autohtonog tla ili nasipa. U tom slučaju geotekstil bi izgubio svoju djelotvornost. Polaganjem pravilno odabranog jednostavnog ili složenog sloja geotekstila na osnovno tlo, može se ispuna izvršiti i materijalom s takvom granulometrijskom krivuljom koja odstupa od krivulje dobivene prema filtarskom pravilu. To ubrzava i pojeftinjuje rad jer je moguće raditi s lokalnim materijalima. Na slici 3.20 prikazan je jedan takav složeni geotekstil za drenaže.



Slika 3.20 Složeni geotekstil za drenaže

Drugi dio drenaže ima zadatak brzo odvesti prikupljenu vodu u što bliži recipijent. Na taj način je onemogućeno skupljanje procjedne vode u području iza zida. Ovaj dio odvodnje je vrlo bitan za stabilnost zidova. On se nalazi u dnu drenažnog zasipa, iza zida. Na slici 3.21 prikazani su detalji takvih drenaža (Nonveiller, 1979.).

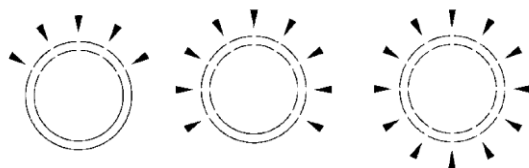


Slika 3.21 Drenaža iza zida: a) bez cijevi; b) cijev od kamenih ploča



Ne mora, ali je bolje da se na dnu nalazi drenažna cijev. Najstariji oblik neke vrste cijevi, tj. neprekinutog puta za vodu u dnu drenaže iza zida izvodio se od ručno slaganih kamenih ploča na način da su one osiguravale slobodan prostor za prolaz vode, koja se iscijedila iz drenažnog sloja. Kasnije su se koristile cijevi od pečene gline, kamenštine i azbest-cementa (Salonit), dužine do 0.5 m, složene na posteljicu od pijeska, jedna do druge, s malim (1-2 cm) međusobnim razmakom. Svaki od ovih sustava zasipa se propusnim, šljunčanim slojem. Pri tom se vodi računa da najsitnija zrna zasipa ne mogu proći između spoja cijevi ili su oni posebno zasuti krupnijim materijalom. Slijedeći korak su bile azbest-cementne cijevi većih dužina (do 2 m) s otvorima koji su se radili ručno na gornjoj polovici cijevi. Postavljale su se jedna do druge bez razmaka. Revoluciju su izazvale plastične mase i njihova primjena u graditeljstvu. Danas se koriste plastične perforirane cijevi, najčešće savitljive, lagane i jednostavne za ugradnju. Na tržištu ih ima mnogo vrsta. Uz cijevi proizvode se i svi potrebni dodaci za nastavljanje, spajanje, kontrolna okna i sl.

Geotekstil je postao dopuna u ponudi cijevi za najrazličitije vrste drenaža, pa tako i ove za ugradnju iza potpornih zidova. Drenažne se cijevi već u tijeku proizvodnje presvlače filtarskim slojem, koji može biti od geotekstila. U novije vrijeme mogu se naći cijevi presvučene filtarskim slojem od kokosovih vlakana. Takav filtarski sloj osigurava cijevi od zamuljenja, a rupice od začepjenja. Na taj način se produžava vijek trajanja cijevi, a zasip također nije vezan na filtarsko pravilo. Na tržištu se mogu naći i sustavi koji se povremeno mogu ispirati, što kod nekih drenaža može biti korisno. Na slici 3.22 prikazan je položaj tvorničke izvedbe otvora na cijevima predviđenim za ugradnju u drenaže.

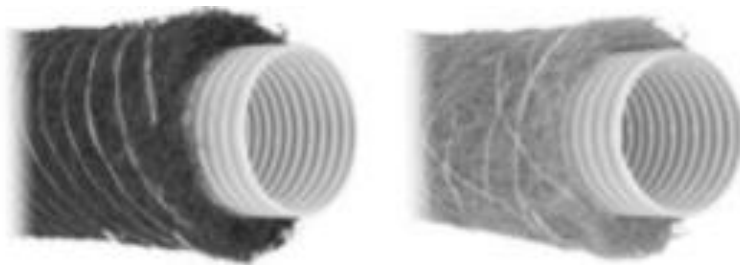


Slika 3.22 Mogući načini postavljanja otvora na drenažnim cijevima

Plastične drenažne cijevi proizvode se iz PVC-a (polivinil klorid) kao i iz PE-HD (polietilen velike gustoće) i PP (polipropilen). Može ih se naći pod različitim nazivima.

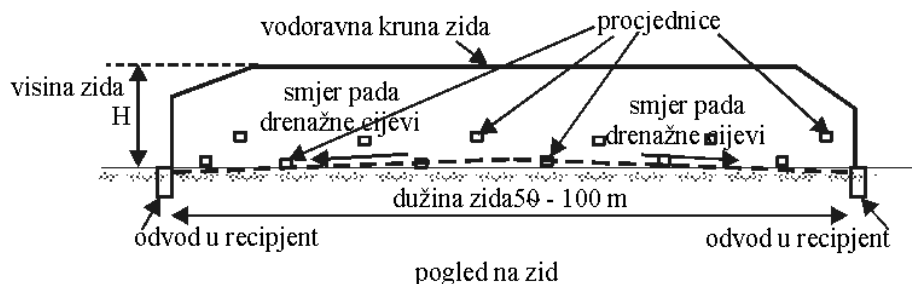


Slika 3.23 Plastične drenažne cijevi različitih poprečnih presjeka



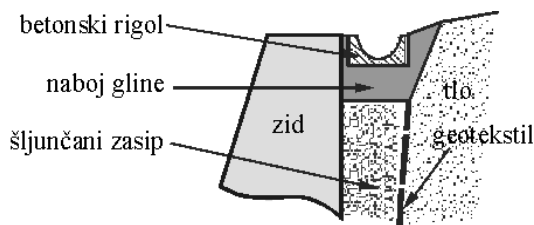
Slika 3.24 Drenažne cijevi s ugrađenim filtarskim slojem, lijevo runo od geotekstila, desno runo od kokosovih vlakana

Odvodni dio drenaže je potrebno izvoditi u minimalnom padu. Ako je teren na kojem se izvodi zid u padu, prati se pad terena. Ako je teren vodoravan može se drenaža izvoditi u padu na jednu ili dvije strane, te zatim odvoditi u neki odvodni sustav. Kod zidova većih dužina može se u padu izvoditi pojedine dionice koje se na pojedinim mjestima izvedu kroz zid u odvod na vanjskom licu zida.



Slika 3.25 Primjer padova drenažnih cijevi i položaja procjednica

U prostoru u koji je ugrađena drenaža, na vrhu zida se ugrađuje brtveni sloj. On ima svrhu spriječiti prodor oborinske vode u prostor iza zida. Potrebno ga je kao u ostalom i drenažu, pažljivo ugraditi u slojevima uz nabijanje. Najčešće se izvodi od srednje do visokoplastične gline. Mora se postići dobar spoj sa zidom ali i s tlom iza zida. Ovaj detalj je vrlo važan za stabilnost zida. Prikazan je na slici 3.26.



Slika 3.26 Položaj brtvenog sloja nad drenažom iza zida

Uz drenažu, u potporne zidove treba ugraditi procjednice ili barbakane. To su otvori u zidu a služe za odvodnju u slučaju pojave visoke razine podzemne i procjedne vode u drenaži. Dodatno štite zid od pojave hidrostatičkog tlaka. **NE MOGU SLUŽITI KAO JEDINA MJERA ZAŠTITE** od hidrostatičkog tlaka. Nužno ih je postaviti što niže, gotovo odmah iznad temelja, a dobro ih je postaviti i u dva reda. Moraju biti promjera minimalno 10 cm. Najjednostavnije je, prilikom izvedbe u beton ugraditi plastičnu cijev zapunjenu papirom, koji se nakon dovršetka zida vadi a ako se i ne izvadi nije vododrživ, te će s vremenom nestati, a neće smetati istjecanju vode. Nažalost, procjednice koje su na dohvat prolaznicima često su zapunjene bocama, limenkama ili sličnim, a što za stabilnost zida može biti vrlo opasno.

Način ugradnje drenaža prikazan je u detaljima izvedbe pojedinih tipova potpornih zidova.

### **3.4.3 Površinska odvodnja**

Iza potpornih zidova nužno je izvršiti dobru površinsku odvodnju šireg prostora. Površinsku vodu na terenu iza zida je potrebno prikupiti i odvesti kontrolirano. Ako se oborinska voda kod intenzivnih pljuskova slijeva iza zida, drenažni ju sustav ne može prihvatiti jer za to nije dimenzioniran. Ako ova voda dospije iza zida ona će uzrokovati pojavu hidrostatičkog tlaka. Valja znati da je za pojavu hidrostatičkog tlaka dovoljan prostor malo širi od onoga u kojem se mogu stvoriti uvjeti za kapilarno dizanje i da, ako se on ispuni vodom, na zid djeluje **HIDROSTATSKI TLAK U PUNOM IZNOSU**. Ovo se često zaboravlja pri projektiranju a naročito pri izvođenju potpornih zidova, te se iza njih ugrađuje do te mjere svašta da se sakriva čak i gradilišni otpad. Nadzor je dužan ovakve pojave uočiti i naložiti da se otklone jer su vrlo opasne glede stabilnosti potpornog zida.

Površinska odvodnja vezana uz sam potporni zid je dobro izvedeni rigol u kruni zida kako je to prikazano na slici 3.26. Ovaj je rigol – kanal potrebno dimenzionirati na **PROJEKTNI PLJUSAK**. Projektni pljusak dobije se obradom podataka o kiši s najbliže ili obližnjih kišomjernih postaja. Kod dimenzioniranja ovog kanala treba uzeti u obzir slivnu površinu koja k njemu gravitira. Iz tih podataka potrebno je odrediti poprečni presjek i pad kanala. Ako rigol nije dobro dimenzioniran dolazi do prelijevanja vode ili iza ili preko zida a što treba izbjeći. Postoje gotovi dijelovi za rigole, koji se mogu umetnuti u prethodno opisani, glineni čep i tako osigurati zaleđe zida od prodiranja vode. Rigol u kruni treba izvesti u padu na jednu stranu, ako je zid u takvom padu ili dvostrano ako je kruna zida vodoravna. Na krajevima vodu iz rigola valja prikladno prihvatiti cijevima ili vodolovnim oknom i dalje odvesti u kanalizaciju ili recipijent.

Površinska odvodnja s površina iza zida treba biti projektirana i izvedena tako da vodu odvede bočno, pored zida u kanalizaciju ili neki drugi recipijent. Zbog imovinsko-pravnih poteškoća ovo nije moguće uvijek osigurati. Prilikom projektiranja odvodnje s ovih prostora nad kojima nije moguće imati izravnog utjecaja, treba pronaći mjesta gdje bi voda mogla doći u dodir s zidom i tu izvršiti njen prihvat i odvođenje izvan područja zida. Ovo je vrlo važan detalj koji, ako

nije dobro izveden može biti koban po stabilnost zida. Projektant je dužan bez obzira ima li ili nema utjecaj na terenu u zaleđu zida, učiniti sve da zidu osigura pravilnu površinsku odvodnju.

Potporni zidovi koji pridržavaju cestovne nasipe podliježu posebnim propisima za izvedbu drenaže i površinske odvodnje u sklopu propisa za građenje gradskih prometnica i cesta. Propisi su sadržani u Općim tehničkim uvjetima za radove na cestama (Grupa autora, 2001.). Ti su uvjeti različiti od gore navedenih te ih se treba pridržavati kod onih potpornih zidova za koje su namijenjeni.

### 3.5 MASIVNI, GRAVITACIJSKI POTPORNİ ZIDOVİ

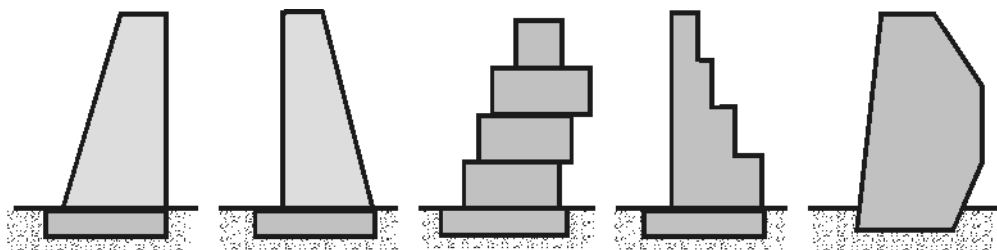
Masivni potporni zidovi vlastitom težinom savladavaju utjecaj bočnih opterećenja. Ima ih mnogo vrsta prema materijalu od kojeg se izvode i prema oblicima. Ovo su najstarije vrste potpornih zidova. Često ih se može naći kao dijelove obrambenih zidova u sredovjekovnim gradovima. Svima je zajednička velika težina, kojom se odupru djelovanju pritiska tla u zaleđu. To naravno zahtijeva i relativno veliku širinu pa zauzimaju mnogo prostora. Iz tih razloga, a razvojem novih tehnologija, naročito armiranog betona, njihovo se značenje nešto smanjuje. Čelik, piloti i slične tehnološke novosti, postepeno zamjenjuju masivne potporne zidove, ali ih nadomještaju i druge tehnologije, kao na pr. zidovi od gabiona, armirano tlo i slično.

Ovi zidovi u zaleđu redovito imaju zasip. Zasip može biti sastavni dio nasipa, kojega zid pridržava ili može imati samo ulogu drenaže i spoja s tlom koje zid pridržava.

#### 3.5.1 Oblikovanje i primjena

Na slici 3.27 prikazano je nekoliko oblika masivnih gravitacijskih potpornih zidova. Oblik im je često prilagođen potrebama građevina uz koje ili za koje se izvode. Osim toga oblik je prilagođen statičkim potrebama, smanjenju veličine zida i smanjenju ukupnog pritiska na zid. Ovakvi se zidovi danas sve manje koriste samostalno za pridržavanje nasipa.

Najčešće su u upotrebi zidovi od gabiona, montažnih elemenata od armiranog betona, metala i drveta, a za očekivati je da će sve veću ulogu početi igrati razne geomreže od kojih se već danas izrađuju košare za gabione i slični sintetički materijali.

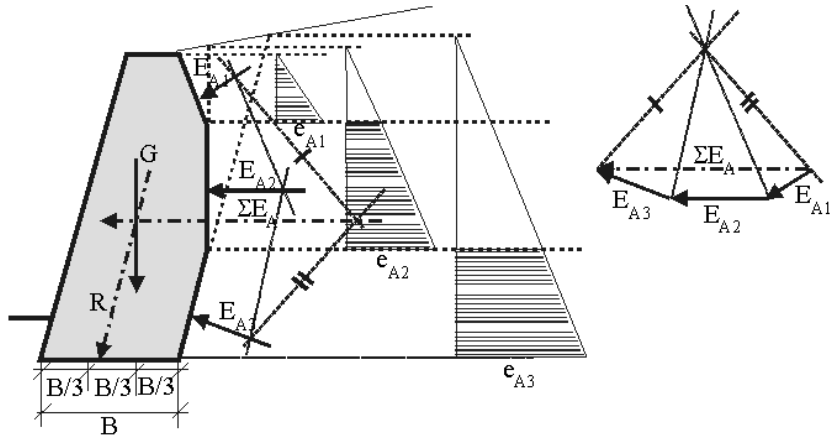


Slika 3.27 Nekoliko oblika masivnih gravitacijskih potpornih zidova

Različiti oblici stražnjeg lica zidova često su u funkciji statike. Kako je aktivni pritisak između ostalog funkcija nagiba stražnjeg lica zida, to se pravilnim odabirom ovog nagiba može smanjiti ukupni pritisak na zid. Smanjenjem ukupne sile smanjuje se i moment sustava na prevrtanje. Kako sustav djeluje tako, da težina zida ne dozvoljava prevrtanje uslijed djelovanja bočnog opterećenja, to zidovi koji su nagnuti prema nazad imaju težište nešto dalje od točke prevrtanja nego uspravni zidovi istih dimenzija. Time se postiže veća sigurnost na prevrtanje.

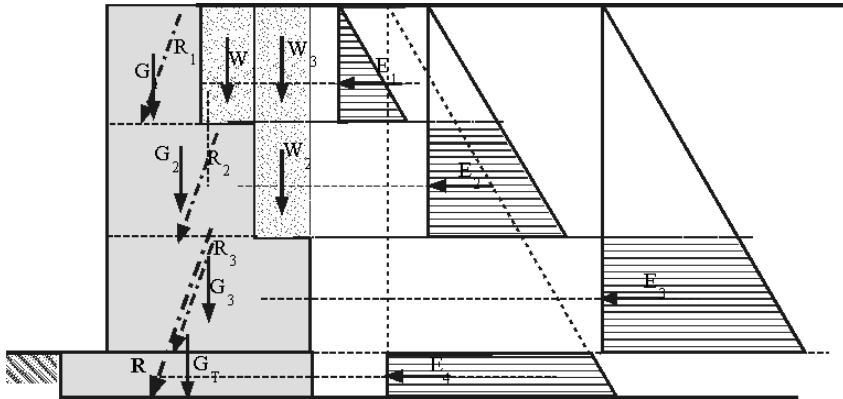
### 3.5.2 Dimenzioniranje

Na slici 3.28 prikazan je zid s lomljenim stražnjim licem, koje uvjetuje pomak težišta zida prema zaleđu i nešto smanjenu ukupnu silu aktivnog pritiska.



Slika 3.28 Dijagram aktivnog pritiska iza zida s lomljenim stražnjim licem

Stepenasto zadnje lice, prilagođeno je statičkim potrebama gravitacijskog zida. Kako ovi zidovi nisu armirani, a slično vrijedi i za zidove od gabiona i od montažnih elemenata, to tlačna linija u svakom presjeku ne smije izaći iz jezgre presjeka. Stepenasto stražnje lice prikazano je na slici 3.29.



Slika 3.29 Utjecaj nasipa na dodatno opterećenje zida sa stepenastim stražnjim licem

Tlo koje leži na pojedinoj stepenici djeluje kao dodatni teret što smanjuje potrebnu količinu građiva. Pri tom treba provjeriti svaki kritični presjek zida na kojem se može pojaviti samo vlačno naprezanje, dozvoljeno za nearmirani beton, ako se radi o betonskim zidovima ili nultu rubno naprezanje ako se radi o slaganim blokovima ili zidovima od gabiona.

Sličan učinak ima nasip koji leži na stražnjem, skošenom licu zida. I on učestvuje u uravnoteženju zida svojom težinom.

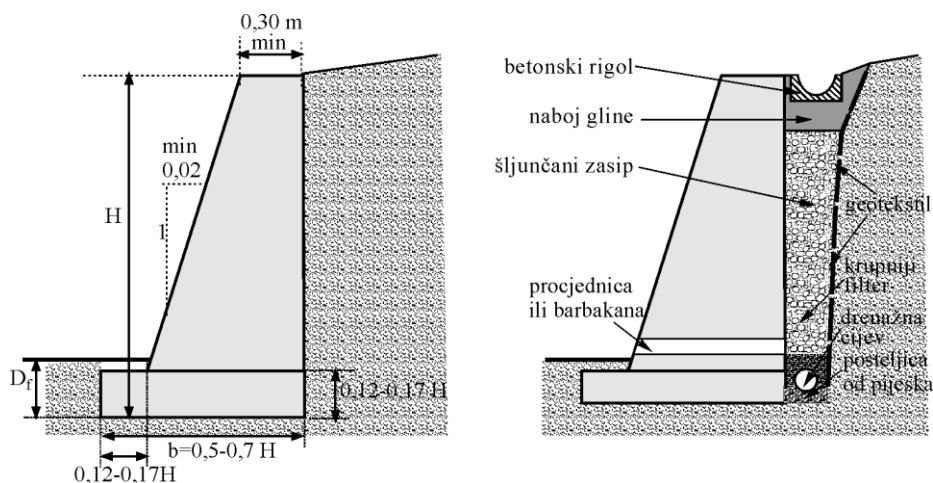
### 3.5.3 Izvedba

Masivne, gravitacijske potporne zidove se najčešće izvodi od masivnog betona, kamenih blokova (danas rijetko), prefabriciranih betonskih blokova, raznih prefabriciranih betonskih elemenata, gabiona i raznih montažnih elemenata koji se pune kamenom, šljunkom, drobinom i slično.

BETONSKIM se zidovima prvo izvodi temelj. Moguće je izvesti istak na stražnjem dijelu temelja, širi od samog zida i na njega postaviti drenažu. Ovo se radi onda, kada se temelj ne betonira u oplati, već izravno u pravilno izvedenom iskopu. Glede stabilnosti zida ovo je povoljniji način izvedbe temelja jer on tada ima dobru vezu s okolnim tlom.

Na istaku temelja se može oblikovati žljeb za polaganje drenažne cijevi. Treba voditi računa da žljeb ima pad dovoljnog nagiba da voda kroz drenažne cijevi teče prema odvodu, a ne da stoji u cijevima. Isto treba učiniti i kada se drenažna cijev polaže na posteljicu od pijeska izravno na tlo. Nagibe treba postići i uzduž rigola za površinsku odvodnju iza krune zida.

Na slici 3.30 prikazan je poprečni presjek jednog dobro projektiranog potpornog zida sa svim detaljima.



Slika 3.30 Poprečni presjek masivnog potpornog zida s približnim odnosima dimenzija i detaljima drenaže i odvodnje

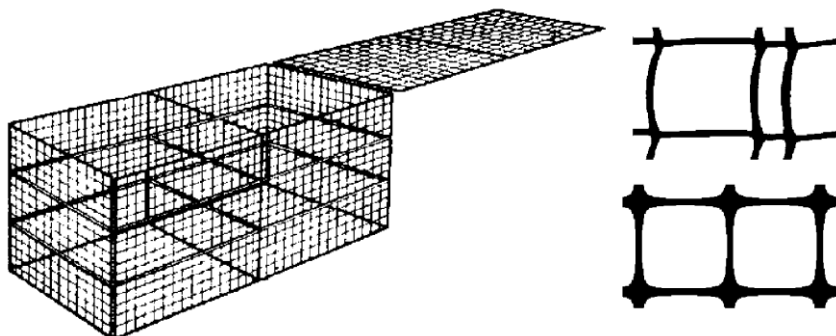
Kod ovih zidova je moguće, ako je potrebno, izvršiti poboljšane podtemeljnog tla. Kada nosivost autohtonog tla ne zadovoljava, može se izvršiti zamjena materijala do odabrane dubine ili se, ovisno o stanju na lokaciji može izvesti nešto dublji iskop i dio tla zamijeniti mršavim betonom s dodatkom određene količine lomljenog kamena. Ako se vrši zamjena materijala, treba poštivati pravila o takvim zahvatima.

Podrazumijeva se potrebno proširenje s obje strane temelja, da bi se dodatna naprezanja pravilno raspodijelila kroz zamijenjeni materijal do temeljnog tla.

MONTAŽNI ZIDOVI i ZIDOVI OD GABIONA spadaju u gravitacijske potporne zidova ali imaju određene posebnosti. Mogu imati temelj, ali mogu ležati i izravno na uređenoj podlozi na tlu. Pod uređenom podlogom smatra se poravnato i lagano zbijeno tlo na koje će se zid polagati. Moguće ga je izravnati slojem uvaljane drobine ili šljunka. Zidove od montažnih elemenata moguće je postaviti na betonski temelj. Za zidove od gabiona temelji se također izvode od za to posebno izrađenih gabiona manje visine (0,3 do 0,5 m). Ako imaju temelje, dobro je da oni budu nešto širi od samog zida.

Montažni zidovi i zidovi od gabiona su propusni za vodu. Punjeni su raznim punilima, od lomljenog kamena do šljunka i drobine različite krupnoće. To međutim ne znači da i kod njihovog projektiranja ne treba posvetiti dužnu pažnju odvodnji. I iza ovih zidova potrebno je izvesti površinsku odvodnju i oborinsku vodu, ako je moguće odvesti izvan područja zida. Između ovih zidova i nasipa ili autohtonog tla, ovisno o tome što je u zaleđu, treba izvršiti spoj nasipom ili zasipom ugrađenim kontrolirano, zbijanjem u slojevima. Za zasip treba izabrati nekoherentan materijal široke granulometrijske krivulje također po filtarskom pravilu, da ga voda ne bi odnosila u zasip montažnog zida. Zasip u gabionima, a i u zidovima od montažnih elemenata može se štititi od kolmacije sitnijim česticama koje donosi voda, ugradnjom geotekstila na strani prema tlu bilo na zidu bilo na tlu. Ovo nešto poskupljuje gradnju ali osigurava trajnost zidovima.

Gabioni su košare pravilnog oblika, najčešće dimenzija 1x1x2 m za zidanje zida odnosno 1x2x0,3 m za temeljne dijelove. Na slici 3.31 prikazana je košara za zid od gabiona i vrste plastičnih mreža od kojih se izrađuju košare za gabione.



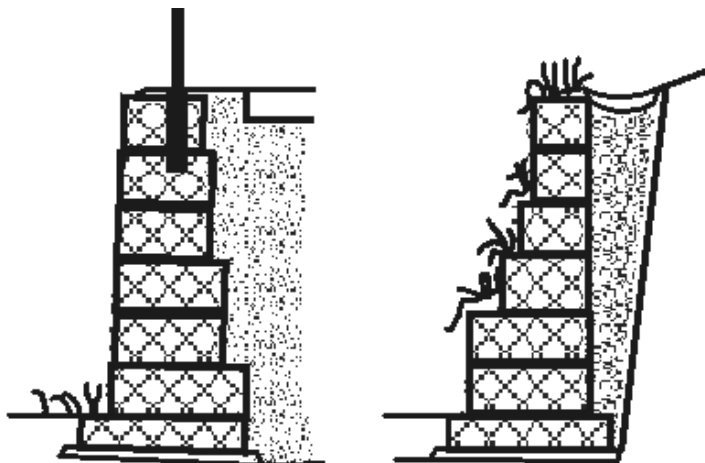
Slika 3.31 Košare za gabione (lijevo) i vrste plastičnih mreža za njihovo izvođenje (desno), Netlon, gore: Tensor, dolje (Werkos, 2002.)

Prvotno su se izrađivali od pocinčanog žičanog pletiva, raznih veličina okana. Sve više žicu zamjenjuju umjetni materijali (plastične mase, PE-HD) koji su se na tržištu pojavili već početkom 70-tih godina prošlog stoljeća. Danas se nude i košare od armaturnih mreža. Nešto su kruće, ali se mogu puniti krupnijim kamenom i ručnim slaganjem oblikovati lice. Bez obzira na materijal od kojeg je izrađena



košara, princip izrade zida je isti. Stjenke košare se usprave i vežu žicom po bridovima. Bridovi su ojačani kod žičanih gabiona, manjim profilom betonskog željeza. Prazne košare postavljaju se na projektirano mjesto i tamo pune kamenom ili šljunkom. Kada su napunjene, prekrivaju se poklopcima koji se šiju po obodu košare. Na jedan se red po istom principu slaže drugi.

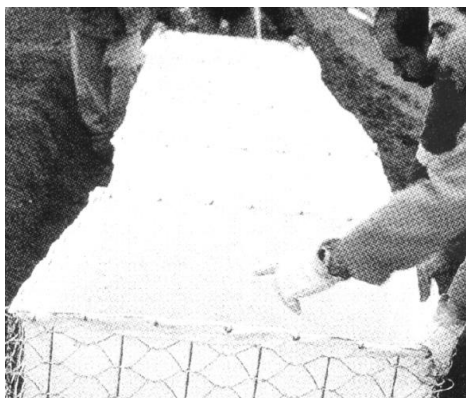
Na slici 3.32 prikazan je mogući načini slaganja gabiona s obzirom na izgled lica zida. Naravno da osim ovakvog slaganja postoje i druge mogućnosti, koje će zadovoljiti naprijed spomenute statičke uvjete zida općenito.



Slika 3.32 Moguće oblikovanje lica zida od gabiona

Usporedo s punjenjem gabiona, zasipava se i zbija materijal u prostoru između zaleđa i zida pa je zid gotov, spreman za preuzimanje opterećenja, onog trenutka kada je dosegao projektiranu visinu.

Široki raspon primjene gabiona proširen je dodatkom geotekstila s unutarnje strane košara (slika 3.33).



Slika 3.33 Detalj složenih košara obloženih geotekstilom

Oblaganje geotekstilom omogućilo je punjenje košara i sa materijalom koji je sitniji od otvora mreža gabiona. Geotekstil, osim što sprječava iznošenje materijala ispunje iz gabiona, sprječava i začepljenje gabiona sitnim česticama iz tla i tako osigurava njegovu trajnu, visoku vodopropusnost.

Na slici 3.34 vidljivo je da se od gabiona mogu izgraditi i vrlo visoki potporni zidovi. Zid na slici visok je više od 8,0 m.



Slika 3.34 Složeni zid od gabiona (Maccaferri, 1997.)

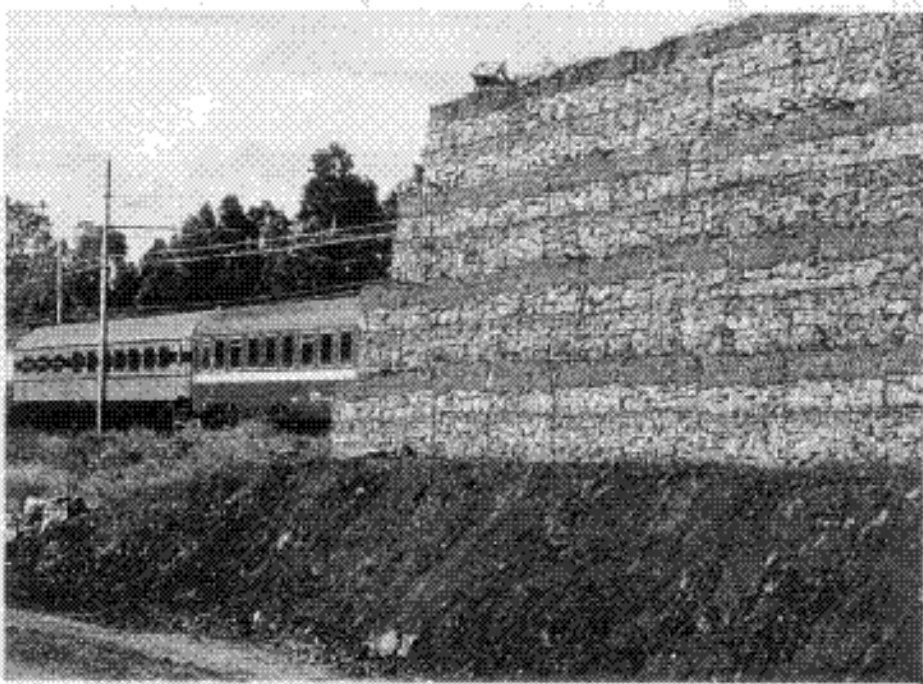
Prvi poznati veći građevinski zahvat od gabiona izveden je 1894. godine u Italiji (Maccaferri, 1997.). U početku su se koristili uglavnom za razne hidrotehničke građevine, osiguranje obala i slično. U tu se svrhu koriste i danas. Krupnoća okana na mreži uvjetovala je veličinu kamena kojim se gabion punio. Nije bilo geotekstila te se moralo voditi računa da se odabire odgovarajuća veličina kamena. Tamo gdje su zidovi bili vidljivi, vanjsko se lice slagalo ručno da bi se postigao što bolji estetski učinak. Naročito su bili popularni za izvedbu bujičnih pregrada, koje su u početku brane, ali se prostor iza njih postepeno puni bujičnim nanosom pa na kraju postaju potporni zidovi. Ovi su zidovi vrlo fleksibilni i prilagodljivi te ih je preporučljivo koristiti tamo gdje bi krute građevine mogle doživjeti teška oštećenja.

Odlično im je svojstvo što se nakon nekog vremena takve građevine zazeleni i gotovo stope s prirodom a u krškom krajoliku djeluju prirodno kao suhozid. Ovo ih svrstava u ekološki vrlo prihvatljive građevine.

Na slici 3.35 prikazan je gabionski zid prekriven zelenilom a na slici 3.36 gabionski zid kao zvučna prepreka uz prugu brze željeznice. Očito je da se gabioni osim za izvedbu potpornih zidova mogu upotrijebiti i za niz drugih građevina najrazličitije namjene.



Slika 3.35 Ozelenjeni zid od gabiona (Maccaferri, 1997.)



Slika 3.36 Gabionski zid za zaštitu od buke (Maccaferri, 1997.)

Zidovi od montažnih elemenata (prečki), imaju slična svojstva kao i zidovi od gabiona. Opterećenja prihvaćaju odmah po završetku gradnje i povezivanja zbijenim nasipom ili zasipom sa zaleđem.

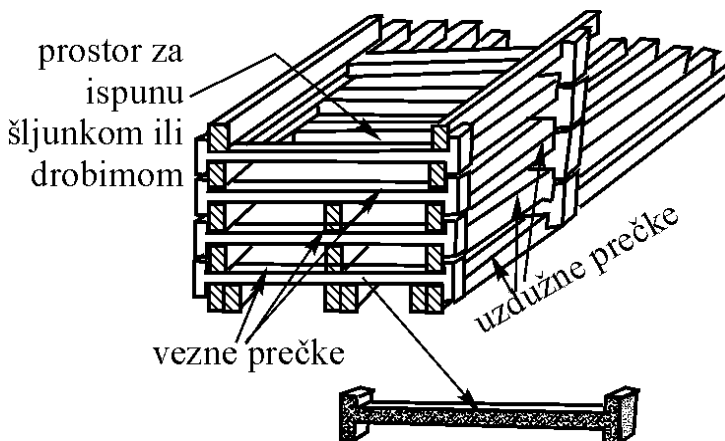
Elementi (prečke) se mogu naručiti po projektiranim veličinama jer se gotovo redovito rade namjenski za pojedini potporni zid. Ne proizvode se serijski. Ovo vrijedi za bilo koji materijal od kojeg se izrađuju krletke za ove zidove. Nije dobro da su elementi predugi. Preporučljivo je do 1,5 m, inače ih treba jače armirati na savijanje ili povećati debljinu ako se izvode od drveta ili metala. Mogu se u poprečnom presjeku spajati dvije dužine te postići širinu zida i do 3,0 m. Visina zidova od montažnih elemenata preporučljiva je do 4,5 metra, ali mogu biti i viši. Poprečni presjek im se može stepenasto mijenjati kao kod zidova od gabiona.

Tijekom izvedbe su zidovi od armiranih elemenata nešto osjetljiviji na način punjenja nego zidovi od gabiona. Pažnju treba posvetiti tome da se elementi ne oštete prilikom ubacivanja kamena u krletke. Dobro je ručno složiti dio kamena uz stjenke, a zatim puniti sredinu.

Ovi su zidovi vodopropusni i imaju zahtjeve glede odvodnje isto kao i zidovi od gabiona. Nužno je urediti odvodnju površine iza zida ako je u padu i ako s nje može doći veća količina vode. Ovo je više estetsko nego statičko pitanje, a ovisi o smještaju zida ovisno na okoliš.

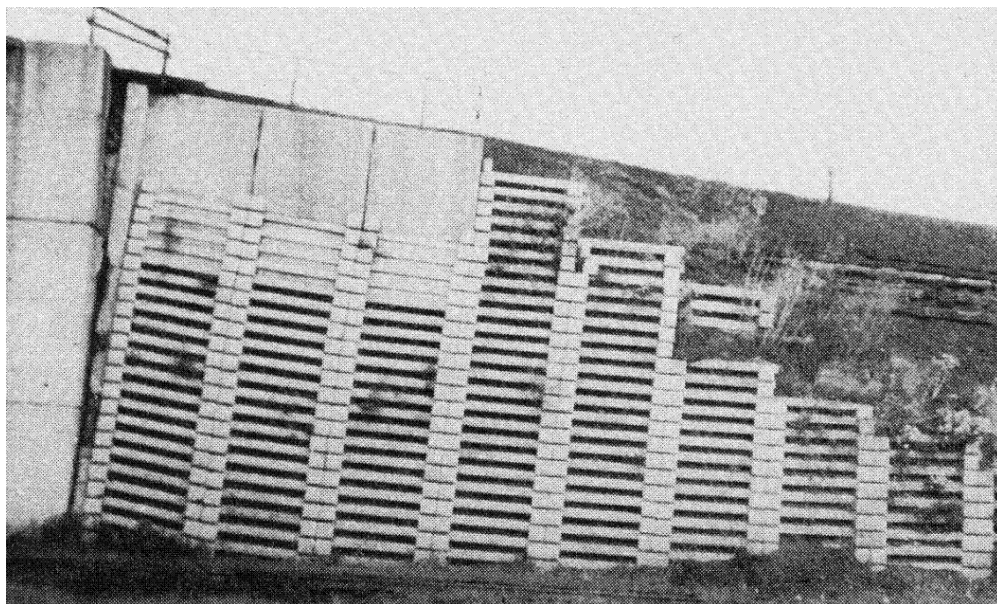
Nastoji im se estetski oblikovati lice i po mogućnosti izvršiti ozeljenjavanje. Ovo je naročito važno tamo gdje oni imaju velike duljine i izrazito su uočljivi u krajoliku. Bočno teže zazelene nego zidovi od gabiona. Ozelenjavanje može biti vrlo važno, ako se zid nalazi na vidljivom mjestu. Gornju površinu lako je zazeleniti ugradnjom sloja humusa na vrh zida.

Na slici 3.37 prikazan je način slaganja betonskih montažnih elemenata za montažni potporni zid. Nakon doseganja visine oko 1 m pristupa se punjenju krletke i zasipanju zaleđa zida. Postupak se ponavlja do potrebne visine.



Slika 3.37 Način slaganja betonskih montažnih elemenata (prečki) za montažni potporni zid

Postoji mogućnost slaganja veznih prečki u dva reda. Na taj se način može dobiti zid koji je u donjem dijelu veće širine.



Slika 3.38 Gotovi montažni zid (Tschebotarioff, 1973.)

Za kretke ovih zidova mogu se koristiti drveni pritesani trupci, metalne šipke i slični materijali. Montažni potporni zidovi danas se rade od najrazličitijih gotovih elemenata.

Masivni gravitacijski potporni zidovi koriste se za visine do  $H=6$  m. Preko te visine postaju preglomazni pa se mora pribjeći izvjesnim prilagodbama. Tako nastaju gravitacijski olakšani potporni zidovi prikladni za veće visine.

### 3.6 OLAKŠANI POTPORNİ ZIDOVI

Kada masivni potporni zidovi prijeđu određenu visinu postaju preglomazni. Zbog velike težine dolazi do prekoračenja nosivosti ili velikog slijeganja temelja na vanjskoj strani zida, a što mijenja geometriju i može dovesti do prevrtanja zida. Tada se moraju primijeniti određeni konstruktivni zahvati kako bi se zidovi olakšali, a mogli primiti potrebna vodoravna opterećenja. Na taj način nastaju olakšani potporni zidovi. Kako je uglavnom teže zadovoljiti klizanje zida nego prevrtanje, to je ideja olakšanja zida išla u tom smjeru. Zid s konzolom prikladnim oblikovanjem smanjuje ukupni vodoravni pritisak i nešto povećava ukupnu težinu, ali s pravilnijom raspodjelom dodirnih pritisaka na plohi temelj–tlo. Zid sa zategom, putem vlačnog naprezanja u zatezi uvlači u građevinu dodatno vodoravno naprezanje smjera obrnutog od pritiska tla i time uravnotežuje sustav u vodoravnom smjeru, tj. na klizanje.

#### 3.6.1 Oblikovanje i primjena

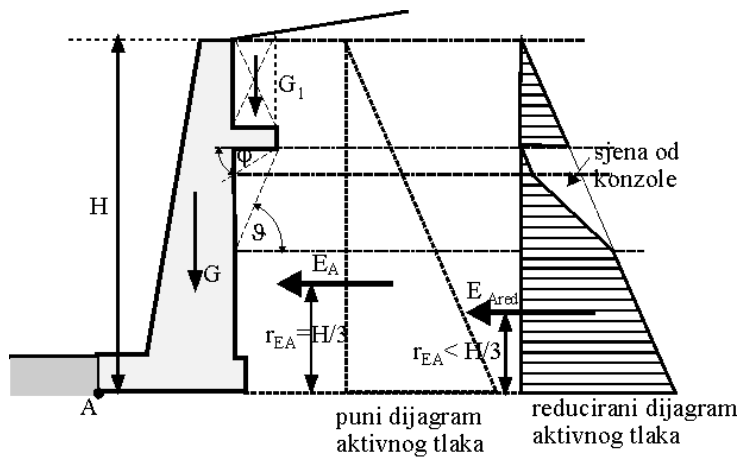
Ovi potporni zidovi su u stvari masivni gravitacijski potporni zidovi s nekim dodacima. Povećanje sigurnosti na prevrtanje, bez povećanja ukupne težine rješava se dodavanjem zatege i/ili geotehnička sidra. Osim vodoravnih sila pritiska tla na zidove, pojavljuju se i vanjske sile, na primjer od priveza broda. Zatege i sidra se koriste i za prihvat ovih vodoravnih vanjskih sila koje djeluju na zidove, a koje je teško preuzeti vlastitom težinom zida.

Olakšanih potpornih zidova ima mnogo vrsta i oblika. Zidovi sa slike 3.2 mogli bi se također svrstati u olakšane potporne zidove. Ovdje će biti prikazane dva često korištena oblika. To su zid s konzolom i zid sa zategom ili sidrom. Ovi zidovi imaju armaturu, ali su još uvijek dovoljno masivni da ih se ne može smatrati savitljivim do mjere da spadaju u tankostijene, armiranobetonske građevine.

#### 3.6.2 Zid s konzolom

Zid s konzolom može se primijeniti i do visina od 10 metara. Poprečni presjek prikazan je na slici 3.39 zajedno s dijagramom aktivnih tlakova. Konzola se izvodi na 2 do 3 metra ispod krune zida. Dužina joj ne bi trebala biti veća od 2,0 metra, što vrijedi inače za takve konzole. Nakon izvedbe betonskog tijela zida, na konzolu se ugradi tlo koje djeluje kao dodatni teret (G1), koji sustavu daje pozitivan moment i time dodatno stabilizira zid.

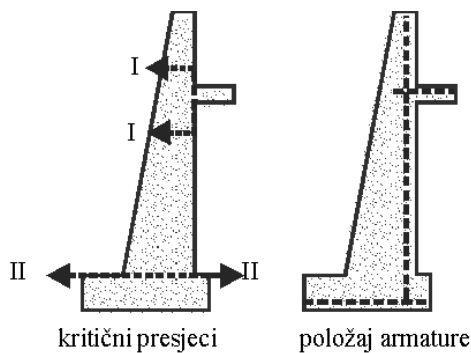
Neposredno ispod konzole, uz sam zid nema geostatičkog naprezanja pa nema ni bočnih pritisaka. Konzola pravi “sjenu” na bočna naprezanja i time smanjuje ukupni aktivni tlak i sve ostale statičke veličine vezane s njim. Puni pritisak ponovo se javlja na dubini gdje pravac pod kutom kritične klizne plohe,  $\vartheta$ , povučen iz vrha konzole, presijeca potporni zid. Od donjeg lica konzole do prve točke smanjenja, bočni tlak se ponaša kao da je površina terena neposredno ispod konzole. Ovo naprezanje seže do točke gdje pravac pod kutom unutrašnjeg trenja,  $\varphi$ , povučen iz vrha konzole, siječe stražnje lice zida. Dio dijagrama između ove dvije točke nastaje tako da se te dvije točke spoje pravcem. Konstrukcija sjene prikazana je na slici 3.39.



Slika 3.39 Zid s konzolom i pripadni dijagrami aktivnih tlakova

### 3.6.2.1 Dimenzioniranje

Potporni zid s konzolom potrebno je provjeriti na prevrtanje, klizanje, nosivost i slijeganje tla te opću stabilnost. Osim toga nužno je dimenzionirati dva kritična presjeka skicirana na slici 3.40. Ova dva presjeka dimenzioniraju se kao armiranobetonski presjeci, jer će se u njima sigurno javiti vlačna naprezanja, koja su veća od dozvoljenih vlačnih naprezanja za nearmirani beton. Dio zida iznad konzole dimenzionira se na pripadne vodoravne pritiske. Bez obzira da li se na presjeku iznad konzole javlja potreba za armiranjem ili ne, ovaj se dio zida armira ili konstruktivnom ili potrebnom armaturom.



Slika 3.40 Presjeci zida s konzolom koji se dimenzioniraju po pravilima armiranog betona i skica položaja armature u zidu

### **3.6.2.2 Izvedba**

Potporni zidovi s konzolom podliježu svim pravilima, propisima i normama koje se primjenjuju kod armiranobetonskih građevina. Izvode se u dvostranoj oplati. Zbog velike visine nije moguće zid betonirati u komadu, već se izvodi po visini u nekoliko dijelova. Najčešće je to prvo temelj, zatim prva polovica visine, zatim visina do konzole, a na kraju konzola i vrh zida. Bitno je pri izvođenju uskladiti betoniranje zida i izvođenje zasipa iza njega. Ako je moguće potrebno je dobro zasuti i zbiti zasip do razine ispod konzole i tek onda nastaviti s izvedbom. Poteškoća je u tome što beton treba izvjesno vrijeme da očvrstne do razine kada može preuzeti opterećenje. Sve ove detalje treba uzeti u obzir kada se odabire zid s konzolom.

Sve što je rečeno za drenažu masivnog zida vrijedi i za zid s konzolom. Potrebno mu je osigurati dobru drenažu, procjednice i površinsku odvodnju u zaleđu. Drenažu je potrebno postaviti i iza konzole, jer se ni ona ne dimenzionira na hidrostatički pritisak.

### **3.6.3 Zid sa zategom**

Zid sa zategom je armirani potporni zid za savladavanje većih visina. Kako ne može samo svojom težinom uravnotežiti sustav sila koje na njega djeluju, to mu se dodaje zatega ili sidro. Time se u sustav dodaje element koji može preuzeti dio vodoravnih opterećenja i prenijeti ih u zaleđe zida. Kod zidova koji pridržavaju nasipe ili zidova koji iza sebe imaju vodoravne površine, ugrađuju se zatege. One mogu biti čelične šipke, čelična užad, armiranobetonske grede, a danas se javljaju i novi materijali kao što su karbonska vlakna. Zatege su usidrene u zaleđu zida u sidrene blokove ili sidrene zidove. Ovi se dijelovi građevine posebno dimenzioniraju.

Kada je iza zida autohtono tlo nagnute površine, umjesto zatega ugrađuju se geotehnička sidra. Ona imaju istu ulogu kao i zatege, ali se sidre u sidreni, injektirani dio, duboko u tlo.

Za oba sidrišna tijela vrijedi da se moraju nalaziti izvan aktivnog kliznog klina i da na njega ne smiju vršiti nikakav utjecaj. U protivnom bi to vršilo dodatno opterećenje na zid i umanjilo djelovanje zatega.

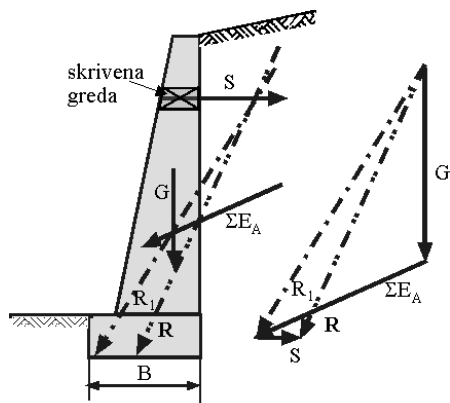
#### **3.6.3.1 Dimenzioniranje**

Zid sa zategom ili sidrom je armiranobetonska građevina, točkasto oslonjena na pojedinim mjestima. Ovaj dodatak pretvara ovakav potporni zid u statički neodređeni sustav. Da bi ispravno bio dimenzioniran potrebno je unijeti neke pretpostavke. Najčešće je to pretpostavka o veličini sile koju će preuzeti zatega ili sidro. Njena se veličina bira prema potrebi veličine sile za stabilizaciju zida kako na klizanje tako i na prevrtanje. Sidra i zatege (osim onih armiranobetonskih, koje se danas rjeđe izvode) su elastični dijelovi građevine. Oni dozvoljavaju izvjestan pomak zidu, da bi se moglo ostvariti stanje aktivnog pritiska. Ako se pomak želi regulirati može se izvršiti izvjesno prenaprezanje. Na taj se način unaprijed u



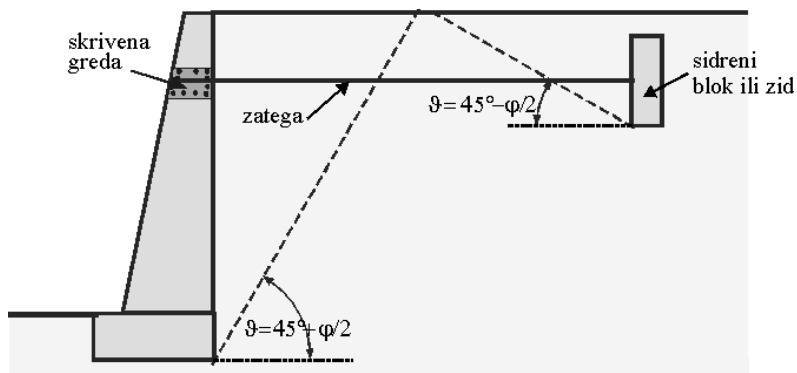
sustav unosi određena sila. Postoje i tehnike samonaprezanja, tj. zatega preuzima opterećene tek kada se ostvari dovoljan pomak zida.

Da bi se učinak zatege mogao ostvariti na cijeloj dužini zida, potrebno je u zid ugraditi ili vanjsku vidljivu uzdužnu gredu ili gredu sakrivenu u debljinu samog zida (slika 3.41). Ova se greda dimenzionira ovisno o broju sidara po dužini. Kako obično ima više od dva sidra ili zatege po dužini, to je uglavnom nosač na više ležajeva, te se kao takav i dimenzionira. Na slici 3.41 prikazan je zid sa zategom i njeno djelovanje na sustav opterećenja zida.



Slika 3.41 Zid sa zategom i pripadajuće sile za proračun

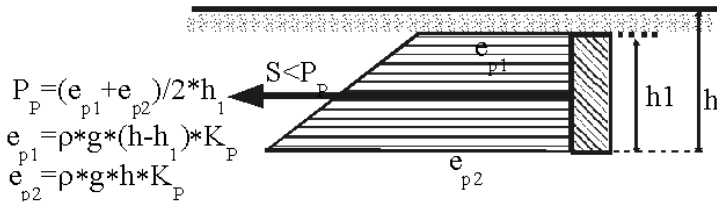
Zatega preuzima silu tako, što je sidrena u sidreni blok ili sidreni zid. Sidreni se zid odupire o tlo aktiviranjem pasivnog otpora. Pritom pasivni klin iza sidrenog bloka ne smije djelovati na aktivni klin iza zida. Položaj sidrenog bloka ili zida koji zadovoljava ovaj uvjet prikazan je na slici 3.42.



Slika 3.42 Položaj sidrenog bloka kod zida sa zategom i skrivena greda

Da bi se pasivni otpor ostvario mora doći do pomaka. Taj se pomak može regulirati prednapinjanjem zatege i aktiviranjem dijela pasivnog otpora prije nego

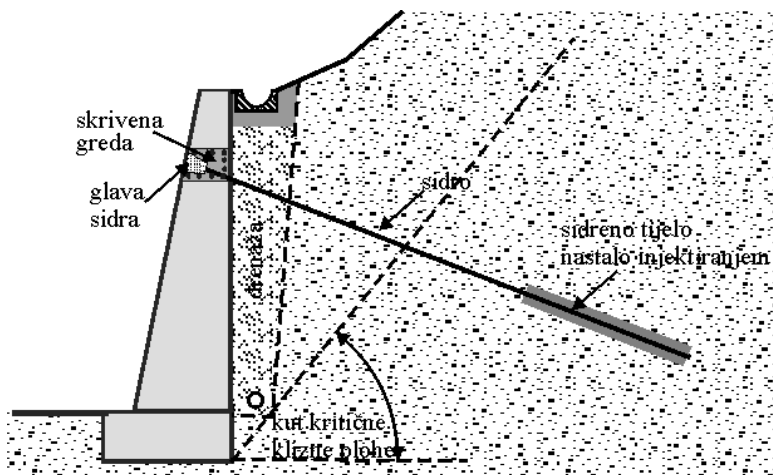
zid preuzme potpuno opterećenje, tako da se nakon ostvarenja pune sile u zatezi ostvari manji dio pomaka koji, zajedno s izduženjem zatege, omogućuje zidu dovoljan pomak da se aktivira minimalni, puni aktivni pritisak.



Slika 3.43 Dijagram pasivnog otpora iza sidrenog zida ili bloka

Sidreni blok mora se dimenzionirati tako da može preuzeti potrebnu vlačnu silu. Poseban detalj treba posvetiti mjestu usidrenja zatege. Ako se radi o sidrenom zidu treba ga dimenzionirati kao nosač kojem su mjesta sidrenja oslonci. U tom slučaju potrebno ga je armirati.

Ako se umjesto zatege treba ugraditi sidro, jer nije moguće izvesti sidrišni blok ili zid, potrebno je na zidu ugraditi ležaj za glavu sidra. Kakav će ležaj biti ovisi o vrsti sidra. Sidrišno tijelo mora se izvesti izvan aktivnog kliznog klina pa je to jedan od čimbenika kojima se određuje duljina sidra. Drugi je čimbenik nosivost samog sidra, koje sidrišnom dionicom prenosi silu u tlo. Sidra se ugrađuju koso pod kutom od 10 do 30 stupnjeva, ovisno o stanju tla u koje se sidri. O dimenzioniranju sidra biti će govora u posebnom poglavlju.



Slika 3.44 Potporni zid usidren geotehničkim sidrom u prostor iza kritične klizne plohe

### 3.6.3.2 Izvedba

Kod oba tipa zida prvo se izvodi temelj. Pošto se radi o lagano armiranim konstrukcijama u temelju se ostavlja armatura za vezu sa zidom. Ova armatura je ili proračunata ili minimalna, prema propisima za armirano betonske konstrukcije. Temelji se često izvode bez oplata izravno u čist i uređeni iskop, što je za prijenos sila povoljno. Često se ostavlja manji istak na temelju sa stražnjeg lica zida, da bi se na njega oslonila oplata. Po montaži armature zida i postavljanja oplata vrši se betoniranje. Često je nemoguće izvesti kampađu zida po cijeloj visini odjednom. Tehnologiju betoniranja treba povjeriti specijaliziranoj osobi ukoliko se radi o iole složenijoj građevini. U armaturni koš se ugrađuje armatura za skrivenu gredu i /ili ojačanja za mjesta ugradnje zatega ili sidara.

Posebnu pažnju treba posvetiti drenaži i odvodnji oborinske vode iza zida. Za ove zidove vrijede iste upute kao za masivne potporne zidove.

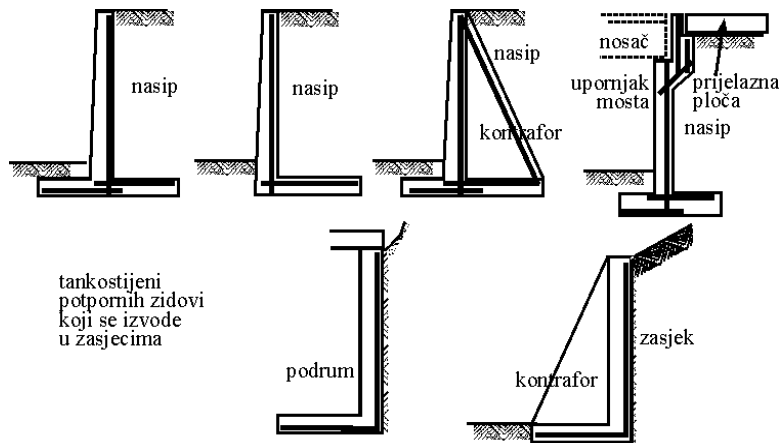
Razlika je u izvedbi između zidova sa sidrom i zidova sa zategama. Zidovi sa zategama izvode se do potrebne visine a istovremeno se ugrađuje nasip ili zasip do visine zatega. U međuvremenu se izvodi sidreni zid ili sidreni blokovi. Kada su zatege položene, završava se zid i nasip. Ako su zatege položene u iskope u autohtonom tlu, te iskope treba pažljivo zatrpiti uz zbijanje.

Zidovi sa sidrima izvode se za pridržanje usjeka. U tom slučaju mogu se izvoditi dijelovi zida usporedno sa spuštanjem iskopa. Mogu se izvoditi u jednostranoj oplati. Pri tom treba naći način da se izvede barem djelomična drenaža iza zida. Svakako treba predvidjeti veći broj procjednica. Sidra se izvode kada se dosegne dubina iskopa na koju se sidra trebaju postaviti. Kada su sidra počela djelovati nastavlja se sa spuštanjem iskopa. Na ovaj se način izbjegava korištenje skela za postavljanje bušilice potrebne za izvedbu sidra. Ako zid ima više redova sidara po visini, postupak se ponavlja. Sidra su gotovo uvijek suviše visoko da bi se mogla izvoditi bez skele s kote dna iskopa za zid. Preporuča se kampađna izvedba kao i kod ostalih potpornih zidova koji pridržavaju usjek.

### 3.7 TANKOSTIJNI, ARMIRANI POTPORNİ ZIDOVI

Ovaj tip potpornih zidova je dugo godina bio u modi usporedno s upotrebom armiranog betona u graditeljstvu. Ovi su zidovi prikladni za izvedbu od predgotovljenih elemenata zida u tvornici betona. U takvom slučaju imaju svojstvo brze ugradnje i preuzimanja opterećenja kao i zidovi od montažnih elemenata ili gabiona. Mogu biti raznih oblika poprečnih presjeka. Mana im je što se prilikom izvođenja najprije izvodi temelj a zatim zid. Na njihovom spoju javlja se radna reška. Ona je bez obzira na pažljivu izvedbu uvijek kritično mjesto za ulaz vode i koroziju armature spoja. Iz tih razloga nije preporučljivo ove zidove raditi velikih visina iako Cernica (1995.) navodi da se koriste i do visine od 8,0 metara.

Ovi se zidovi uglavnom uvijek izvode kao samostalni potporni zidovi, najčešće za pridržavanje nasipa. U iznimnim slučajevima oni nose uspravna opterećenja. To je slučaj kada tankostijeni potporni zidovi služe kao stupovi upornjaka mostova, ili kada su dijelovi podzemnih prostorija zgrada. Uspravna opterećenja doprinose njihovoj stabilnosti, ali ne uvijek i nosivosti. To je naročito izraženo kod upornjaka mostova temeljenih na lošem tlu, u riječnim dolinama. Tada treba primijeniti posebne zahvate u temeljenu ili zidove temeljiti na pilotima. Na slici 3.45 prikazano je nekoliko mogućih presjeka tankostijenih armirano betonskih potpornih zidova.



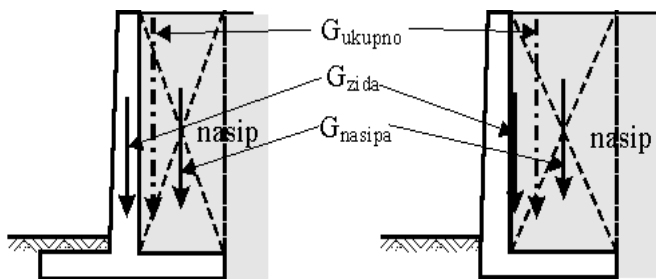
Slika 3.45 Mogući oblici tankostijenih potpornih zidova

#### 3.7.1 Oblikovanje i primjena

Oblik ovih zidova ima izgled obrnutog slova T ili slova L. Kod većih visina dodaju im se rebra ili kontrafori s unutrašnje, a rjeđe s vanjske strane. Rebra mogu biti smještena u sredini dionice koja se izvodi, ako je kraća ili po nekoliko rebara u jednoj dionici ako je ova duža. Rebro u polovici duljine, najčešće se nalazi kod predgotovljenih elemenata. Oni nisu velike dužine radi jednostavnijeg prijevoza na gradilište.

Dio tla koji leži na temeljnoj stopi zida, postaje sastavni dio gravitacijskog potpornog zida. Taj dio tla svojom težinom učestvuje u stabilizaciji zida kao cjeline na prevrtanje i klizanje. Opterećenje nasipom temelj zida prenosi na tlo kao dodirni pritisak.

Na slici 3.46 prikazan je zajednički učinak zida i tla u oblikovanju gravitacijskog potpornog zida.



Slika 3.46 Učinak opterećenja temeljne stope zida nasipom

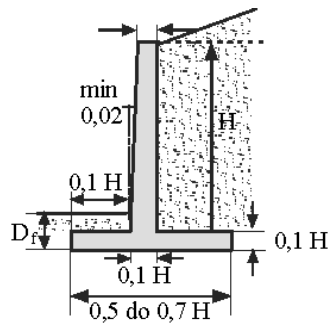
Ovakvi su zidovi vrlo stabilni na prevrtanje i klizanje. Nosivost ovisi o kakvoći podtemeljnog tla. Mana im je mogućnost pojave vlačne pukotine na kritičnom presjeku između zida i temelja.

Za veće visine dodaju se kontrafori. Učinak kontrafora je vrlo značajan. Prostor zida, između dva kontrafora, nije više čista konzola, već postaje križno armirana ploča oslonjena na tri strane. To bitno mijenja veličinu momenta savijanja u kritičnom presjeku, na spoju temelja i zida u pozitivnom smislu. Čak i kada se rade predgotovljeni elementi s rebrom u sredini, krilni dijelovi zida više nisu čiste konzole, što je također povoljnije za kritični presjek. Prethodno spomenuti gotovi dijelovi potpornog zida s rebrom u sredini, često su u upotrebi.

### 3.7.2 Dimenzioniranje

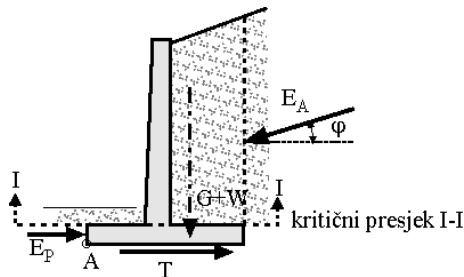
Na slici 3.47 prikazane su približne proporcije veličina tankostijenog, armirano betonskog potpornog zida. Neki autori konzolni potporni zid bez kontrafora, ne preporučuju izvoditi visine veće od 2,0 m. Čini se da ova preporuka ima svoja opravdanja.

Uobičajeno je konzolni zid izvoditi tako da je širina zida,  $B$ , jednaka  $1/10$  visine zida,  $H$ . Ovaj način projektiranja nije preporučljiv. Potrebno je svaki potporni zid dimenzionirati u ovisnosti o bočnom opterećenju, a što ovisi o vrsti tla iza zida, nagibu površne terena iza zida, teretu koji se može pojaviti u zaleđu i svim ostalim opterećenjima koja se mogu pojaviti, a koja su prikazana u poglavlju 2. Uz to je nužno projektirati odvodnju površinske vode i drenažu jer nepravilna odvodnja može uzrokovati rušenje zida.



Slika 3.47 Proporcije tankostijenog armiranog konzolnog potpornog zida

Ove vrste zidova se kao cjelina dimenzioniraju jednako kao gravitacijski potporni zidovi na prevrtanje, klizanje, nosivost, slijeganje i globalnu stabilnost. Na slici 3.48 su prikazane osnovne sile koje ulaze u proračun ovih zidova.



Slika 3.48 Sile koje ulaze u proračun zida

Kritični presjek je na spoju temelja i zida (I-I na slici 3.48). Ako nema rebara, zid je čista konzola i tako se dimenzionira, uvažavajući sve propise za armirani beton. Posebnost ovih zidova je i temelj, koji je također savitljiva armirano betonska konstrukcija, te za njega vrijede sva pravila za takve temelje (Roje-Bonacci, 1997.).

Kod zidova s kontraforima javlja se statički složenija konstrukcija. Ploče zida i temelja, između kontrafora, su križno armirane ploče. Spoj rebra i ploče zida napregnut je na vlak. Ovome treba prilagoditi armaturu spoja ploče rebra, ploče zida i temelja.

Ako su kontrafori smješteni s vanjske strane, na licu zida, tada su oni pritisnuti, dok su ostali dijelovi zida u istim uvjetima kao i kod kontrafora s unutrašnje strane zida.

### 3.7.3 Izvedba

Izvide se kao monolitni za veće visine i montažni predgotovljeni za manje visine. Često su u upotrebi u naseljima kod oblikovanja prostora. Projektanti redovito zaboravljaju na denivelaciju koja nastaje izgradnjom potpornih zidova. Ne predviđaju na njima ograde i slične zapreke, stoga mogu biti opasni.

Kod monolitne izvedbe izvodi se prvo temelj, češće bez oplata, a zatim gornji dio u dvostranoj oplati.

Kod većih visina nisu se pokazali naročito sigurni. Na fotografiji na slici 3.9 vidi se privremena zaštita ovakvog tipa zida u Splitu. Zidovi visine i do 7 metara, projektirani su točno prema preporukama za njihove proporcije ( $B=0,1H$ ). Pokazalo se da armatura u radnoj reški korodira tim brže što je više napregnuta. Kod nekih zidova pokazalo se da je i do 30 % armature (u broju šipaka) potpuno korodiralo tijekom vremena. Nažalost ni danas nema zakonske zabrane projektiranju i izgradnji ovih potpornih zidova.

Posebnu pažnju treba posvetiti drenaži koja se nešto razlikuje od drenaže ostalih potpornih zidova. Preporučljiv način dreniranja ovih zidova prikazan je na slici 3.40.



Slika 3.49 Drenaže konzolnih potpornih zidova

Kada se ovi zidovi izvode uz zgrade, potrebno ih je izolirati od vlage i vode, s vanjske strane. U tom su slučaju u nešto povoljnijim uvjetima s obzirom na koroziju armature u radnoj reški.

## 4 OJAČANO TLO

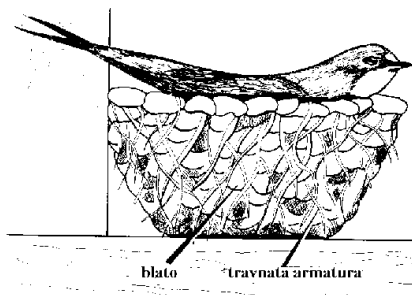
### 4.1 OPĆENITO

Ojačano tlo je složenac u kojem vlačna napreznja preuzimaju dijelovi armature. Armatura je od gradiva koje može preuzeti vlačno napreznje. Ovo svojstvo dodatnog, vlačno napregnutog gradiva u tlu, koristi se od davnina u raznim građevinskim zahvatima.

Koherentno tlo ima određenu vlačnu čvrstoću, koja se, ako je potrebno može povećati ugradnjom armature. Činjenica je poznata još iz Starog Zavjeta gdje u Knjizi Izlaska 5:6-9 stoji da se u starom Egiptu koristila slama za ojačanje opeka. Pri rekonstrukciji poznatog zigurata iz Ur-a pronađena je armatura, isprepletana trska, u blokovima od na suncu sušenog blata (Mitchell i Collin, 1984.). Poznata su ojačanja od trupaca, najranije metoda za svladavanje blatnjavih dionica putova.

Nekoherentno tlo nema nikakvu vlačnu čvrstoću. Mogućnost dodavanja armature u građevine od nekoherentnog tla proširila je područja njegovog korištenja u graditeljstvu. Široka je primjena ojačanog tla pri građenju na lošim tlima. Tu osim osiguranja vlačne čvrstoće, određene vrste dodatnih gradiva imaju filtrirajuću i razdvajajuću ulogu.

Da ojačano tlo nije izum čovjeka, pokazuje slika 4.1. Mnoge slične građevine postoje u prirodi.



Slika 4.1 Ojačano tlo u prirodi (Rankilor, 1981.)

Ojačanje tla raznim vrstama gradiva, koja mogu prenijeti vlačne čvrstoće, kao na pr. trava, slama, granje, trupci i slično, koristi se odavna u graditeljstvu. Sva spomenuta gradiva organskog su porijekla i nisu postojana u vremenu. Prvi ozbiljniji pokušaji učinjeni su pojavom čelika. Tada se međutim javio problem korozije, koji je rješavan u hodu.

Uobičajeni pojam OJAČANO TLO podrazumijeva nekoliko tehnologija kod kojih je, kada je riječ o potpornim građevinama, ovdje svrstano više načina ojačanja. Jedna od tih je ARMIRANO TLO zatim tehnologija UGRADNJA



ZATEGA UČVRŠĆENIH NA OBA KRAJA i IGLANO TLO (ČAVLANO TLO).  
Mlazno injektiranje i mikropiloti proširuju ponudu u tehnologiji ojačanja tla.

U grupu ojačanog tla mogle bi se svrstati i potporne građevine koje se sastoje od lica i naličja povezanog zategama kroz nasip. Radi se o ugradnji zatega u više razina u zaleđe, u tijeku izvođenja nasipa. Vodoravna se naprezanja preko zatega prenose u sidrena tijela, koja se ugrađuju usporedo s podizanjem građevine. Prijenos sila nije na trenje, već kao kod svake druge zatege, s elemenata na licu zida, zategom, u sidrene blokove u zaleđu. Stoga to nije ni stvarno armirano tlo ni stvarno sidreno tlo. Sustav funkcionira slično kao kod potpornih zidova sa zategom samo se umjesto jedne, ugrađuje niz zatega na malim međusobnim razmacima kako u vodoravnom tako i u uspravnom smjeru. Ovakvih građevina ima u vrlo različitim izvedbama. Globalno djeluju kao gravitacijski potporni zidovi.

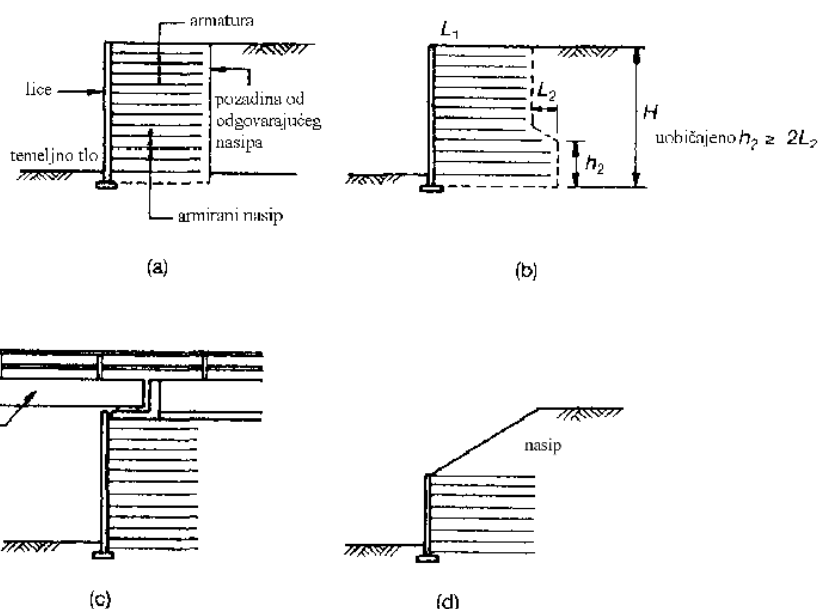
Iglano (čavlano) tlo je tehnologija ojačanog tla koja se primjenjuje uglavnom za ojačanje autohtonog tla. Sastoji se u ugradnji niza štapnih sidara u vrlo gustom rasporedu. Ovakve građevine služe za stabiliziranje kosina usjeka ili zasjeka. Građevina ojačana iglanjem (čavlanjem) može se primijeniti i kod kombinacije zasjeka s manjim dijelom nasipa. Primjenjuje se i za stabilizacije klizišta i odrona.

U ovom radu detaljno će se prikazati samo jedna vrsta ojačanog tla, ARMIRANO TLO.

## 4.2 POTPORNE GRAĐEVINE OD ARMIRANOG TLA

Pod potpornom građevinom od ARMIRANOG TLA podrazumijeva se ona vrsta gradnje koja djeluje tako da armatura, ugrađena u nasip, naprezanja prenosi trenjem po dodirnoj površini između armature i tla u nasipu, bez obzira o kakvoj se vrsti armature radi. Armatura i nasip tvore jedno tijelo koje djeluje kao gravitacijski potporni zid s određenim posebnostima.

U ovom poglavlju prikazat će se tehnologija izrade potpornih građevina, koja se podrazumijeva pod nazivom ARMIRANO TLO. U području potpornih građevina, tehnologijom armiranog tla najčešće se izvode potporni zidovi koji drže nasipe kao i upornjaci mostova. Nekoliko primjera prikazano je na slici 4.2.



Slika 4.2 Mjesta primjene potpornih građevina od armiranog tla

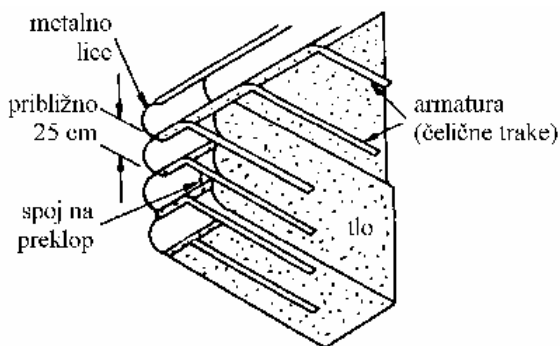
Jones (1996.) navodi primjenu armiranog tla, osim spomenutog, kod izgradnje:

1. završetka nasipa – upornjaka mosta; kada je stup mosta temeljen duboko, neovisno o nasipu od armiranog tla;
2. vijadukta, zamjenu armiranim tlom;
3. nasutih brana; obrambenih nasipa; nasipa za željeznice;
4. naselja na kosini;
5. raznih industrijskih pogona koji tehnološki zahtijevaju denivelaciju tla;
6. vojnih građevina (bunker);
7. sportskih građevina (skijaških skakaonica);

8. zaštitnih nasipa za tankvane;
9. pristana i obala plovnih kanala itd.

Za sanacije klizišta ili pridržanja prirodnog tla potrebno je osigurati iza lica građevine prostor od barem  $0,7 H$ , ako je  $H$  visina buduće građevine, za ugradnju armature, što uvijek nije moguće.

Počeci korištenja armiranog tla za potporne građevine javljaju se negdje 60-tih godina prošlog stoljeća. Francuski arhitekt H. Vidal je prve pokuse izvodio 1963. godine, a svoj izum je patentirao 1966. godine kao Terre Armée. Godine 1969. objavio je rad (Vidal, 1969.) u kojem detaljno opisuje svoj izum. Njegov izum posljedica je potreba za masovnom i jeftinom izgradnjom potpornih građevina pri izgradnji autoputova u Francuskoj. Prve građevine izvedene su na potezu autoceste Nica – talijanska granica. Osnova im je čelična, trakasta armatura pričvršćena za metalnu košuljicu koja se nalazi na licu građevine. Vidalov izvorni presjek prikazan ja na slici 4.3.



Slika 4.3 Vidalov (1969.) patent Terre Armée

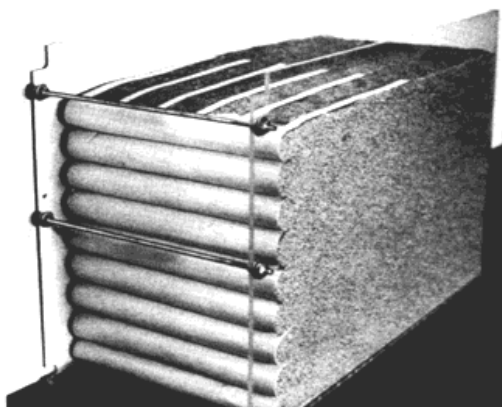
U SAD se ova tehnologija počela primjenjivati 1972. godine na državnom autoputu 39 u Kaliforniji. Nakon prvih početaka bilježi se nagli razvoj armiranog tla kako u primjeni različitih gradiva za armature tako i u primjeni kod različitih građevina. Danas postoji međunarodna korporacija zaštićenog imena "Reinforced Earth" utemeljena u SAD-u.

Vidalova se tehnologija temelji na aktiviranju trenja između metalnih traka i tla u koje su ugrađene. Na tom principu djeluju i druge vrste armatura (geotekstil, geomreže), koje su se razvile tijekom vremena.

Tehnologija armiranog tla ima dobra svojstva u tome što preuzima opterećenja trenutkom završetka izvođenja. Opterećenje podloge je minimalno jer građevina nema poseban temelj, već čitavom širinom leži na podlozi – tlu. To je opterećenje jednako opterećenju nasipom iste visine. Izvodi se od nekoherentnih materijala, da bi se postiglo dobro dreniranje tla, jer se ove građevine ne dimenzioniraju na utjecaj vode niti su za to predviđene. Uz malo truda, vidljivi dijelovi zidova mogu se vrlo lijepo i estetski oblikovati.

Armirano tlo danas ima široku primjenu u mnogim područjima niskogradnje, svugdje gdje tlu treba povećati vlačnu čvrstoću. U ovom poglavlju bit će riječi samo o armiranom tlu za potrebu izgradnje denivelacija u tlu, tj. za oblikovanje potpornih građevina. Korištenje armiranog tla se sve više širi pojavom novih tehnologija. Široka primjena uvjetovana je između ostalog i korištenjem lokalnih materijala za nasipavanje, što pojeftinjuje gradnju. Osim lokalnog tla mogu se koristiti i razne vrste industrijskih ostataka ukoliko zadovoljavaju mehanička svojstva tražena za nasip. Armirano tlo ne zahtijeva posebno tešku mehanizaciju kao ni mnogo ljudskog rada.

Tehnologija izvedbe armiranog tla zahtijeva s jedne strane gradivo kojim se armira, a s druge strane tlo koje se armira. Iz toga proizlazi da su ovakve građevine u osnovi NASUTE GRAĐEVINE, u koje se tijekom nasipavanja i zbijanja UGRAĐUJU VLAČNI ELEMENTI, ARMATURE.



Slika 4.3 a) Model s licem od papira, armiran papirnatim trakama (Mitchell i Collin, 1984.)



Slika 4.3 b) Model s licem od papira, armiran listovima papira (ispitivanja autora, 2005.)

## **4.3 GRADIVA**

Armirano tlo zahtijeva dvije temeljne vrste gradiva, nasip i armaturu. Osim ta dva osnovna gradiva dodaju se elementi lica, najčešće ukrasni, prilagođeni upotrebi i okolini građevine.

### **4.3.1 Armature**

Prve armature bile su izrađene od metala. Kod metala je najveći problem u trajnosti tj. pojavi korozije. Još i danas se koriste metalne armature, ali se izbor armatura bitno povećao masovnom proizvodnjom relativno jeftinih a zadovoljavajuće čvrstih i dokazano vremenski trajnih proizvoda od plastičnih masa. Nedostaci metalnih traka davno su bili uočeni, te su prvi pokusi na potpornoj građevini s armaturama – trakama od nemetala, poliestrom presvučenog fiberglasa, izvedeni 1966. godine. Fiberglas su napale bakterije i zid je uništen nakon 10 mjeseci (Schlosser i Bastick, 1991.)

Kasnije su se pojavili sintetički materijali, najprije geotekstili, a malo zatim i geomreže. Ova dva materijala imaju mnogo širu primjenu u građevinarstvu, ali će ovdje biti opisani kao armature za potporne građevine.

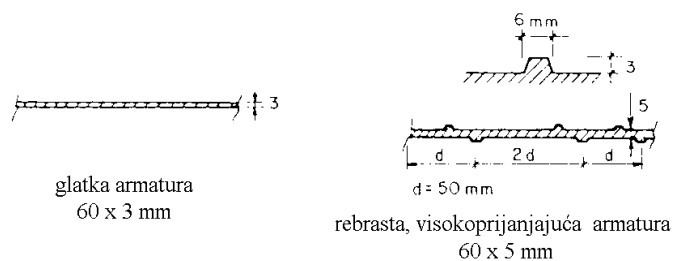
Sagledavajući način prihvaćanja vlačnih naprezanja gore spomenutim armaturama, dade se zaključiti da se generalno koriste dvije vrste armatura, ovisno o načinu preuzimanja vlačnog naprezanja s lica potporne građevine i njegovog prenošenja u unutrašnjost nasipa. Trake prihvaćaju točkasto naprezanje na licu i linijski ga trenjem prenose u dubinu nasipa. Mreže, geotekstili i geomreže, naprezanje prihvaćaju linijski, a prenose ga plošno (površinski), trenjem, u dublje slojeve tla. U samom proračunu nema razlike, ali je ima u detaljima izvedbe.

U dimenzioniranju armiranog tla veliku ulogu igra krutost armature.

#### **4.3.1.1 Metalna armatura**

Metalna je armature bila prva s kojom je Vidal patentirao svoju “Terre Armee”. On je koristio glatke, plosnate metalne trake koje je povezivao s metalnim, fleksibilnim licem. Mnogo je pokusa izvedeno s raznim metalnim trakama. Da bi se spriječila korozija izvršen je niz pokusa s nehrđajućim čelikom, kovanim željezom i aluminijem. Postoje mnogi rezultati tih ispitivanja u literaturi (Schlosser i Bastick, 1991.). Najbolja svojstva pokazao je galvanizirani čelik. To je čelik presvučen tankim slojem cinka. Ova se armatura koristi i danas jer se pokazala kao najpovoljnija u uvjetima kada je ukopana u tlo.

Slijedeći korak u primjeni metalnih traka je patent multinacionalne kompanije Reinforced Earth. Umjesto glatkih traka namjenski su proizvedene rebraste trake. Ovakve trake imaju mnogo veći prividni (efektivni) koeficijent trenja od običnih glatkih traka, što bitno poboljšava svojstva armirane građevine. Teoretsko objašnjenje može se naći u radu Schlosser i Bastick (1991.). Na slici 4.4 prikazane su metalne trake za armaturu tla.



Slika 4.4 Metalne trake za armiranje tla (Schlosser i Bastick, 1991.)

Osim traka koriste se kao armatura i metalne mreže. Danas ih sve više zamjenjuju razne vrste sintetičkih materijala.

#### 4.3.1.2 Armature od plastičnih masa

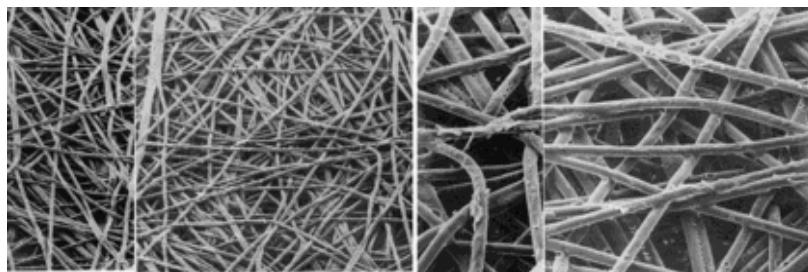
Postoje dvije vrste armatura od plastičnih masa.

Jedno su GEOTEKSTILI, koji mogu biti netkani, tkani, pleteni i sl. Pojavili su se ranije u upotrebi. Ima ih raznih vrsta i kakvoće. Primjenjuju se kao armature i kao filtarski i odvajajući slojevi.

Druga vrsta su GEOMREŽE. Pojavljuju se nešto kasnije i još uvijek se ispituju raznovrsne mogućnosti njihove primjene u graditeljstvu. Postepeno zamjenjuju pocinčane mreže u raznim primjenama.

##### 4.3.1.2.1 Geotekstili

Armature od plastičnih masa prvotno su bile razne vrste geotekstila. Geotekstili su proizvodi tekstilne industrije. Mogu biti tkani, netkani, pleteni i uzlani. Danas se za armature u tlu najčešće rabe netkani geotekstili. Prvotna namjena netkanih geotekstila bila je za podne obloge. Primjena u građevinarstvu naglo je povećala proizvodnju ovih tekstila na svjetskoj razini. Vrlo su otporni na habanje, često nepoderivi, ograničenog izduženja pri razvlačenju, vodopropusni, filtrirajući, postojanih boja, perivi. Na slici 4.5, prikazana je struktura netkanog geotekstila.



Slika 4.5 Netkani geotekstil, vidi se struktura i promjenjivost veličina pora, slika pod elektronskim mikroskopom, uvećanje lijevo 22 puta, desno 88 puta (Rankilor, 1981.)

Tkani, a naročito netkani sintetički tekstili, pokazali su mnoga dobra svojstva za primjenu u građevinarstvu:

1. Djeluju filtrirajuće.

Imaju veliku propusnu moć za vodu, a zadržavaju sitne čestice tla. Pravilnim odabirom gustoće i debljine mogu zamijeniti nekoliko filtarskih slojeva.

2. Djeluju odvajajuće.

Ovo svojstvo je toliko dobro da je moguće polagati geotekstil između gline i krupnog kamena a da pri tom ne dođe do miješanja čestica.

3. Imaju relativno velike vlačne čvrstoće.

Ovo svojstvo ovisi o sirovini za vlakna, načinu izrade, gustoći, i debljini. Proizvođači za svaku vrstu daju atest. Prema traženoj kakvoći odabiru se za armature u tlu.

4. Nije ih moguće parati.

Moguće ih je smo rezati nožem ili škarama. Ako se slučajno dogodi da se na nekom mjestu probiju, rupa se dalje teško širi (samo pri jakom razvlačenju).

5. Ne jedu ih životinje koje žive u tlu (krtice, štakori).

6. Uglavnom su kemijski postojani na određena onečišćenja koja se mogu pojaviti u tlima.

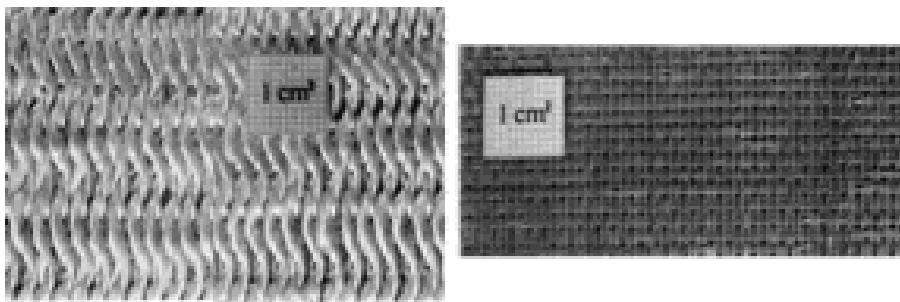
7. Do danas nije dokazan negativan utjecaj starenja.

8. Mogu biti obojeni, a boja im je postojana.

Gore navedena svojstva daju im mnoge razloge za korištenje u graditeljstvu općenito pa tako i kao armature za potporne građevine od armiranog tla.

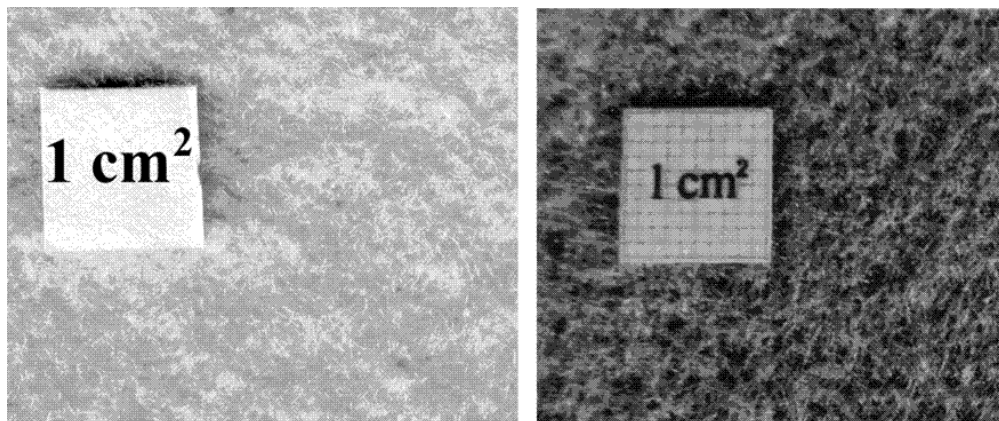
Prije je rečeno da se armirano tlo počelo masovno koristiti početkom 70-tih godina prošlog stoljeća. O brzom razvoju ove tehnologije svjedoči i razvoj industrije za proizvodnju geotekstila. Rankilor (1981.) u svojoj knjizi nabraja 31 svjetskog proizvođača tkanih i netkanih geotekstila.

Na slici 4.6 pokazan je izgled tkanih geotekstila.



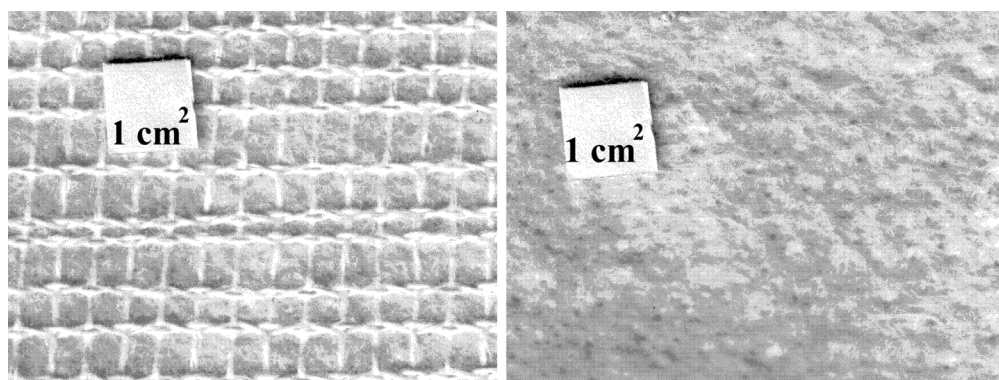
Slika 4.6 Tkani geotekstili (Rankilor, 1981.)

Na slici 4.7 prikazan je izgled netkanih geotekstila.



Slika 4.7 Netkani geotekstili

Slijedeći korak je proizvodnja kombiniranih, tkanih i netkanih geotekstila prikazanih na slici 4.8.

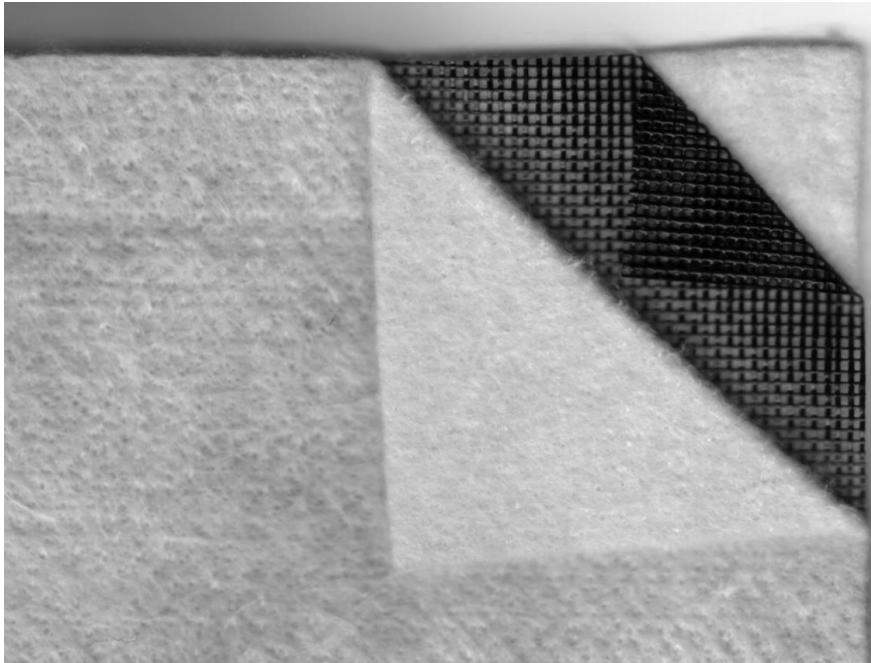


Slika 4.8 Kombinirani geotekstil (lijevo tkana strana; desno netkana strana)

Osim prikazane kombinacije, danas se geotekstili kombiniraju s geomrežama raznih dimenzija i s još nekim drugim vrstama sintetičkih netkanih materijala. Te se materijale naziva runom, jer izgledaju kao sirova vuna. Izrađeni su od sintetičkih vlakana debljine nekoliko desetinki milimetra. Niti su svinute u čupave, vrlo rahle slojeve materijala, koji se rijetko koristi sam. Dodaje mu se geotekstil kao drugi dio kompozita. Strana prekrivena runom služi za dreniranje, a geotekstil za filtriranje. Ima raznih vrsta kompozita, koji se koriste u najrazličitije svrhe. Neki služe kao hidroizolacije, parne brane u visokogradnji i slično.

Kompoziti geotekstila i geomreža također se koriste za armaturu u tlu. Ima ih mnogo vrsta kako po odabiru mreže, tako po odabiru geotekstila i po načinu kombiniranja slojeva materijala. Na slici 4.9 prikazan je jedan takav kompozit.





Slika 4.9 Kompozitni geotekstil, geomreža između dva sloja netkanog geotekstila

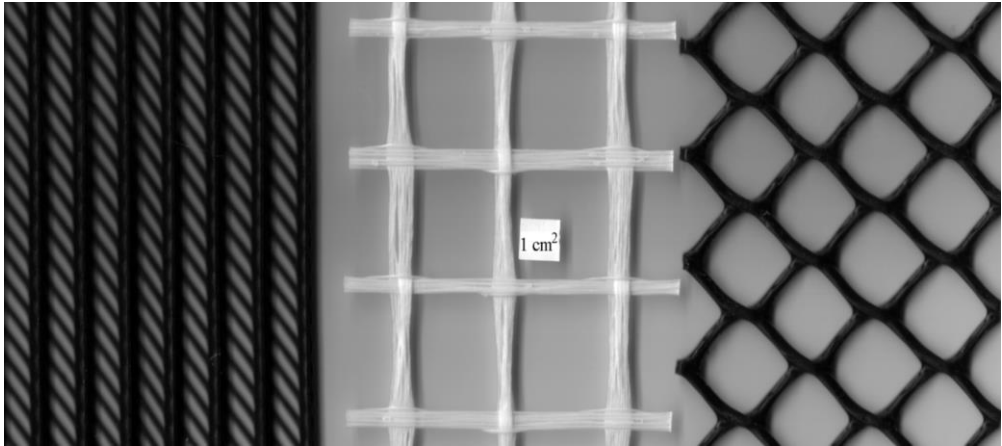
Svi ovi materijali imaju višestruke primjene u građevinarstvu, naročito u niskogradnji i hidrogradnji, gdje su se i počeli upotrebljavati. Između ostalog i one služe kao armature za potporne građevine. Izbor vrste geotekstila ili kompozita, koji će se koristiti za armiranje tla, ovisi o mnogim čimbenicima. Najvažnije je malo izduženje pri maksimalnom opterećenju i dobra prionjivost uz nasipno tlo.

#### 4.3.1.2.2 Geomreže

Geomreže su gradiva od raznih vrsta plastičnih masa, proizvedene raznim tehnologijama razvijenima u industriji plastičnih masa. Nemaju nikakve veze s tekstilnom industrijom. Mogu biti homogene, izrađene od isprepletenih vlakana ili isprepletenih traka. Izrađuju se izvlačenjem, sječenjem, termovarom i sl. Njihova je proizvodnja toliko raznolika da je teško izdvojiti neke određene vrste.

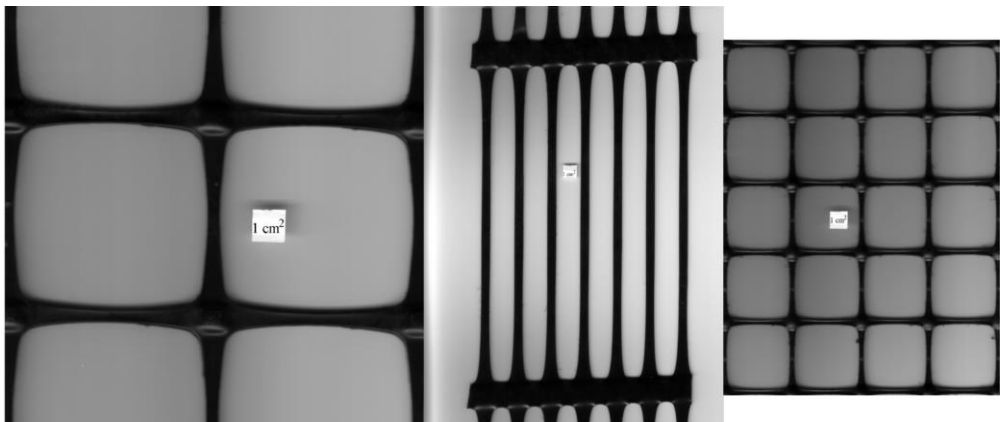
Svaki proizvođač se trudi da dokaže da je njegov proizvod upravo onaj koji je potreban za određenu namjenu, tako da je ispitivanje ovih proizvoda vrlo razvijeno. Za svaki se od ovih proizvoda mogu dobiti detaljni podaci o kakvoći i ostalim osobinama.

Na slici 4.10 prikazane su lijevo i desno geomreže homogenog sastava izrađene jednom od tehnologija u proizvodnji plastičnih masa. Mreža u sredini slike 4.10 izrađena je od snopova sintetičkih vlakana, zavarenih na mjestima križanja. Slika rječito govori o velikom izboru i raznolikosti proizvoda koji se nazivaju geomreže.



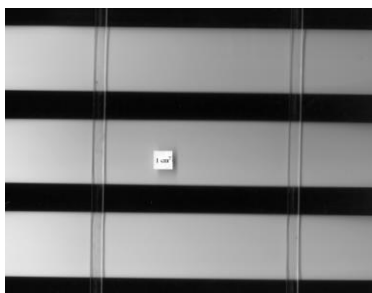
Slika 4.10 Nekoliko primjeraka geomreža

Danas se ova gradiva koriste već dovoljno dugo, tako da njihova trajnost više nije upitna. Na slikama 4.11 i 4.12 prikazane su još neke vrste geomreža.



Slika 4.11 Geomreže

Proizvođači nastoje omogućiti što lakše rukovanje geomrežama na gradilištu. U tom nastojanju razvijaju se sve noviji proizvodi. Jedan od najnovijih je mreža prikazana na slici 4.12, sastavljena od dvije vrste traka. Prozirna traka je smještena s obje strane crne trake i na mjestima mimoilaženja zavarena, dok u međurazmacima tvori jedno tijelo.



Slika 4.12 Geomreža, isprepletene plastične trake različitih svojstava

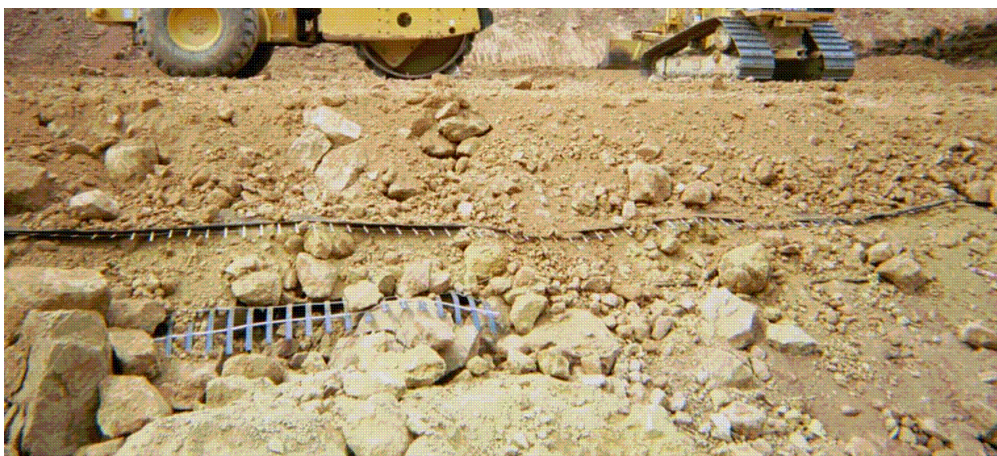
Gornje fotografije najbolje pokazuju široki raspon vrsta i oblika geomreža, od kojih neke služe i za izradu gabiona.

### 4.3.2 Nasipni materijal

Kao nasipni materijal koristi se uglavnom nekoherentno tlo. Razlog tome je u dobrom prijanjanju takvog tla uz armaturu, ali i dobra filtrirajuća svojstva šljunka i pijeska. Potporne građevine od armiranog tla ne dimenzioniraju se na djelovanje hidrostatskog tlaka, već se smatraju vodopropusnim građevinama. Stoga je potrebno osigurati da građevine zaista budu propusne za vodu. Nasipni materijal je najčešće prirodni nekoherentni materijal. Može imati određenu količinu sitnijih čestica, ali se ona mora propisati projektom i stalno provjeravati. Sve što inače vrijedi za nasipe od nekoherentnih materijala vrijedi i za ovaj koji se ugrađuje u armirane potporne građevine. Sredstva za zbijanje treba prilagoditi mogućnostima armature. I ovdje se prilikom zbijanja javljaju opterećenja nastala prilikom zbijanja, opisana u poglavlju 2, ako se radi o krutim elementima lica zida. O ovim će opterećenjima biti više govora u poglavlju 4.3, koje govori o dimenzioniranju građevina od armiranog tla.

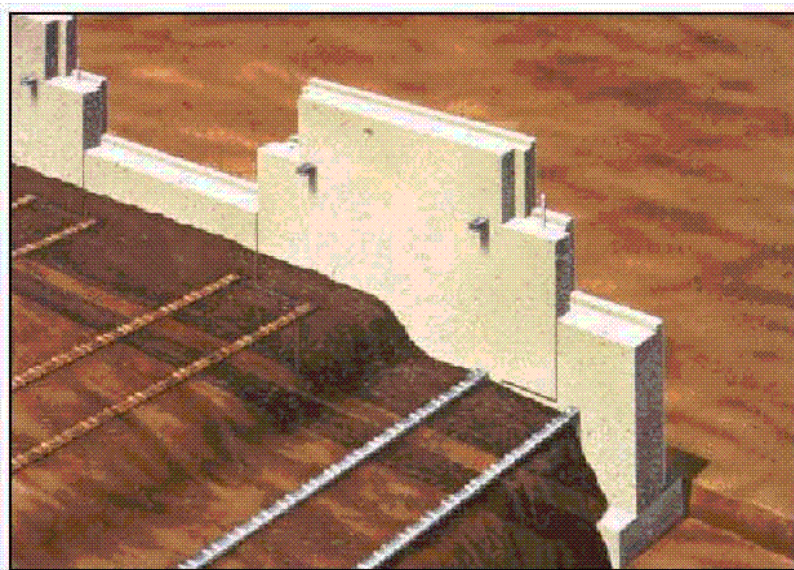
### 4.3.3 Lica građevina od armiranog tla

Prvobitno je lice zida od armiranog tla igralo bitnu ulogu u prijenosu naprezanja. Vidalova (1969.) je ideja da se aktivni pritisak s lica trakama preuzima i prenosi u tijelo građevine trenjem. Kasnije je uočeno da lice zida od armiranog tla igra vrlo malu ulogu u preuzimanju naprezanja. Praktički bi ove građevine mogle opstojati i bez lica. Lice je nužno kad mora biti uspravno, a kada nasip ima određeni nagib lice ima više estetsku nego nosivu ulogu. Iz ovog bi se dalo zaključiti da se privremene, pogotovo građevine vrlo kratkog trajanja, zaista mogu izvoditi bez lica (privremeni nasipi i slično) s tim da se vodi računa da rubni dijelovi ne budu opterećeni iz razloga sigurnosti. Kod uspravnih građevina pojavilo bi se osipanje materijala na licu, ali samo do mjere zauzimanja kuta prirodnog pokosa nasipnog materijala. Iz tog im se razloga stavlja lice i na njega ujedno učvršćuje armatura. Na slici 4.13 pokazan je detalj armiranog tla sintetičkom mrežom bez lica. Vidi se da osipanje kod malih debljina slojeva (do 30 cm) nije značajno.



Slika 4.13 Armirano tlo bez lica

Prvotno je lice ovih građevina, prema Vidalovom patentu, bilo izrađeno od čeličnog lima. Revoluciju je izazvao element križnog oblika s četiri točke za prihvaćanje armature, izveden od betona. Ovi su se elementi mogli estetski oblikovati bilo profiliranjem vanjskog lica, miješanjem boje s betonom ili kombiniranjem raznih površinskih reljefa i boja, što je proširilo njihovu primjenu u arhitektonsko-pejsažno-estetskom smislu. Na fotografiji sa slike 4.14 vidi se stražnje lice ovih elemenata i rebrasta armatura od čeličnih traka.



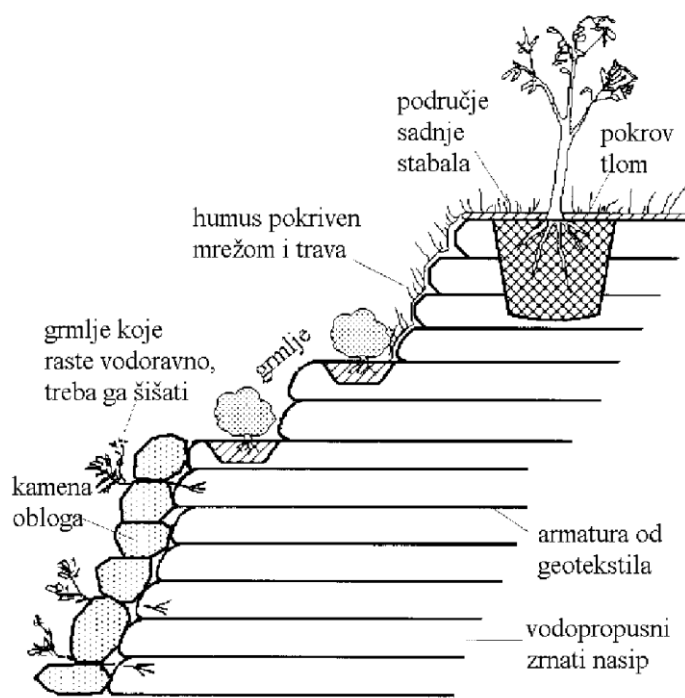
Slika 4.14 Lice od betonskih, križnih elemenata gledano s nasipa

Danas se, kod armiranja trakama, za lica koriste križni i šesterokutni betonski elementi, metalni elementi, dekorativni elementi s prostorom za ozelenjavanje i drugi. Na slici 4.15 prikazano je dekorativno lice zida od armiranog tla izvedeno od križnih, betonskih elemenata.



Slika 4.15 Lice od betonskih, križnih elemenata gledano srijeda

Kod građevina, armiranih geotekstilom, lice se može izvesti preklapanjem geotekstila. Lice se može izvesti i od vreća od geotekstila punjenih tlom. Iz estetskih se razloga može lice kasnije obložiti kako je to prikazano na slici 4.16, na pr. kamenom.



Slika 4.16 Lice građevine armirane geotekstilom (Rankilor, 1994.)

Mogućnosti oblikovanja lica su neograničene upravo iz razloga koji je naveden u početku ovog poglavlja, a to je da samo lice gotovo i ne sudjeluje u prijenosu opterećenja, iako se to na prvi pogled ne čini tako. Dio mogućnosti odabira lica prikazan je na slikama 4.17 i 4.18.



Slika 4.17 Mogućnost ozelenjavanja

Lice se može izvesti i iz prefabriciranih L elemenata, ukrašeno po volji i prema potrebi lokacije na kojoj se građevina nalazi.



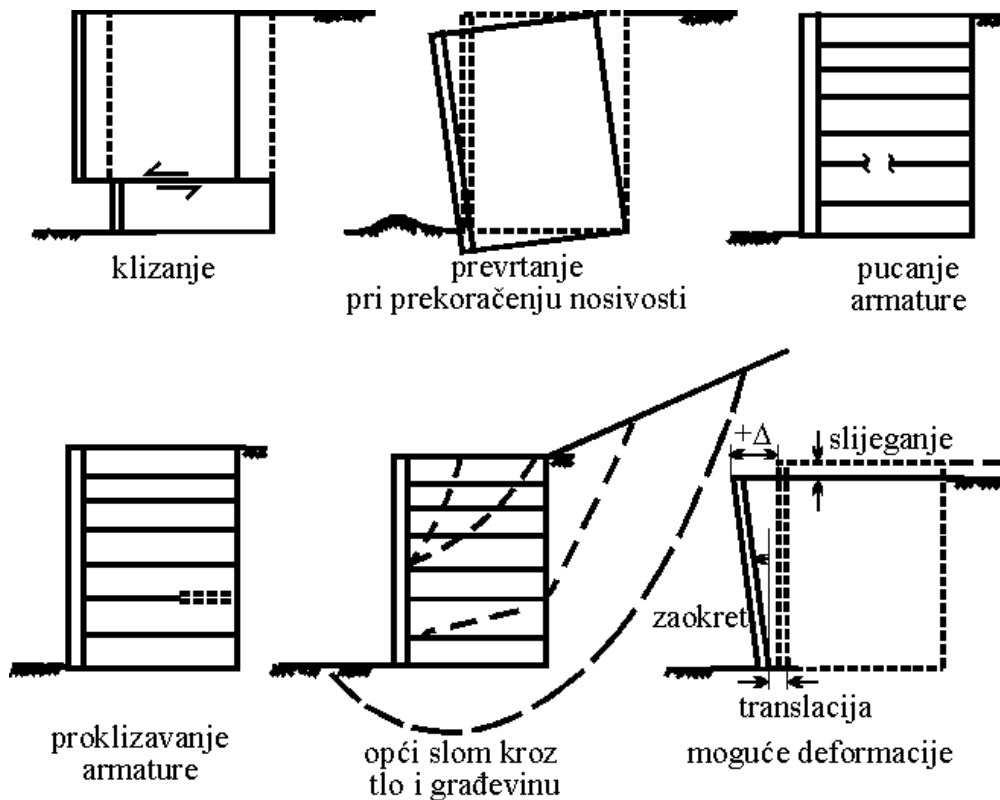
Slika 4.18 Kameno lice zida

## 4.4 DIMENZIONIRANJE POTPORNH GRAĐEVINA OD ARMIRANOG TLA

### 4.4.1 Općenito

Sagledavajući građevine od armiranog tla unutar potpornih građevina, moguće je zaključiti da bi ih se moglo svrstati u gravitacijske potporne građevine s određenim posebnostima. Tijelo koje nastaje sjedinjenjem armature i nasipa tvori jedinstvenu cjelinu. Ono se svojom težinom odupire pritiscima tla koje pridržava. Stoga ovakve građevine treba dimenzionirati jednako kao i gravitacijske potporne zidove. S obzirom na način gradnje i preuzimanja sila potrebno je izvršiti i dodatne proračune.

Na slici 4.19 pokazane su mogućnosti oštećenja potpornih građevina od armiranog tla. Samim tim naznačeni su i dijelovi proračuna pri dimenzioniranju potpornih građevina od armiranog tla.



Slika 4.19 Mogući mehanizmi loma za koje treba provesti proračun potporne građevine od armiranog tla (Jones, 1996.)

Sa slike 4.19 vidi se da je građevinu potrebno provjeriti:

za vanjsku stabilnost na;

1. klizanje,
2. prevrtanje oko vanjske točke,
3. naprezanje tla ispod vanjskog lica građevine i usporediti s nosivošću tla ( $D_f=0$ ),
4. opću stabilnost.

za unutarnju stabilnost na;

1. pucanje armature,
2. proklizavanje, čupanje armature i kidanje na mjestu usidrenja,
3. razne oblike deformacija koje su svojstvene samo ovim potpornim građevinama.

U poglavlju 2 opisana su opterećenja koja djeluju na sve potporne građevine pa tako i na potporne građevine od armiranog tla. Na građevinu od armiranog tla djeluje većina tih opterećenja, ovisno o namjeni građevine. Utjecaj podzemne i procjedne vode onemogućuje vodopropusni, nasipni materijal i lice koje nije brtvljeno. U iznimnim slučajevima treba silama dodati utjecaj hidrodinamičkih sila na klizni klin kako je to pokazano u poglavlju 2.

Pritisak od sredstava za zbijanje nasipa ovdje brzo opada zbog mogućnosti dovoljno velike vodoravne deformacije armature.

Ove se građevine često koriste za upornjake mostova. Tada su opterećene ležajnom reakcijom nosača koji leži na vrhu građevine. Postoji i druga mogućnost, da je ležaj temeljen posebno, a da armirano tlo samo pridržava nasip. Mnogo se koriste kao potporne građevine nasipa u cestogradnji, a imaju i drugdje široku promjenu (Jones, 1996.).

U poglavlju 3 opisan je proračun gravitacijskih potpornih zidova koji odgovara proračunu vanjske stabilnosti građevina od armiranog tla. U ovom će se poglavlju prikazati samo proračuni koji se odnose isključivo na posebnosti građevina od armiranog tla.

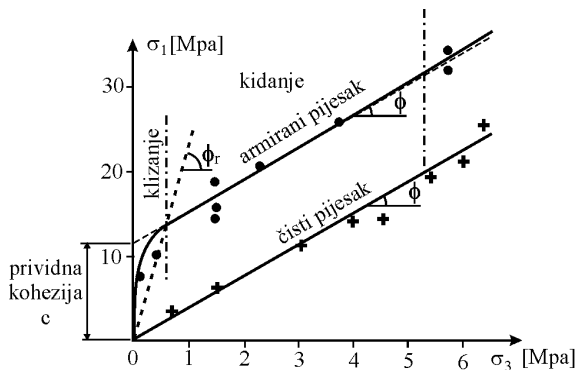
Osim nabrojanih proračuna, može se provesti provjera i na neka posebna opterećenja kao što su potres, ponovljena opterećenja i plavljenje građevine ako za to postoje uvjeti.

#### **4.4.2 Oblikovanje klizne plohe unutar građevine i način djelovanja armature**

Način djelovanja armiranog tla izučavan je u laboratoriju i na terenu. Na slici 4.20 prikazani su rezultati smicanja u troosnom uređaju (Schlosser i sur., 1972.).

Ispitan je uzorak pijeska, visine 20 cm, promjera 10 cm, armiran aluminijskom folijom. Utjecaj armature je jasno vidljiv. Kod nižih vrijednosti pritiska u ćeliji,  $\sigma_3$ , dolazi do proklizavanja armature. Krivulja sloma u dijagramu,  $\sigma_3 - \sigma_1$ , može se zamijeniti pravcem kroz ishodište. Globalni, prividni kut trenja je mnogo veći od kuta trenja pijeska korištenog za model. Njegova je veličina izravno ovisna o gustoći armature. Pri većim vrijednostima pritiska u ćeliji,  $\sigma_3$ , dolazi do pucanja armature, a krivulja loma je pravac, usporedan s pravcem koji nastaje kao rezultat troosnog smicanja samog pijeska, odmaknut za visinu prividne kohezije, c.





Slika 4.20 Rezultati troosnog ispitivanja (Schlosser i sur., 1972.)

Vrijednost prividne kohezije,  $c$ , izravno je povezana s gustoćom armature i njenom vlačnom čvrstoćom prema izrazu:

$$c = \sqrt{K_p} * \frac{T_{arm}}{\Delta H} \quad (4.1)$$

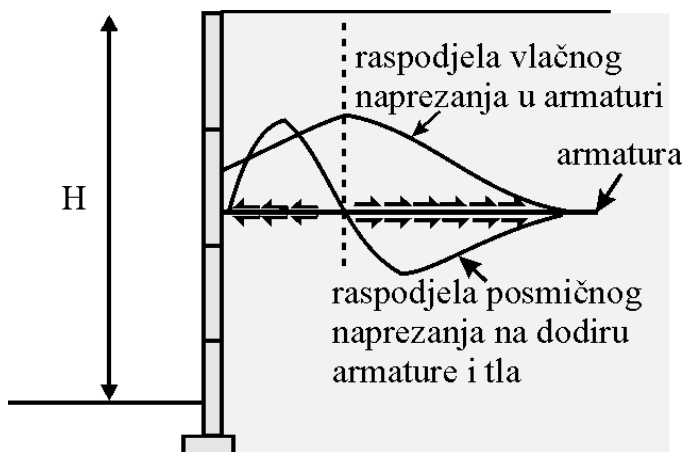
pri čemu je:

$$K_p = \tan^2(45^\circ + \phi/2);$$

$T_{arm}$  = jedinična vlačna čvrstoća armature

$\Delta H$  = uspravni razmak između slojeva armature.

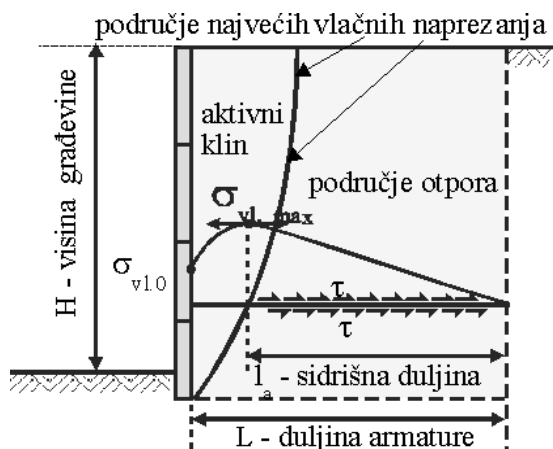
Sustav tlo – armatura djeluje na način prikazan na slici 4.21. U armaturi se javlja vlačno naprezanje koje na licu građevine ima neku vrijednost koja raste do određene udaljenosti od lica građevine, a zatim opada na nulu na kraju armature. Istovremenu se javlja posmik na dodiru armature i tla.



Slika 4.21 Raspodjela naprezanja u armaturi i na dodiru armature i tla

Veličina posmičnog naprezanja ima dva maksimuma u dva međusobno suprotna smjera, tj., prvi dio armature, unutar aktivnog klina (slika 4.22), povlači tlo i armaturu prema licu građevine, dok se drugi dio, iza maksimalne vrijednosti vlačnog naprezanja, odupire tom izvlačenju i pridržava armaturu.

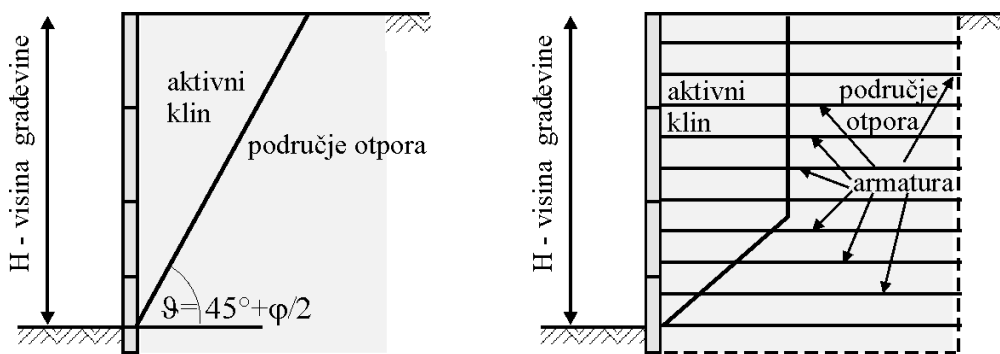
Prateći promjenu položaja najveće vrijednosti vlačnog naprezanja u armaturi po visini, može se rekonstruirati crta razdvajanja aktivnog područja i područja otpora unutar građevine od armiranog tla.



Slika 4.22 Aktivno i otporno područje unutar građevine od armiranog tla.

Može se uočiti da je potencijalna klizna ploha bliže licu zida od onih koje bi se javile u istoj građevini bez armature.

Uvažavajući sve do sada rečeno kao i ispitivanja koja su provedena s armiranim tlom na modelima i u prirodi, može se zaključiti da kritični klizni klin nije trokutastog oblika, već ga armatura izobličuje tako da je negdje do donje trećine visine trokutast, s tim da se lom događa stepenasto od armature do armature, a zatim se uspravno penje na površinu (slika 4.23).



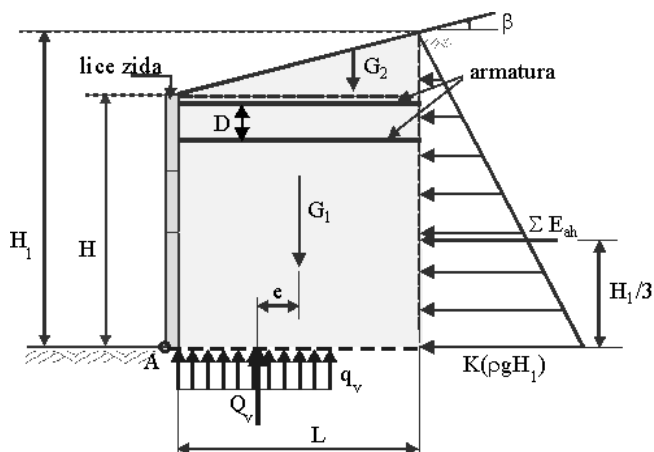
Slika 4.23 Kritična klizna ploha iza potporne građevine u nearmiranom (lijevo) i armiranom (desno) tlu (Schlosser i Bastick, 1991.)

### 4.4.3 Proračuni

Projektiranje, koje u sebi sadrži proračune, počinje pretpostavkom duljine armature za potrebnu visinu potporne građevine i odabirom broja slojeva armature, tj. odabirom osnovne geometrije. Prema Schlosseru i Basticku (1991.), najvažniji uvjet, koji mora biti zadovoljen je, da odnos  $L/H$  mora iznositi minimalno 0,5. Ova vrijednost je iskustvena. Time je odabrana duljina armature za odabrani tip zida. Prema istim autorima, sloj nasipa do prvog reda armature mora biti debeo minimalno 0,4 m. Debljinu slojeva tla,  $D$ , između armatura preporučuju odabrati tako, da ona iznosi  $D=H/20$ . Nakon ovako odabrane geometrije preostaje provjera građevine na sve zahtjeve vanjske i unutrašnje stabilnosti. Ukoliko ista zadovoljava pretpostavljene uvjete građevina je dimenzionirana.

Dimenzioniranje je preporučljivo provoditi analizom graničnih stanja (Jones, 1996.). Takvi su proračuni u suglasju sa zahtjevima Eurokod 7. U Britaniji se za takve proračune koristi BS 8006. Proračuni se sastoje od analize graničnog stanja pri lomu i analize graničnog stanja pri upotrebi građevine. Za svako od dva navedena stanja koristi se parcijalni faktor sigurnosti. Procedura proračuna prema Eurokod 7 i tabele parcijalnih faktora sigurnosti može se naći u tabeli 2.3 i u literaturi (Jones, 1996.) ; Eurokod 7.

Na slici 4.24 prikazan je sustav opterećenja, potreban za proračun građevine od armiranog tla.  $Q_v$  i  $q_v$  predstavljaju ukupnu silu otpora tla i reakciju podloge.



Slika 4.24 Vrijednosti koje ulaze u proračun građevine od armiranog tla

Za potrebe proračuna unutrašnje stabilnosti potpornih građevina od armiranog tla, ključno je odrediti veličinu koeficijenta bočnog tlaka,  $K$ .

Prema istraživanjima Mitchella i Schloserra (1979.) na instrumentiranim potpornim građevinama od armiranog tla, utvrđeno je da se ova vrijednost mijenja od,  $K_0$ , na vrhu zida do,  $K_A$ , na dubini od 6 m. Ispod te dubine ostaje nepromjenjiv i iznosi,  $K_A$ . Pokusi su rađeni s metalnim trakama (sustav Vidal). Slično se ponašaju mreže od betonskog željeza i krute geomreže.

Veličina koeficijenta bočnog tlaka,  $K$ , ovisi o veličini vodoravne deformacije. Geosintetici tipa geotekstila, mnogo su deformabilniji, dozvoljavaju veće pomake te je kod njih veća mogućnost pojave koeficijenta aktivnog tlaka,  $K_A$ , već od vrha potporne građevine. Odabir veličine bočnog tlaka,  $K$ , prema tome ovisi o vrsti armature i procjeni projektanta o veličini moguće deformacije. Proračun s koeficijentom tlaka mirovanja,  $K_0$ , je na strani sigurnosti.

#### 4.4.3.1 Proračun vanjske stabilnosti

Zbog fleksibilnosti ovih građevina kao cjeline, za proračun vanjske stabilnosti je moguće koristiti koeficijent bočnog tlaka,  $K_A$ , za aktivno stanje naprezanja.

- 1) Provjera na klizanje za uvjete sa slike 4.24

Duljina armature,  $L$ , koja određuje širinu građevine od armiranog tla, mora biti tolika da proračun na klizanje na dodiru temelj – tlo, ali i na svakoj dodirnoj plohi armatura – nasip, zadovolji faktor sigurnosti od 1,5. Ovaj uvjet može se pisati na način:

$$F_{Sk} = \frac{(G_1 + G_2) \operatorname{tg} \varphi}{\Sigma E_{Ah}} \geq 1,5 \quad (4.2)$$

gdje je,  $F_{Sk}$ , faktor sigurnosti na klizanje;

$$\Sigma E_{Ah} = \frac{H^2 * \rho * g * K_A}{2}, \text{ za uvjete sa slike 4.24}$$

$$G_1 = L * H * \rho * g$$

$$G_2 = \rho * g \left[ \frac{L * (H_1 - H)}{2} \right]$$

$\operatorname{tg} \varphi$ , kut trenja nasipnog materijala.

- 2) Provjera na prevrtanje oko točke A sa slike 4.24

$$F_{Sp} = \frac{\Sigma M_R}{\Sigma M_{OV}} \geq 2,0 \quad (4.3)$$

gdje je,  $F_{Sp}$ , faktor sigurnosti na prevrtanje;

$$\Sigma M_R = \text{suma otpornih momenata} = G_1 \left( \frac{L}{2} \right) + G_2 \frac{2L}{3}, \text{ za uvjete sa slike 4.24}$$

$$\Sigma M_{OV} = \text{suma momenata vanjskih sila} = E_{Ah} \left( \frac{H_1}{3} \right).$$

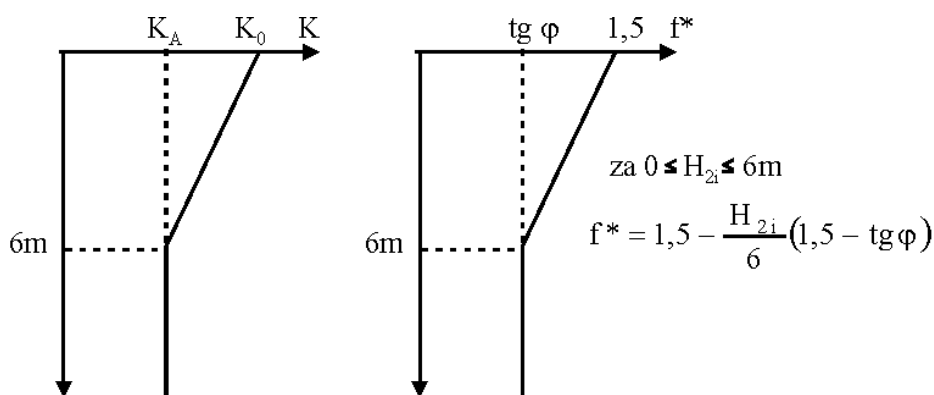
- 3) Provjera nosivosti na vanjskom rubu (u točki A)

Računa se kao nosivost svakog drugog temelja uz dubinu temeljenja  $D_f=0$ .

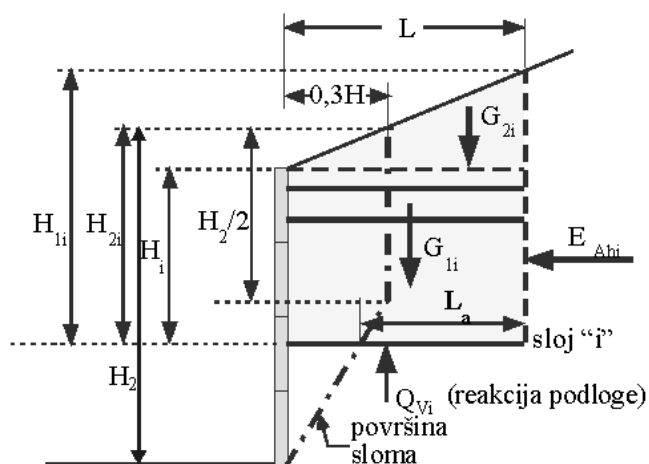
#### 4.4.3.2 Proračun unutarnje stabilnosti

Ovaj je proračun bitan za armirano tlo. Sastoji se od nekoliko provjera. U nastavno danim proračunima uvažava se promjena vrijednosti koeficijenta bočnog pritiska od vrha građevine gdje iznosi,  $K_0$ , do dubine od 6 m, gdje opada na vrijednost,  $K_A$ , kako su pokazala ispitivanja Mitchela i Schlossera (1979.).

Odgovarajuće ovim rezultatima Basma (2003.) preporuča za proračune unutarnje stabilnosti koristiti sličan način raspodjele veličine prividnog koeficijenta trenja,  $f^*$ , između armature i nasipnog materijala. Oba dijagrama prikazana su na slici 4.25. Na slici 4.26 prikazane su sile potrebne za proračun unutarnje stabilnosti i-tog sloja armiranog tla.



Slika 4.25 Promjena vrijednosti koeficijenta bočnog tlaka i prividnog koeficijenta trenja za proračune unutarnje stabilnosti građevine od armiranog tla (Basma, 2003.)



Slika 4.26 Vrijednosti koje ulaze u proračun unutarnje stabilnosti građevine od armiranog tla za sloj "i" na dubini  $H_i$  (Basma, 2003.)

Veličine na slici 4.26 vezane su s veličinama na slici 4.24 kako slijedi:

$$H_2 = \frac{(H + H_1)}{2} \text{ sa slike 4.24,} \quad \text{a} \quad H_{2i} = \frac{(H_i + H_{li})}{2}$$

Usvoji li se, za proračun, vodoravno naprezanje na dubini,  $H_i$ , za metar dužni potporne građevine, kao vlačno naprezanje na koje se dimenzionira armirano tlo može se pisati:

$$\sigma_{hi} = K * \sigma_{vi} \quad (4.4)$$

$$\sigma_{vi} = \rho * g * H_i \quad (4.5)$$

Prema Basma, 2003. i slici 4.25, vrijednost,  $K$ , može se proračunati:

$$\text{za } z = 0, K = K_0; \quad (4.6)$$

$$\text{za } z > 6\text{m}, K = K_A, \quad (4.7)$$

gdje je  $K_A = \text{tg}^2(45^\circ - \varphi/2)$ , a  $K_0 = 1 - \sin\varphi$  (prema Jaky-u, vidi poglavlje 2).

Za  $0 \leq H_{2i} \leq 6\text{m}$ :

$$K = K_0 - \frac{H_{2i}}{6} (K_0 - K_A) \quad (4.8)$$

#### 1) Proračun armature na pucanje

Kada je poznato vodoravno naprezanje na dubini  $i$ -tog sloja,  $\sigma_{hi}$ , ono se uspoređuje s dozvoljenim naprežanjem u armaturi,  $\sigma_{a \text{ dop}}$ .

Kako proizvođači armature daju vrijednosti sile kidanja,  $T_a$ , u jedinicama  $\text{kN/m}$ , to je preporučljivo u proračunima ovu vrijednost izraziti kao silu.

Uvaži li se da svaka armatura preuzima dio naprežanja između dva sloja visine,  $D$ , može se sila,  $T_{ai}$ , izračunati kao:

$$T_{ai} = D * K_i * \Sigma \sigma_{vi} \quad (4.9)$$

pri čemu je,  $\Sigma \sigma_{vi}$ , zbroj svih uspravnih naprežanja koja djeluju na vodoravnu ravninu na dubini,  $H_i$ , a,  $K_i$ , koeficijent bočnog naprežanja ovisan o dubini, prema slici 4.25. Kada se za,  $K$ , uvažava koeficijent aktivnog pritiska,  $K_A$ , najveća se sila dobije na dnu građevine. Kada je vrijednost,  $K$ , promjenjiva (prema jed. 4.8), najveću silu treba odrediti iterativno. Pri tom treba biti zadovoljen uvjet:

$$T_{ai} < T_a / F_s \quad (4.10)$$

#### 2) Proračun na čupanje – proklizavanje armature (dužina sidrenja)

Kada je poznata najveća vlačna sila na metar dužine građevine,  $T_a$ , moguće je izračunati potrebnu duljinu usidrenja  $L_a$ , koja neće dozvoliti čupanje armature iz nasipa.

Jednadžba za proračun ove dužine glasi:

$$L_a = \frac{T_a}{(\sum \sigma_v) * f^*} \quad (4.11)$$

gdje je,  $f^*$ , prividni kut trenja između armature i nasipnog materijala, a mijenja se s dubinom prema dijagramu na slici 4.25. Veličina,  $L_a$ , je dužina armature potrebna da se trenjem između armature i nasipa savlada sila čupanja armature. Računski su to male vrijednosti, daleko manje od predložene veličine,  $L_{min}=0,5 H$ , gdje je,  $H$ , visina građevine. Kod ovog se proračuna stoga koristi faktor sigurnosti na čupanje,  $F_{sc} \geq 3$ . Tome se još dodaje dužina od lica zida do izlaza kritične klizne plohe na površinu,  $X$ .

Pri tome,  $X$ , iznosi:

$$X = 0,3 * H \quad (4.12)$$

za uvjete sa slike 4.26 ili

$$X = H * \text{tg} \vartheta \quad (4.13)$$

ako se pretpostavlja da se u armiranom tijelu javlja aktivni klizni klin. Predlaže se odabir veće vrijednosti. Tako dobivena duljina armature,  $L$ , uspoređuje se s onom odabranom na početku proračuna. Ako zadovoljava, zadržava se po cijeloj visini građevine.

$$L = L_{a \max} + X \quad (4.14)$$

Kada je armatura pričvršćena na lice građevine, kako je to slučaj kod metalnih traka na križne, armirane ili slične elemente, potrebno je na silu čupanja,  $T_a$ , dimenzionirati vezu armature i elemenata lica.

Vrlo zanimljiv proračun koji razmatra međudjelovanja zida i tla s nizom rezultata laboratorijskih pokusa daju Baker i Klein, 2004. U proračun ulaze parcijalni faktori sigurnosti za svaki proračunski element, a što je u skladu s Eurocode 7.

### 3) Proračuni mogućih deformacija

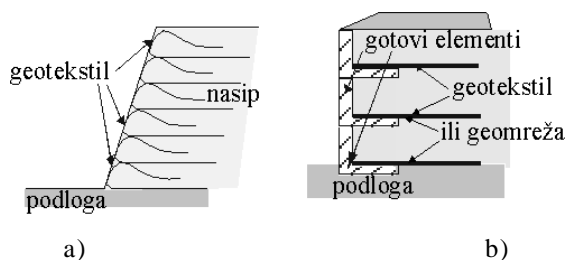
Ovi se proračuni provode ovisno o vrsti armature i lica zida. Tu spadaju proračuni slijeganja uslijed slijeganja tla ispod građevine i slijeganja od vlastite težine. Zatim se može provjeravati translatorni pomak zida i/ili rotacija oko točke A.

Postoje izvjesne razlike u proračunima tla armiranog geotekstilom i tla armiranog krutim armaturama. Za detaljnije proračune čitaocima se preporuča postojeća, domaća literatura (Babić i sur., 1995.).

#### 4.5 IZVEDBA POTPORNIH GRAĐEVINA OD ARMIRANIG TLA

Izvedba potporne građevine od armiranog tla je jednostavna, premda postoje razlike u izvedbi tla ojačanog geotekstilima, bez lica i ostalih izvedbi.

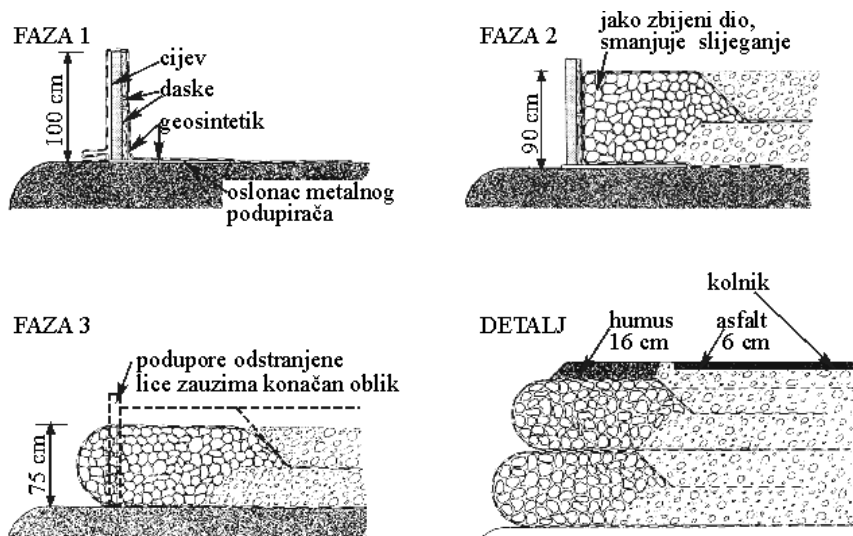
Na slici 4.27 prikazana su dva tipa građevina od armiranog tla.



Slika 4.27 Potporni zidovi od armiranog tla, a) armatura geotekstil, lice od presavijenog geotekstila, b) armatura geotekstil, ali i geomreža ili metalna traka, lice od gotovih L elemenata

Lice građevine može biti uspravno ili nagnuto. Kod određenih vrsta elemenata može biti stepenasto. Kod svih izvedbi nužno je osigurati pravilno postavljanje armature i vrlo brižljivo nasipavanje, da se armatura ne pomakne ili ne ošteti.

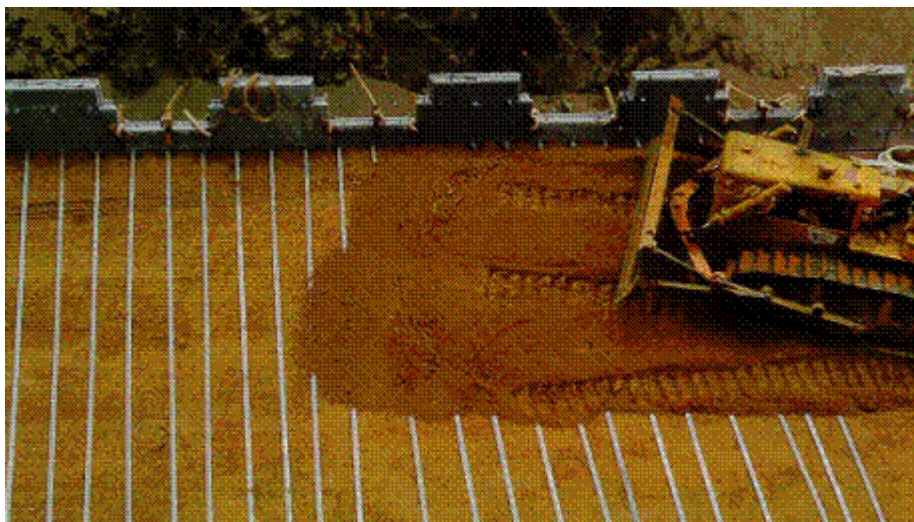
Zidovi s krutim licem, betonskim križnim elementima ili metalnim elementima, imaju osiguran rub, potreban da nasipni materijal ne bježi prilikom zbijanja. Građevine bez lica armirane geotekstilom, moraju imati pomoćne podupirače prilikom nasipavanja sloja i njegovog zbijanja. Moguća tehnologija prikazana je na slici 4.28.



Slika 4.28 Izvedba građevine od geotekstila (Babić i sur. , 1995.)



Slijedeći bitan korak je zbijanje nasipa. O njegovoj zbijenosti ovisi nosivost sustava na trenje. Na slici 4.29 vidi se razgrtanje nasipa za izradu armiranog tla s licem od betonskih križnih elemenata, armiranog metalnim trakama.



Slika 4.29 Nasipavanje iza lica građevine armirane metalnim trakama

Stroj koji razgrće materijal ujedno ga i zbjija. Ako ovakvo zbijanje ne zadovoljava zahtjeve zbijenosti predviđene projektom, zbijanje će se dopuniti nekim od strojeva za zbijanje (glatki valjak, vibro-valjak, vibro-ploča). Provjera kakvoće ugrađenog nasipa provjerava se kao kod svakog drugog nasipa, usporedbom rezultata Proctorovog pokusa.

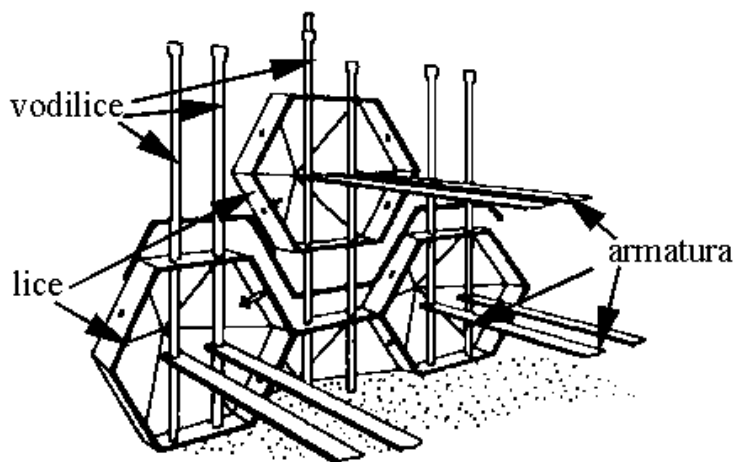
Kod svih ovih građevina javlja se slijeganje nasipa u tijeku izvedbe, zbog zbijanja. Stoga je potrebno osigurati i mogućnost gibanja lica u svrhu praćenja slijeganja nasipa. Jones (1996.) navodi tri osnovna tipa izvedbe, vezana uz način osiguranja zajedničkog slijeganja nasipa i armature prilikom zbijanja.

Prvi tip naziva **METODOM HARMONIKE** i navodi da je to sustav koji je uveo Vidal koristeći metalno cilindrično lice. Sastoji se u tome da se lice može deformirati poput mijeha harmonike i tako pratiti slijeganje nasipa pri zbijanju. Na slici 4.28 vidi se da se geotekstil ponaša slično. Jones (1996.) navodi da se na isti način ponašaju građevine armirane geotekstilom i geomrežama kada nemaju posebne elemente lica.

Drugi tip je **TELESKOPSKA METODA** koju je Vidal razvio 1978. godine za građevine s licem od betonskih elemenata. Ovo se postiže umetanjem stišljivih umetaka između elemenata lica, koja “vise” na armaturi dok se ne zbjije nasip, a armatura ne dođe u konačni položaj. Izvođenje na slici 4.29 i na slici 4.14 je teleskopskom metodom.

Treći način je razvio Jones (1978.). Naziva se **KLIZNA METODA**. Kod ove metode armatura nije spojena s elementima lica, već klizi po posebnim vodilicama.

Po tim istim vodilicama neovisno od armature klize elementi lica. Detalj je prikazan na slici 4.30.



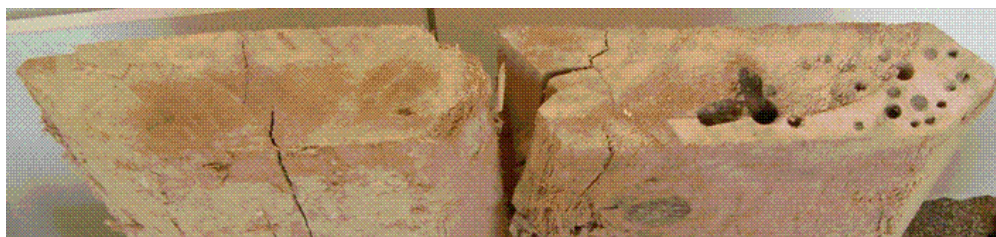
Slika 4.30 Dijelovi (lice, vodilice i armatura) građevine od armiranog tla za kliznu metodu izvedbe (Jones, 1996.)

## DRVENE PLATICE

građevna jama stupa mosta preko rijeke Žrnovnice, Stobreč kod Splita oko 1960. god. ili ranije, izvađene 2005. god. prilikom izrade pilota za novi most



pogled na vrhove platica



poprečni presjek, riblja kost, vidi se učinak štetočina u drvetu

## 5 PODUPORE USPRAVNIH ISKOPA

### 5.1 OPĆENITO

Uspravni iskopi, raznih dubina, javljaju se u građevinarstvu vrlo često. Razlog može biti oblik i primjena građevine, skućeni slobodni prostor potreban za gradnju, zaštita okolnih građevina prilikom iskopa i niz drugih razloga. Način pridržanja ovakvih iskopa u građevinskoj praksi vrlo je raznolik. Razvojem tehnologije povećavaju se mogućnosti pridržanja i njihova raznolikost.

Prema jednadžbi 2.11, aktivni pritisak na koherentno tlo do dubine,  $H_0$ , je  $\int_0^{H_0} \sigma_A * dz = 0$ , što znači da do te dubine, teoretski, nema pritiska na potpornu građevinu u koherentnom tlu. Ta se činjenica koristi kod privremenih, uspravnih iskopa u koherentnim tlima manjih dubina, koji se mogu izvoditi bez podgrade.

Za nekoherentna tla i veće dubine iskopa od,  $H_0$ , u koherentnim tlima, upravne je iskope potrebno podgrađivati i pridržavati nekom potpornom građevinom.

Granicu između plitkog i dubokog iskopa odredili su Terzaghi i Peck (1967.) kao dubinu od 6,0 metara. Za iskope dubine veće od 6,0 m, nužno je podgrađivanje iz razloga sigurnosti ljudi i materijalnih dobara.

Pri izvođenju iskopa u bilo koju svrhu, može se ostati s kotom dna iznad razine podzemne vode, ali se može zaći i ispod razine podzemne vode. Ako iskopani prostor treba ostati nepotopljen, a dno iskopa seže ispod razine podzemne vode, tada zaštitna građevina mora biti vododrživa. U tom slučaju će na nju djelovati hidrostatički pritisak.

Poseban slučaj je izvedba iskopa u vodi, bilo mirnoj bilo tekućoj. U tom slučaju je glavno opterećenje na zaštitnu građevinu pritisak vode.

Već iz navedenog vidljivo je kako je izvedba uspravnih iskopa složen zadatak, a mogućnost rješenja višeznačna. U ovom poglavlju govoriti će se o podgradama koje su pretežno opterećene pritiskom tla i podgradama koje su opterećene pritiskom tla i hidrostatičkim tlakom. Građevine koje pretežitito štite gradilišta od prodora vode (zagati) bit će opisane u poglavlju 6.

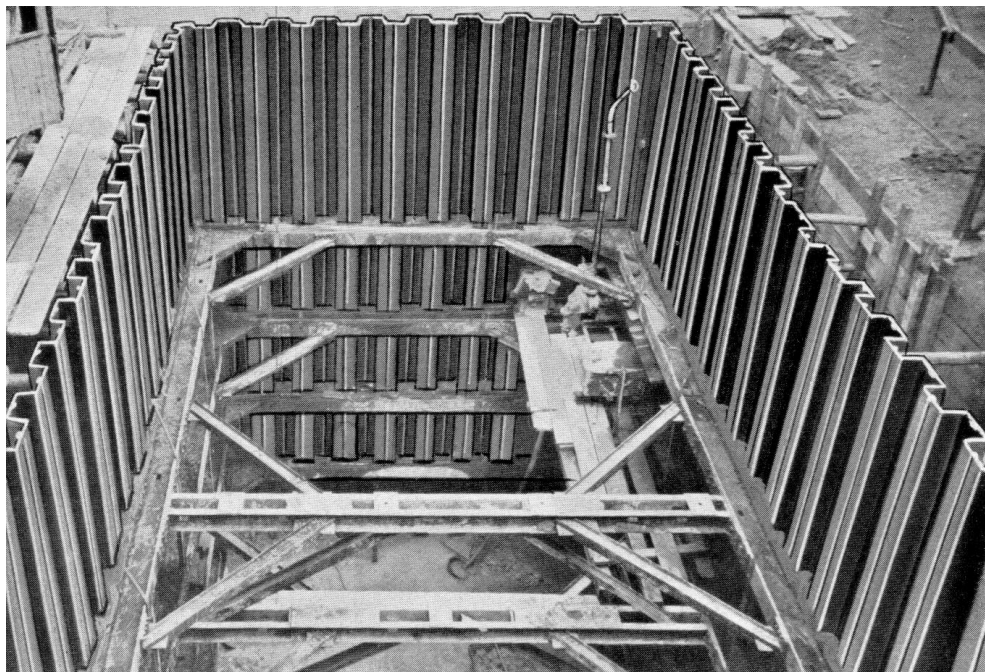
U literaturi je moguće građevine, koje pridržavaju iskope uspravnog lica, naći češće u sklopu primjene pojedine građevine, nego obuhvaćene jednoznačno po nekoliko srodnih obilježja. Tako se zagatne stijenke kod raznih autora mogu naći na različitim mjestima. Primjerice Dismuke (1991.) smješta ove građevine među

one koje jesu opterećenje vodom na strani tla, ali i na vanjskom licu. Time je osiguran znatno manji utjecaj hidrostatičkog tlaka što nije uvijek slučaj. Wilson (1974.) ih naziva savitljivim građevinama za pridržanje tla i također razmatra opterećenja vodom samo pri manjim razlikama u razini vode ispred i iza zagatne stijenke. Cernica (1995.) ih spominje u kontekstu čeličnog žmurja, također opterećenog malom razlikom hidrostatičkog pritiska. Tschebotarioff (1973.) svrstava ove građevine u obalne građevine, govori uglavnom o čeličnom žmurju i opisuje slučaj žmurja usidrenog jednom zategom ili sidrom.

Iz prethodnih razmatranja može se prihvatiti podjela građevina koje pridržavaju uspravne iskope u tlu na građevine koje pridržavaju samo tlo pa ne moraju biti vododržive, i one koje moraju biti vododržive i prihvaćaju opterećenje hidrostatičkim tlakom.

Druga podjela bi mogla biti na PRIVREMENE GRAĐEVINE ILI PODGRADE I STALNE GRAĐEVINE ILI ZAGATNE STIJENKE .

Privremene građevine ili podgrade su sastavni dio GRAĐEVNIH JAMA. Građevne jame, osim kao građevine za zaštite iskopa, moraju zadovoljiti još neke uvjete. Općenito o građevnim jamama biti će govora u poglavlju 8. U ovom će se poglavlju pažnja obratiti isključivo na podgrade kao privremene dijelove zaštite građevnih jama i zagatne stijenke koje mogu, ali ne moraju trajno ostati u tlu i/ili biti sastavni dio građevine.



Slika 5.1 Višestruko razuprto čelično žmurje (Hoesch-Kölnneuessen, 1937.)

## **5.2 PRIVREMENE GRAĐEVINE ZA OSIGURANJE USPRAVNOG ISKOPA U TLU (PODGRADE)**

Podgrade su privremene građevine. Služe za osiguranje ljudi i materijalnih dobara za vrijeme rada u iskopima. Građevine omeđene podgradama mogu biti ROVOVI i GRAĐEVNE JAME. Razlika između rova i građevne jame je u tome što se rovovi kopaju, u njih polažu predviđene instalacije i sukcesivno zatrpavaju, dok građevne jame traju do trenutka dok se unutar njih ne izvede temeljenje, a ponekad i dio građevine te se tek tada zatrpavaju. Građevne jame ostaju mnogo duže otvorene i zaštićene podgradama od rovova. Podgrade nikad nisu sastavni dio gotove građevine.

Razlikuju se tri osnovna tipa podgrada.

1. Oplate, izvedene na licu mjesta i/ili predgotovljene;
2. Berlinsko ziđe;
3. Žmurje (drveno, čelično).

Podgrade su razuprte na više mjesta ili su poduprte kosnicima, što ovisi o obliku građevne jame koju štite. Razupiru se rovovi za kanale s usporednim stijenkama i prikladne zatvorene tlocrtne površine (vidi sliku 5.1), dok se široki tlocrti podupiru kosnicima. Kako kosnici smetaju unutar radnog prostora to ih se danas sve više zamjenjuje sidrima. Ova je tehnologija nešto skuplja, ali omogućuje slobodan rad u štićenom prostoru gradilišta. Tehnologija bušenja i ugradnje sidara jeoliko uznapredovala da se danas rijetko mogu vidjeti podgrade poduprte kosnicima. Sidrene podgrade ostaju trajno u tlu iako izgradnjom građevine koju su štatile gube svoju temeljnu namjenu. Druge vrste podgrada mogu se vaditi ili čak sukcesivno vaditi i ugrađivati, kako se napreduje s izgradnjom.

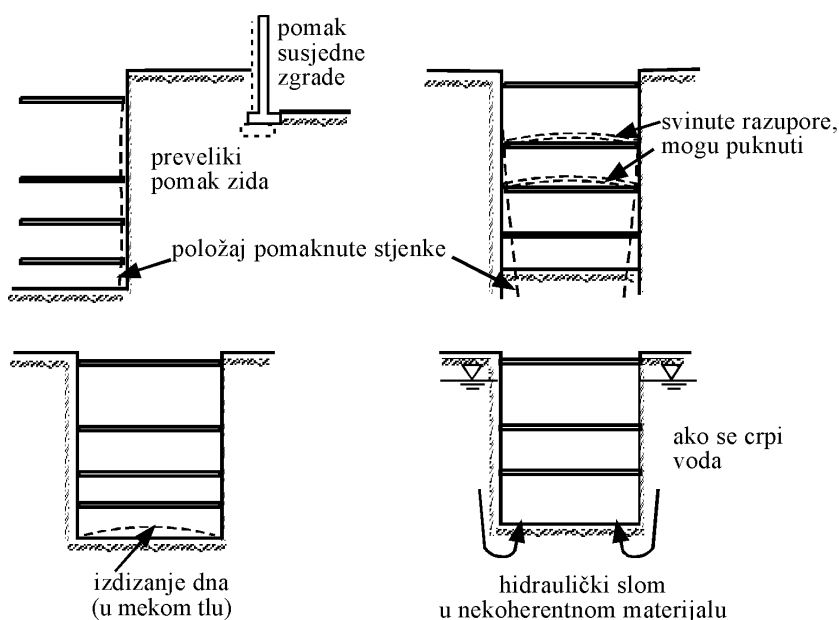
Podgrade koje nisu opterećene hidrostatičkim tlakom i nisu zabijene u tlo, opterećene su kao i svaka druga potporna građevina, ali imaju i neke posebnosti. Ovo je prvi uočio Terzaghi (1941.). Primijetio je da su pritisci u gornjem dijelu podgrade (sile u gornjim razuporama) nešto veći od onih dobivenih teorijom aktivnog pritiska, dok su u donjim dijelovima podgrade nešto manji. Kasnije su se ovim bavili mnogi autori. S obzirom na ove posebnosti, u idućem se poglavlju daju smjernice za proračun ovih građevina.

### **5.2.1 Proračun podgrada**

Za proračun i dimenzioniranje oplata koje nisu zabijene u tlo, već samo razuprte na više mjesta, koristi se i danas metoda Terzaghija i Pecka za duboke iskope ( $H > 6,0$  m). Prijedlozi za proračune raspodjele pritisaka na podgradu proizlaze iz niza mjerenja na terenu, raznih autora. Već 1937. Spilker (prema Tschebotarioff, 1974.) objavljuje mjerenja u razuporama oplata u pijesku, prilikom izgradnje umjetnih tunela za podzemnu željeznicu u Berlinu. Njegove rezultate analizirao je Terzaghi i na temelju toga došao do zaključka o trapezoidnoj raspodjeli pritisaka na podgradu. Ovu su metodu izučavali i razradili još neki autori.

U nastavku (slika 5.4 i 5.5) će biti prikazan niz dijagrama raspodjele pritisaka na podgrade, koje Dismuke (1991.) naziva “prividnom dijagramima” raspodjele pritisaka na višestruko poduprte oplate. Temeljna pretpostavka za upotrebu ovog načina proračuna je da je riječ o dubokim iskopima ( $H > 6,0$  m) i da nema vode iza podgrade.

Na slici 5.2 prikazana je mogućnost sloma u tlu koje je pridržano višestruko razuprtom oplatom.



Slika 5.2 Mogući načini sloma višestruko razuprtih podgrada (Dismuke, 1991.)

Za procjenu stabilnosti iskopa rovova u glini koristi se izraz za broj stabilnosti,  $N$ , prema jednadžbi:

$$N = \frac{\rho * g * H}{c} \quad (5.1)$$

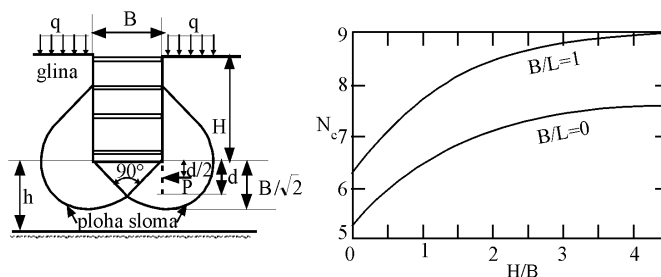
gdje je,  $\rho$ , gustoća tla,  $g$ , gravitacija,  $H$ , visina uspravnog iskopa kojeg treba pridržati a,  $c$ , kohezija za nedrenirano stanje ( $c=c_v$ ). Za vrijednosti  $N > 3$  ili 4 mogu se očekivati značajni pomaci podgrade. Za  $N=6$  vjerojatno je izdizanje dna.

### 5.2.1.1 Provjera izdizanja dna rova u glini

Kada je broj stabilnosti,  $N \approx 6$ , potrebno je provesti proračun sigurnost od sloma dna rova. Skica je dana na slici 5.3. Vrijednost faktora sigurnosti od ovog sloma mora biti,  $F_s \geq 1,5$ . Izraz za faktor sigurnosti glasi:

$$F_s = N_c \frac{c}{\rho * g * H + q} \geq 1,5 \quad (5.2)$$

gdje je,  $N_c$ , faktor nosivosti dan dijagramom na slici 5.3,  $c$ , kohezija,  $H$ , dubina iskopa,  $\rho$ , gustoća tla i  $q$  vanjsko opterećenje pored rova.



Slika 5.3 Stabilnost dna rova u glini i pripadni dijagram za faktor nosivosti  $N_c$  (Dismuke, 1991.)

Ako se ne može zadovoljiti faktor sigurnosti stabilnosti dna rova koji mora biti veći od 1,5, podgrada se može zabiti u tlo za dubinu,  $d$ , na slici 5.3. Tada se pritisak na 1m' zabijenog dijela podgrade može izračunati za slučaj kad je  $d > \frac{2B}{3\sqrt{2}}$

kao:

$$P = 0,7 (\rho * g * H * B - 1,4 * c * H - \pi * c * B) \quad (5.3)$$

odnosno ako je  $d < \frac{2B}{3\sqrt{2}}$  kao:

$$P = 1,5 * d * B (\rho * g * H * B - 1,4 * c * H - \pi * c * B) \quad (5.4)$$

### 5.2.1.2 Raspodjela pritisa na višestruko pridržane oplate

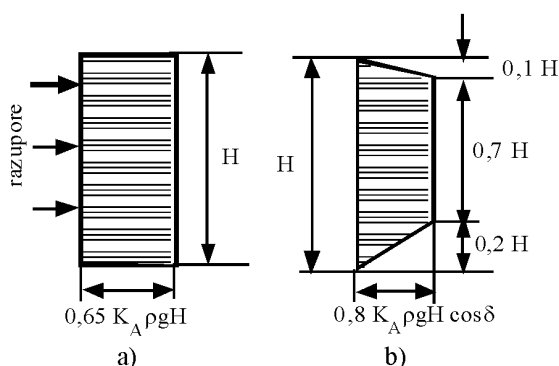
Oplate podrazumijevaju građevine koje nisu vododržive niti opterećene hidrostatičkim tlakom. Nastavni proračun podrazumijeva da je posmična čvrstoća glina izražena u nedreniranom stanju i da je razina podzemne vode ispod dna iskopa.

Za dimenzioniranje broja i veličine razupora potrebno je odrediti vodoravni pritisak na podgradu. Pretpostavka je da su iskopi dublji od 6,0 m.

Na slici 5.4 prikazani su dijagrami pritisa na podgrade, koji se koriste za dimenzioniranje razupora (Wilson, 1974., Dismuke, 1991.) za pijeske. Pri tom je,  $K_A = \text{tg}^2(45^\circ - \varphi/2)$ .

Na slici 5.4 a) prikazana je raspodjela pritisa na pogradu u suhom i vlažnom pijesku (Wilson, 1974.). Na slici 5.4 b) je dijagram prema Tschebotarioffu (1951.).

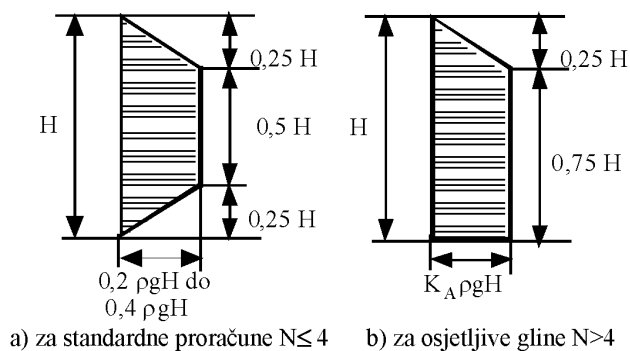




Slika 5.4 Raspodjela pritisaka na podgradu u pijescima (Dismuke, 1991.)

Za podgrade sustava Berlinskog ziđa vrijednost kuta trenja između tla i podgrade treba uzeti s vrijednošću,  $\delta=0$ .

Na slici 5.5. dani su dijagrami pritisaka na podgrade za gline



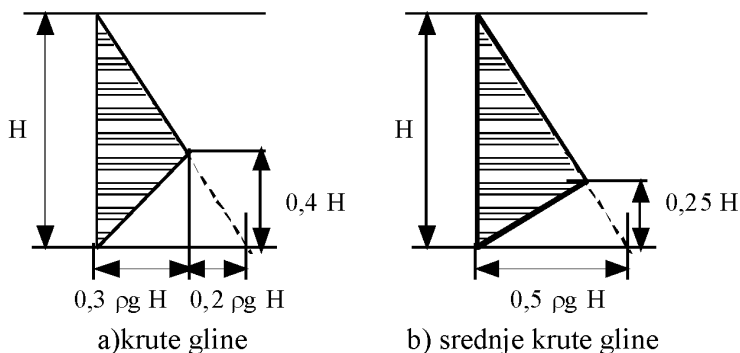
Slika 5.5 Raspodjela pritisaka na podgrade u glini (Cernica, 1995., prema Terzaghi i Peck, 1967.)

Raspodjela pritisaka kao na slici 5.5 (Terzaghi i Peck, 1967.) teoretsko je rješenje niza rezultata mjerena. Dijagram 5.5 a) vrijedi za gline s brojem stabilnosti  $N \leq 4$ . Raspodjelu sa slike 5.5 b) predlažu isti autori za osjetljive gline. Pri tom je koeficijent  $K_A$  izračunat prema jed 5.5. Faktor,  $m$ , iz jed. 5.5 je promjenjivi ovisno o vrijednosti,  $N$ , iz jed. 5.1 na način da je za  $N \leq 4$ ;  $m=1$ , a za  $N > 4$ ,  $m < 1$ . Faktor,  $m$ , (Wilson, 1974.) može poprimiti vrijednosti od 0,4-1. Koeficijent,  $K_A$ , vezan je za nedreniranu jednoosnu čvrstoću gline,  $q_u$ , na način:

$$K_A = 1 - m \frac{2q_u}{\rho * g * H} \quad (5.5)$$

Dismuke (1991.), Cernica (1995.) prema Terzaghi i Peck (1967.) za meke do srednje gline.

Tschebotarioff (1973.) predlaže za gline raspodjelu pritisaka sa slike 5.6. On metodu proračuna naziva «metoda neutralnog koeficijenta pritiska  $K_0$ », pri čemu je,  $K_0 = 0,5$ , a raspodjela pritiska je po trokutu.

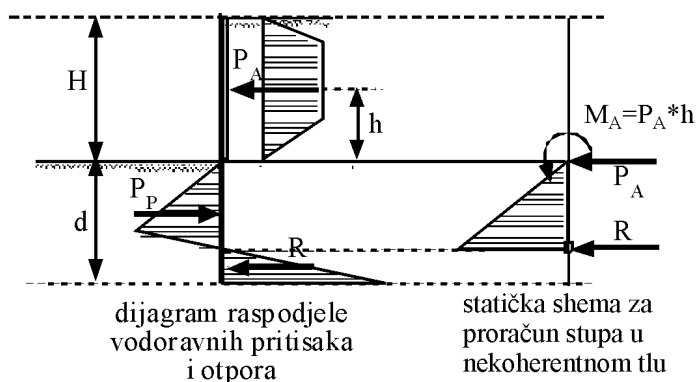


Slika 5.6 Raspodjela pritisaka (Tschebotarioff, 1973.)

### 5.2.1.3 Raspodjela pritiska na Berlinsko zide

Berlinsko zide je sustav podgrađivanja tla masovno primjenjivan pri izgradnji podzemne željeznice u Berlinu, odakle je dobio ime. Koristi se najčešće u nekoherentnim, pjeskovitim tlima u kojima nema opasnosti od pojave podzemne vode. Sastoji se od stupova ukliještenih u tlo na određenom razmaku, između kojih se sukcesivno sa spuštanjem iskopa ulažu platice.

Platice preuzimaju pritisak tla jednako kao oplata pa se može primijeniti raspodjela pritisaka kao i na višestruko pridržane oplatae. Za manje visine ove se građevine ne moraju razupirati, već pritiske preuzimaju stupovi zabijeni u tlo. U tom slučaju treba dimenzionirati ukliještenje ovih stupova u tlo. Proračun se provodi kao za pilote opterećene momentom i vodoravnom silom. Na slici 5.7 dana je shema za proračun stupova Berlinskog zida.



Slika 5.7 Shema dimenzioniranja stupa Berlinskog zida u nekoherentnom tlu

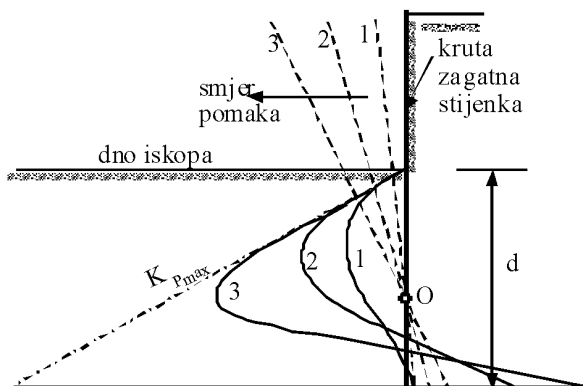
Stupovi se dimenzioniraju kao vodoravno opterećeni piloti, opterećeni aktivnim pritiskom (slika 5.7) koji se na njih prenosi preko platica. Ukupni pritisak koji otpada na jedan stup ovisi o razmaku između dva stupa. Kritični presjek s maksimalnim momentom nalazi se nešto ispod točke ulaza stupa u tlo. Dubina zabijanja određuje se kao za krute ili savitljive pilote, slobodne glave (Roje-Bonacci i Mišćević, 1997.). Krutost ovisi o dimenzijama stupova.

#### 5.2.1.4 Slobodno stojeća zagatna stijenka (žmurje)

Slobodno stojeće žmurje koristi se za podgrađivanje plićih iskopa koje je potrebno štititi od dotoka podzemne vode. To je vitka, tankostijena građevina zabijena u tlo. Kako nije spriječena deformacija slobodnog dijela, na poduporu djeluje aktivni pritisak. Opterećenje sa slobodnog dijela podupore prenosi se njenom deformacijom u zabijeni dio. Time se aktivira pasivni otpor, koji preuzima vanjsko opterećenje.

U statičkom smislu slobodno stojeća zagatna stijenka je do dna iskopa konzola, ali je njezin u tlo zabijeni dio statički neodređen. Da bi se moglo provesti proračun potrebno je uvesti neke pretpostavke.

Uvažavajući činjenicu da je pasivni otpor ovisan o veličini deformacije, to može poslužiti kao polazište za daljnje proračune. Na slici 5.8 prikazana je ovisnost raspodjele otpora tla o otklonu zabijenog dijela krutog žmurja koje zaokreće oko točke O. Pomaci obilježeni s 1, 2 i 3 rezultiraju raspodjelama pasivnog otpora označenim brojkama 1, 2 i 3. Bitno je uočiti da ni jedna krivulja raspodjele otpora ne prelazi graničnu crtu kojom je prikazan najveći mogući pasivni otpor.



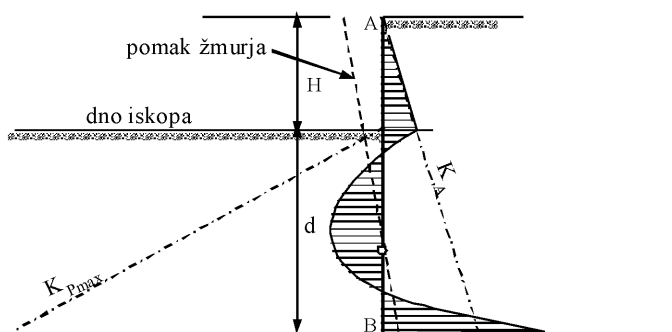
Slika 5.8 Raspodjela pritisaka u području uklještenja u zavisnosti o pomaku

Uvažavajući ovakvu raspodjelu pasivnog otpora, može se raspodjela pritisaka na slobodno stojeće žmurje u nekoherentnom materijalu, prikazati kao na slici 5.9.

Klasični proračun se svodi na rješavanje kubne jednadžbe, iterativnom metodom. Postupak je prikazan nastavno jednadžbama 5.15 i dalje.

Da bi sustav bio u ravnoteži treba zadovoljiti tri osnovna uvjeta:

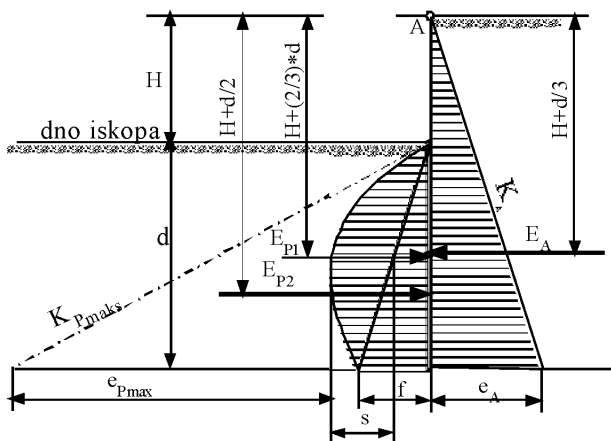
( 5.6)



Slika 5.9 Ukupna raspodjela pritisaka na slobodno stojeće žmurje

Rješenje je moguće naći i grafoanalitičkim putem uvažavajući da raspodjela pasivnog otpora ima dva dijela. Prvi dio ima oblik parabole sa strelicom,  $s$ , i visinom,  $d$ , a drugi dio ima oblik trokuta s bazom na osi apscisa, veličine,  $f$ , i visinom,  $d$ , kao na slici 5.10. Postupak je iterativan, mijenja se dubina zabijanja,  $d$ .

Moment u točki A je poznat i jednak:  $M_A=0$ . Pretpostavka je da je uvjet  $\Sigma Y=0$  zadovoljen. Uz vrijednosti sa slike 5.10 može se napisati dvije jednadžbe s dvije nepoznanice. Za rješenje jednadžbi potrebno je pretpostaviti dubinu zabijanja žmurja,  $d$ . Dubina,  $d$ , je kod slobodno stojećeg žmurja uvijek veća od slobodne visine žmurja,  $H$ . Za vrijednost u prvoj iteraciji može se uzeti da je  $d= 1,2H$ .



Slika 5.10 Geometrija potrebna za proračun slobodno stojećeg krutog žmurja

S veličinama sa slike 5.10 mogu se napisati dvije jednačbe s dvije nepoznanice uz uvažavanje da je  $\Sigma Y=0$  :

$\Sigma X$ :

$$E_A - E_{P1} - E_{P2} = 0 \quad (5.7)$$

Veličina  $E_{P1}$  može se izraziti kao:

$$E_{P1} = \frac{2}{3} * d * s \quad (\text{površina parabole strelice } s) \quad (5.8)$$

a  $E_{P2}$  kao:

$$E_{P2} = \frac{1}{2} * d * f \quad (\text{površina trokuta baze } f) \quad (5.9)$$

pa se jednačba 5.7 može pisati kao:

$$0,5 * K_A * \rho * g * (H + d)^2 - 0,5 * d * f - \frac{2}{3} * s * d = 0 \quad (5.10)$$

odakle je moguće izraziti,  $f$ , kao funkciju od,  $s$ :

$$f = \frac{2E_A}{d} - \frac{4s}{3} \quad (5.11)$$

Iz  $\Sigma M_A$  može se dobiti izraz:

$$E_A * \frac{2}{3} * (H + d) - E_{P2} * \left(H + \frac{2}{3}d\right) - E_{P1} * \left(H + \frac{d}{2}\right) = 0 \quad (5.12)$$

odnosno:

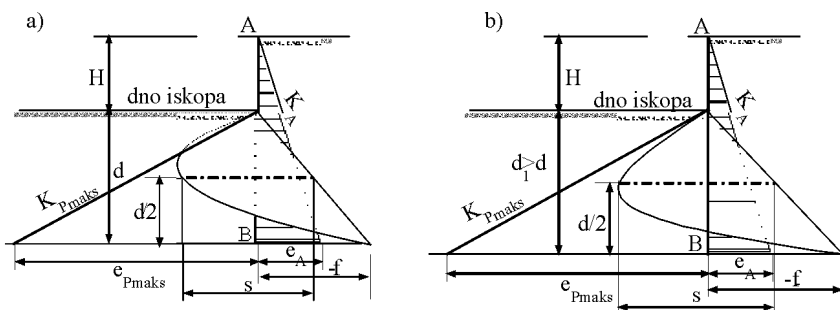
$$E_A * \frac{2}{3} * (H + d) - 0,5 * d * f * \left(H + \frac{2}{3}d\right) - \frac{2}{3} * s * d * \left(H + \frac{d}{2}\right) = 0 \quad (5.13)$$

pri čemu  $E_A$  iz jednačbe 5.10 ne obuhvaća sva opterećenja (hidrostatički pritisak, vanjske sile i ostala opterećenja) koja djeluju na žmurje, prema opterećenjima iz poglavlja 2, već samo aktivni pritisak. Kada se ova opterećenja uključe u proračun, jednačba 5.10 treba sadržati utjecaj i tih sila.

Kada se za,  $f$ , uvrsti vrijednost iz jed. 5.11 u jed. 5.13 dobije se rješenje za,  $s$ :

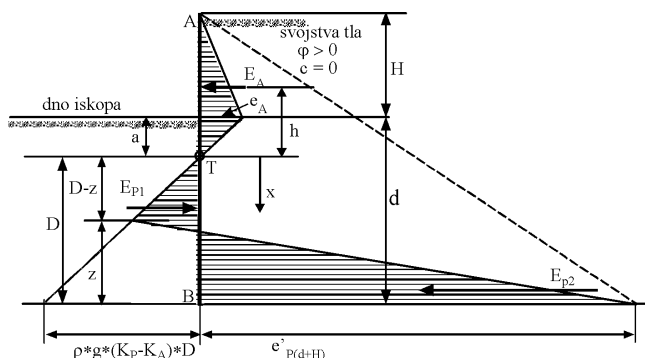
$$s = (3 * E_A * H) / d^2 \quad (5.14)$$

S vrijednostima za,  $f$  i  $s$ , može se nacrtati dijagram otpora na uklještenom dijelu žmurja. Vrijednosti iz dijagrama moraju zadovoljavati uvjet da krivulja dijagrama pasivnog otpora ni u jednoj točki ne siječe pravac najveće moguće vrijednosti pasivnog otpora kao na slici 5.11.



Slika 5.11 Grafička kontrola rezultata dimenzioniranja slobodno stojećeg krutog žmurja: a) ne zadovoljava; b) zadovoljava

Numerički način za određivanje dubine zabijanja slobodno stojećeg žmurja zahtijeva određivanje točke, T, kod koje je ukupni pritisak na žmurje jednak nuli, kao na slici 5.12 (za nekoherentno tlo).



Slika 5.12 Slobodno stojeća kruta zagatna stijenka u nekoherentnom materijalu, ukupni dijagram pritiska

S oznakama na slici 5.12 može se iz sličnosti dvaju trokuta izračunati položaj točke, T, u kojoj je pritisak na stijenku jednak nuli, tj. veličina, a:

$$a = \frac{e_A}{\rho * g * (K_P - K_A)} \quad (5.15)$$

Da bi se ograničila veličina deformacije u području pasivnog otpora potrebno je za računsku veličinu pasivnog otpora koristiti faktor sigurnosti od,  $F_{sP} = 2$  do 3,.

Iz zbroja vodoravnih sila,  $\Sigma X=0$ , može se dobiti točka prijelaza pasivnog otpora tj. vrijednost, z, kako slijedi:

$$E_A + E_{P2} - E_{P1} = 0 \quad (5.16)$$

Zbog jednostavnosti može se označiti kao,  $e_d$ :

$$e_d = \rho * g * (K_P - K_A) * D \quad (5.17)$$

pa se može dio jednadžbe 5.16 pisati kao:

$$E_{P2} - E_{P1} = \left( e_d + e'_{P(d+H)} \right) \frac{z}{2} - e_d \frac{D}{2} \quad (5.18)$$

odakle izlazi:

$$E_A + \left( e_d + e'_{P(d+H)} \right) \frac{z}{2} - e_d \frac{D}{2} = 0 \quad (5.19)$$

odakle se može izraziti veličina, z, kao funkcija od, D, kao:

$$z = \frac{e_d * D - 2E_A}{e_d + e'_{P(d+H)}} \quad (5.20)$$

pri čemu je,  $e'_{P(d+H)}$ :

$$e'_{P(d+H)} = \rho * g * (d + H) * K_P - \rho * g * d * K_A \quad (5.21)$$

Da bi se sustav riješio koristi se jednadžba momenata, tj. drugi uvjet ravnoteže sustava,  $\Sigma M = 0$ . Zbroj momenata s obzirom na točku B u dnu zagata odabrane dubine, d, glasi:

$$E_A * (D + h) + (e_d + e_{P(d+H)}) \frac{z}{2} * \frac{z}{3} - e_{P(d+H)} \left( \frac{D}{2} \right) \left( \frac{D}{3} \right) = 0 \quad (5.22)$$

odnosno:

$$6E_A * (D + h) + (e_d + e_{P(d+H)}) z^2 - e_{P(d+H)} D^2 = 0 \quad (5.23)$$

u koju kad se uvrsti, z, iz jednadžbe 5.20 izlazi:

$$6E_A (D + h) + \left( \frac{1}{e_d + e_{P(d+H)}} \right) \left( e_d^2 D^2 - 4e_d D E_A + 4E_A^2 \right) - e_{P(d+H)} D^2 = 0 \quad (5.24)$$

Kako su vrijednosti,  $e_d$ , i  $e_{P(d+H)}$ , zavisne o dubini, D, to potencija u jed. 5.23 raste. Rješenje se traži iterativno i nalazi u nekoliko koraka.

Za dimenzioniranje platica (čeličnih, drvenih) od kojih se izvodi zagatna stijenka, potrebno je odrediti najveći moment savijanja sustava. On se nalazi u točki u kojoj je zbroj poprečnih sila jednaka nuli odnosno:

$$E_{P1} = E_A \quad (5.25)$$

Za proračun potrebnog momenta moguće je pisati:

$$M_{maks} = E_A (h + x) - E_{P1} \left( \frac{x}{3} \right) = E_A (h + x) - E_A \left( \frac{x}{3} \right) \quad (5.26)$$

odnosno:

$$M_{\text{maks}} = E_A \left( h + \frac{2}{3} x \right) \quad (5.27)$$

Uvažavajući jednadžbu 5.24 može se pisati:

$$E_{P1} = \frac{1}{2} \rho * g (K_P - K_A) x^2 \quad (5.28)$$

odakle se, x, može izraziti kao:

$$x = \left[ \frac{2E_A}{\rho * g (K_P - K_A)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.29)$$

pa se zamjenom za, x, u jednadžbi 5.26 dobiva veličina traženog momenta:

$$M_{\text{maks}} = E_A \left\{ h + \frac{2}{3} \left[ \frac{2E_A}{\rho * g (K_P - K_A)} \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (5.30)$$

Za praktičnu primjenu kao i za brza rješenja mogu se naći nomogrami (Cernica, 1995.). U svim slučajevima potrebno je pretpostaviti dubinu zabijanja, d, koju se proračunom samo provjerava.

U tabeli 5.1 dani su približni podaci o dubini zabijanja u ovisnosti o broju udaraca, N, standardnog penetracijskog pokusa.

Ťabela 5.1 Približne vrijednosti dubine zabijanja slobodno stojećeg Źmurja, d, u nekoherentnom tlu (Cernica, 1995.)

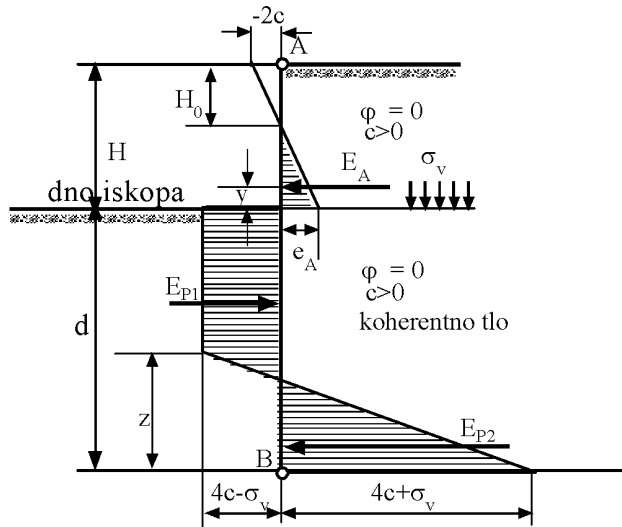
Broj udaraca SPP-a, N	Relativna gustoća	Dubina zabijanja, d
0-4	vrlo rahlo	2,0 H
5-10	rahlo	1,5 H
11-30	srednje zbijeno	1,25 H
31-50	zbijeno	1,0 H
preko 50	jako zbijeno	0,75 H

Relativno velika dubina zabijanja, d, uglavnom zadovoljava uvjet zaštite od pojave hidrauličkog sloma.

Bitan čimbenik u sustavu je pasivni otpor. Da bi se postigla njegova najveća moguća vrijednost, potrebne su nedozvoljene velike deformacije. Cernica (1995.) preporuča smanjenje pasivnog otpora na 30 % do 50 % najveće moguće vrijednosti odnosno ( $F_s = 2-3$ ).

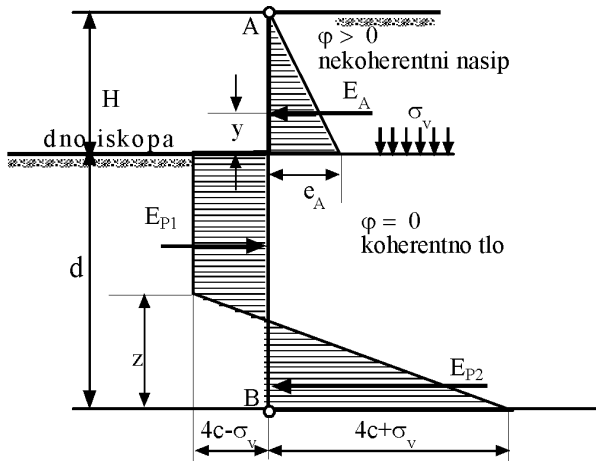
U koherentnim materijalima pasivni otpor se razmatra kao funkcija kohezije, c, odnosno nedrenirane jednoosne čvrstoće,  $q_u$ . Na slici 5.13 prikazana je raspodjela pritisaka i otpora na slobodno stojeće kruto Źmurje u koherentnom tlu ( $\varphi=0$ ;  $K_A=1$ ) potrebna za proračun dubine zabijanja, d.





Slika 5.13 Raspodjela pritiska i otpora tla u koherentnom tlu ( $c, \varphi=0$ ) (Cernica, 1995.)

Može se dogoditi da je žmurje zabijeno u koherentno tlo, a opterećeno nekoherentnim. U tom je slučaju aktivni pritisak do pojave gline važeći za nekoherentno tlo kao na slici 5.14.



Slika 5.14 Raspodjela pritiska nekoherentnog nasipa ( $c=0, \varphi$ ) i otpora koherentnog tla ( $c, \varphi=0$ ) potrebna za proračun dubine zabijanja,  $d$  (Cernica, 1995.)

Proračun treba zadovoljiti uvjete jednadžbe 5.6. Slijedom toga za zbroj vodoravnih sila može se pisati:

$$E_A - E_{P1} + E_{P2} = 0 \quad (5.31)$$

Za razliku sila pasivnog otpora  $E_{P1}-E_{P2}$  može se pisati:

$$E_{P2} - E_{P1} = (4c - \sigma_v + 4c + \sigma_v) \frac{z}{2} - (4c - \sigma_v) * d \quad (5.32)$$

odnosno:

$$E_{P2} - E_{P1} = 4cz - (4c - \sigma_v) * d \quad (5.33)$$

Ako se izraz 5.33 uvrsti u 5.31 dobije se jednačba:

$$E_A + 4cz - (4c - \sigma_v) * d = 0 \quad (5.34)$$

koja kada se riješi po  $z$  daje:

$$z = \frac{(4c - \sigma_v) * d - E_A}{4c} \quad (5.35)$$

Drugi uvjet je da je zbroj momenata oko točke B, na dnu žmurja zabijenog do dubine  $d$ , jednak nuli. Jednačba za taj zbroj glasi:

$$E_A (d + y) - (4c - \sigma_v) \frac{d^2}{2} + 8c \frac{z^2}{6} = 0 \quad (5.36)$$

odnosno:

$$d^2 (4c - \sigma_v) - 2E_A (d + y) - \frac{8cz^2}{3} = 0 \quad (5.37)$$

Kada se u jednačba 5.37 uvrsti izraz 5.35 za  $z$ , dobije se:

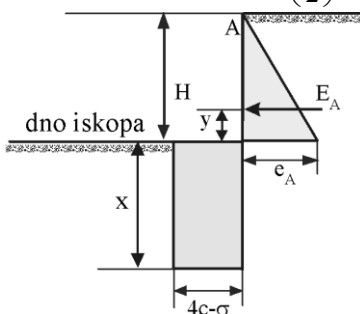
$$d^2 (4c - \sigma_v) - 2E_A (d + y) - \left(\frac{8}{3}c\right) \left(\frac{1}{4c}\right)^2 [(4c - \sigma_v)d - E_A]^2 = 0 \quad (5.38)$$

Rješenje se dobiva iteracijom. Da bi se postigao zadovoljavajući faktor sigurnosti, koji ovisi o tome radi li se o trajnoj ili privremenoj građevini, preporuča se dobivenu potrebnu dubinu zabijanja povećati za 20 do 40 %.

Najveći moment savijanja, potreban za dimenzioniranje i odabir vrste i tipa žmurja, nalazi se u točki gdje je zbroj vodoravnih napreznja jednak nuli.

S oznakama na slici 5.15 može se pisati jednačba za najveći moment savijanja:

$$M_{maks} = E_A (x + y) - (4c - \sigma) \left(x\right) \left(\frac{x}{2}\right) \quad (5.39)$$



Slika 5.15 Veličine potrebne za određivanje najvećeg momenta savijanja za žmurje u koherentnom tlu (Cernica, 1995.)

Uvažavajući da je iz uvjeta zbroja vodoravnih sila,  $\Sigma X=0$ , može se pisati:

$$E_A=(4c-\sigma)x \quad (5.40)$$

odakle je, x:

$$x = \left( \frac{E_A}{4c - \sigma} \right) \quad (5.41)$$

Za jednostavna i brza rješenja mogu se koristiti nomogrami koje daje Cernica (1995.).

### 5.2.1.5 Sigurnost od hidrauličkog sloma

U slučaju da u tlu postoji podzemna voda, čija se razina ne može sniziti zahvatima s vanjske strane podgrade, a u jami je predviđen rad u suhom, voda će se crpiti iz jame. Najčešće se javlja u nekoherentnim materijalima, ali se može javiti i u obliku proboja nepropusnog sloja na dnu jame, ukoliko ovaj nije dovoljno debeo. Može izazvati katastrofalne posljedice. Na pojavu hidrauličkog sloma najosjetljiviji su zbijeni pijesci.

Pri projektiranju podgrada koje rovove i jame štite od vode, potrebno je predvidjeti mogućnost pojave hidrauličkog sloma u dnu jame, kako bi se prostor unutar podgrada potpuno osigurao od prodora vode i od urušavanja koje prodor vode izaziva.

Usljed razlike potencijala dolazi do strujanja vode oko podgrade (slika 2.36) i izviranja vode kroz dno rova ili jame. Najveći je učinak uz samu podgradu, gdje je najveći IZLAZNI hidraulički gradijent,  $i_{izl.}$ . Ovaj se gradijent može izračunati, kako je to prikazano na slici 2.34 (jednadžba 2.26), pomoću strujne mreže. Računom se određuje dubina zabijanja žmurja (podgrade, platica i sl.), d, ispod dna iskopa, dovoljna da izlazni gradijent bude zadovoljavajuće manji od kritičnog. Kod višestruko pridržanih podgrada, koje rov brane i od dotoka podzemne vode, dubina zabijanja žmurja, d, je određena isključivo zaštitom od hidrauličkog sloma.

Hidraulički slom nastaje kada izlazni gradijent,  $i_{izl.}$ , na dnu rova, postane veći od KRITIČNOG gradijenta, koji iznosi:

$$i_{krit.} = \frac{(\rho_{\check{c}\check{c}} - \rho_w)}{\rho_w} \quad (5.42)$$

pri čemu je,  $\rho_{\check{c}\check{c}}$ , gustoća čvrstih čestica tla,  $\rho_w$ , gustoća vode. Izlazni gradijent moguće je odrediti hidrauličkim proračunom procjeđivanja ispod podgrade. Faktor sigurnosti od hidrauličkog sloma tla mora zadovoljiti uvjet  $F_s > 1,5$  odnosno:

$$F_s = \frac{i_{krit.}}{i_{izlaz.}} \geq 1,5 \quad (5.43).$$

### 5.2.1.6 Dimenzioniranje razupora

Razupore se dimenzioniraju u ovisnosti o načinu oslanjanja na podgradu. Podgrada može biti pridržana točkasto kao na slici 5.16, preko uspravnih veznih greda ili preko vodoravnih veznih greda (kao na slici 5.1). Iz dijagrama bočnog

pritiska i rasporeda oslonaca izračuna se sila u razupori. Razupora se ponaša kao stup pritisnut tlačnom silom i tako se i dimenzionira. Kosnici su opterećeni kosim silama te se u njima javljaju i momenti savijanja, te ih tako treba i dimenzionirati. Podupore i kosnici moraju se provjeriti i na izvijanje.

## 5.2.2 Izvedba

Način izvedbe ovisi o vrsti zaštite, te će na taj način biti ovdje i izložena. Izvedba se može podijeliti na dva tipa. Jedno su oplatae koje se izvode usporedno s iskopom. Drugo su građevine izvedene od platica prethodno zabijenih u tlo, nakon čega se vrši iskop unutar prostora omeđenog platicama.

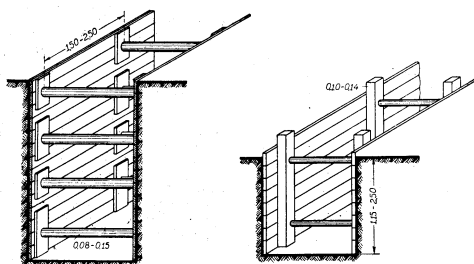
### 5.2.2.1 Višestruko razuprte oplatae

Višestruko razuprte oplatae uglavnom nisu zabijene u tlo. Mogu se izvoditi od dasaka, drvenih ili čeličnih platica. Danas postoje na tržištu gotove ploče za oplatae. Proizvođači uz ove oplatae daju i tabele za proračun i dimenzioniranje, što izvođačima znatno olakšava posao. Razuprte su na više mjesta.

Razupore su danas češće čelične nego drvene. Razupore raspolažu mehanizmom na vijak pomoću kojeg se učvršćuju na oplatu. Uz metalne razupore se na radilištima nailazi i na poneku drvenu razuporu. One se upotrebljavaju iz sigurnosnih razloga. Drvo, u slučaju preopterećenja razupora, počinje pucketati prije nego dođe do loma i na taj način upozorava da je potrebno napustiti rov. Ovo iskustvo poznato je iz rudarstva.

Oplatae se koriste za izvođenje dubokih kanala raznih namjena. Kod takvih iskopa pojavljuju se velike dubine koje treba samo privremeno podržati. Oplatae se stavljaju i vade kako napreduje ugradnja opreme u rovove kojoj su namijenjeni. Zatim se rovovi zatrpavaju propisanim vrstama tla uz zbijanje.

Višestruko razuprte oplatae mogu se koristiti kod zatvorenih tlocrta, kružnih tlocrta, izduženih tlocrta. Mogu se razupirati, podupirati i sidriti. Bit je da nisu vododržive. Zatvoreni tlocrtni oblici većih širina podupiru se kosnicima ili se koriste dijagonalne razupore. Ako se izvode za zaštitu širokih građevnih jama, podupiru se kosnicima. Ovaj način razupiranja oplatae bio je korišten u prošlosti uglavnom sve do pojave predgotovljenih, tipiziranih oplatae. Danas ga se može rijetko vidjeti na gradilištu. Na slici 5.16 prikazana su dva primjera razuprtih oplatae kanala.

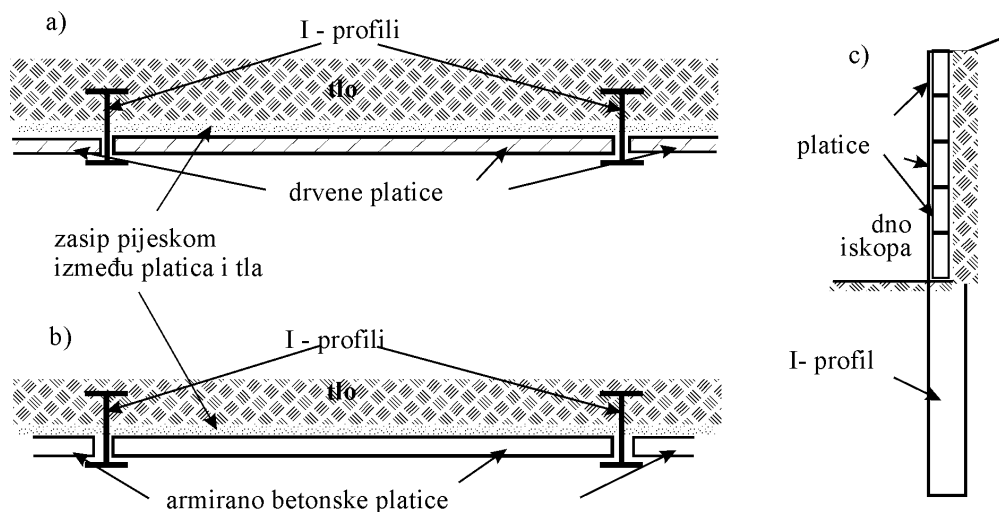


Slika 5.16 Drvene višestruko razuprte oplatae kanala

### 5.2.2.2 Berlinsko zide

Kod odabira tehnologije ili vrste izvedbe podgrade, ključnu ulogu igra voda. U tom smislu postoje dvije vrste ovih građevina. Jedne moraju biti vodonepropusne, pa su onda i opterećene hidrostatičkim tlakom. Druge ne moraju biti vodonepropusne, pa na njih ne djeluje pritisak vode, tj. hidrostatički tlak. U ovu drugu grupu spada tehnologija tzv. berlinskog zida. To je podgrada, koja se sastoji od stupova – vodilica zabijenih u tlo na određenom razmaku do potrebne dubine, i između vodilica umetnutih platica, koje se postepeno spuštaju, prateći napredovanje iskopa. Platiche mogu biti drvene, metalne ili armirano–betonske. Ove se građevine ne dimenzioniraju na hidrostatički pritisak.

Nije nužno da stupovi budu izvedeni od čeličnih I profila. Mogu se koristiti i složeni čelični profili kako se to vidi na slici 5.18. Stupovi mogu biti izvedeni od rashodovanih željezničkih tračnica, koje se često koriste za privremene građevine pri radovima na željeznici, ali se mogu koristiti i na drugim mjestima. Čelični profili se koriste kada se ne očekuju poteškoće pri zabijanju. Tamo gdje se očekuje pojava većih komada kamena odnosno samaca ili kada treba pridržati nekontrolirani stari nasip, stupove za Berlinsko zide je bolje izvoditi tehnologijom koja se primjenjuje za bušene pilote. Ove tehnologije olakšavaju prolaz kroz zapreke u tlu kroz koje zabijeni profili ili teško prolaze ili se uopće ne mogu zabiti. Stupovi za Berlinsko zide mogu se izvesti i tehnologijom mlaznog injektiranja s ugradnjom armature. Na slici 5.17 prikazani su detalji berlinskog zida.



Slika 5.17 Detalji berlinskog zida: tlocrt a) s drvenim platicama; b) s armirano betonskim platicama; c) poprečni presjek



Slika 5.18 Berlinsko ziđe

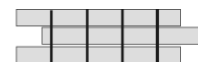
### 5.2.2.3 Žmurje

Žmurje se može izvoditi od drvenih dasaka, drvenih, posebno oblikovanih platica, čeličnih platica i armiranobetonskih predgotovljenih platica.

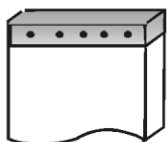
Na slici 5.19 prikazano je nekoliko tlocrta žmurja od drvenih dasaka, a na 5.20 detalji žmurja od drvenih, za tu svrhu oblikovanih, platica.



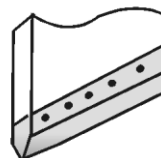
dvoredno zabijene daske



talpa složena od tri daske povezane čavlina



daska ojačana limom na glavi



daska ojačana limom na vrhu

Slika 5.19 Presjeci žmurja od drvenih dasaka (gore) i detalji ojačanja glave i vrha

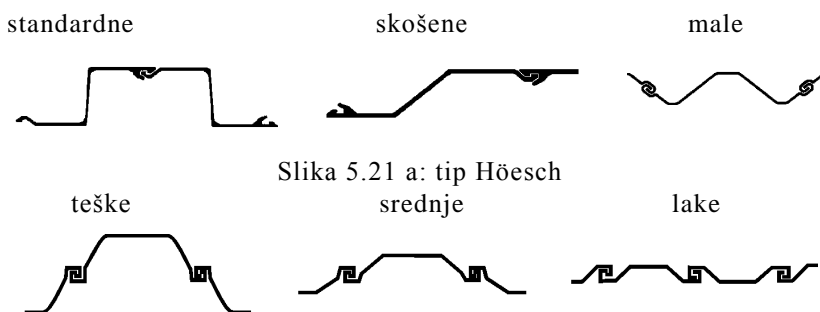


Slika 5.20 Presjeci platice drvenog žmurja

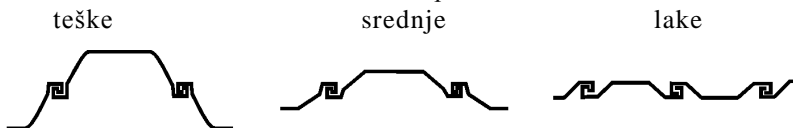
Drvene platice debljine su 8 -15 cm. Širine su 2 do 3 puta veće od debljine. Na slici 5. 20 a) je platice na riblju kost, na slici 5.20 b) je platice na pero i utor a na slici 5.20 c) je platice na utor s perom od tvrdog drva.

Za veće visine koriste se čelične platice, koje nose nazive prema proizvođačima. Spajaju se posebno oblikovanim krajevima, «bravama».

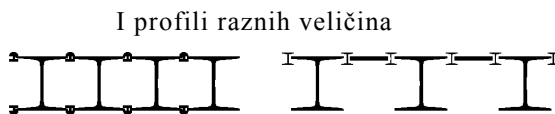
Na slici 5.21 prikazano je nekoliko poprečnih presjeka čeličnih platica, a na slici 5.22 nekoliko posebnih čeličnih platica.



Slika 5.21 a: tip Höesch

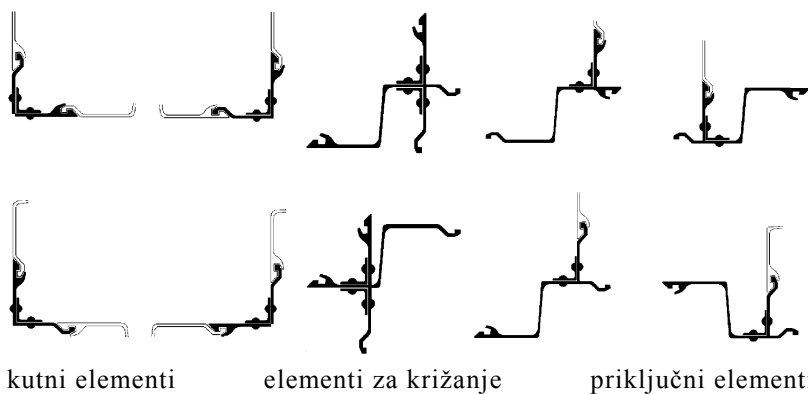


Slika 5.21 b: tip Larsen



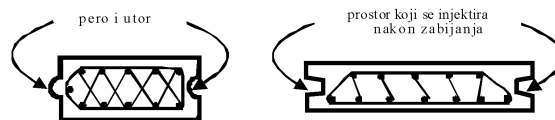
Slika 5.21 c: tip Peine

Slika 5.21 Poprečni presjeci čeličnih platica



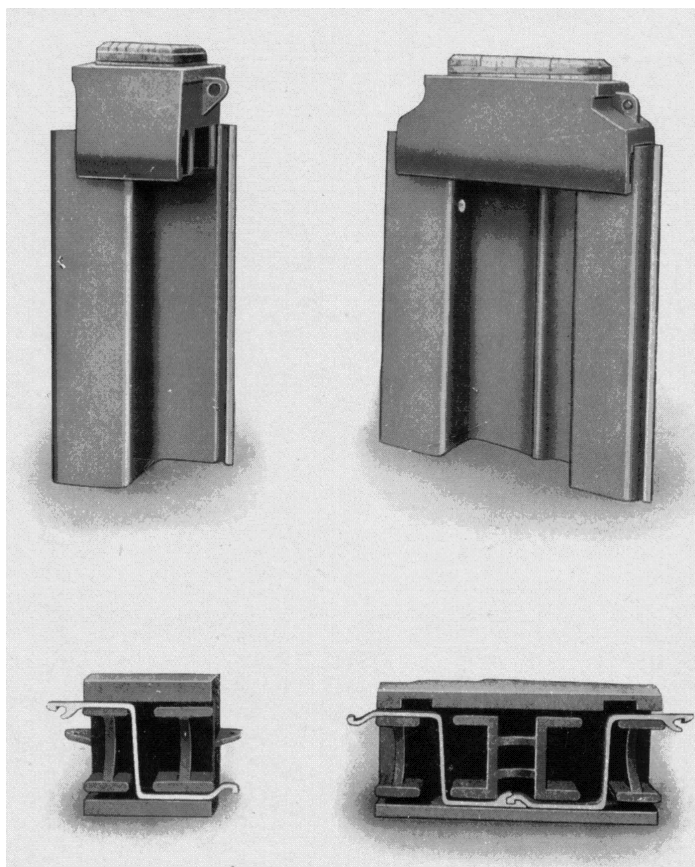
Slika 5.22 Posebni oblici čeličnih platica (Höesch-Kölnneuessen, 1937.)

Armirano-betonska platice zamijenile su drvene u onim zemljama koje su imale jaču industriju cementa nego čelika. U tvornicama betona mogle su se izraditi vrsne platice u gotovo laboratorijskim uvjetima. Daljnji postupak s njima je isti kao i s ostalim platicama. Na slici 5.23 prikazano je nekoliko poprečnih presjeka armirano betonskih platice.



Slika 5.23 Poprečni presjeci armirano betonskih platice

Između nabijača i platice se postavljaju nastavci za nabijanje (slika 5.24). Oni osiguravaju pravilno vođenje platice. Izvedeni su tako da na vrhu imaju nastavak od drveta koji umanjuje buku od udarca bata o nastavak za nabijanje. Noviji tipovi nabijača (makara) imaju ove dijelove ugrađene u sam uređaj.



Slika 5.24 Posebni nastavci za zabijanje plaica (Hoesch-Kölnneussen, 1937.)



Sve platice se ugrađuju tako da se zabijaju u tlo. Za zabijanje se koriste nabijači. Prvi nabijači pokretani su ljudskom snagom, podizanjem rukama i padanjem. U slijedećem koraku korišten je tronožac s kolotutom, što je olakšalo dizanje i omogućilo upotrebu težih nabijača. Slijedeći je korak bio nabijač pokretan parnim strojem. Danas se koriste vibronabijači. Jedan od njih prikazan je na slici 5.25.

Platice koje se koriste za kanale nabijaju se redom. Ako se koriste za zatvorene oblike, treba voditi računa o redoslijedu zabijanja. Proizvođači u svojim priručnicima daju upute o redoslijedu zabijanja platice.



Slika 5.25 Nabijanje čeličnih platice hidrauličkim vibro-nabijačem

### 5.3 TRAJNE PODUPORE OPTEREĆENE TLOM I VODOM (ZAGATNE STIJENKE)

Zagatne stijenke su vitke tankostjene građevine zabijene u tlo ili izvedene u tlu. Služe za zaštitu iskopa, kada je prostor ograničen, te je potrebno promjene visine u tlu izvesti na što manjem prostoru. Lice zagatne stijenke je uvijek uspravno.

Neki autori povezuju ih s građevinama koje s jedne strane imaju tlo, a s druge vodu kao što su na primjer pristani, plovni kanali, suhi dokovi i slično. Mogu djelovati kao samostalne građevine i/ili sastavni dijelovi složenih građevina. Mogu biti trajne građevine ili privremene građevine. U bilo kojoj prethodnoj kombinaciji služe i kao zaštita građevnih jama.

Postoje i takve građevine, kod kojih je prostor ograđen zagatnom stijenkom, naknadno ispunjen tлом. Na taj način nastaju umjetni otoci i zagati.

Najstarije zagatne stijenke izvodile su se zabijanjem drvenih platica jedne do druge. Nagli su razvoj doživjele pojavom čelika, od kojeg se i danas izrađuju razni tipovi platica, najčešće nazvani po proizvođaču. Ove se platice gotovo uvijek upotrebljavaju tamo gdje postoji mogućnost da ih se po završetku građenja može izvaditi i ponovo koristiti. Na slici 5.26 dva su primjera primjene čeličnih platica.



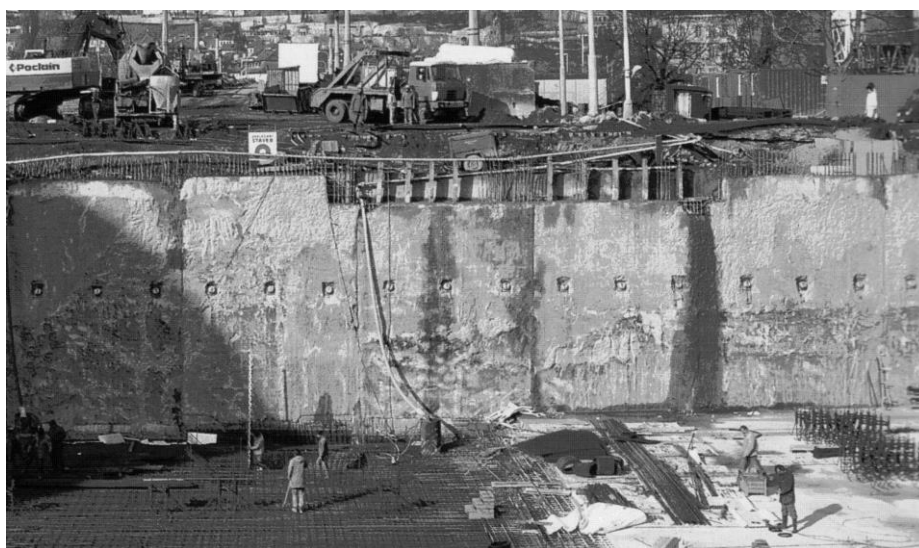
Slika 5.26 Zagatne stijenke od čeličnih platica

Na slici 5.27 prikazan je detalj čeličnog žmurja unutar kojeg se vrši iskop.



Slika 5.27 Detalj čeličnih platica, čelična zagatna stijenka

Tehnologija armiranog betona dala je novi doprinos razvoju zagatnih stijenki. Postoji više mogućnosti izvedbe zagatnih stijenki od armiranog betona. Najpoznatija je metoda izrade armirano-betonske dijafragme, neprekinutog, kampadno izrađenog zida u tlu (slika 5.28). Danas se sličnom tehnologijom izvode dijafragme od predgotovljenih armirano-betonskih elemenata (slika 5.29).



Slika 5.28 Armiranobetonska dijafragma s jednim redom sidara (Zakladani staveb, 1999.)

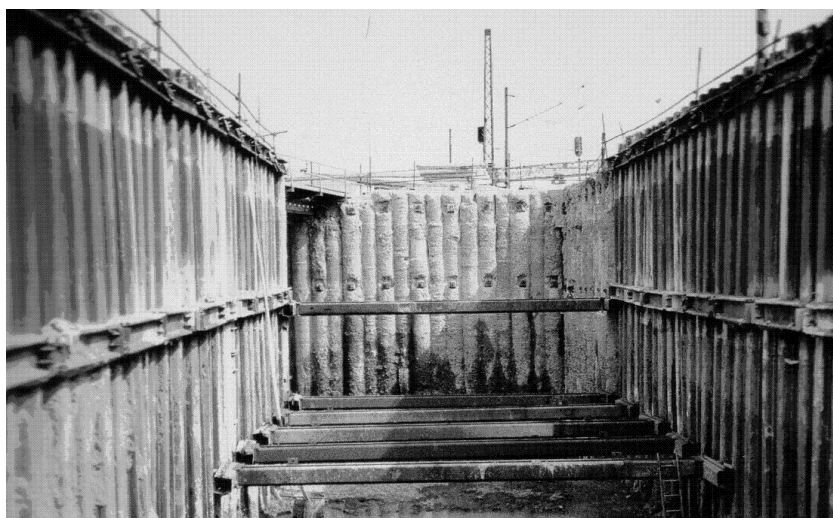


element pri ugradnji i grabilica

ugrađeni elementi

Slika 5.29 Neprekinuta AB zagatna stijenka od gotovih elemenata u izvedbi (Zakladani staveb, 1999.)

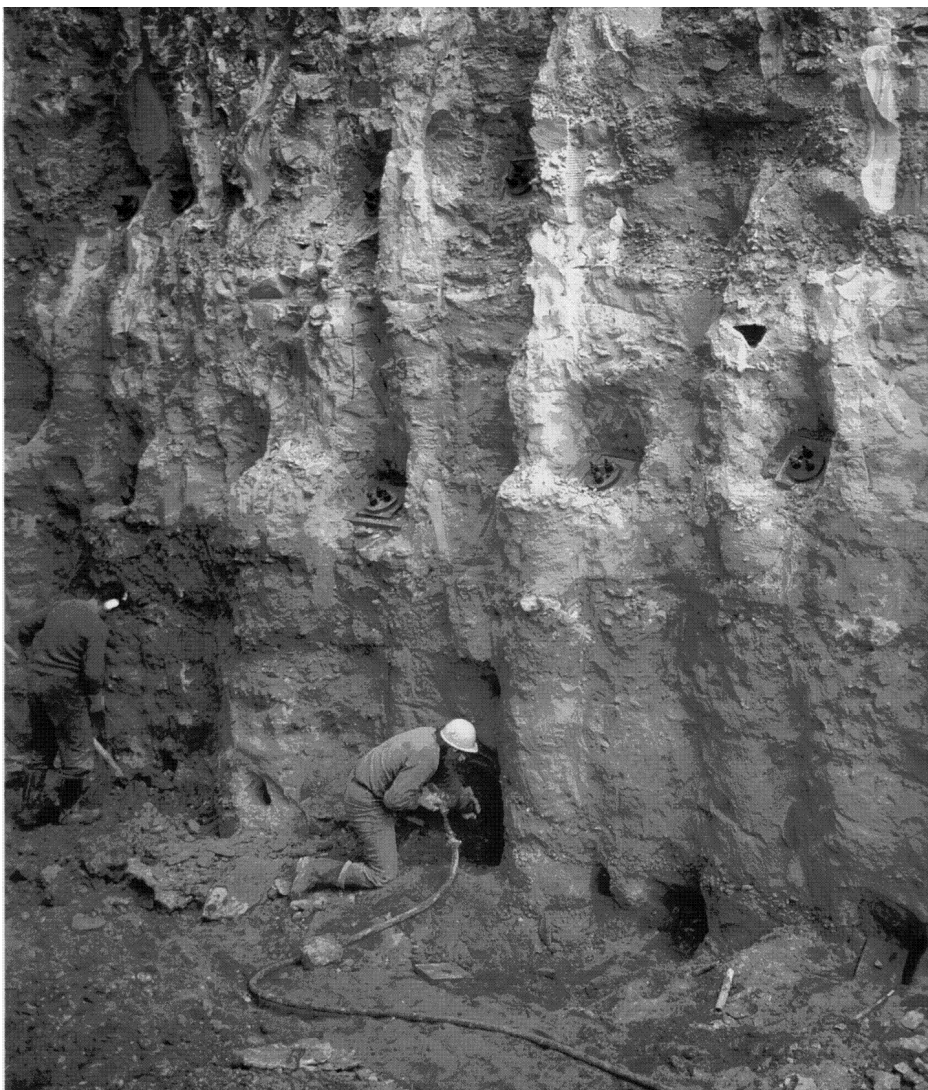
Metoda pilot do pilota također spada, po materijalu od kojeg je izvedena, u armiranobetonske građevine. Na slici 1.8 prikazana je jedna takva građevina kod koje piloti ne dodiruju jedan drugoga. To je moguće kada zagatna stijenka ne štiti prostor od dotoka vode. Ako zagatna stijenka mora biti vododrživa izvode se dva reda pilota od kojih je jedan zasječen u drugi (prikazani u dnu slike 5.30).



Slika 5.30 Zagatna stijenka izvedena metodom pilot do pilota s veznim gredama i sidrima (Zakladani staveb, 1999.)

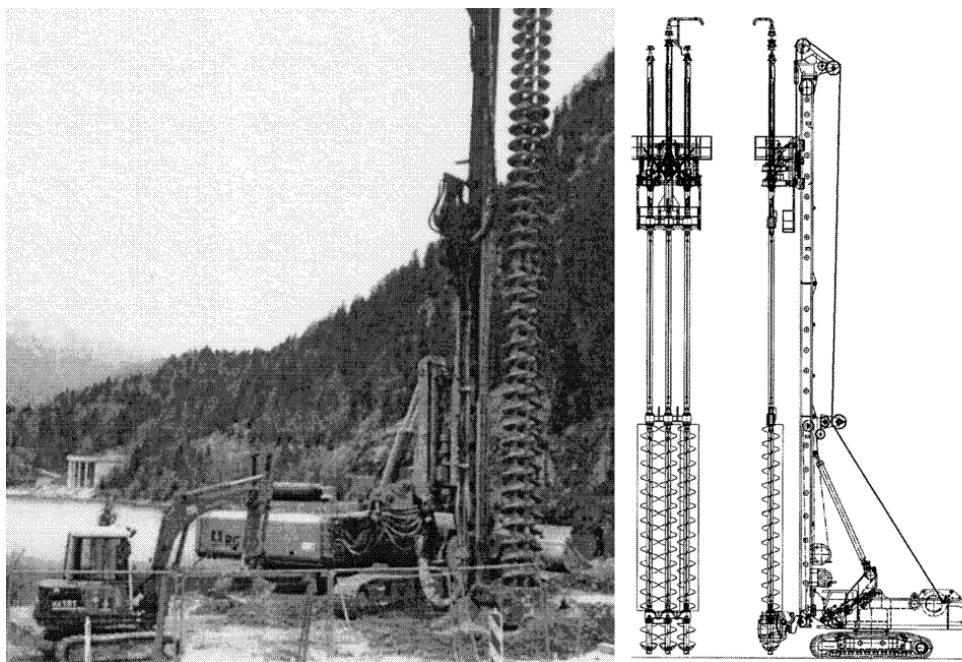
Najnovije tehnologije koriste mlazno injektiranje za izradu neprekinutih zavjesa u tlu. U mlazno injektirana tijela ugrađuje se armatura utiskivanjem u svježe ugrađenu smjesu. Tako nastaju nove vrste armirano-betonskih geotehničkih građevina.

Sve zagatne stijenke moguće je sidriti te na taj način povećati njihovu stabilnost. Na slici 5.31 prikazana je zagatna stijenka od mlazno injektiranih stupnjaka, ojačanih sidrima.



Slika 5.31 Zagatna stijenka od mlaznoinjektiranih stupnjaka učvršćena sidrima (Zakladani staveb, 1999.)

Ovo nije zadnja riječ u tehnologiji izvedbe neprekinutih dijafragmi u tlu. Za mekše materijale, koji se mogu razarati svrdlom, pojavila se metoda miješanja na licu mjesta (Mixed in place). Pokazala se učinkovita za izradu vodrživih zidova i privremenu zaštitu građevnih jama.



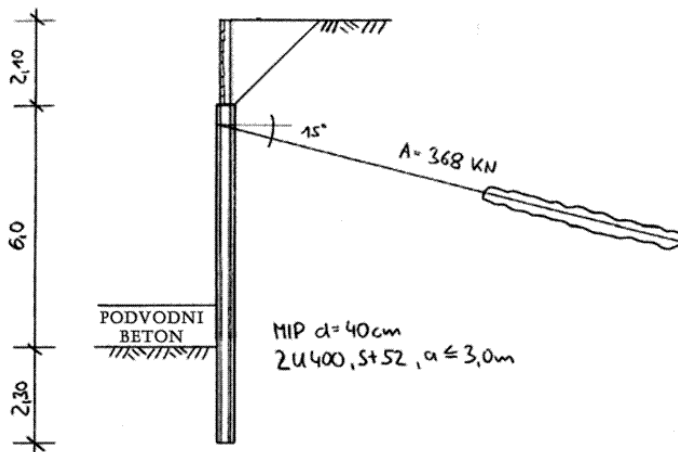
Slika 5.32 Uređaj za "Mixed in place" (MIP) izvedbu zagatnih stijenki (Bauer, 2004.)

Od svih nabrojanih tehnologija za trajne se građevine koriste zagatne stijenke od čeličnog žmurja, armiranobetonske neprekinute dijafragme, sustav pilot do pilota koji su armirani i sustav mlazno injektiranih stupnjaka. Ove građevine mogu biti samostalne ili sastavni dio nekih drugih složenijih sustava.

Zagatne stijenke u statičkom smislu mogu biti slobodno stojeće, pridržane na slobodnom dijelu u jednoj točki zategom, sidrom, razuporom ili kosnikom i pridržane u više točaka po visini slobodnog lica.

Na slici 5.33 prikazana je usidrena zagatna stijenka izrađena pomoću dvije tehnologije. Gornji dio izveden je tehnologijom Berlinskog зида, a donji MIP tehnologijom. Zanimljiv je detalj ugradnje stupova Berlinskog зида (čeličnih profila) u vrh MIP tehnologijom izvedene zagatne stijenke.

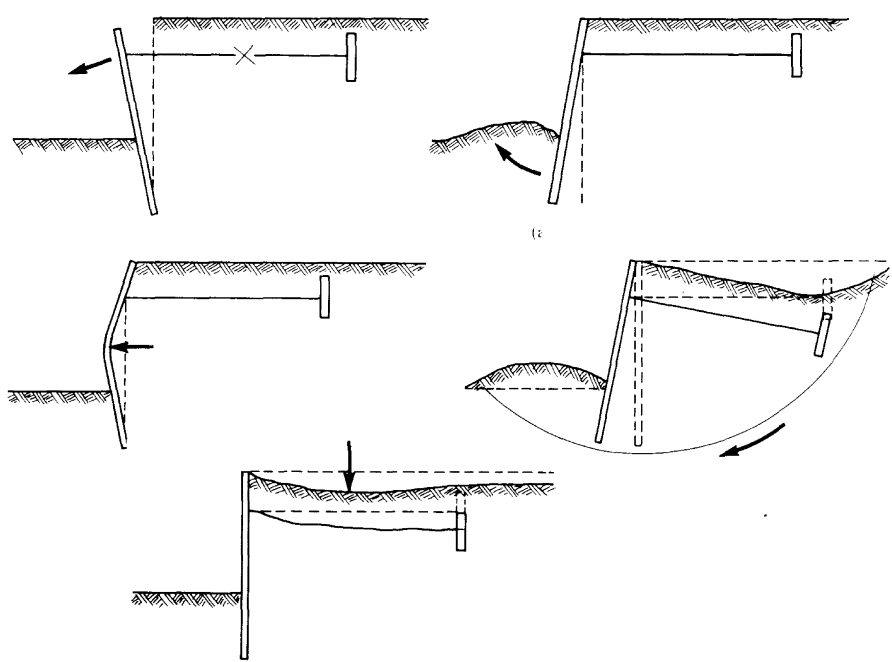
Uz fotografiju je prikazana skica poprečnog presjeka nosivog sustava s veličinama nosivih dijelova građevine (Bauer, 2004.).



Slika 5.33 Zagatna stijenska izvedena MIP tehnologijom , gornji dio Berlinsko zide (Bauer, 2004.)

### 5.3.1 Proračun i dimenzioniranje

Na slici 5.34 prikazani su mogući načini sloma zagatnih stijenki. Opaža se da se na svim crtežima pojavljuje zatega. To je stoga što se za veće dubine iskopa zagatna stijenka mora pridržati da bi bila ekonomične dužine. Vrlo su rijetke slobodno stojeće zagatne stijenke kao trajne građevine, iako ih ima u praksi. Pridržanje ne mora biti zatega već može biti sidro ili razupora koju se kasnije zamjenjuje s nekim od nosivih dijelova građevine. Bitno je da na slobodnom dijelu zagatne stijenke postoji jedno ili više pridržajnih mjesta.



Slika 5.34 Moguće vrste sloma zagatne stijenke

Proračun slobodno stojeće zagatne stijenke prikazan je u poglavlju 5.2.1.4.

U ovom poglavlju prikazat će se proračun zagatne stijenke s jednim ili više pridržanja na slobodnom dijelu.

Prilikom dimenzioniranja potrebno je razmotriti slučajeve prikazane na slici 5.34. Do sloma može doći (Dismuke, 1991.) uslijed:

1. pucanja ili popuštanja oslonca (zatege) na slobodnom dijelu;
2. ostvarenja punog pasivnog otpora ispred zabijenog dijela stijenke;
3. prekoračenja nosivosti nosača, platica;
4. globalnog loma tla oko zagatne stijenke;
5. slijeganja tla iza zagatne stijenke.



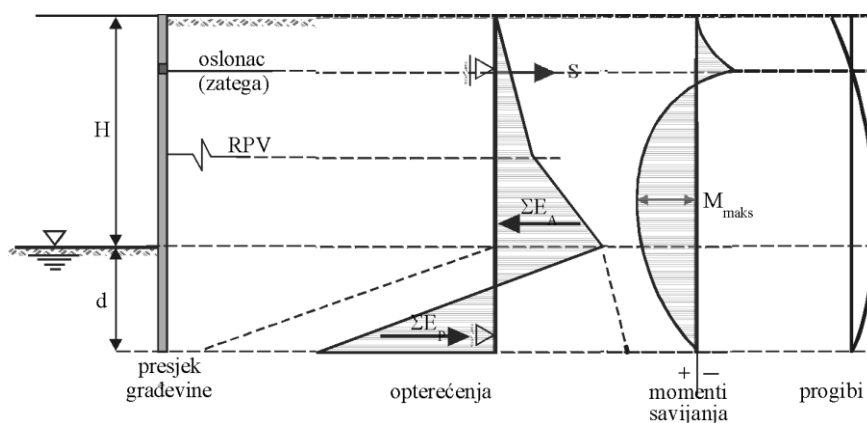
Iz prethodnog slijedi da za sve opisane situacije treba provesti računsku provjeru građevine. Situacija navedena pod 5. javlja se u slučaju kada je dio tla iza zagatne stijenke nasut. To je čest slučaj kod priobalnih građevina.

Opterećenja koja djeluju na građevinu opisana su u poglavlju 2. Ove su potporne građevine redovito opterećene hidrostatičkim tlakom uslijed opterećenja s vodom na različitoj visini ispred i iza zagatne stijenke.

U proračunu zagatnih stijenki s jednim osloncem na slobodnom dijelu mogu se koristiti dvije pretpostavljene mogućnosti uklještenja zabijenog dijela u tlo.

### 5.3.1.1 Plitko zabijeno žmurje

Pri plitko zabijenim platicama pretpostavlja se, da se nosač ponaša kao prosta greda s prepustima. Na slici 5.35 prikazana je ova pretpostavka. Proračun se provodi kao za prostu gredu s prepustima. Za pretpostavljenu dubinu zabijanja izračuna se potrebna sila pasivnog otpora i uspoređuje s mogućim ukupnim pasivnim otporom za odabranu dubinu. Kada faktor sigurnosti pasivnog otpora dosegne zadovoljavajuću vrijednost (2-3), odabrana dubina zabijanja je zadovoljavajuća.



Slika 5.35 Usidrena zagatna stijenka slobodna na donjem kraju

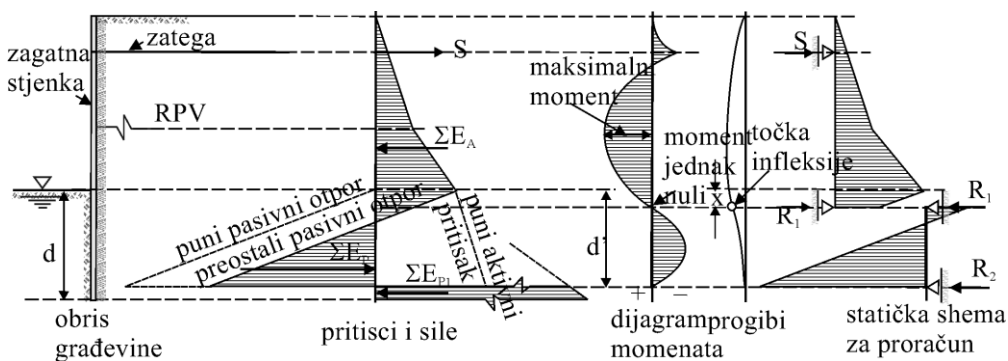
Kada se odabere dubina zabijanja koja zadovoljava uvjete faktora sigurnosti od sloma tla uslijed iskorištenja pasivnog otpora, potrebno je dubinu zabijanja,  $d$ , provjeriti na mogućnost pojave hidrauličkog sloma. Upravo je ova vrsta zagatnih stijenki najosjetljivija na pojavu hidrauličkog sloma, naročito ako se izvodi u dobro zbijenim, sitnim, jednoličnim pijescima. Zbog relativno velikog kuta unutarnjeg trenja, pritisci od tla nisu veliki, pa dubina,  $d$ , zadovoljava uvjete stabilnosti ali ne osigurava dovoljno dug put vodi za sigurnost od hidrauličkog sloma tla.

Ova metoda proračuna preporučuje se za određivanje dubine zabijanja žmurja u koherentnim tlima.

### 5.3.1.2 Žmurje s uklještenim ležajem u tlu

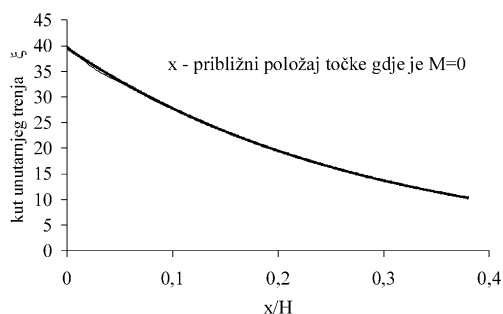
Kada je zagatna stijenka izvedena tako da joj je dubina zabijanja,  $d$ , dovoljno velika, može se smatrati da je upeta u tlo na donjem kraju. Na slici 5.36 prikazan je takav sustav. Kod progiba takvog nosača javlja se točka infleksije na dubini  $x$  ispod točke dna iskopa. Prilikom proračuna momenata savijanja javlja se točka u kojoj dolazi do promjene smjera tj. u kojoj je moment savijanja jednak 0 ( $M=0$ ). Ta točka odgovara točki infleksije kod progiba. Takav se sustav može proračunati metodom elastične linije. Drugi način proračuna je metodom ekvivalentne grede (Blum, 1930.), pri čemu se sustav pretvara u Gerberov nosač. Za obje metode je grafičko rješenje dao Terzaghi (1943.).

Za rješenje je u oba slučaja potrebno poznavati točku u kojoj je moment savijanja jednak 0, na slici 5.36 označeno s « $x$ ». Ova vrijednost ovisi o kutu unutarnjeg trenja,  $\phi$ .



Slika 5.36 Usidrena zagatna stijenka, upeta na donjem kraju (s rješenjem metodom ekvivalentne grede)

Na slici 5.37 prikazan je dijagram za određivanje položaja točke infleksije ( $x$ ) ovisno o slobodnoj visini zagatne stijenke i kutu unutarnjeg trenja  $\phi$  (za pijeske).



Slika 5.37 Dijagram ovisnosti položaja točke nultog momenta savijanja ( $M=0$ ) i kuta trenja tla,  $\phi$ , za zagatne stijenke sa zategom (Blum, 1931.)

Rješenje metodom ekvivalentne grede se nalazi u nekoliko koraka:

1. Iz dijagrama sa slike 5.36 ovisno o kutu unutarnjeg trenja,  $\varphi$ , i slobodnoj visini zagatne stijenke,  $H$ , odredi se vrijednost  $x$ ;
2. Odredi se duljina ekvivalentne grede,  $L$ , kao razmak od točke u kojoj se nalazi zatega do točke infleksije:  $L=H_1+x$ ;
3. Izračuna se ukupno opterećenje na ekvivalentnu gredu;
4. Izračuna se maksimalnim moment na gredi,  $M_{maks}$ , jednom od statičkih metoda, temeljem kojeg se dimenzionira ovaj dio nosača;
5. Iz uvjeta ravnoteže vodoravnih sila izračuna se vrijednost reakcije  $R_g$  na donjem kraju ekvivalentne grede te se ta sila usvaja kao reakcija  $R_{g1}$  na drugom dijelu Gerberovog nosača;
6. Iz uvjeta ravnoteže vodoravnih sila i momenata savijanja oko točke infleksije za drugi, donji dio nosača dobije se potrebna dubina zabijanja ispod razine dna iskopa (Za izvod vidi: Terzaghi, 1972.; 1943.),  $d$ :

$$d = x + 1,2 \sqrt{\frac{6R_{g1}}{(K_p - K_A) * \gamma'}} \quad (5.44)$$

(Za ovaj dio proračuna potrebno je uvesti faktor sigurnosti za veličinu iskorištenog pasivnog otpora,  $F_{sp}=2$  do  $3$ . Veličina,  $\gamma'$ , je vrijednost "uronjene zapreminske težine tla" odnosno,  $\gamma'=(\rho_{zas.}-\rho_w)*g$ );

7. Iz poznatih vrijednosti opterećenja tlom i reakcije u točki infleksije izračuna se sila u sidru,  $S$ , za  $1m'$  zagatne stijenke.

Na ovaj način određena je puna duljina (visina) žmurja, uključujući i faktor sigurnosti u dijelu koji je zabijen u tlo preko veličine  $1,2$  iz jednadžbe 5.44. Određen je najveći moment savijanja, potreban za odabir potrebnih platica i sila u zatezi za  $1m'$  žmurja.

Ova metoda ima svoje područje primjene. Može se koristiti samo za nekoherentna tla i pri maloj razlici razina vode. Ne preporučuje se koristiti kod velikog opterećenja tla na površini iza žmurja i ako je zatega smještena vrlo nisko.

U literaturi (Dismuke, 1991.) za ovu metodu postoje nomogrami koji daju dovoljno točna rješenja za orijentacione proračune.

Odabir i dimenzioniranje platica mora poštovati sve postupke i propise, predviđene za dimenzioniranje nosača, ovisno o materijalu od kojeg su izrađene.

### 5.3.2 O izvedbi zagatnih stijenki

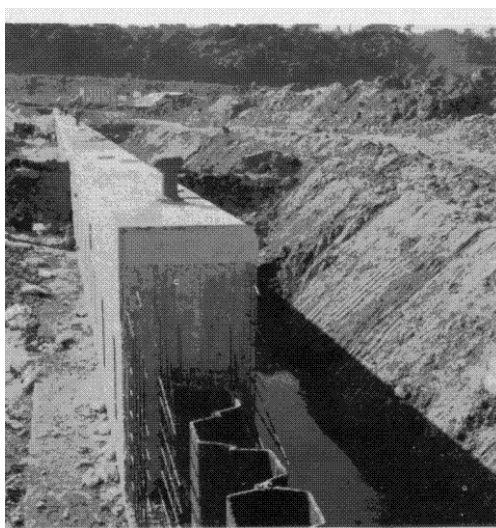
Ovo su vrlo raznolike građevine te ih je stoga vrlo teško sve nabrojiti, a kamo li opisati. Temeljna im je svrha osiguranje građevne jame kao prostora unutar kojega je potrebno izvesti temelje i podzemne dijelove građevine u suhom. Međutim to nije njihova jedina uloga. Osim zaštite građevne jame, zagatne su stijenke često

zidovi i temelji buduće građevine. Tada trajno ostaju u tlu. Zagatne stijenke služe za izradu zagata i umjetnih otoka. Koristi ih se kao protufiltracijske i protuerozijske dijelove raznih hidrotehničkih građevina. Mogu biti izvedene od svih vrsta platica, ali i kao betonske, armirano-betonske, glinobetonske, neprekinute dijafragme izvedene u prethodno iskopanom prerezu u tlu. Mogu biti izvedene na niz naprijed nabrojenih načina. Ovdje će se prikazati one posebnosti izvedbe koje do sada nisu bile opisane.

### 5.3.2.1 Zabijeno žmurje

Izvedba je ista kao što je opisano u poglavlju 5.2.2.3. Kada se želi izvesti zagatna stijenka upotrebom platica zabijenih u tlo, najčešće se rabi čelično žmurje. Za izvedbu zagatnih stijenki, dodaju se vodoravne vezne grede i zatege i/ili sidra. Na slici 5.26 vide se vodoravne vezne grede i zatege unutar prostora okruženog čeličnim žmurjem što znači da će u konačnoj izvedbi ovo predstavljati umjetni otok, s opterećenjem tla s unutarnje strane.

Ako zabijeno žmurje služi kao trajna građevina, mora se povezati s ostalim dijelovima koji su često armirano – betonski. Na slici 5.38 prikazana je naglavna greda s polerima za privez brodova iznad čeličnog žmurja.



Slika 5.38 Naglavna greda na čeličnom žmurju

### 5.3.2.2 Zagatne stijenke izvedene u tlu

Zagatne stijenke izvedene u tlu služe u dvije svrhe. Prva im je da stvore trajnu zaštitu građevne jame od urušavanja okolnog tla i prodora vode. Uz to ova vrsta zagatnih stijenki često postaje sastavni dio građevine kao zidovi podzemnih prostora. Tada preuzimaju i dio opterećenja od građevine te postaju temeljni

zidovi. Druga im je svrha isključivo vododrživost. U tu se svrhu izvode unutar nasipa kao vododrživi ekrani, ispod brana, sa svrhom smanjenja hidrostatskog pritiska na temelj i slično.

#### 5.3.2.2.1 Oblikovanje i primjena

Ovisno o namjeni pojedine zagatne stijenke, koriste se najrazličitije tehnologije izvedbe, kao i najrazličitije kombinacije materijala. Tehnologije će biti opisane pojedinačno detaljnije, a za materijale se može reći da postoje dva osnovna tipa. Zagatne stijenke izvedene u tlu mogu biti armirane i nearmirane.

Armirane zagatne stijenke izvode se uvijek u slučaju kada služe kao dijelovi građevine. Mogu se izvoditi tako da se betoniraju u tlu ili da se u pripremljeni iskop ugradi gotovi armirani element zida kako je to prikazano na slici 5.29. Nearmirane se izvode uvijek kada moraju biti isključivo vododržive, a nosivost je prepuštena okolnom tlu. Najbolji primjer je zaštita velikih građevnih jama na slobodnom prostoru, gdje je moguće izvesti otvoreni iskop, ali je potrebna zaštiti prostor od dotoka podzemne vode. Nearmirane mogu biti i u drugim slučajevima, kada se može dokazati da kao privremene građevine mogu preuzeti opterećenje od tla za vrijeme njihovog predviđenog vijeka trajanja. Materijali kod nearmiranih zagatnih stijenki mogu biti čisti, pomno odabrani u svrhu postizavanja dobre vododrživosti. To su precizno odabrani glinobetoni, koji se ugrađuju u gotove iskope u tlu, ali mogu biti i smjese cementa, bentonita, punila i vode s materijalima iz okolnog tla. Koji će materijal biti ugrađen ovisi o odabranoj tehnologiji ugradnje. Sve zajedno mora zadovoljiti potrebu građevine kojoj je zagatna stijenska namijenjena.

#### 5.3.2.2.2 Armirano betonske i glinobetske dijafragme

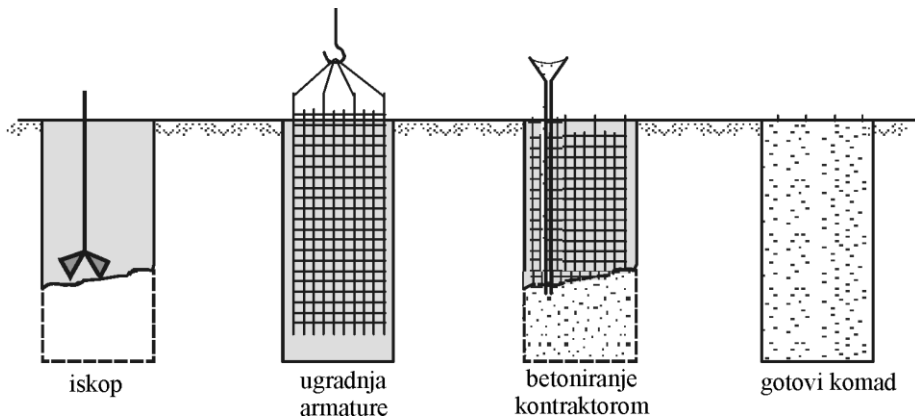
Tehnologija izvedbi ovih zagatnih stijenki je gotovo identična. Jedina je razlika u tome što se u glinobetske zagatne stijenke ne ugrađuje armatura, jer su one isključivo vododržive.

Osnovne radnje pri izvedbi su:

1. Izvedba uvodnog kanala;
2. Iskop rova u tlu;
3. Ugradnja armaturnog koša (kod armiranobetonskih stijenki);
4. Ugradnja ispune;
5. Uređenje vrha stijenke.

Prije početka iskopa u tlu je potrebno izvesti UVODNI KANAL. Ovaj kanal ima višestruku namjenu. Izvodi se tako da se u tlu izvedu dva usporedna betonska zida visine od 80 do 100 cm, kojima je vrh u razini terena, lagano armirana. Najčešće se izvode u jednostranoj oplati. Njihov međusobni razmak ovisi o debljini zagatne stijenke koja će se izvoditi. On je uvijek 10 cm širi od širine stroja kojim će se vršiti iskop, da bi se moglo nesmetano vršiti radnje potrebne za izvedbu zagatne stijenke. Onaj dio uvodnog kanala na kojem se ne vrši iskop ili betoniranje, drži se razuprt. Po završetku izvedbe zagatne stijenke, vodni se kanal ruši.

Na slici 5.39 prikazane su radnje pri izvedbi iskopa i betoniranja AB dijafragme.

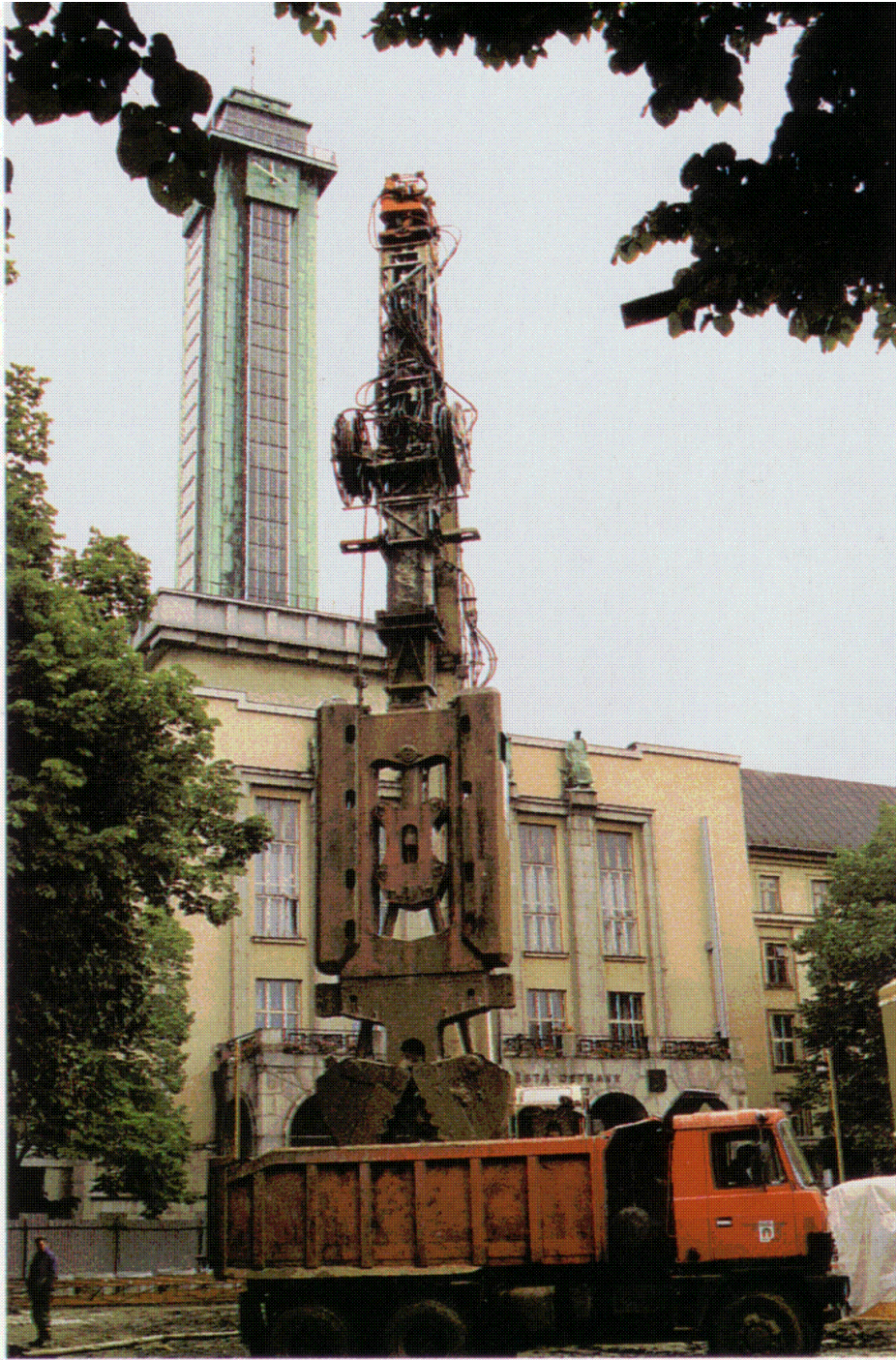


Slika 5.39 Izvedba armirano-betonske dijafragme

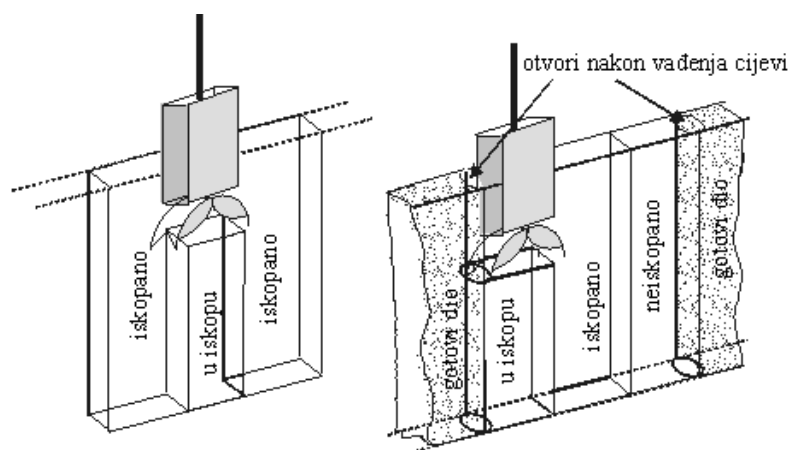
Uvodni kanal služi za dovod i odvod ISPLAKE. Isplaka je suspenzija bentonitne gline u vodi pa je stoga gušća od vode. Njome se puni iskopani prostor u tlu. Uslijed veće gustoće ona djeluje hidrostatičkim pritiskom na stijenke iskopanog kanala i na taj se način suprotstavlja hidrostatičkom tlaku podzemne vode i sprječava tečenje i eroziju čestica iz tla u iskop. Razina isplake u uvodnom kanalu uvijek mora biti znatno viša od razine podzemne vode. Uvodni kanal izvodi se po cijelom tlocrtu buduće zagatne stijenke. Kako se isplaka djelomično gubi tijekom izvođenja, mora ju se stalno nadopunjavati. U tu svrhu u blizini uvodnog kanala mora biti smješten uređaj za izradu isplake, s bazenom za gotovu isplaku. Iz bazena se crpkom dodaje na radilište ona količina isplake koja je potrebna za održavanje njene stalne razine u uvodnom kanalu. Tijekom rada u iskopani prostor isplaka ulazi, a prilikom betoniranja ona bude istisnuta iz prostora u koji ulazi beton, jer beton ima veću gustoću od isplake. Istisnuta isplaka ulazi u uvodni kanal i njime teče od mjesta betoniranja do mjesta iskopa. Da bi se dobila ravnoteža u količini isplake potrebno je tako organizirati rad na izvedbi da se jedan komad zagatne stijenke iskapa dok se drugi betonira. Dio isplake gubi se prilikom iskopa, ali se gubi i infiltracijom u tlo. Stoga ju je potrebno stalno provjeravati i nadopunjavati.

**Iskop** se vrši grabilicom prikazanom na slici 5.29 i 5.40. Današnja grabilice nalaze se na kruto vođenoj šipci. Između grabilice i šipke nalazi se tijelo s pogonom. Grabilica pri otvorenim čeljustima ima zagriz od 2 do 2,5 m. Ovisno o zahtjevima širine zagatne stijenke debljine grabilice se kreću od 0,5 do 1,2 m. Grabilica se utiskuje u tlo i «odgriza» ga, zatim se izvlači na površinu i iskopano tlo utovaruje u kamion.

Duljine pojedinih komada zagatne stijenke moraju se prilagoditi tehnologiji iskopa ali i betoniranja. Grabilica mora pri iskopu imati uvijek iste uvjete ulaza zubi, tj. zubi moraju ili ulaziti u tlo s obje strane i odgrizati ga ili moraju oba zuba ulaziti u već iskopani prostor i odgrizati preostalo tlo između dva iskopa. Od tuda proizlaze približne duljine pojedinih komada zagatne stijenke. Princip je prikazan na slici 5.41.

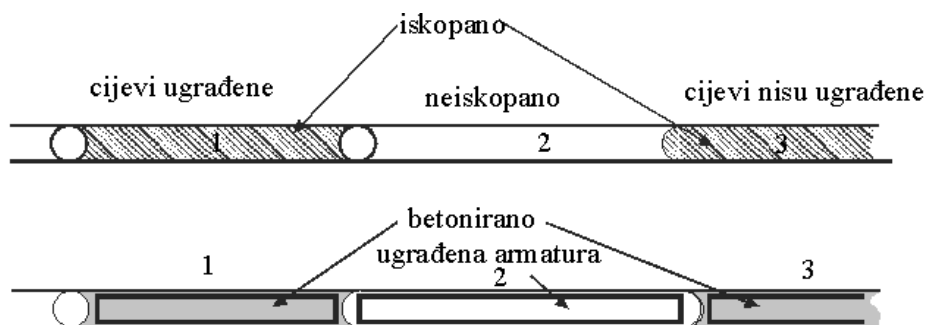


Slika 5.40 Grabilica pri istovaru iskopanog tla u kamion (Zakladani staveb, 1999.)



Slika 5.41 Princip iskopa neparnog (lijevo) i parnog (desno) komada grabilicom

Pri ovoj tehnologiji se u neparni dio, po iskopu u rubove ugrađuju cijevi. Ove se cijevi, nakon što je beton dovoljno stvrdnuo, vade te ostaju šupljine koje su potrebne za iskop parnog dijela stijenke. Redosljed iskopa je takav da se najprije iskopaju i betoniraju barem dva neparna dijela, a zatim se između njih izvodi parni. Na slici 5.42 prikazan je tlocrtni raspored izvedbe dijafragme.



Slika 5.42 Tlocrt s redosljedom izvedbe armiranobetonske dijafragme

Iskop se može vršiti pomoću alata koji glode tlo i miješa ga s bentonitnom isplakom. Isplaka se zajedno s iskopanim tlom crpi iz iskopa i odlaže u bazen za taloženje. U tom bazenu ostaje istaloženo tlo, a isplaka se vraća u sustav. Ovaj način iskopa je dobar kada tlo nije homogeno već ima komada koji bi otežali rad grabilici. Danas se pojavom novih tehnologija rjeđe koristi.

**Ugradnja armature** javlja se kod armiranobetonskih, nosivih, zagatnih stijenki. One su najčešće ujedno i dijelovi buduće građevine. Ugradnja se vrši pomoću dizalice (slika 5.43). Osnova svakog koša je UKRUTA. To je vodoravna armatura većeg profila, raspoređena na približno svaka 3,0 m po visini koša na koju se vari glavna armatura. Nekoliko šipaka glavne armature izvede se duže s kukama na gornjim krajevima. Ove kuke služe za vješanje koša prilikom betoniranja. Na taj se



način osigurava pravilan visinski položaj koša. Bez obzira na dimenzioniranje, glavna armatura se stavlja ista na obje strane koša, kako prilikom ugradnje ne bi došlo do zabune koja je strana tlačna, a koja vlačna. Na glavnu armaturu dolazi razdjelna ili vilice ovisno o zahtjevima iz proračuna. Na koš se postavljaju «distančeri» koji će osigurati da armatura stoji u sredini iskopa, tj. osigurati potrebni zaštitni sloj. Kod armiranobetonskih građevina koje su izvedene u tlu kao što su zagatne stijenke, zaštitni sloj je nešto deblji od uobičajenog. Preporuča se oko 10 cm. Sve ovo treba uzeti u obzir pri projektiranju armaturnih koševa. Treba nastojati da se iskop elemenata podesi tako da se u neparne i parne elemente mogu ugraditi koševi istih veličina kada god je to moguće. To pojednostavljuje i ubrzava izvedbu. Koševi su priređeni tako da budu sigurni prilikom podizanja s tla i ugradnje. U tu svrhu potrebno je najmanje 2/3 spojeva ovih armaturnih koševa zavariti.



Slika 5.43 Ugradnja armature i cijevi za naknadno injektiranje ispod zagatne stijenke (Zakladani staveb, 1999.)

**Ugradnja ispune**, bez obzira da li se radi o betonskoj ili glinobetonskoj ispuni, vrši se «kontraktor» postupkom (slika 5.44). Sastoji se u tome da se ispuna ugrađuje kroz lijevak na vrhu cijevi, koja u prvom času gotovo dodiruje dno

iskopa. Kako je ispuna teža od isplake to ona, prilikom ulaska u iskop kroz cijev, gura isplaku na površinu. Zbog svoje gustoće ispuna se u prostoru u koji se ugrađuje razlijeva stožasto. Stožac je najviši uz cijev kontraktora, a najniži uz rubove iskopa. Što je iskopani dio duži, to je ova razlika veća. Iz ovih se razloga ne preporuča izvoditi iskope duže od 7,0 m. Stožac raste zajedno s ugradnjom ispune i takav izlazi i na površinu. Stoga je visinu ugrađene ispune potrebno provjeravati na rubovima iskopa. Pri tom je nužno da cijev kontraktora uvijek bude najmanje 1,0 m u masi ispune. Kako se iskop puni, tako se postepeno skraćuje cijev kontraktora. Potrebno je osigurati dovoljnu količinu ispune za dio koji se puni, da se ispuna može ugraditi bez prekida. Cijev kontraktora mora se stalno lagano zakretati i podizati da bi ostala pokretna u masi ispune, ali ne smije izaći iz ispune. Ukoliko dođe do prekida ugradnje ispune dolazi do oštećenja dijela koji se izvodi. Ovo zahtjeva dodatne zahvate koji su vrlo skupi te stoga treba nastojati da nikako ne dođe do prekida punjenja iskopanog dijela stijenke.



Slika 5.44 Betoniranje kontraktor postupkom i otvorena grabilica (Zakladani staveb, 1999.)

**Završna obrada** potrebna je po završetku ugradnje ispune. Ispuna pred sobom gura isplaku i miješa se s njom u području međusobnog dodira. Iz tog razloga se na vrhu ispunjenog iskopa javlja sloj visine 0,5 do 0,8 m loše ispune koju je potrebno odstraniti. To treba uzeti u obzir pri određivanju visine ugradnje ispune. Ovo je vrlo bitno naročito kod armiranobetonskih zagatnih stijenki. Uređenje vrha izvodi se na način da se loš beton odstrani do visine projektirane kote vrha nosivog dijela stijenke. Često je predviđeno dijelove zagatne stijenke povezati NAGLAVNOM

GREDOM. Ona se izvodi na vrhu stijenke kao armiranobetonska greda. Za njenu izvedbu vodni kanal ponekad može služiti kao oplata. Po završetku svih potrebnih radnji oko iskopa i ugradnje ispune, vodni se kanal odstranjuje.

Na slici 5.45 prikazana je gotova, otkopana armiranobetonska dijafragma pričvršćena s tri reda sidara u tlo.



Slika 5.45 Otkopana armiranobetonska dijafragma s naglavnom gredom i glavama sidara (Zakladani staveb, 1999.)

#### 5.3.2.2.3 Pilot do pilota

Tehnologija pilot do pilota primjenjuje se kada iz nekih razloga nije rješenje moguće pomoću tehnologije iskopa dijafragme. Na slici 5.30 vidi se jedno takvo rješenje u kombinaciji s čeličnim platicama. Jedno vrlo upečatljivo rješenje prikazano je na slici 1.8.

Pilot do pilota može se izvoditi u raznim redoslijedima i rasporedima, prikazanim na slici 5.46: a) za berlinsko zide, b) na razmaku s korištenjem lučnog djelovanja tla; c) pilot do pilota; d) sa zasijecanjem; e) sa zasijecanjem napreskokce; f) dvoredno, ali su moguće i druge kombinacije.

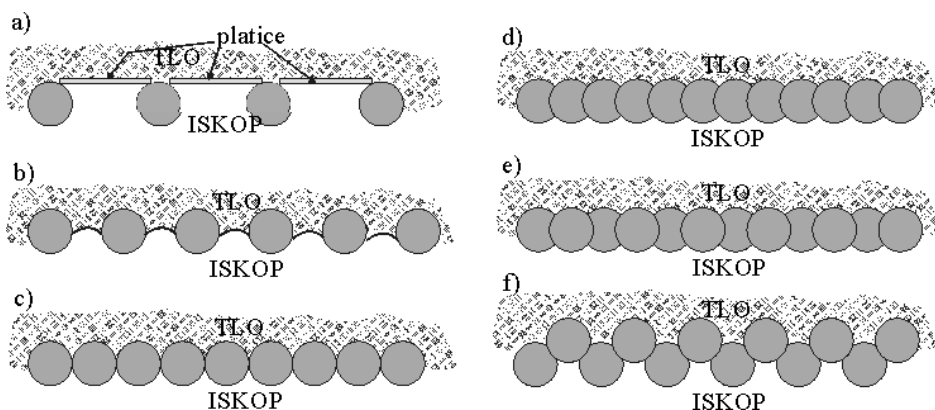
Osnovno je pitanje mora li stijenka biti vododrživa ili ne? Ukoliko ne, može se izvoditi pilot do pilota ili piloti na međusobnom razmaku sa ili bez ugradnje platica između njih (primjeri a, b i c).

Na slici 1.8 vidi se da je stražnji red pilota izveden na malom međusobnom razmaku. Za veće dubine iskopa dodan je još jedan red pilota koji se vidi u prvom planu.

Tehnologija izvedbe ovih pilota vrlo je slična izvedbi dijafragmi s tim da se umjesto glinebetonske isplake može koristiti zaštitna čelična kolona za održavanje

stijenki iskopa. U pilote se može ugrađivati armatura, ali mora biti tako izvedena da ne smeta zasijecanju ako je potrebno. Može se armirati svaki drugi pilot tj. onaj u koji se ne zasijeca.

Ako stijenka mora biti vododrživa izvodi se višeredna zavjesa od pilota ili se piloti međusobno zasijecaju (primjeri d, e i f na slici 5.46).



Slika 5.46 Mogući raspored pilota pri njihovom korištenju kao zagatne stijenske

Na slici 5.47 prikazana je još jedna otkopana građevina izvedena tehnologijom pilot do pilota.



Slika 5.47 Otkopana stijenka izvedena metodom pilot do pilota s gredama i sidrima

#### 5.3.2.2.4 Mlazno injektiranje

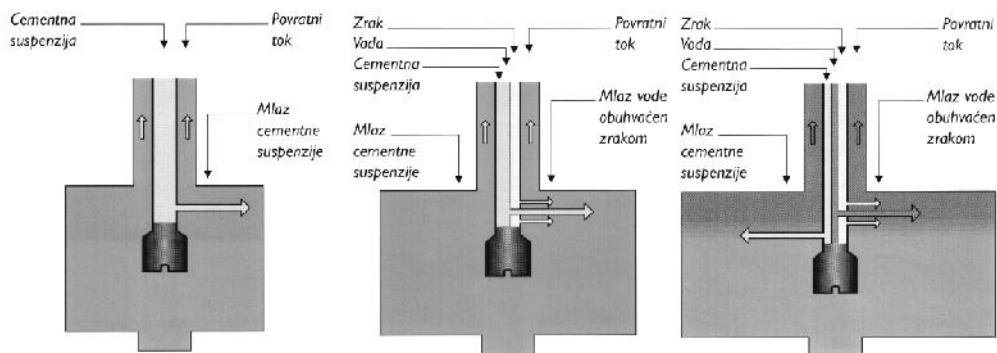
Mlazno injektiranje (Jet Grouting) je tehnologija novijeg datuma. Pojavila se postepenim razvojem tehnike injektiranja stijenske mase prije nekih trideset godina (Čorko i sur., 1997.). To je jedna od tehnologija poboljšanja svojstava tla, koja se između ostalog može koristiti i za izradu zagatnih stijenki. Temeljni učinak mlaznog injektiranja je razaranje strukture tla visokim pritiskom mlaza vode, koji se ubrizgava u tlo i miješanje tako usitnjenog tla s vezivnim sredstvom – injekcijskom smjesom, koje povećava čvrstoću tla.

Tehnologija je razvijena u Japanu. Prvobitno se izvodilo mlazno injektiranje u tlu bez rotacije, te su na taj način nastajali paneli. Kasnije (Yahiro, 1975.) je izrađen pribor koji se prilikom rada vrti i na taj način stvara u tlu valjkasta tijela.

Danas ima više postupaka mlaznog injektiranja, ali je temeljni učinak uvijek isti, visokim pritiskom fluida usitniti injekcijsku masu u tlo i izmiješati ih. Pri tom se koriste tri osnovna postupka:

1. Usitnjavanje tla i miješanje injekcijske smjese i tla pod visokim pritiskom jednom mlaznicom – jedan fluid;
2. Usitnjavanje tla vodom i zrakom (dvije mlaznice) i miješanje, pod visokim pritiskom, tla s injekcijskom smjesom obavijenom zrakom – dva fluida;
3. Usitnjavanje tla smjesom zraka i vode, koja djelomično ispire tlo i zatim utiskivanje injekcijske smjese – tri fluida.

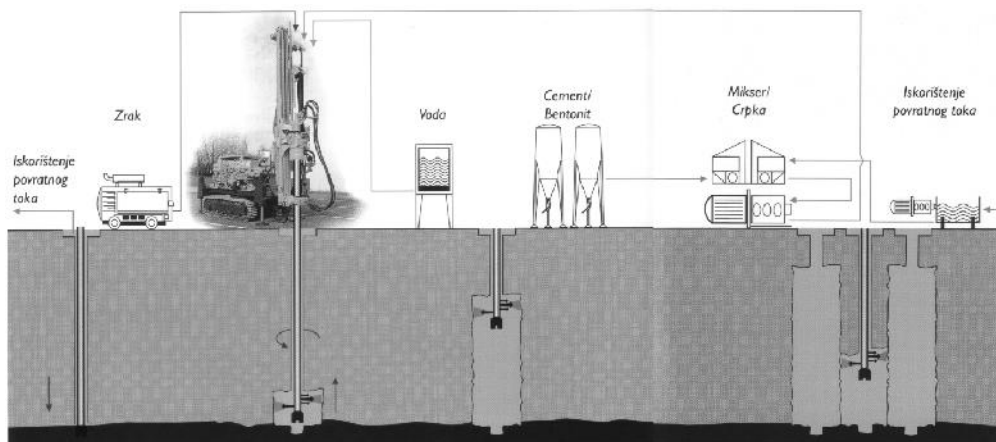
Shema tehnologije izvođenja prikazana je na slici 5.48 (Keller, 2003.).



Slika 5.48 Sheme mlaznog injektiranja s jednim (lijevo); dva (u sredini) i tri fluida (desno)

Na opisani način u tlu nastaju obla tijela slična betonskim stupovima – STUPNJACI, kojima je agregat zamijenjen česticama tla. U sredinu im se može ugraditi armatura

Na slici 5.49 prikazan je način izvedbe mlazno injektirane stijenke u tlu s pripadnom opremom. Postupak započinje bušenjem do potrebne dubine do koje će sezati mlazno injektirano tijelo. Potom se kroz pribor ubrizgava smjesa za rezanje i injektiranje uz postepeno podizanje i zaokretanje pribora. Pri izradi stupnjaka zaokretanje iznosi 360 stupnjeva, ali može biti izvedeno i samo djelomično zaokretanje, ovisno o želji i potrebi projektanta.



Slika 5.49 Shema izvođenja zagatne stijenke mlaznim injektiranjem (Keller, 2003.)

Na slici 5.50 prikazan je otkopani dio zagatne stijenke izveden mlaznim injektiranjem (Zakladani staveb, 1999.).



Slika 5.50 Otkopani niz stupnjaka izveden mlaznim injektiranjem

Kada se zavjesa izvodi od stupnjaka (kružnih tijela) raspored im može biti vrlo sličan rasporedu pilota. Stupnjaci se mogu završiti na bilo kojoj potrebnoj dubini. U stupnjake se u sredinu može ugraditi armatura i na taj ih način ojačati. Mogu se izvoditi koso, što je vrlo povoljno kada se radi u gradskim jezgrama gdje treba štititi ili prihvatiti temelje okolnih zgrada, kako je to prikazano na slici 5.51. Na zidu iznad stupnjaka vide se tragovi bušotina. Desno se vide dijelovi usidrene, armirano betonske dijafragme.



Slika 5.51 Niz mlazno injektiranih stupnjaka ispod temelja zgrade na rubu građevne jame.

Mlazno injektiranje izvrsna je dopuna drugim tehnologijama kada je potrebno brzo izvesti dodatno brtvljenje, povezivanje ili popravke pojedinih dijelova bilo armiranobetonskih dijafragma bilo zavjesa pilot do pilota.

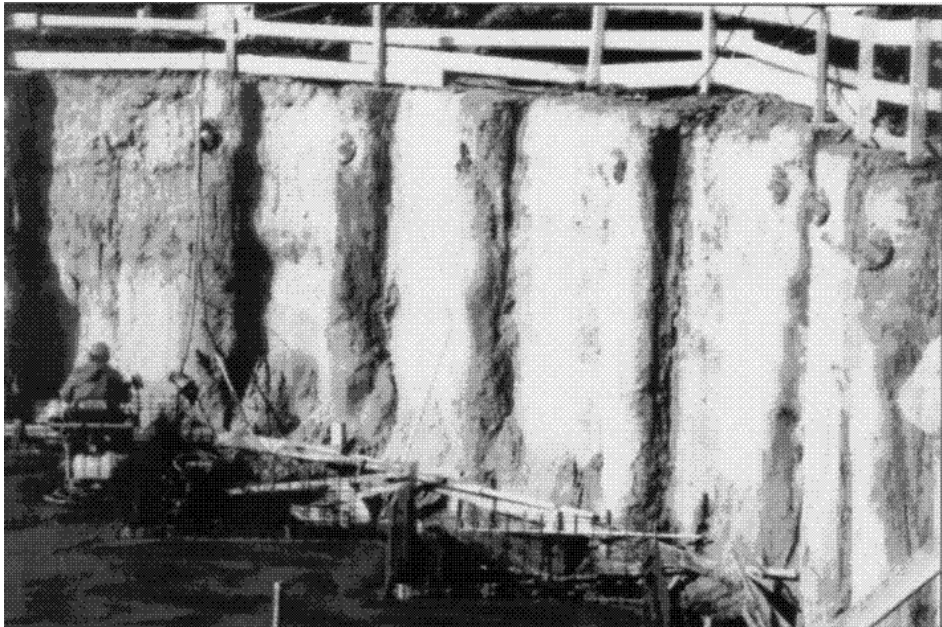
#### 5.3.2.2.5 Stijenke izmiješane u tlu (Mixed in place - MIP)

Zagatne stijenke izmiješane u tlu novijeg su datuma. Tehnologija se sastoji u tome da se posebnim svrdlima, prikazanim na slici 5.32 izvede bušotina bez zaštite i da se zatim dodaje i miješa s tлом vezno sredstvo. Na taj način nastaje ojačani dio tla koji djeluje kao zagatna stijenka.

Na slici 5.52 prikazana je zagatna stijenka izvedena MIP tehnologijom. Među MIP platnima ugrađeni su čelični I profili na nejednakim razmacima, ovisno o razmaku između zagatne stijenske i okolnih građevina. Sustav je poduprt kosnicima preko vodoravne vezne grede i dijagonalnog nosača u kutu jame.



Slika 5.52 Zagatna stijenka slobodne visine 10,20 m, izvedena MIP tehnologijom (Bauer, 2004.)



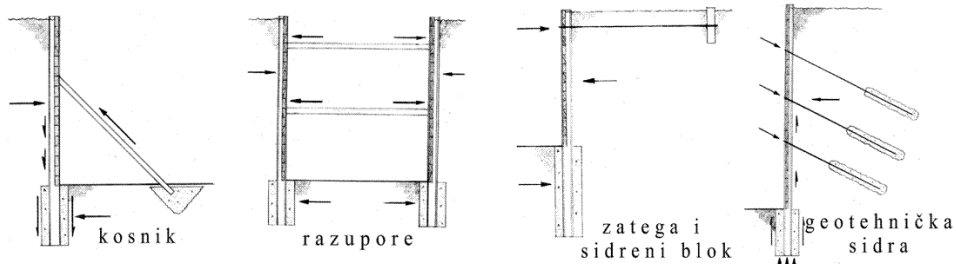
Slika 5.53 Zagatna stijenka slobodne visine 4,6 m, izvedena MIP tehnologijom ojačana bušenim pilotima  $\Phi$  630 mm i geotehničkim sidrima (Bauer, 2004.)



## 5.4 OSLONCI

Slobodno stojeće zagatne stijenke izvode se samo za pliće iskope. Kod većih denivelacija dubina zabijanja postaje prevelika, a za sprečavanje većih deformacija potrebna je velika krutost nosača. Iz tih razloga zagatne se stijenke podupiru, razupiru, pridržavaju zategama ili sidre. Odabir pričvršćenja oslonca ovisi o nizu čimbenika. Oslonci mogu biti u jednom redu po visini, a mogu biti smješteni u više redova, kod većih dubina iskopa.

Na zagatnoj stijenci je potrebno osigurati uzdužnu veznu gredu koja će pritisak sa zagatne stijenke preuzeti linijski i točkasto prenijeti na mjesta oslonaca. Ta vezna greda je kod čeličnog žmurja najčešće čelični I profil. Kod armirano-betonskih zagatnih stijenki to može biti skrivena greda, izvedena u armaturnom košu same stijenke, a može biti i naknadno, površinski izvedena greda.



Slika 5.54 Nekoliko primjera bočnog oslanjanja (Macnab, 2002.)

### 5.4.1 Kosnici i razupore

Kosnici se rabe samo onda kada ne smetaju izvođenju. Mora im se osigurati stabilan oslonac na zagatnoj stijenci i stabilan oslonac na tlu. Izvode se za manje visine potporne građevine. Koriste se kao privremeni oslonci.

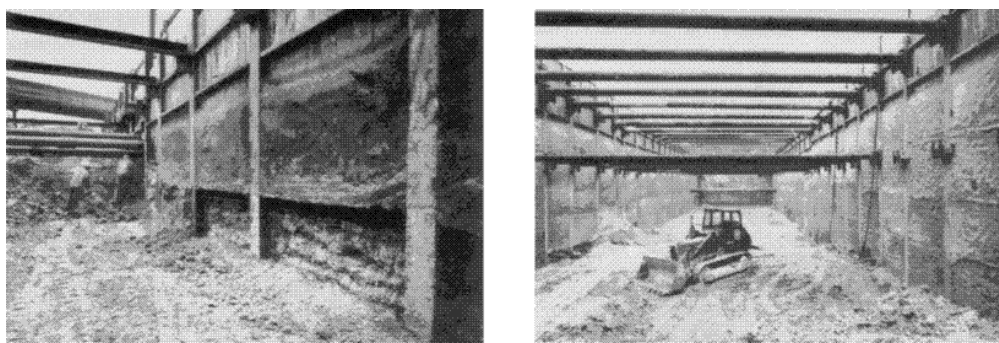


Slika 5.55 Kosnici (Macnab, 2002.)

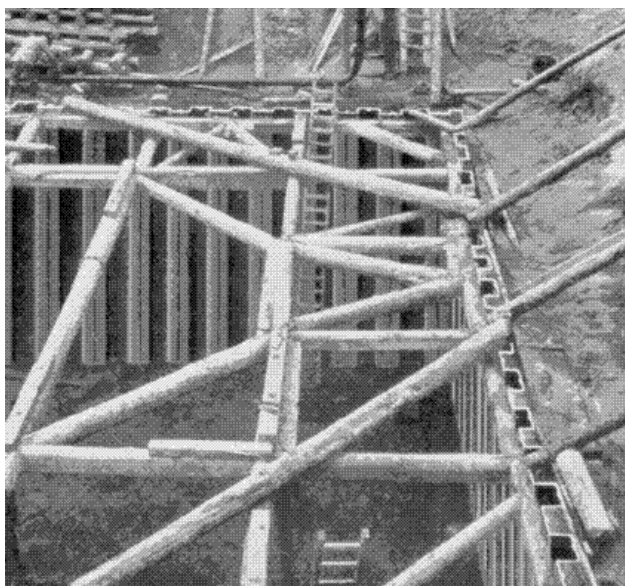
Razupore se koriste kada je moguće dohvatiti dva dijela zagatne stijenke na način da se između njih postavi nosač. Razupore se mogu postavljati okomito na usporodne stijenke, ako su ove dovoljno blizu ili dijagonalno u uglovima, kada su zagatne stijenke tako oblikovane da tlocrtno imaju uglove.

Razupore i kosnici se izvode od drvenih greda, čeličnih profila, čeličnih rešetki. Dimenzioniraju se kao svi osno pritisnuti dijelovi građevina. Primjer razupiranja dan je na slici 5.1. i 5.30.

Razupore su najčešće čelične. Mogu biti čelični profili, čelične rešetke ili posebno izrađene razupore s kontra navojima za unošenje sile prednapinjanja u razuporu. Razupore se dimenzioniraju na nosivost na tlak i na izvijanje jednako kao stupovi. Na slici 5.56 i 5.57 prikazani su primjeri razuprtih zagatnih stijenki.



Slika 5.56 Zagatna stijenka s razuporama (Bayart i sur., 1979.)



Slika 5.57 Kose drvene razupore, kosnici i čelično žmurje

Ako se zagatna stijenka izvodi tako da se puni s unutrašnje strane (na pr. pri stvaranju umjetnih otoka), oslonci se mogu izvesti pomoću zatega. Zatege se mogu izvoditi od čelične užadi, betonskog željeza ili vrsta nosača koji pretežno nose na vlak.



Slika 5.58 Zagatna stijenka učvršćena zategama (Hoesch-Kölnneuessen, 1937.)

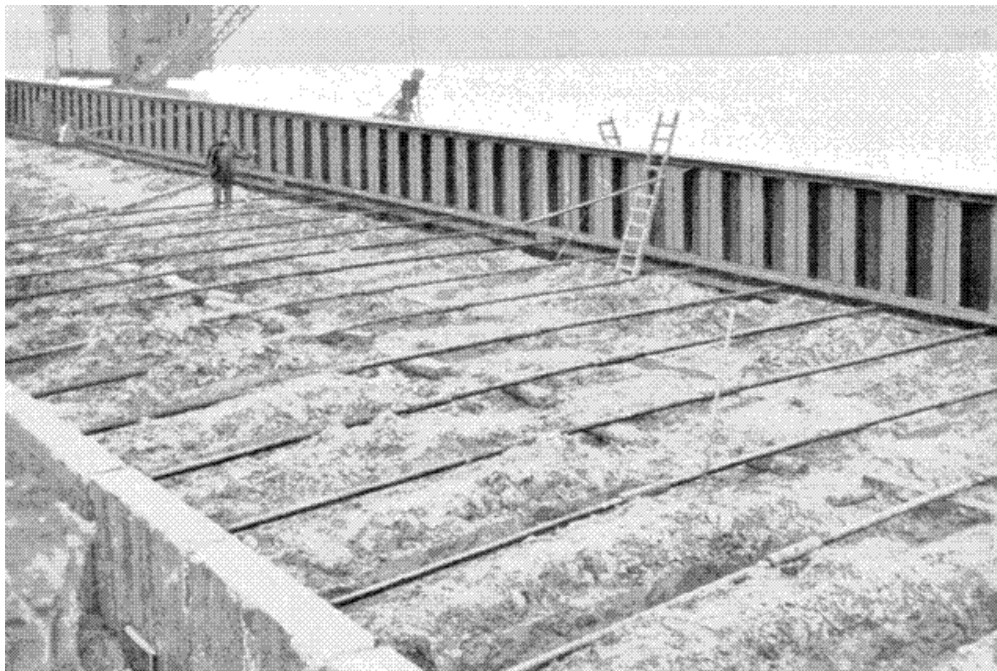
#### 5.4.2 Zatege, sidreni blokovi i sidreni zidovi

Zatege se koriste kada je na dohvatljivoj dubini i dovoljno velikoj udaljenosti (vidi 3.6.3.1) moguće izvesti sidrene blokove i/ili sidrene zidove, u koje će se zatege učvrstiti (usidriti). Sidreni blokovi i zidovi izvode se od armiranog betona, dovoljne visine da aktiviranjem dijela pasivnog otpora, mogu preuzeti potrebne oslonačke sile iz zatega.

Sidreni blokovi i sidreni zidovi koriste se i dimenzioniraju na isti način kako je to prikazano kod potpornih zidova. Ugrađuju se u nasip iza zagatnih stijenki, ili u posebno izvedene iskope, ako dubina sidrenja nije velika. Moraju biti dovoljno udaljeni od zagatne stijenske, da njihovo aktiviranje pasivnog otpora ne utječe na aktivni klin tla iza zagatne stijenske. Kod izrade pristana u velikim lukama ovi su načini pridržanja zagatnih stijenki učestali.

Na zagatnoj stijenci mora postojati vodoravni nosač koji vrši preraspodjelu pritisaka sa stijenske na točke pridržanja, zatege. To može biti čelični profil, kod čeličnog žmurja ili skriveni ili neskriveni nosač kod armirano-betonskih zagatnih stijenki.

Veza između zagatne stijenke i sidrenog bloka ili zida se može ostvariti pomoću čelične užadi, čeličnih profila ili armirano-betonskih greda. Metalne veze potrebno je zaštititi od korozije. Na mjestima spoja veznih dijelova sa zagatnom stijenkom potrebno je izvesti ležajno mjesto.

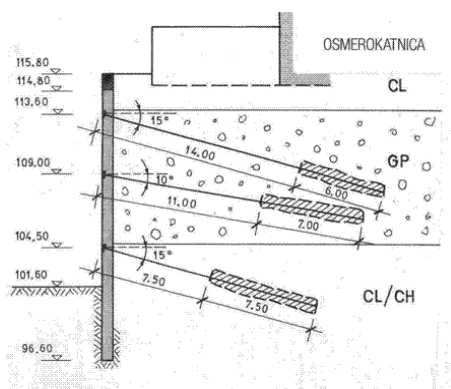


Slika 5.59 Zatege usidrene u sidreni zid (Hoesch-Kölnneuessen, 1937.)

Kada je iza zagatne stijenke kosina ili sraslo tlo, nije moguće izvoditi zatege. Za takve slučajeve koriste se druge vrste oslonaca.

#### 5.4.3 Geotehnička sidra

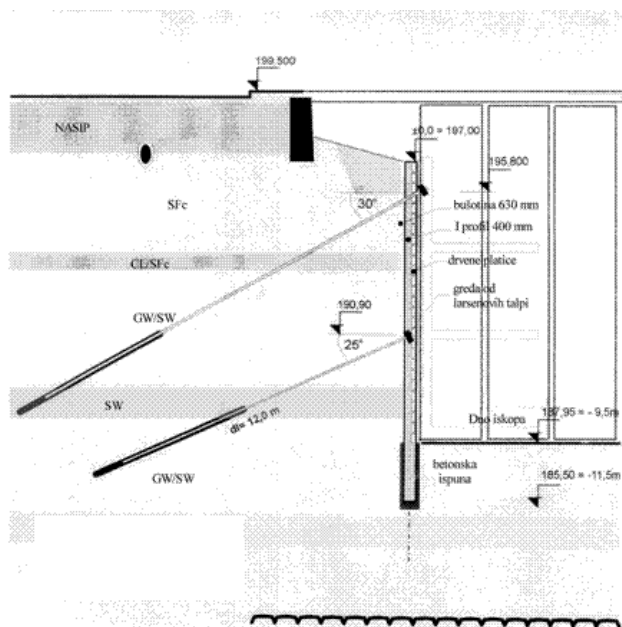
Geotehnička sidra koriste se za pridržanja zagatne stijenke u prirodno tlo u njenom zaleđu. Geotehnička sidra prenose opterećenje s ležaja na zagatnoj stijenci u dublje slojeve tla putem sidrišne dionice. Sidrišna dionica nastaje tako da se krajnji dio sidrene užadi ili sidrenog štapa injektira na određenoj dužini. Na taj način se sidro poveže s okolnim tlom. Između zagatne stijenke i sidrenog tijela nalazi se slobodna dionica. Ovaj dio sidra dozvoljava izvjesnu deformaciju koja se može programirati. Deformacija je nužna za ostvarenje pomaka zagatne stijenke, potrebnog da se ostvari aktivni pritisak. Ako deformacija iz nekih razloga nije moguća (temelji zgrada u neposrednoj blizini) ili dozvoljena, slobodnom dionicom i načinom prednaprezanja ona se može regulirati. Geotehnička se sidra redovito prednaprežu tj. u njih se unosi dio sile prije nego što preuzmu puno opterećenje. Za prednaprezanje se izrađuje program koji ovisi o nizu čimbenika. Na slici 5.60 prikazan je crtež poprečnog presjeka troredno sidrene armirano betonske dijafragme.



Slika 5.60 Troredno sidrena dijafragma, poprečni presjek (BBR–CONEX, 1996–1998)

Na slici 5.61 prikazan je poprečni presjek sidrenja berlinskog zida izvedenog od čeličnih I (400 mm) profila, ugrađenih u unaprijed izvedene bušotine. Čelični I profili su u tlu ugrađeni u beton. Ispuna je izvedena od drvenih platica. Prije nego što je nastavljano s iskopom, ugrađene su Larsen platice, povezane s I profilima, kao vezne grede nižeg reda sidara.

Berlinsko zide je bilo moguće izvesti jer nema podzemne vode.



Slika 5.61 Dvoredno sidreno berlinsko zide (Zakladany staveb, 1999.)

Geotehnička sidra sastoje se od glave izvedene tako da se može izvršiti prednaprezanje, slobodne dionice koja je zaštićena plastičnom cijevi, sidrene dionice koja se injektira i nepomične glave na kraju sidrene dionice. Sila se s glave

na sidreno tijelo može prenositi čeličnom užadi ili čeličnom šipkom Sidra sa žicama su veće duljine i koriste se za sidrenje u tlu i stijeni.

Sidra sa šipkama su općenito nešto kraća, a koriste se za sidrenje u stjenjnoj masi i tlu.

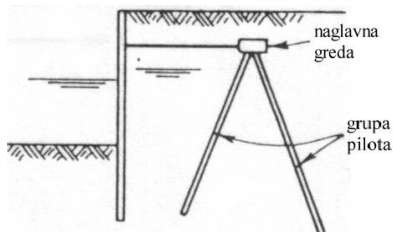
Za glave sidara potrebno je u zagatnoj stijenci izvesti posebno pripremljeni ležaj na koji sidro nalegne. Mjesta ležaja posebno se armiraju spiralnom armaturom prema zahtjevima proizvođača sidara.

Danas se proizvodi užad od karbonskih vlakana što je znatno poboljšanje glede korozije. Sidra s čeličnom užadi, ako se koriste kao trajni dijelovi građevine moraju se zaštititi od korozije. Geotehnička sidra mogu se koristiti kao privremena, za vrijeme trajanja građenja građevine koja kasnije prihvaća opterećenja od zagatne stijenske ili okolnog tla i trajna, kada su sastavni dijelovi trajne građevine. Trajna sidra osim što moraju biti antikorozivno zaštićena, moraju biti trajno dostupna da bi se tokom korištenja mogla kontrolirati. Kontrola se odnosi na veličine sila u sidrima, njihovo popuštanje i pojavu neželjenih deformacija.

Više o sidrima vidi u poglavlju 7.

#### 5.4.4 Građevine za preuzimanje vlačnih sila

Kada zagatne stijenske nije moguće poduprijeti niti na jedan od gore navedenih načina, izvode se posebne sidrišne građevine, kako je to prikazano na slikama 0.2 i 5.64.



Slika 5.62 Građevina za sidrenje zagatne stijenske (Dismuke, 1991.)

Kod nekih vrlo složenih potpornih građevina u sklopu kojih se nalaze i zagatne stijenske, nije dovoljno izvršiti sidrenje u sidrene zidove i/ili blokove niti geotehnička sidra. Takav je najčešće slučaj kod izgradnje operativnih obala, koje se izvode u dubokoj vodi, a iza njih se znatan dio prostora nasipava. U takvim slučajevima je nužno zagatne stijenske dodatno pričvrstiti u zaleđe pogotovo kada se radi o privezima za velike brodove. U tu se svrhu u zaleđu izvode građevine za sidrenje. To su najčešće grupe kosih pilota za prihvaćanje tlačno – vlačne kombinacije sila bilo s priveza za brod ili samih građevina.

Grupe pilota prihvaćaju tlačne i vlačne sile na trenje, rjeđe tlak na vrh. Grupe se povezuju armirano-betonskim naglavnim gredama. Naglavne se grede izvode radi povezivanja sustava, prenosa mogućih pomaka i preraspodjele opterećenja.



## 6 ZAGATI

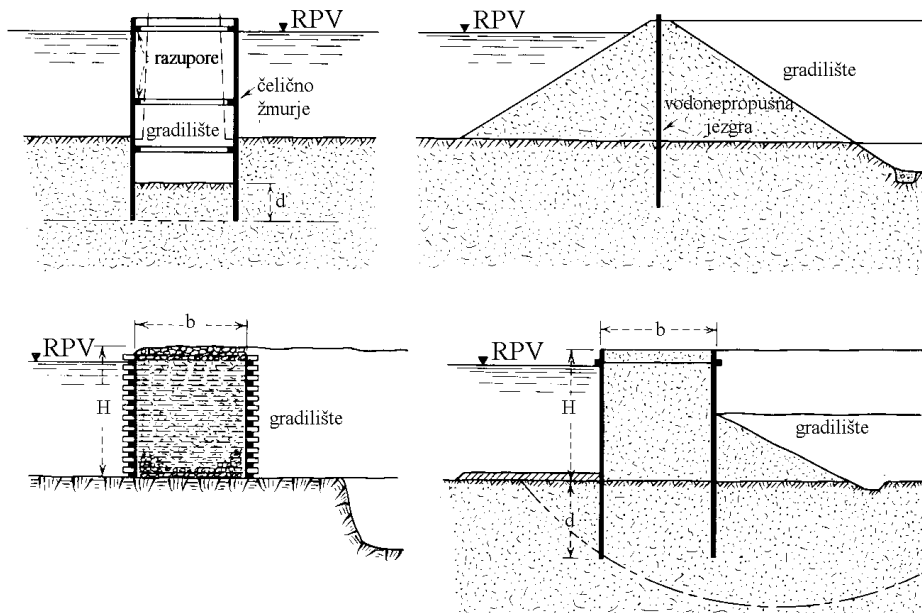
### 6.1 OPĆENITO

Zagati su građevine koje služe za obranu gradilišta od vode. To su građevine koje su uvijek opterećene hidrostatskim pritiskom, dok mogu i ne moraju biti opterećene tlom. U literaturi se mogu naći kao odvojena skupina geotehničkih građevina, zajedno sa zagatnim stjenkama ili u sklopu složenih temeljenja. Kako je njihova glavna namjena obrana gradilišta od vanjske (mirne ili tekuće) vode posvećeno im je posebno poglavlje. Svim zagatima je zajedničko da moraju biti VODONEPROPUSNI bolje rečeno VODODRŽIVI.

Osim u nekim slučajevima, zagati se pritisku vode odupiru vlastitom težinom tj. ponašaju se kao gravitacijske potporne građevine. Vododrživost postižu nekim od vodonepropusnih dijelova građevine. Zagati su privremene građevine koje nakon izgradnje glavne građevine gube svoj smisao i namjenu, ali su glede vododrživosti, za svog vijeka upotrebnog trajanja, trajne građevine i tako ih treba projektirati, dimenzionirati i izvoditi.

Prema tome kako su opterećeni vodom, zagati se mogu podijeliti na one koji su opkoljeni vodom (otoci), a građevina se izvodi u zaštićenom prostoru i one koji su vodom opterećeni samo s jedne strane dok je s druge strane zagata prostor gradilišta.

Na slici 6.1 prikazano je nekoliko tipova zagata, što je samo mali broj mogućih kombinacija građevina i gradiva koji se koriste za izradu zagata.



Slika 6.1 Nekoliko poprečnih presjeka zagata (Tschebotarioff, 1973.)



Oštećenjem ili čak rušenjem zagata mogu se prouzročiti velike materijalne štete i ljudske žrtve, stoga je ove građevine potrebno vrlo pažljivo dimenzionirati i izvoditi.

Najjednostavniji su zagati izvedeni od nasipa. Vodonepropusnost se postiže odabirom materijala za nasipavanje i širinom nasipa. Za manje dubine vode ili kao privremena nadvišenja, mogu se izraditi od vreća punjenih pijeskom (zečji nasipi). Za veće dubine vode nasipi mogu postati preširoki u poprečnom presjeku, a potrebno je osigurati dobru vododrživost. Tada se nasipi kombiniraju s vodonepropusnom jezgrom ili se izvode tankostijene zagatne stjenke zatvorenog oblika koje se pune tlom.

Zagati se mogu podijeliti u tri skupine s odgovarajućim podskupinama:

1. Nasuti, sa ili bez vodonepropusnog dijela.

Zemljani nasipi; kameni nasipi; nasipi od vreća punjenih pijeskom.

2. Od čeličnog ili drvenog žmurja, samog ili u kombinaciji s nasipom i /ili zasipom.

Drvene ili čelične platice, jednoredne; drvene ili čelične platice, dvoredne; savitljive zagatne stjenke od drvenih ili čeličnih platica; čelijasti zagati.

3. Ostali;

Drvene krletke punjene zemljom ili kamenom; bušeni piloti, dijafragme, gotovi betonski blokovi i sl.



Slika 6.2 Zagat – otok (Havranek, 1999.)

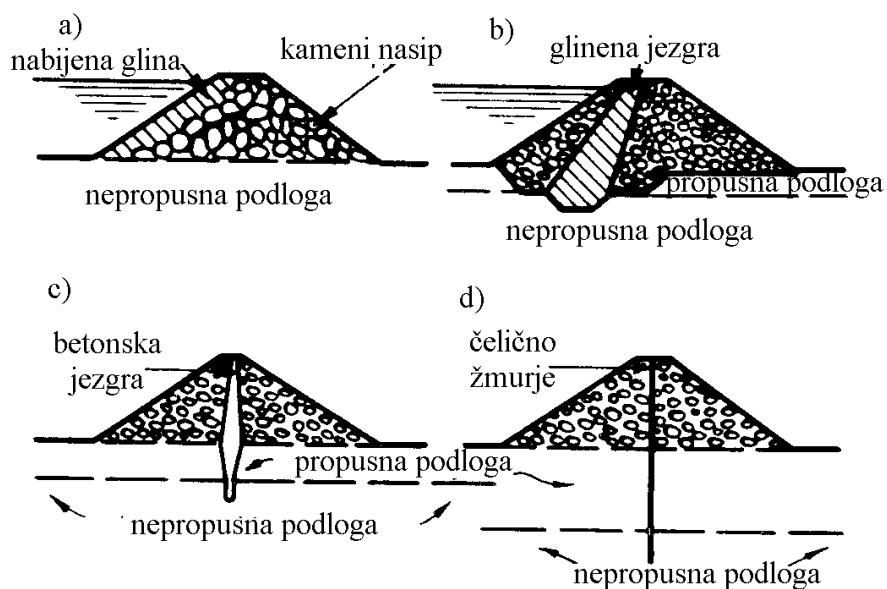
Građevina se uvijek gradi unutar zagata, ali postoje razlike u potrebama pri izvođenju. Za stupove mostova (na slici 6.1 gore lijevo) izvodi se zagat – otok. Unutar njega se izvodi stup. Ovisno o tehnologiji izrade temelja ovakav zagat može biti tankostijeno, razuprto čelično žmurje, unutar kojeg se plitko temelji stup. Ako je potrebno izvesti duboko temeljenje tada zagat može biti od čeličnog žmurja, ispunjen nasipom, kroz koji se onda prvo izvodi duboko temeljenje.

Kada se izvode građevine većih tlocrtnih površina, gradilište se opaše zagatom unutar kojeg se izvede temeljenje i dio građevine koji se nalazi ispod razine vode. Najsloženiji zagati su oni koje treba izvesti u tekućoj vodi. Načini i redoslijedi izvedbe ovakvih zagata i popratne građevine bez kojih njihovo izvođenje nije moguće. bit će opisani u poglavlju o građevnim jamama.

## 6.2 NASUTI ZAGATI

### 6.2.1 Općenito

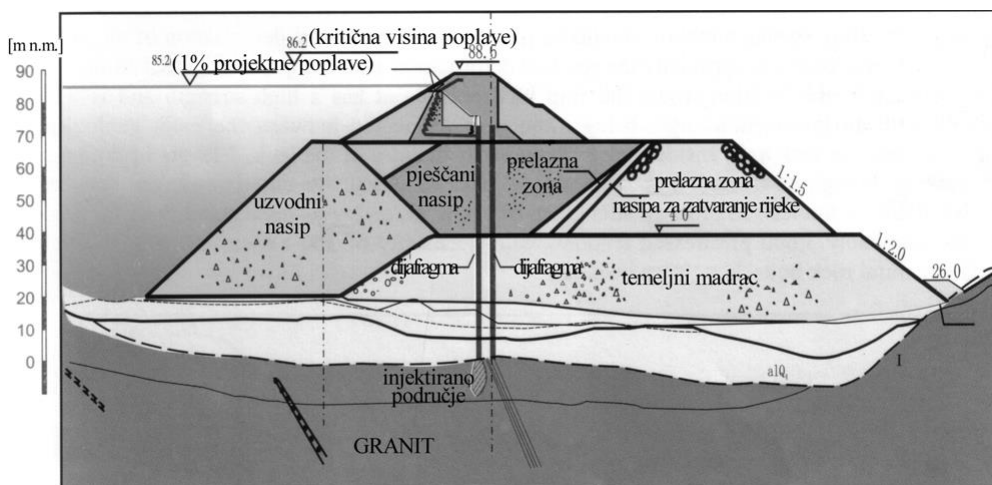
Nasuti zagati mogu biti kameni, zemljani ili miješani. Mogu biti bez ili sa vodonepropusnom barijerom. Izvode se u tekućoj i u mirnoj vodi, kada nema ograničenog prostora unutar kojeg se mogu izvoditi, odnosno kada ekonomski pokazatelji ukažu da je to opravdano. Često se ovakvi nasipi mogu uklopiti u gotovu građevinu, što je slučaj kod velikih nasutih brana. Na slici 6.3 prikazano je nekoliko nasutih zagata.



Slika 6.3 Nasuti zagati

Jedan od najvećih građevinskih zahvata danas je brana Tri klanca u Kini. Na slici 6.4 prikazan je uzvodni nasuti zagat za izvedbu sjevernog dijela brane. Južni dio brane izvest će se nakon propuštanja vode kroz sjeverni dio, pod zaštitom betonskog zagata.

Nasuti zagati su kao i svi nasipi vrlo osjetljivi na prelijevanje. Kako se međutim ipak radi o privremenim građevinama, pri njihovom se odabiru visine krune nasipa, odabire razina velike vode manjeg povratnog razdoblja nego bi se odabrala za trajnu građevinu. Na ove su visine osjetljivi zagati na rijekama. Na morskoj obali javlja se promjena visine vode uslijed velike plime. O mogućnosti da dođe do prelijevanja treba voditi računa prilikom projektiranja zagata.



Slika 6.4 Uzvodni zagat brane Tri klanca u Kini (CTGPC, 2002.)

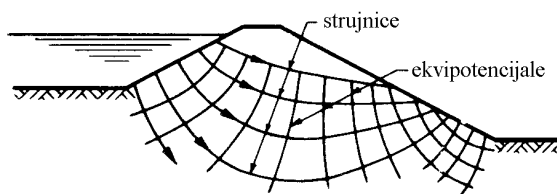
## 6.2.2 Proračun nasutih zagata

Proračun nasutih zagata mora sadržavati sve proračune koji se rade za velike nasute brane.

To su:

- 1) proračun procjeđivanja kroz zagat;
- 2) proračun procjeđivanja ispod zagata;
- 3) analize stabilnosti uzvodnog i nizvodnog pokosa;
- 4) proračun slijeganja od vlastite težine;
- 5) proračun slijeganja zagata uslijed slijeganja temeljnog tla opterećenog zagatom;
- 6) proračun utjecaja valova;
- 7) proračun potrebnog nadvišenja zbog slijeganja i valovanja.

**Proračun procjeđivanja kroz zagat** se radi pomoću strujnih mreža za poznate rubne uvjete i poznata svojstva propusnosti pojedinih dijelova nasipa.

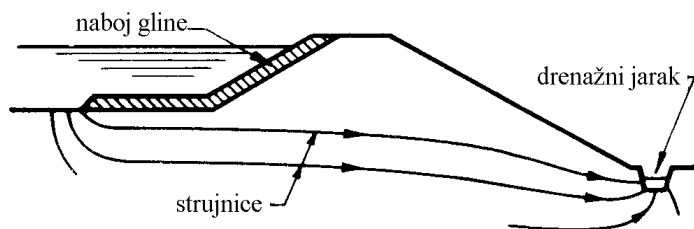


Slika 6.5 Procjeđivanje kroz zagat - homogeni nasip (Tomlinson, 1980.)

Zagati su umjetne građevine, ali se često ne mogu kontrolirano zbijati jer se izvode u mirnoj ili tekućoj vodi. Kod takvih je zagata teško precizno odrediti

vrijednosti koeficijenta procjeđivanja, k. Naknadna mjerenja, iz kojih bi se mogao odrediti koeficijent procjeđivanja, nemaju smisla jer su takvi nasipu uglavnom privremeni. Osim toga sastav nasipa je vrlo promjenjivu u prostoru ovisno o vrsti materijala ugrađenoj koja ne mora biti istovrsna po trupu nasipa. Vrijednost koeficijenta procjeđivanja se pretpostavi. Najčešće se odabire prema iskustvu sa sličnim građevinama.

**Proračun procjeđivanja ispod zagata** radi se kada zagat leži na propusnoj podlozi. Za propusnu podlogu nužno je i moguće, terenskim pokusima utvrditi svojstva procjeđivanja, da bi se utvrdilo je li potrebno otješnjenje takve podloge. Ovakvi se slučajevi javljaju kod pregrađivanja riječnih korita koja na dnu imaju slojeve vlastitog nanosa.



Slika 6.6 Procjeđivanje ispod zagata s nepropusnim glinenim ekranom (Tomlinson, 1980.)

Za zagat, koji leži na stijeni potrebno je utvrditi vodopropusnost stijene. Površinski slojevi stijene su jače propusni od dubljih, te ih je potrebno brtviti da bi se smanjilo procjeđivanje.

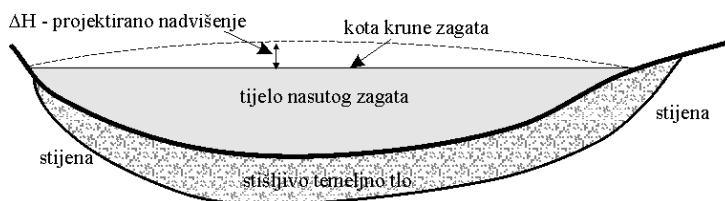
**Analize stabilnosti** uzvodnog i nizvodnog pokosa potrebno je utvrditi za sva moguća radna stanja zagata. Najteže je pravilno odabrati parametre čvrstoće na smicanje i deformacijska svojstva nasipa, za koji se vrši proračun. U većini slučajeva nagibi pokosa se odabiru prema iskustvu, a analize stabilnosti provode parametarskim analizama. Koriste se razne metode proračuna, najčešće numeričke, koje ujedno sadrže i proračune procjeđivanja kroz zagat i ispod zagata. Kako se radi o privremenim građevinama, zadovoljavajući rezultati prihvaćaju se i kada su faktori sigurnosti na klizanje manji od onih za stalne nasipe. Preporuča se proračun provesti prema pripadnom Eurocode-u.

**Proračun slijeganja od vlastite težine** nužno je provesti za visoke nasipe, kod kojih do takvih slijeganja može doći. Kako se zagati najčešće izvode bez kontroliranog zbijanja koje iz tehnoloških razloga nije moguće izvesti, to su deformacijska svojstva ovih nasipa manja od onih koja se propisuju za velike brane. S takvim vrijednostima potrebno je provoditi proračune slijeganja uslijed vlastite težine ako se ne raspolaže s preciznijim podacima. Slijeganje nasipa zagata nije konsolidacijsko jer se ovi nasipi uglavnom izvode od nekoherentnih materijala.

**Proračun slijeganja zagata uslijed slijeganja temeljnog tla opterećenog zagatom** provodi se onda kada zagat leži na stišljivom tlu. Svojstva temeljnog tla utvrđuju se istražnim radovima na terenu i u laboratoriju.

**Proračun utjecaja valova** valja provoditi uvijek kada postoji mogućnost razvoja valova i njihovog utjecaja na zagat. Za takav su proračun potrebni podaci o vjetrovima i razgonu. Ako postoji mogućnost pojave velikih valova, potrebno je uzvodnu stranu na takav utjecaj dimenzionirati opet uvažavajući da se radi o privremenoj građevini.

**Proračun nadvišenja** se radi kada se provedu svi prethodni proračuni. Proračun nadvišenja se izvodi za najveću visinu nasipa, a ostali se dijelovi mogu nadvisiti proporcionalno visini nasipa ako su svi ostali čimbenici koji na to utječu isti. Ako su uvjeti različiti (valovi, temeljno tlo) potrebno je za svaki pojedini slučaj računati potrebno nadvišenje nasipa. Kod pregrada riječnog korita, nadvišenje izgleda kao na slici 6.7.



Slika 6.7 Nadvišenje zagata

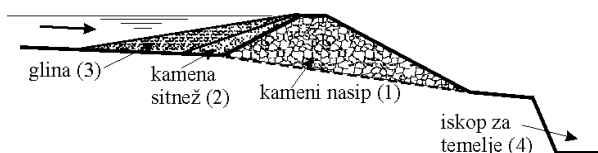
Nadvišenjem se nadoknađuje slijeganje zagata uslijed vlastite težine i uslijed konsolidacijskog slijeganja podtemeljnog tla.

### 6.2.3 Izvedba nasutih zagata

Nasuti zagati izvode se nasipavanjem u mirnoj (jezero, more) ili tekućoj vodi. Nasipavanje se gotovo uvijek vrši s čela bez zbijanja. Iz tog su razloga ovi nasipi uglavnom relativno slabo zbijeni. Nagibi pokosa kod ovakvog nasipavanja, bez obzira na projekte i proračune, poprimaju kutove prirodnog pokosa materijala koji se nasipava i to u potopljenim uvjetima.

Nasipavanje u dubokoj vodi vrši se pomoću specijalnih plovila. Podvodni dio nasipa provjerava se pomoću ronilaca, ako je potrebno.

Nasipavanje pri pregrađivanju riječnih korita vrši se s kopna, s čela na način da se vozila kreću po već nasutom dijelu zagata. Iz tog su razloga ovakvi nasipi nešto malo bolje zbijeni.



Slika 6.8 Zagat – nasip s glinenim ekranom, redoslijed izvođenja (HE Đale na Cetini)

Nasipavanjem u tekuću vodu zatvara se riječno korito. Nasipa se kamen dovoljno krupan da ga voda ne odnese. Suženjem korita povećava se brzina vode i krupnoća kamena. Ovakav je nasip vodopropusan. Da bi se protok vode zaustavio,

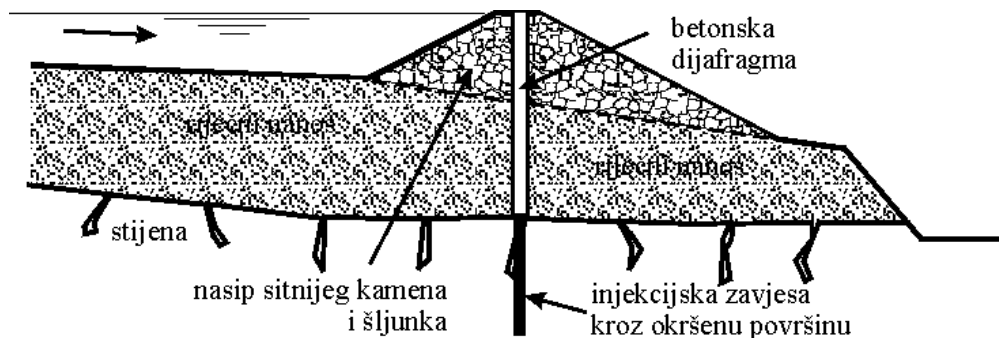
ugrađuje se nepropusni dio nasipa. Na primjeru HE Đale to je dvoslojni nasip prvo kamene sitneži i šljunka koji djelomično popunjava šupljine u kamenom nasipu, a zatim se ugrađuje glina koja popunjava šupljine u kamenoj sitneži i šljunku.

Za normalan rad potrebno je osigurati protok vode pored radilišta za vrijeme građenja. O načinu evakuacije vode za vrijeme građenja biti će govora u poglavlju o građevnim jamama.

Nakon što se izvede trup zagata, izvodi se vodonepropusni dio ako je to projektom predviđeno. Na slici 6.8. prikazan je redosljed izvođenja zagata od kamenog nasipa s uzvodnim vodonepropusnim slojem gline.

Ako se nepropusni sloj nalazi u sredini zagata kako je to prikazano na primjerima c i d na slici 6.3, on se izvodi s krune gotovog nasipa. Ovisno o vrsti materijala u nasipu, može se zabijati čelično žmurje, izvesti glinobetonska ili betonska dijafragma, zavjesa pilot do pilota ili jedan ili više redova mlazno injektiranih stupnjaka.

Moguće su i kombinacije nasutog zagata s nepropusnom jezgrom kroz zagat i propusno temeljno tlo i s injektiranjem u površinski sloj raspucale stijene. Ovo je čest slučaj u vapnencima dinarskog krša. Površinski sloj stijene je okršen i raspucan te ga je nužno brtviti. U tu svrhu služe injekcijske zavjese koje se uvijek izvode ispod velikih nasutih brana u kršu, ali se moraju, u slučaju velike propusnosti, izvesti ispod zagata, da bi se prostori unutar zagata osigurali od prodora vode. Jedan takav tip zagata prikazan je na slici 6.9.



Slika 6.9 Zagati na Neretvi (HE Salakovac, BiH.)

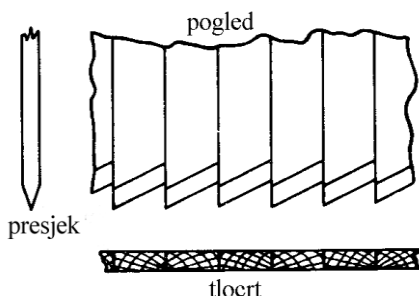
Kod zagata sa slike 6.9 potrebno je u dijelove betonske dijafragme ugraditi cijevi kroz koje će se bušiti za potrebe injektiranja. Na nekim dijelovima izvedena je armiranobetonska dijafragma koja je naknadno otkopana i služi kao sastavni dio građevine.

Nasuti zagati mogu se kombinirati i s drugim vrstama zagata pa nastaju najrazličitiji oblici ovih građevina.

## 6.3 ZAGATI OD DRVENOG I ČELIČNOG ŽMURJA

### 6.3.1 Drveni zagati

Drveno žmurje je vjerojatno najstarije gradivo za izradu zagata. Bilo je u širokoj primjeni u 19. stoljeću. Danas je manje u upotrebi. U poglavlju 5 prikazano je nekoliko vrsta platice od kojih se izvodi ovo žmurje. Može se izvoditi u kombinaciji s čeličnim I profilima slično berlinskom zidu. Koristi se za manje visine vode. Na slici 6.10 prikazan je pogled, tlocrt i poprečni presjek na zabijene drvene platice, a na slici 6.11 nekoliko načina spajanja drvene građe u platice.

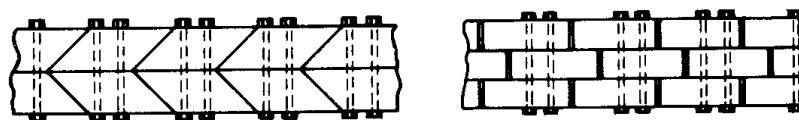


Slika 6.10 Drvene platice za zagat

Na slici 6.10 vide se zakošenja vrhova platice. Na taj način se prilikom zabijanja platice usmjeravaju jedna ka drugoj da bi se spoj među njima što bolje brtvio.



toredno zabijeno žmurje s preklopom



građa spojena vijcima

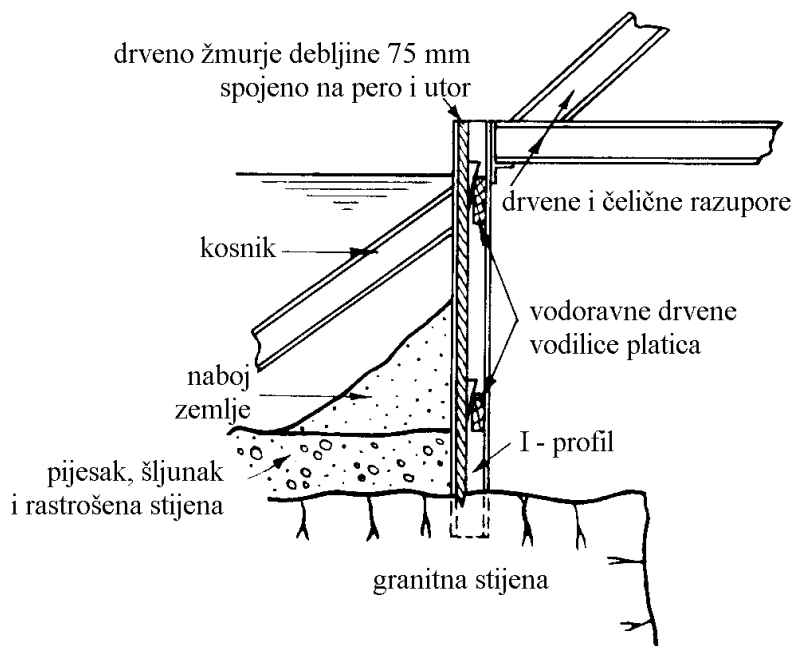
Slika 6.11 Nekoliko primjera spajanja drvene građe u platice

Način spajanja drvene građe u platice sa slike 6.11 ima svrhu što boljeg brtvljenja, kao bitnog zadatka zagata od drvenog žmurja.

Drvene platice ne mogu se zabiti u tlo s krupnijim komadima kamena i samcima.



Na slici 6.12 prikazan je zagat od drvenog žmurja u kombinaciji s čeličnim I profilima, razuporama i nabijenim tлом za bolje brtvljenje. Ovo je primjer zagata za podzemnu željeznicu u Stockholmu (Tomlinson, 1980.).



Slika 6.12 Zagat od drvenih platica i čeličnih profila i razupora

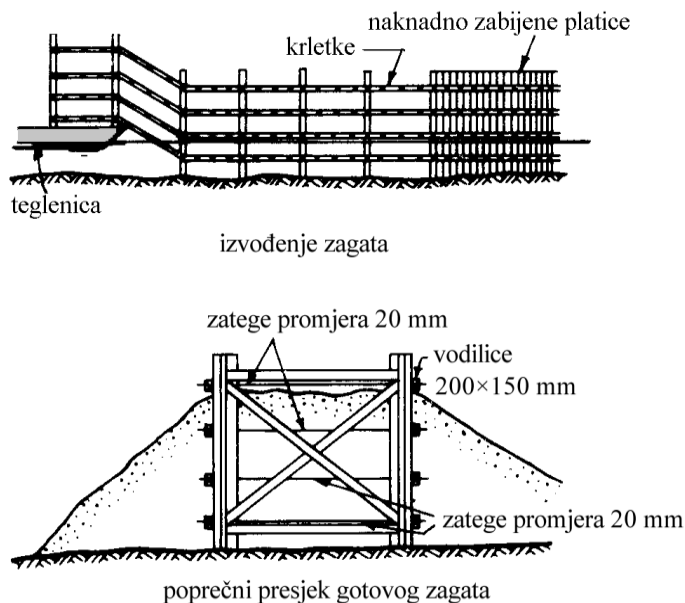
Da bi se drvene platice mogle zabiti u dubokoj vodi, potrebne su im vodilice. Na slici 6.12 dvije su vodoravne drvene vodilice pričvršćene prirubnicama na I profile. Nakon što su platice zabijene, klinovima su dodatno učvršćene na vodilice.

Tomlinson (1980.) navodi prema Fowleru (1920.), podatke o vezi između debljine platica, visine vodnog stupca od kojeg zagat štiti gradilište i razmaku rebara - vodilica. Podaci su dani u tabeli 6.1.

Tabela 6.1 Razmak rebara – vodilica ovisno o debljini platica i visini stupca vanjske vode

Debljina platica [mm]	Visina vanjske vode [m]	Razmak vodilica [m]
75	<1,5	1,8
75	6,4	0,9
100	2,7	2,0
100	5,4	1,5
225	6,0	2,7

Osim drvenog žmurja, drvena građa služi za izradu krletki, koje se pune kamenom i/ili šljunkom. Krletke se izrađuju van mjesta ugradnje, prenose ili dotegle na mjesto ugradnje i potope na dno. Zatim se ispune kamenom što im daje stabilnost. Vodopropusnost se postiže naknadnim zabijanjem drvenih ili čeličnih platica s vanjske strane krletke. Na slici 6.13 prikazan je jedan ovakav zagat.



Slika 6.13 Zagat od drvenih krletki i nasipa

### 6.3.2 Zagati od čeličnog žmurja

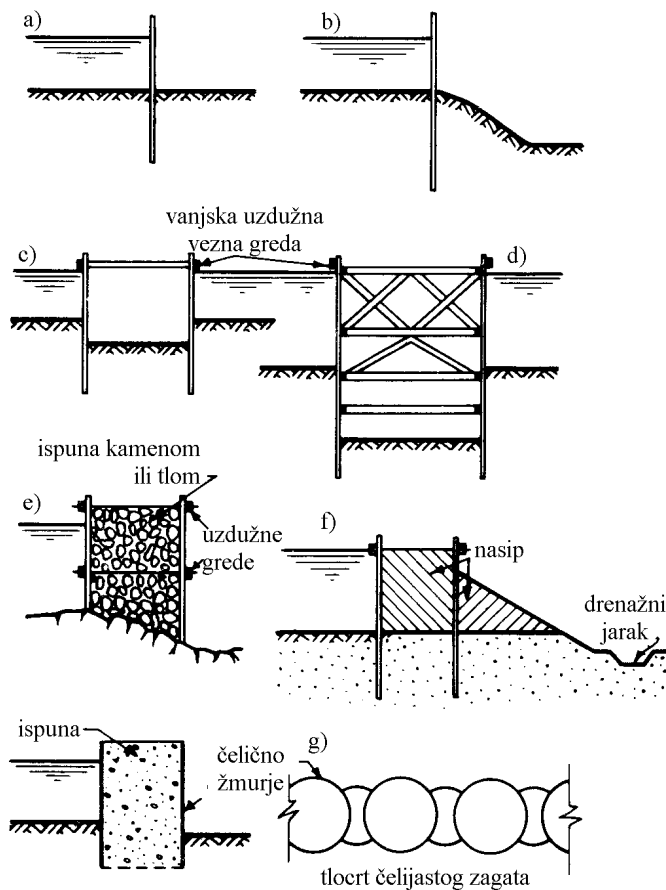
Čelično žmurje se već veoma dugo koristi za izradu zagata. Primjenjivo je svugdje gdje se može zabiti u tlo. Za takve su radove pogodni pijesci, meke do polučvrste gline, morski i riječni mulj i slični materijali. Čelično žmurje nije moguće koristiti ako se u tlu u koje se žmurje zabija mogu pojaviti krupniji komadi kamena ili samci.

Zagati od čeličnog žmurja mogu biti privremene i trajne građevine. Ako su privremene građevine, mogu se platice po završetku radova vaditi i ponovo upotrijebiti na drugom mjestu. Višestruka upotreba istih platica snižavaju cijenu radova, jer se isti materijal koristi nekoliko puta.

Čelično žmurje je našlo široku primjenu u zemljama kao što je Nizozemska, Njemačka, Francuska i Poljska. Javlja se tamo gdje je razvijena industrija čelika i povoljni uvjeti u tlu za zabijanje platica.

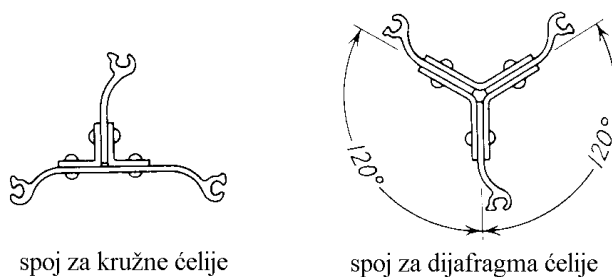
U zemljama s razvijenom cementnom industrijom više se koriste betonske, glino-betonske i armirano-betonske dijafragme, bušeni piloti i novije tehnologije kao na pr. mlazno injektiranje.

Na slici 6.14 prikazano je nekoliko zagata izrađenih od čeličnog žmurja.



Slika 6.14 Zagati od čeličnog žmurja (Tomlinson, 1980.)

Za ćelijaste zagate izrađuju se posebne platice za spojeve između ćelija. Na slici 6.15 prikazani su presjeci kroz dvije takve spojne platice. Svaka od njih je prilagođena odgovarajućem obliku ćelijastog zagata.

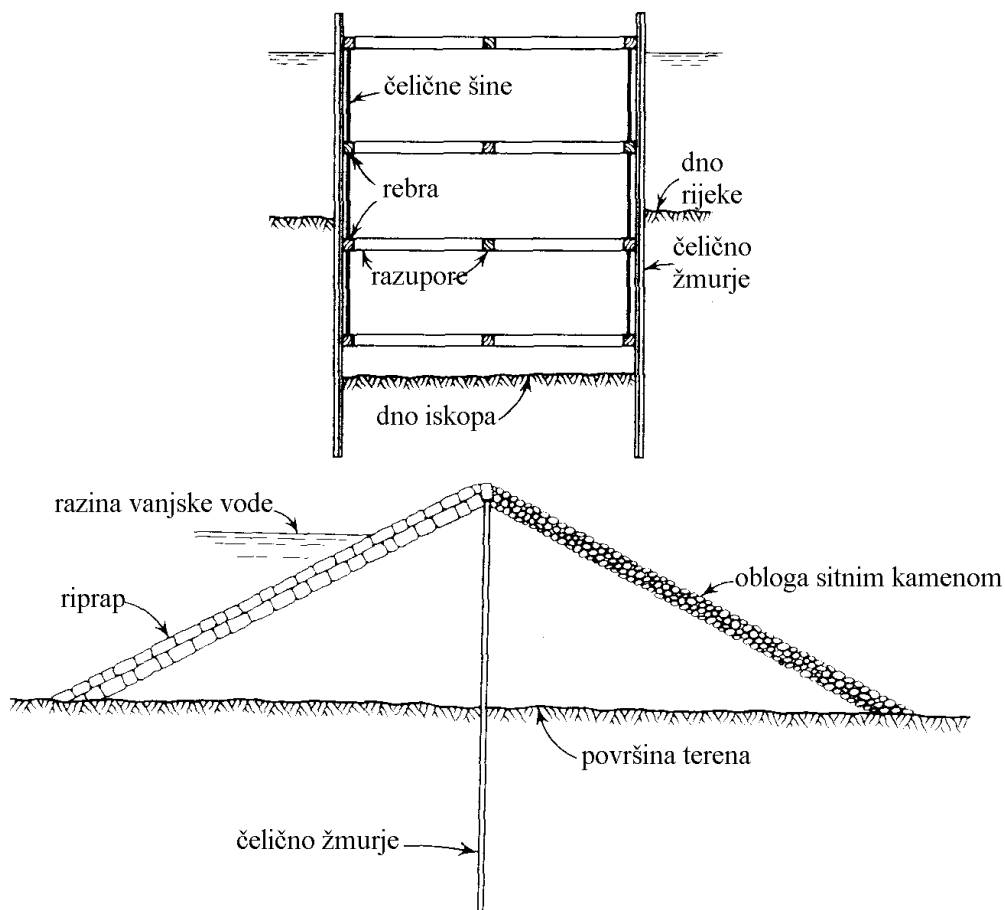


Slika 6.15 Spojne platice za ćelijaste zagate od čeličnog žmurja

Na slikama 5.21 i 5.22 prikazano je nekoliko poprečnih presjeka čeličnih platica koje se koriste i za izradu zagata.

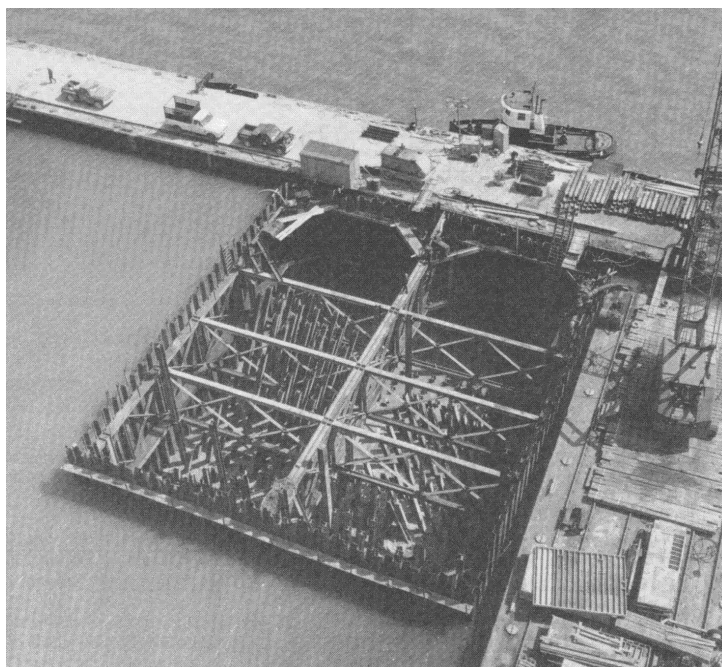
**Jednoredno čelično žmurje** se koristi kod manjih dubina vode, kao slobodno stojeća zagatna stjenka, (slika 6.14, primjer a) i b)). Primjer sa slike 6.14 b), na strani gradilišta ima zemljanu bermu za povećanje stabilnosti.

Za veće dubine koristi se razuprto žmurje (primjeri na slici 6.14 c) i d) i 6.16), ako je dovoljno blizu. Može biti zaštićeno nasipom, kao na slici 6.16.



Slika 6.16 Mogući oblici zagata od jednorednog čeličnog žmurja (Moran, 1974.)

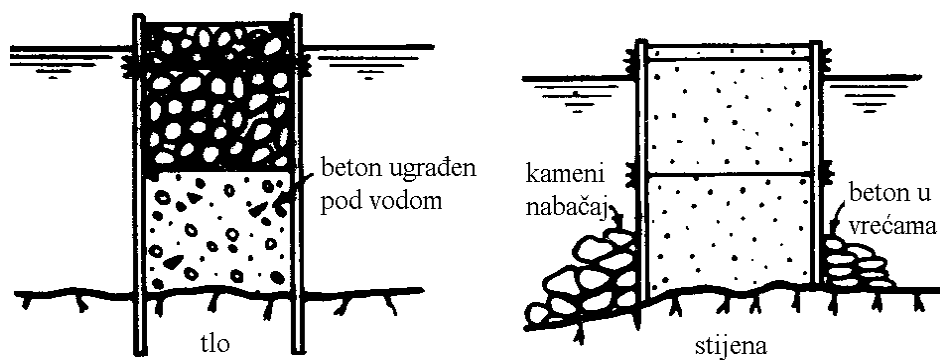
Na slici 6.17 prikazan je tipični zagat od jednorednog čeličnog žmurja. Vide se vodoravne vodilice – rebra i sustav razupora unutar zagata (Dismuke, 1991.). Unutar zagata vide se zabijeni čelični profili pripremljeni za izvedbu temelja.



Slika 6.17 Jednoredni zagat od čeličnog žmurja sa sustavom razupora

**Zagati od dvorednog čeličnog žmurja** koriste se kada nije moguće žmurje razupirati. Koriste se uglavnom za zaštitu gradilišta smještenih u dubokoj vodi. Sastoje se od dva reda čeličnog žmurja ili od vanjskog reda od čeličnog, a unutarnjeg reda od drvenog žmurja. Ova su dva reda međusobno povezana zategama i privremenim razuporama. Žmurje može biti zabijeno u tlo, ali i samo oslonjeno na stijensku podlogu. Između ova dva reda žmurja nasipa se materijal te tako nastaje gravitaciona građevina koja mora biti vododrživa (slika 6.14 e) i f).

Na slici 6.18 prikazane su mogućnosti oslanjanja zagata od dvorednog žmurja na tlo.



Slika 6.18 Zagati od dvorednog žmurja (Tomlinson, 1980.)

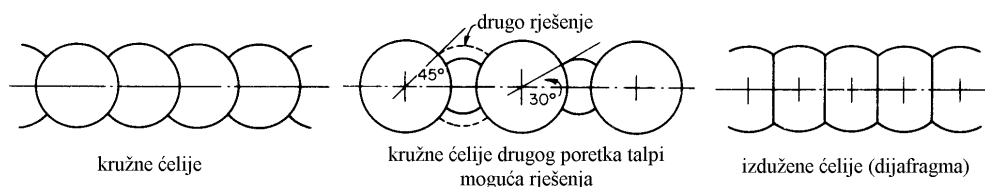
Kada je podloga tvrda i u nju nije moguće zabiti žmurje, mora se zaštititi dodirna ploha zagat-tlo od prodora vode. Na slici 6.18 vidi se da je to moguće izvesti vrećama punjenim betonom. Ovakvi zagati su osjetljivi na klizanje po plohi temelj – tlo, te ih je u tu svrhu potrebno stabilizirati kamenim nabačajem i/ili vrećama s pijeskom ili betonom.

Vodonepropusnost se kod ovih zagata postiže žmurjem, a ne ispunom. S unutarnje strane zagata treba u žmurju ostaviti otvore za istjecanje zarobljene vode koja bi inače između žmurja stvarala hidrostatski pritisak, na koji se ono ne proračunava.

Ispuna zagata uvijek se izvodi u vodi. Iz tog razloga nije moguće ovaj nasip zbijati. Zbog toga se u zagate ugrađuje materijal koji ne zahtijeva zbijanje, kao što su kamen, šljunak ili podvodni beton. Dio zapunjen podvodnim betonom smanjuje pritisak nasutog materijala na žmurje što je ponekad korisno da bi se smanjile dimenzije platice.

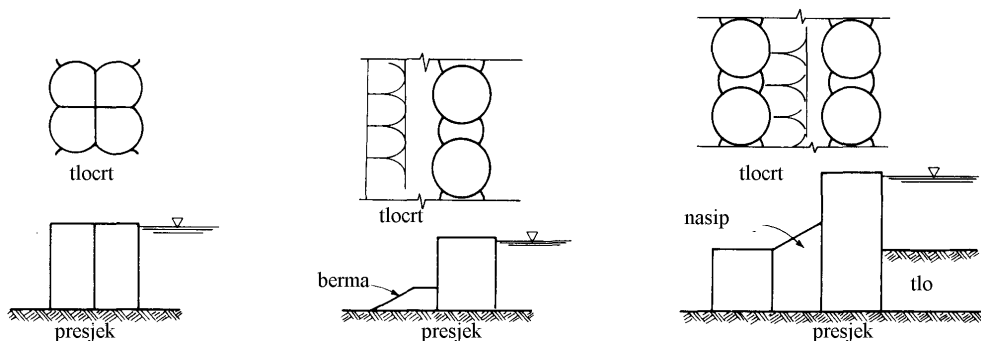
**Čelijasti zagati** se koriste za veće zahvate, kada nema prostora za nasip ili kada bi nasip zbog dubine vode bio ekonomski neopravdan.

Ima ih raznih vrsta, prema tlocrtnom izgledu, poprečnim presjecima, dodatnim nasipima i td. Svi se izvode tako da se zabije čelično žmurje u zatvorene oblike i zatim puni materijalom. Na slici 6.19 prikazani su tlocrti jednostavnih čelijastih zagata.

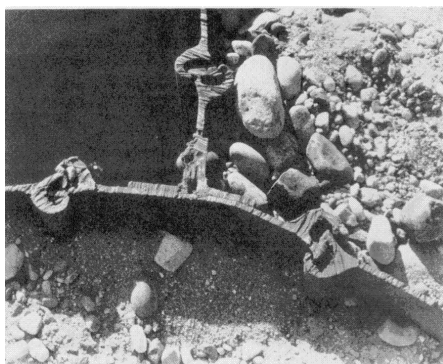


Slika 6.19 Tlocrti jednorednih čelijastih zagata (Tomlinson, 1980.)

Za veće dubine vode koriste se zagati masivnih poprečnih presjeka prikazani na slici 6.20 u tlocrtu i poprečnom presjeku.



Slika 6.20 Čelijasti zagati složenih presjeka (Dismuke, 1991.)



Slika 6.21 Vezna platica za ćelijaste zagate od ćelićnog žmurja

Primjer ćelijastog zagata dan je na slici 6.22.



Slika 6.22 Ćelijasti zagat, platice tipa Larsen

### 6.3.3 Dimenzioniranje zagata od drvenih i čeličnih platica

#### 6.3.3.1 Opterećenja na zagate

Da bi se zagat mogao dimenzionirati potrebno je u detalje upoznati opterećenja koja mogu djelovati na njega u toku građenja i za vrijeme korištenja. Na zagate ne djeluju uvijek sva moguća opterećenja koja se mogu pojaviti. To ovisi o mjestu gradnje, lokalnim uvjetima i uvjetima u tlu.

Za zagate u tekućoj vodi potrebni su (Dismuke , 1991.) slijedeći podaci:

1. razina male i velike vode;
2. vjerojatna protoka i promjena protoke za vrijeme građenja pod zaštitom zagata;
3. učestalost i trajanje leda;
4. profil dubina;
5. uzdužni i poprečni presjeci;
6. geotehnički profil temeljnog tla;
7. podaci o vodopropusnosti, čvrstoći na smicanje i konsolidaciji temeljnog tla;
8. pozajmišta šljunka i kamenolomi;
9. kakvoća vode
10. mogući utjecaj na okoliš
11. smetnje u riječnom prometu u okolišu radilišta.

Kada se radi na morskoj obali, neki od navedenih podataka će biti nepotrebni, ali će trebati poznavati neke druge:

1. o valovima;
2. o plimi i oseci;
3. brzini pojave nevremena;
4. smještaju meteorološke postaje;
5. utjecaj brodova, mjesta priveza.

Pri dimenzioniranju zagata potrebno je izvršiti provjeru na slijedeće utjecaje:

1. vanjska opterećenja;
2. procjeđivanje;
3. razliku visine vanjske i unutarnje vode i prelijevanje;
4. eroziju;
5. nosivost temeljnog tla;
6. slijeganje;
7. dozvoljene pomake;
8. trajanje građevine.

**Dimenzioniranje jednorednog žmurja** opisano je u poglavlju o zagatnim stjenkama. Jedina je razlika što kada žmurje služi kao zagat, na njega djeluje opterećenje vodom na slobodnoj visini. Može biti slobodno-stojeće ili razuprto. Način proračuna prikazan je u poglavlju 5.3.1. Bitan dio proračuna ovog zagata je kontrola mogućnosti pojave hidrauličkog sloma, tim više što su ovi zagati uglavnom uvijek višestruko razuprti što smanjuje dubinu zabijanja, potrebnu za stabilnost zagata.

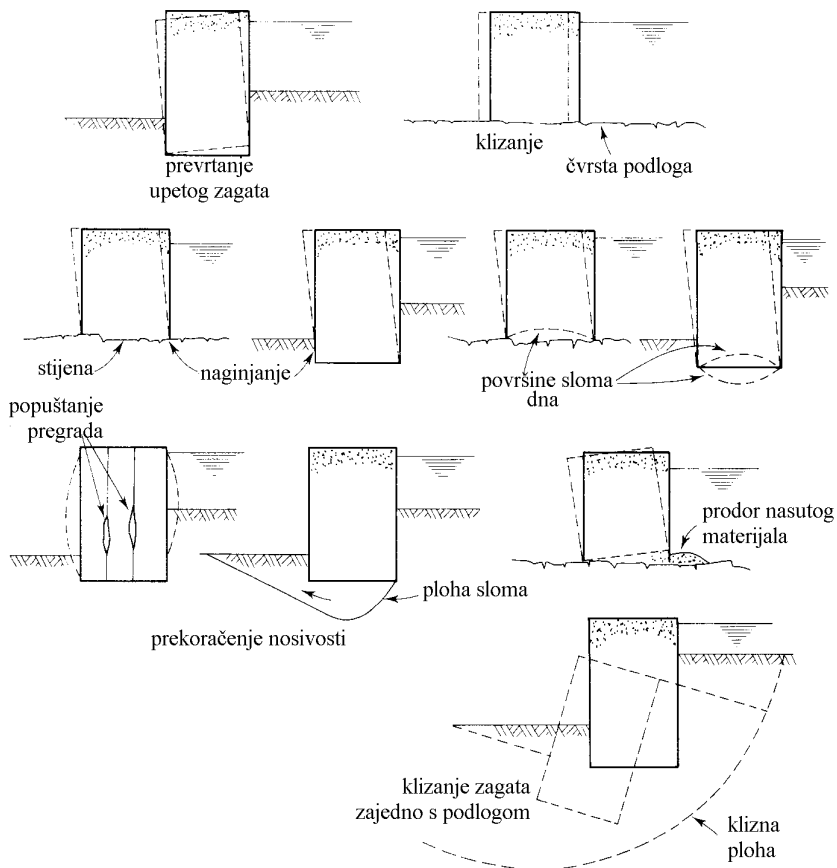


**Dimenzioniranje dvorednog žmurja** svodi se na dimenzioniranje zagatne stjenke opterećene tlom i dimenzioniranje zagata kao cjeline opterećenog vodom s jedne strane.

Razmak usporednih zagatnih stjenki uvjetuje veličinu opterećenja tlom. Zbog blizine stjenki opterećenje se ponaša kao u silosu, tj. ne može se javiti puni aktivni pritisak tla na stjenke zagata.

Zagatna stjenka opterećena tlom u zagatu, uvijek je pričvršćena zategama. Broj zatega ovisi o visini slobodne dionice iznad vode. Zatege se dimenzioniraju na ležajne reakcije kao vlačni elementi. Dimenzioniranje ovog zagata kao cjeline ovisi o tome je li žmurje zabijeno u dno ili zagat samo leži na podlozi. Ako zagat samo leži na podlozi, dimenzionira se kao gravitacijski potporni zid. Ako je žmurje zabijeno u tlo potrebno je računski odrediti potrebnu dubinu zabijanja da ne dođe do čupanja žmurja.

**Dimenzioniranje ćelijastih zagata** svodi se na provjeru mogućih slučajeva sloma prikazanih na slici 6.23.



Slika 6.23 Mogući načini sloma ćelijastih zagata

Na slici 6.23 prikazani su slijedeći mogući scenariji oštećenja čelijastih zagata na koje je potrebno izvršiti provjeru:

1. prevrtanja upetog žmurja zagata i odizanja osnove;
2. klizanja slobodno oslonjenog zagata po čvrstoj podlozi;
3. otpora naginjanju uslijed popuštanja čvrstoće na smicanje ispune;
4. otpora naginjanju uslijed sloma u osnovici zagata;
5. slom unutarnjih veza;
6. prekoračenje nosivosti temeljnog tla;
7. gubitak ispune uslijed izdizanja žmurja;
8. klizanje zajedno s okolnim tlom i/ili nasipom.

Proračuni bitni za dimenzioniranje ovih zagata su :

1. kontrola na prevrtanje, naginjanje i zaokretanje čelija;
2. slom unutarnjih veza;
3. stabilnost osnove (nosivost temeljnog tla) i klizanje;
4. gubitak punjenja uslijed izdizanja žmurja;
5. prevrtanje.

Za proračune je potrebno uvesti neka pojednostavljena. Ona se prvenstveno odnose na geometriju. Pokušaji trodimenzionalnog modeliranja metodom konačnih elemenata pokazali su se neekonomični za proračun ovih građevina.

Posebnost proračuna ovih građevina je proračun unutarnje stabilnosti. Za te se proračune koriste dvije metode koje su se postepeno razvijale od strane mnogih autora: 1) Metoda vodoravnog posmika, Cummings (1957.); 2) metoda uspravnog posmika, Terzaghi (1945.). Belz je 1970. godine izvanredno prikazao obje ove metode. Proračuni se mogu naći u literaturi (Dismuke, 1991.)

### **6.3.4 Izvedba zagata od drvenih i čeličnih platica**

Za izvedbu ovih zagata potrebne su opsežne pripreme. Valja imati na umu da se radi na vodi. Pri radu na mirnoj vodi, (jezero, more) poteškoće stvaraju valovi i plima i oseka. Pri radu u tekućoj vodi poteškoće stvara strujna sila vode. Zatvaranjem korita djelomično ili potpuno, potrebno je osigurati protok tekućoj vodi. Pri potpunom pregrađivanju potrebno je osigurati građevine za evakuaciju vode za vrijeme građenja. Pri djelomičnom pregrađivanju, što se obično radi na velikim vodotocima, preostali dio korita je znatno sužen, a brzina vode povećana. Ako je još vodotok plovni, to može stvarati dodatne poteškoće kako gradilištu tako i prometu.

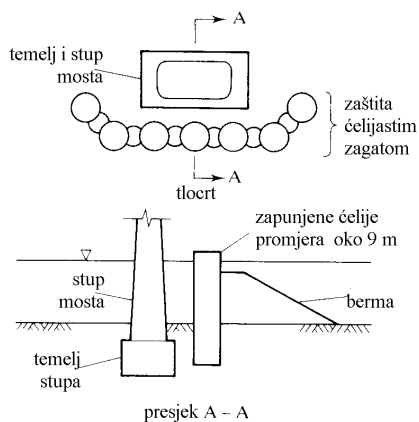
Nakon što se izvrše sve pripreme radnje za izvedbu zagata u dubokoj vodi, pristupa se prvo zabijanju platici odnosno izvedbi zagatne stjenke. Drugi je korak njeno učvršćivanje i povezivanje iznad razine vode.

Zatim slijedi zatrpavanje čelija predviđenim materijalom. Nasipavanje se može izvoditi dizalicama, a ako u blizini ima prikladnog materijala (pijeska ili sitnih šljunka) i refuliranjem posebnim brodovima – crpkama (refulerima), koji inače služe za čišćenja dna od nanosa i produbljivanja korita.

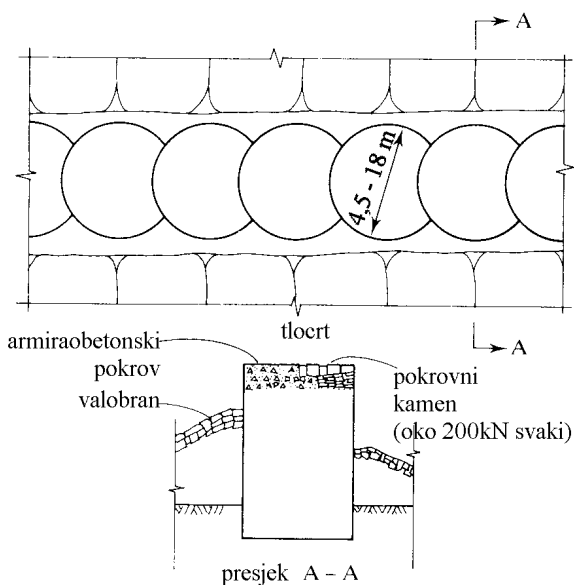
Ako je izvan čelija predviđen još nekakav nasip i on se mora izvesti prije crpljenja vode iz prostora kojeg štiti zagat.

## 6.4 OSTALE VRSTE ZAGATA

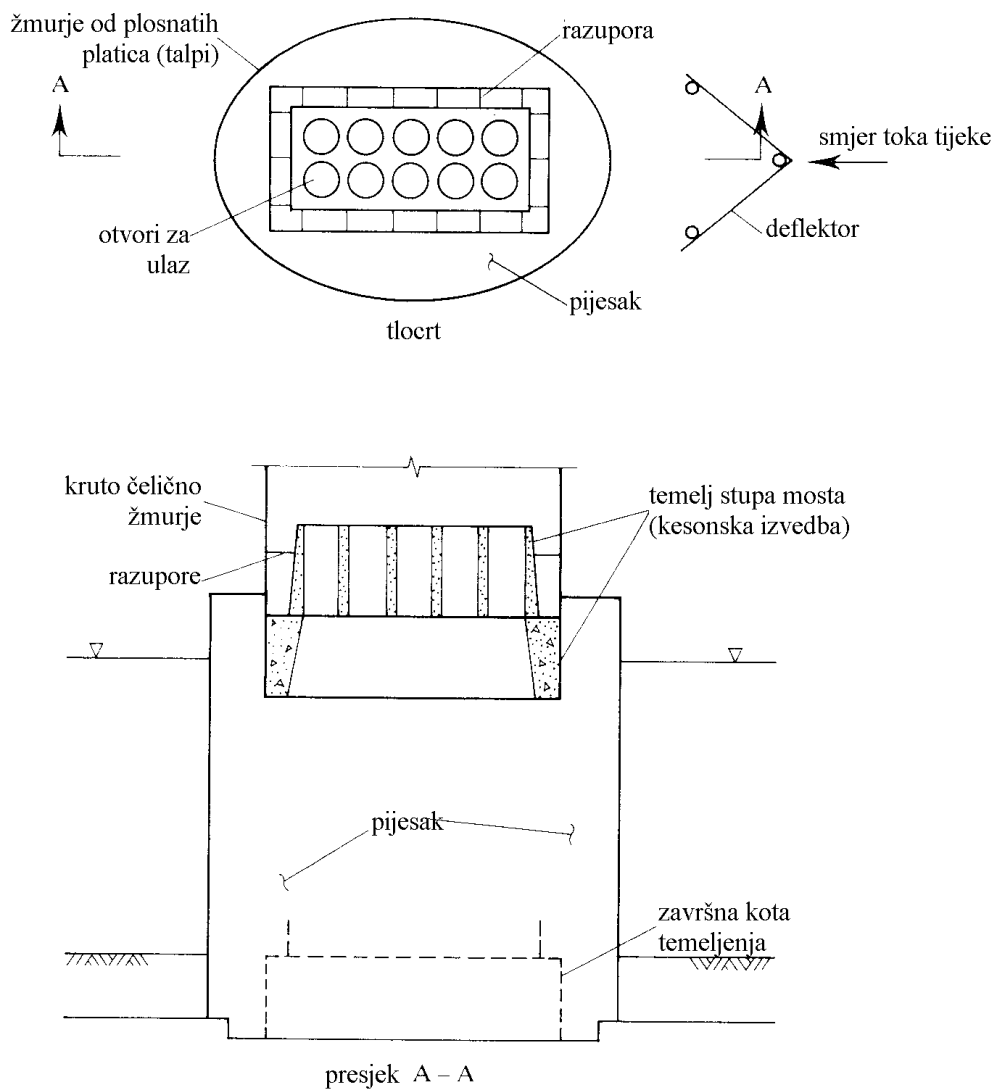
Postoji bezbroj mogućih kombinacija izvedbe zagata, te ih je veoma teško sve nabrojiti. Koji će oblik zagat imati, kakav će se materijal za gradnju upotrijebiti i kojom će se tehnologijom izvoditi teško je nabrojiti na jednom mjestu. Stoga ovo poglavlje nije detaljnije razrađeno jer bi zahtijevalo suviše detalja koji nisu smisao pisanja ove knjige. Za šira saznanja o zagatima čitaocu se može preporučiti navedena literatura. Na slici 6.24 prikazano je nekoliko mogućih namjenskih oblika zagata.



Slika 6.24 (1) Čelijasti zaštitni zagat



Slika 6.24 (2) Čelijasti zagat kao valobran



Slika 6.24 (3) Umjetni otok

Postoji mnogo mogućnosti oblikovanja zagata koje nije bilo moguće sve nabrojiti u ovom poglavlju.

Neki od načina izvedbe zagata vezani su uz izvedbu građevnih jama te će tamo biti i opisani.

## GLAVE SIDARA



## 7 SIDRENE POTPORNE GRAĐEVINE I SIDRA

### 7.1 OPĆENITO

U nekoliko prethodnih poglavlja bilo je već govora o sidrima, ali kao dodatnim nosivim dijelovima potpornih građevina. Kod sidrenih potpornih građevina glavni nosivi dio je SIDRO. Ono može biti samostalno, a može djelovati s nekom površinskom građevinom koja nije temeljni nosivi dio.

Sidrenih potpornih građevina ima najrazličitijih oblika i vrsta i teško ih je sve nabrojiti i opisati. Značaj sidrenih građevina možda je najbolje vidljiv na slikama 1.1 i 1.2, građevna jama brodske prevodnice za branu Tri klanca u Kini. Tamo su sidra jedini nosivi dijelovi zaštite pokosa iskopa građevne jame, ali i kasnijeg pokosa iznad buduće brodske prevodnice.



Slika 7.1 Sidrena građevina s armirano betonskom pločom na površini pokosa

Na slici 7.1 jasno se vidi temeljno svojstvo ovakvih građevina. One se grade usporedo s iskopom po visini. Postepeno se spuštaju i NE MORAJU IMATI TEMELJ.

Sidrene građevine mogle bi se svrstati i u grupu OJAČANOG TLA, kamo spadaju još neke vrste potpornih građevina (armirano tlo, iglano ili čavlano tlo). Kako je iglano tlo u svakom pogledu bliže armiranom tlu o njemu se neće govoriti u ovom poglavlju. Jedina razlika između armiranog tla i iglanog (čavlanog) tla je u tome što se armatura ugrađuje u nasipe a iglanje (čavlanje) se izvodi u autohtonom tlu. Sidrene građevine djeluju malo drugačije od ostalih skupina ojačanog tla.

Samostalna sidra, bez površinske zaštite pokosa mogu se izvoditi samo u stijenskoj masi koja je dovoljno kompaktna na površini pa se s nje ne odvajaju manji blokovi, koji se nalaze među sidrima. Površina stijene ne smije biti podložna utjecaju atmosferilija. Samostalna sidra koriste se za učvršćenje pojedinačnih blokova stijene za koje se utvrdi da bi bez zaštite mogli ugroziti prostor ispred zasjeka. Sidra se kao samostalna zaštita pokosa koriste samo u usjecima i zasjecima. U svim drugim slučajevima, mora se površina štititi nekim građevinskim zahvatom koji će osigurati trajnu cjelovitost površine pokosa. To mogu biti uzdužni nosači, poprečni nosači, roštilji, armirano betonske ploče, prskani beton, zaštitna mreža i njihova kombinacija.

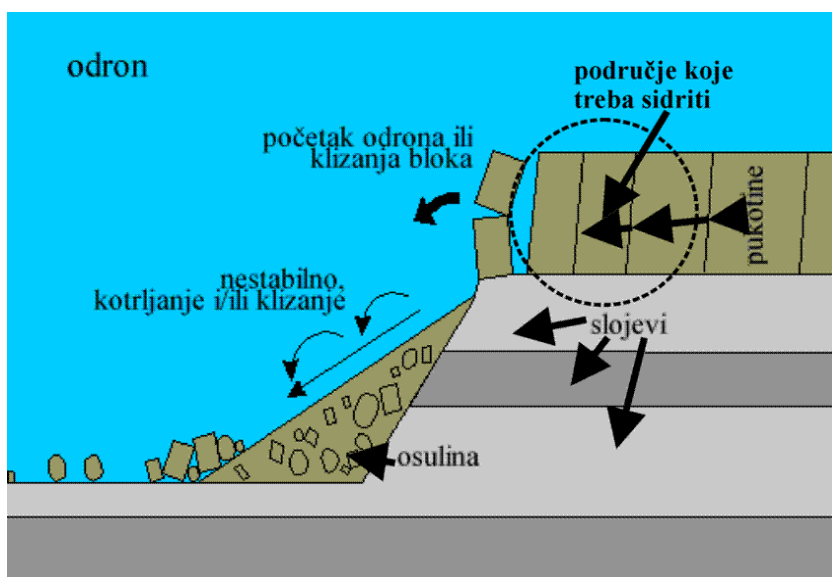


Slika 7.2 Sidreni blokovi i glave niza sidara, otok Tokushima, Japan  
([www.kingston.ac.uk](http://www.kingston.ac.uk))

## 7.2 SIDRA

Sidra su linijske geotehničke građevine ugrađene u tlo ili stijensku masu. Mogu djelovati samostalno, ali i kao dijelovi složenih građevinskih zahvata. Moraju djelovati tako da pritiske s površine i/ili labilnih dijelova pokosa prenesu u duboke, stabilne slojeve tla ili stijene. Sidra su građevine opterećene na vlak i služe za unošenje i/ili preuzimanje vlačnih naprezanja u tlu. Ugrađuju se na onim mjestima gdje se pojavljuju vlačna naprezanja koja tlo ili ploha dodira građevina – tlo, ne mogu preuzeti.

Sidra se u građevinarstvu koriste pri vrlo različitim vrstama radova. U ovom poglavlju bit će govora samo o onim sidrima koja služe kao pridržanja pokosa usjeka u tlu i/ili stijenskoj masi. Pod pridržanjem pokosa podrazumijevaju se svi oni zahvati koji osiguravaju da izvedeni pokosi budu sigurni i stabilni. To može biti stabilizacija pojedinih blokova stijene, slojeva koji su potencijalno nestabilni, lica kosina podložnih rastrošbi, ali i usjeka dubokih građevnih jama neposredno uz postojeće građevine odnosno njihove temelje.



Slika 7.3 Područje moguće primjene sidara

U ukupnom opsegu mogućeg korištenja sidara u geotehničkim radovima i građevinama, ovo je samo mali dio područja primjene sidara. Sidra se mogu samostalno koristiti pri stabilizaciji klizišta. I tada ona sudjeluju u građevini koja bi se mogla smatrati potpornom građevinom. U takvom sustavu su odnosi tla, sidara i ostalih dijelova građevine mnogo složeniji od opsega predviđenog za iznošenje u ovom poglavlju. Tu se preklapaju dva geotehnička područja rada: potporne građevine i sanacija klizišta. Valja napomenuti da potporne građevine, ne samo sidra nego i ostale građevine, mogu naći svoje mjesto u sanaciji klizišta. Sanacija klizišta posebno je područje geotehnike te ovdje o tome neće biti govora.



## 7.2.1 Vrste sidara i način prijenosa sila u tlo

### 7.2.1.1 Vrste sidara

Sidra se mogu podijeliti na više načina (Muhovec, 1987.):

- 1) Prema građi, na štapna i kabelaška;
- 2) Prema tlu u koje su ugrađena, na sidra u tlu (anchors) i sidra u stijeni (rock bolts);
- 3) Prema vrsti sidrišta na uklinjena sidra s točkastim sidrištem i injektirana sidra (grout anchors) sa sidrišnom dionicom duž cijelog sidra ili jednog njegovog dijela;
- 4) Prema načinu djelovanja na pasivna i aktivna sidra;
- 5) Prema vremenu djelovanja na trajna i privremena sidra.

Sidra nose nazive prema proizvođačima koji su ih patentirali.

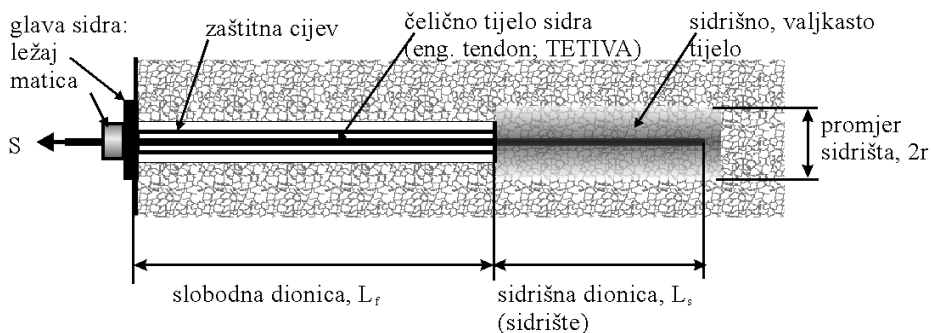
U praksi se susreću sidra koja predstavljaju različite kombinacije prethodno spomenutih svojstava prema kojima su sidra podijeljena. Proizvođači sidara dijele ih na sidra povezana tлом pomoću injektirane, sidrišne dionice i sidra s gotovo točkasto, mehaničkim prijenosom sile na stijensku masu.

Još jedna osobina sidra nije navedena u gornjoj podjeli, a to je sidro sa i bez slobodne dionice. Većina sidara ima slobodnu dionicu. Slobodna je dionica vrlo važna za djelovanje sidra.

Sva sidra izrađena od metala, podložna su koroziji. Utjecaj korozije nije bitan kod privremenih sidara dok je kod trajnih sidara potrebno izvršiti antikorozivnu zaštitu.

### 7.2.1.2 Način prijenosa sile u tlo

Pored svih nabrojanih vrsta i mogućih raznolikosti sidara, za potporne sidrene građevine najčešće je u upotrebi PREDNAPETO sidro sa slobodnom i produženom sidrišnom dionicom. Takvo je sidro prikazano na slici 7.4.



Slika 7.4 Skica dijelova sidra injektiranog na jednom dijelu

Silu  $S$ , čelično tijelo sidra, tetiva, prenosi na sidrišno tijelo, a ono na tlo. Pri tome je granična vrijednost sile,  $S_f$ :

$$S_f = \tau * (2r\pi) * L_s \quad (7.1)$$

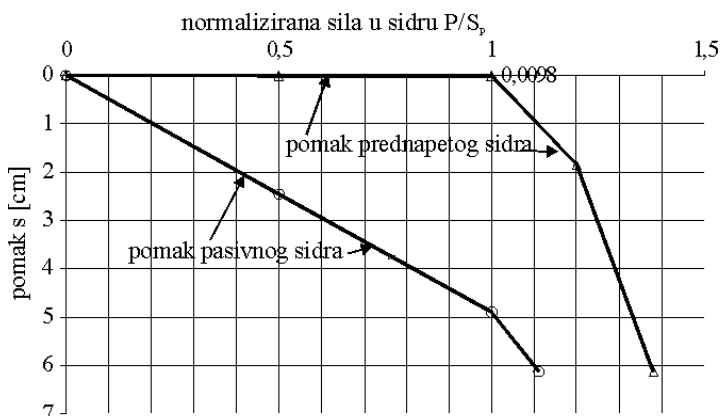
gdje je:

$$\tau = \alpha * c + \sigma_n * \text{tg}\varphi \quad (7.2)$$

čvrstoća na smicanje na kritičnom plaštu sidrišnjog tijela polumjera,  $r$ . Pri tom je,  $L_s$ , duljina sidrišne dionice,  $\alpha$ , koeficijent prionjivosti ( $\alpha * c$  je adhezija) između sidrišnjog tijela i tla, a,  $\sigma_n$ , naprezanje okomito na plašt valjka sidrišnjog tijela. Naprezanje,  $\sigma_n$ , ovisi o geostatičkim napreznjima u okolini sidrišne dionice.

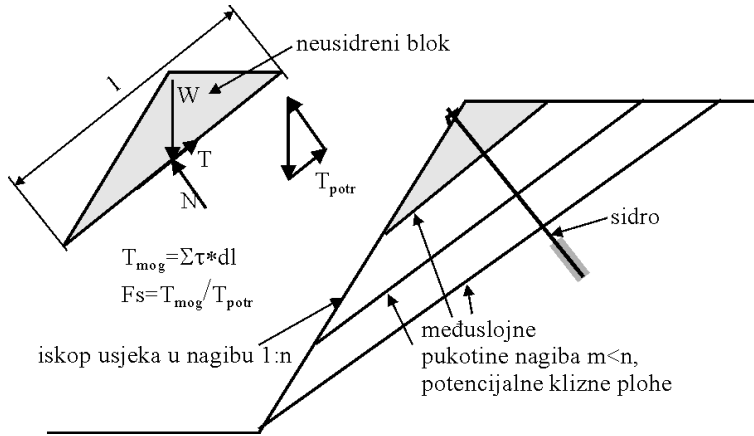
U građevinama, u kojima je sidro temeljni dio podupore, za učinkovitost sidra bitno je PREDNAPREZANJE. Sidro je na taj način aktivno odmah nakon prednapreznja što znači da nije potreban pomak da bi se aktivirao učinak sidra. Prilikom naknadnih pomaka u usidrenom tlu, u sidru nastaje SAMONAPREZANJE, povećanje sile uslijed novonastalog pomaka u tlu.

Na slici 7.5 prikazan je učinak prednapreznja na pomake u tlu (Muhovec, 1987.) Ako je,  $S_p$ , sila prednapreznja a,  $P$ , trenutna veličina sile u sidru, sa slike je jasno, kakav je učinak prednapreznja na veličinu pomaka koji se može ostvariti kod sidrene potporne građevine, ali i kod svih drugih sidrenih građevina. Kada je pomak spriječen nije moguće ostvariti aktivni pritisak. Veličina pomaka je spriječena ili bitno smanjena ali je povećan bočni pritisak. Iz tih razloga se potporni zidovi sidre pasivnim sidrima i zategama. Tada je moguće ostvariti dovoljni pomak, da bi se aktivirao puni aktivni pritisak. Kada je potrebno spriječiti pomak, koriste se prednapregnuta sidra. Kod potpornih zidova i zagatnih stijenki koriste se ova sidra onda kada je potrebno spriječiti pomak zida ili zagatne stjenke kako bi se spriječila oštećenja na susjednim zgradama, koje ovakve građevine štite od utjecaja iskopa građevne jame. U tom slučaju potrebno je proračun vršiti korištenjem koeficijenta bočnog tlaka mirovanja, jer je stvarno stanje bliže mirovanju nego aktivnom stanju.



Slika 7.5 Odnos sile i deformacije u pasivnom i prednapetom sidru

Drugi je učinak sidara u unosu naprezanja u smjeru njegovog djelovanja, u tlo odnosno stijenu. Time se na kritičnoj kliznoj plohi povećava normalno naprezanje odnosno otpor na smicanje.



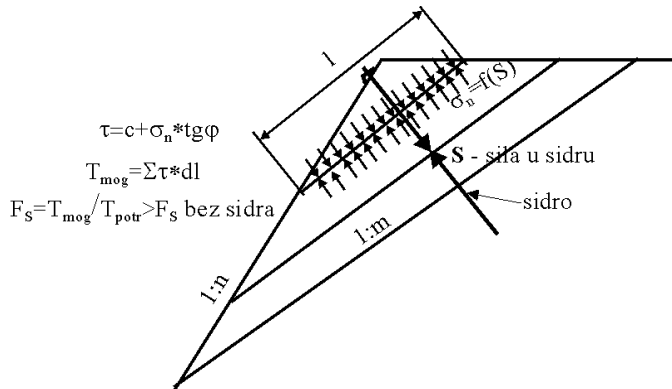
Slika 7.6 Zasjek u uslojenoj stijeni, mehanizam smicanja i optimalni položaj sidra

Mobilizirano posmično naprezanje duž klizne plohe jednako je:

$$\tau_m = c + \sigma_n * \text{tg}\varphi \quad (7.3)$$

gdje su, c, i  $\varphi$ , svojstva materijala a,  $\sigma_n$ , naprezanje okomito na kliznu plohu.

Veličina,  $\sigma_n$ , je jedina na koju se može utjecati. Ako se ovo naprezanje poveća, povećat će se i čvrstoća na smicanje, a time i moguća posmična sila duž promatrane klizne plohe. Tu se koristi djelovanje prednapetog sidra. Može se primijetiti da u ovakvim modelima nije predviđeno da sidra nose na odrez.

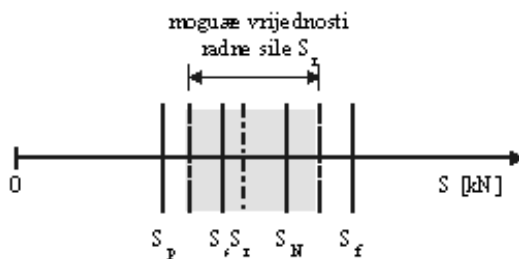


Slika 7.7 Utjecaj prednapetog sidra na blok koji «visi»

Optimalno je da sidro siječe potencijalne klizne plohe okomito, jer je tada najveća iskoristivost sile u sidru. Ovo međutim nije uvijek moguće postići.

Kada je geometrija modela poznata, vrlo je jednostavno odrediti okomito naprezanje, potrebno da se zadovolji stabilnost. Zbrajanjem potrebnog naprezanja po površini koja računski otpada na jedno sidro moguće je utvrditi potrebnu silu,  $S$ , u sidru.

Postavlja se pitanje kolika sila prednaprezanja je dovoljna da bi sidro djelovalo prema projektnim traženjima? Pretpostavi li se da je raspon moguće sile prednaprezanja prikazan na slici 7.8, očito je da postoji područje unutar kojeg bi se sila prednaprezanja mogla naći.



Slika 7.8 Odabir sile prednaprezanja (Muhovec, 1987.)

Oznake na slici 7.8 su slijedeće:

$S_p$  – sila prednaprezanja;

$S_s$  – stvarna sila u sidru koja se mijenja u vremenu, nastaje samonaprezanjem;

$S_r$  – računaska sila, potrebna sila iz geostatičkog proračuna;

$S_N$  – nominalna vrijednost sile ili najveća sila koju mogu preuzeti kablovi ili štap, sila prema kojoj se označavaju kablovi ili štapanovi;

$S_f$  – čvrstoća sidra, kada se prekorači ova vrijednost sidro puca ili se izvlači.

Moguća sila u sidru  $S$ , u trenutku ugradnje može se kretati u rasponu:

$$0 \leq S \leq S_f \quad (7.4)$$

pri čemu je  $S_f$  nosivost sidra. Nosivost sidra ograničena je s tri moguće rubne veličine:

- 1)  $S_{fc}$  → nosivost na **čupanje**;
- 2)  $S_{fp}$  → nosivost pričvršćenja kabela ili štapa, i drugih **pomoćnih** dijelova sidra;
- 3)  $S_o$  → nosivost **osnovnog** dijela sidra (presjeka snopa žica ili štapa).

Ove tri granične vrijednosti nikad nisu izjednačene. Međusobni odnos ovih nosivosti je najčešće kako slijedi:

$$S_{fc} < S_{fp} < S_o \quad (7.5)$$

Kod geotehničkih sidara je potrebno kritički i pomno odabrati odgovarajuću vrijednost sile prednaprezanja,  $S_p$ , koja će s jedne strane zadovoljiti razloge zbog kojih se sidra prednaprežu, a neće izazvati nepovoljne učinke polja visokih

naprezanja. Prilikom odabira sile prednaprezanja treba voditi računa da će kod prednapetog sidra zbog visokog stupnja prednaprezanja doći do postupnog pada posmične čvrstoće u dodirnom području duž sidrišne dionice, a time i do smanjene nosivosti sidra.

Prethodne oprečne zahtjeve moguće je pomiriti uvođenjem pojma SAMONAPREZANJA. Ako se u sidro unese sila prednaprezanja,  $S_p$ , manja od računске sile,  $S_r$ , i od sile,  $S_s$  kojom će sidro, uslijed međudjelovanja geostatičkog sustava biti stvarno opterećeno, tada će procesom samonaprezanja sidra doći do porasta prednaprezanjem nanosene sile,  $S_p$ , na stvarno potrebnu silu,  $S_s$ . Na taj je način ostavljena mogućnost da sidro samonaprezanjem preuzme upravo onu silu koja je kroz geostatičko međudjelovanje, (građevina)-sidro-tlo, potrebna.

Određivanje sile u sidru je vrlo složen geostatički zadatak, pa se u praksi prelazi na pojednostavnjenja koja, zbog mnoštva pretpostavki, dovode do velikog rasapa rezultata.

Stvarnu silu,  $S_s$ , računski se određuje kao tzv. radnu ili računsku silu  $S_r$ , pa je zbog toga raspon vrijednosti sile,  $S_r$ , vrlo širok. To je posljedica grubog pojednostavnjenja proračuna, ali i nepouzdanih podataka iz mikrolokacije sidra.

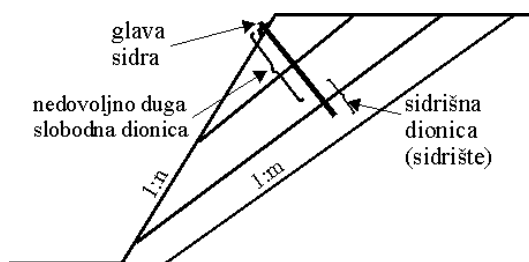
Za praksu se preporuča koristiti silu prednaprezanja koja će zadovoljiti odnos:

$$S_p < S_r \quad (7.6)$$

odnosno preporučljivo je da bude:  $S_p = 50\%$  do  $75\%$   $S_r$ .

Sila se s površine u tlo prenosi pomoću užadi ili štapova koji su u tlo pričvršćeni pomoću sidrišnog tijela. Užad ili štapovi se u literaturi (Hanna, 1982.) mogu naći pod jednim imenom (eng. tendon) – TETIVA, što slikovito opisuje taj dio sidra. Tetiva je uvijek napregnuta na vlak. SIDRIŠNO TIJELO se nalazi na unutarnjem kraju sidra, u tlu. Može biti na vrlo kratkom potezu – točkasto (klin, produženi klin); na određenoj duljini kraja sidra ili može cijela dužina sidra biti povezana s tlom. Prve dvije izvedbe su sidra sa SLOBODNOM DIONICOM. Sidro koje je punom svojom dužinom povezano s okolnim tlom nema slobodnu dionicu.

Slobodna dionica ima vrlo važnu ulogu kod prednapregnutih sidara. Ona svojom dužinom omogućava prijenos sile u duboke, stabilne slojeve tla. Osigurava da se utjecaj sile, unesene u tlo sidrom, ne osjeća na površini kosine. Ako ovaj učinak nije osiguran može nastati usidreni blok, odvojen od zaleđa. U tom slučaju sidro je bespredmetno.



Slika 7.9 Usidreni blok sa sidrom nedovoljno duge slobodne dionice

Slobodna dionica osigurava elastično izduženje sidra. Time se pad sile prednaprezanja svodi na najmanju mjeru i sidru se omogućava prilagodba na pomake koji se događaju unutar usidrene građevine.

Prednaprežanjem se izaziva elastično izduženje sidra,  $\Delta l_e$ , koje je veće od moguće deformacije tla ispod glave sidra,  $\Delta l_t$ . Kad bi se tlo ispod glave sidra s vremenom moglo pomaknuti baš za vrijednost,  $\Delta l_e$ , u smjeru prednaprezanja, sila prednaprezanja bi pala na nulu. Prema tome, proizlazi zaključak da treba težiti za time da omjer,  $\Delta l_e / \Delta l_t$ , bude što veći. Kako je pomak tla ispod glave sidra funkcija vrste tla pa se na to teško može utjecati, preostaje da se djeluje na vrijednost,  $\Delta l_e$ .

Ako je tetiva (užad ili štap) glavni dio sidra unutar kojeg se ostvaruje izduženje  $\Delta l_e$ , prema Hookeovu zakonu može se pisati:

$$\Delta l_e = S_p * \frac{L_f}{E * F} \quad (7.7)$$

To znači da će izduženje,  $\Delta l_e$ , pri nekoj sili,  $S_p$ , biti to veće, što je dulja slobodna dionica,  $L_f$ , manja površina presjeka tetive,  $F$ , i manji modul elastičnosti,  $E$ . Uz pretpostavku da je modul elastičnosti,  $E$ , za sve vrste čelika podjednak, povećanje izduženja pri prednaprežanju,  $\Delta l_e$ , može se postići povećanjem dužine slobodne dionice,  $L_f$ , i/ili smanjenjem površine poprečnog presjeka tetive,  $F$ . Površina presjeka tetive može se smanjiti, ako se koriste čelici visokih vlačnih čvrstoća pa se poprečni presjek tetive,  $F$ , može smanjiti 3 do 5 puta. Njihov modul elastičnosti,  $E$ , je nešto veći od onog za obični betonski čelik. Ostaje još dužina slobodne dionice,  $L_f$ , kao čimbenik putem kojega se može utjecati na vrijednost izduženja,  $\Delta l_e$ .

Prema jednadžbi (7.7) treba birati što veće duljine,  $L_f$ , slobodne dionice sidra. Slobodna se duljina,  $L_f$ , treba odabirati tako da bude veća od sidrišne duljine,  $L_s$ .

Prednapeto geotehničko sidro zasniva se na pravilno odabranoj slobodnoj dionici.



Slika 7.10 Prednaprežanje sidra moment ključem

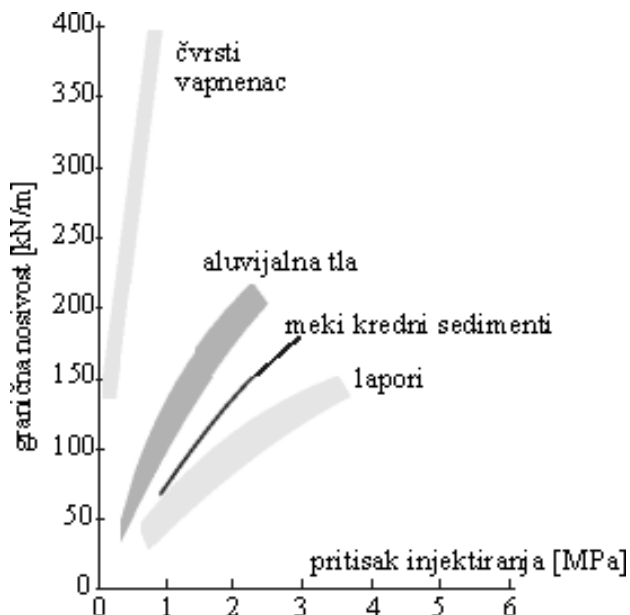
Slobodnu dionicu nemaju jedino ona sidra koja su u potpunosti - po cijeloj dužini tijela sidra, povezana nekim veznim sredstvom s okolnim tlom. To je najčešće cementni malter, ali mogu biti i neke druge tvari. Ovakva sidra nije preporučljivo prednapinjati, jer prilikom istezanja tetive nastaju pukotine u vezivu.

Projektanti (statičari) ovome često posvećuju nedovoljnu pažnju. Više vode računa o odabiru ispravne SIDRIŠNE DIONICE.

Sidrišna dionica (sidrište) je onaj dio sidra koji prenosi silu s tijela sidra u tlo. Sidrišna je dionica različita kod raznih vrsta sidara i različito prenosi silu u tlo.

Štapna sidra s klinom, krilcima i sličnim završetkom, koriste se uglavnom u stijenskoj masi. Ona silu s površine predaju «točkasto» u tlo. Na mjestu klina oblikuje se vrh stošca naprezanja koji prenosi silu u tlo. Proračun ovih sidara svodi se na to da se proračuna dovoljna dužina sidra, da napregnuti dio tla između kraja sidra i površine može preuzeti naprezanje s dovoljnom sigurnošću od sloma.

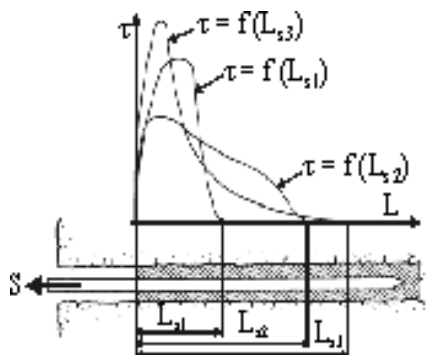
Sidra koja su duž sidrišne dionice povezana s tlom preko valjkastog tijela nastalog zalijevanjem ili injektiranjem prostora između čeličnog tijela (titive) sidra i tla, prenose prvo silu s tetive sidra na injekcijsku smjesu, a zatim s valjkastog tijela na tlo. Prionjivost injekcijske smjese na čelik tetive sidra nije upitna tj. pretpostavlja se da je zadovoljavajuća. Ostaje da se proračuna potrebna dužina sidrišne dionice u funkciji prionjivosti valjkastog tijela nastalog injektiranjem ili zalijevanjem i tla. Prionjivost ovisi o vrsti tla u koje se sidro ugrađuje i o tlaku prilikom injektiranja. Podaci su prikazani u dijagramu 7.11 (Muhovec, 1987.).



Dijagram 7.11 Nosivost sidrišne dionice u ovisnosti o vrsti tla i pritisku injektiranja

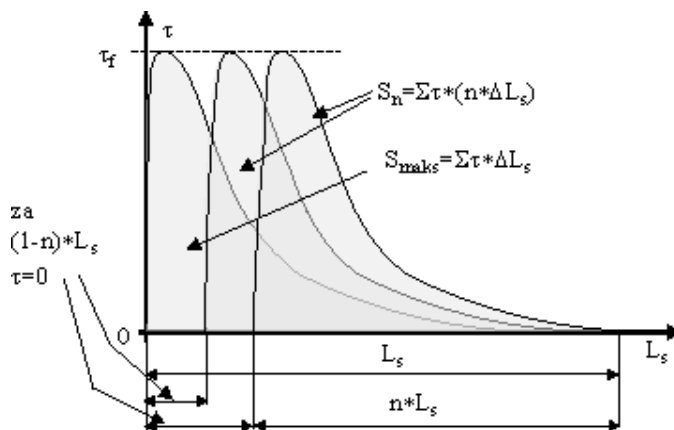
U prvom trenutku se čini da, što je sidrišna dionica duža, to je moguće u tlo predati veću silu. međutim se pokazalo se da to nije točno.

Pokusi su pokazali da dolazi do koncentracije posmičnih napreznaja na početku sidrišne dionice.



Slika 7.112 Raspodjela posmičnih napreznaja u ovisnosti o dužini sidrišta (Hudec, 1987.)

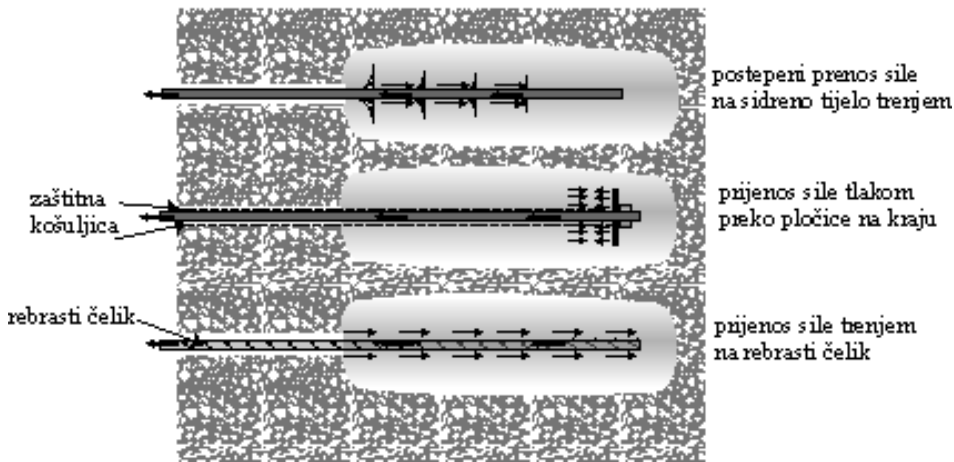
Intenzitet koncentracije se smanjuje produžetkom sidrišne dionice, ali samo do neke mjere. To znači da se velikim duljinama sidrišne dionice ne može bitno povećati sila u sidru. Ako se sidrišna dionica poveća i poveća sila u sidru, doći će do prekoračenja čvrstoće na smicanja na početku sidrišne dionice, napreznaja će se «povući» dublje, a proces ponoviti kao na slici 7.13. Na kraju će sidro popustiti.



Slika 7.123 Pomak dijagrama posmičnog napreznaja duž sidrišta u slučaju dosega čvrstoće na smicanje na njenom početku

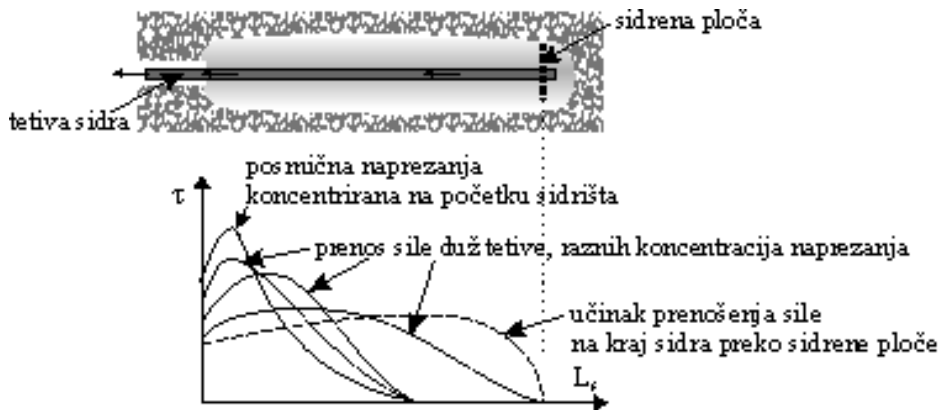
Jasno je da je dužina sidrišne dionice određena čvrstoćom na smicanje na dodiru sidrišta s tлом. Učinak sa slike 7.12 pokušava se umanjiti takvom izvedbom kraja sidra da ono na sidreno tijelo, umjesto trenjem duž tetive sidra, silu predaje pritiskom metalne ploče na kraju sidra na sidrišno tijelo. Na slici 7.14 prikazana su moguća prenošenja sile iz tetive sidra na sidrišno tijelo (Jašarević, 1987.)





Slika 7.14 Mogući načini prijenosa sile iz tetive na sidrišno tijelo

Na slici 7.15 prikazano je nekoliko mogućih raspodjela posmičnih napreznja duž kliznog tijela ovisno o načinu predaje sile s tetive sidra na sidreno tijelo. Prijenos sile preko ploče na kraju sidra stvara u sidrištu tlačna napreznja i sprječava stvaranje pukotina u tijelu sidrišta (Sorić, 1987.).

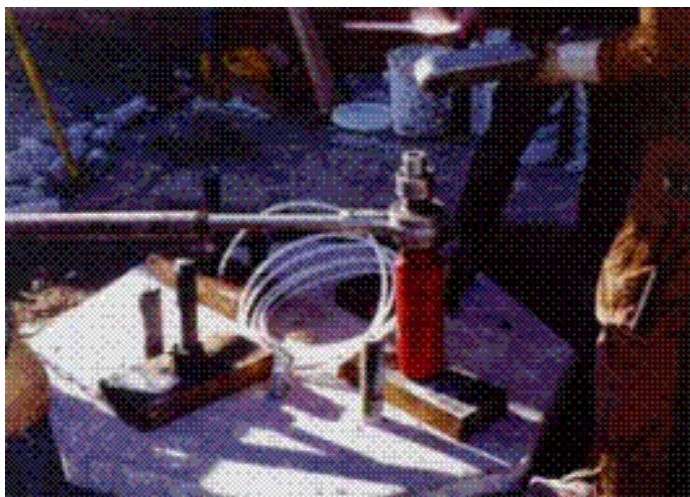


Slika 7.15 Mogući oblici raspodjele posmičnih napreznja u sidrišnoj dionici

Računski je nemoguće precizno odrediti čvrstoću na smicanje jer ona ovisi o parametrima koji nisu jednoznačni. Druga nepoznanica je veličina promjera sidrišta  $2r$ , na kojem će se pojaviti kritična klizna ploha, tj. nepoznata je površina na kojoj se ostvaruje kritično posmično napreznje. Proračun prema jednadžbi (7.1) se vrši temeljem pretpostavljenih vrijednosti.

Iz tih se razloga uvijek zahtijeva izvedba POKUSNIH SIDARA. Pokusna sidra daju najpouzdaniji podatak s kojim je potrebno izvršiti provjeru proračuna sidara u sidrenoj građevini.

Na slikama 7.16 i 7.17 prikazan je pribor za ispitivanje pokusnih sidara.



Slika 7.16 Ispitivanje pokusnog sidra moment ključem i moment ključ



Slika 7.17 Tijesak za ispitivanje pokusnog sidra

Ispitivanje pokusnih sidara provodi se prema posebno izrađenom programu, (Lardner i Littlejohn, 1985.). Iz rezultata takvih ispitivanja provjerava se proračun sidrene potporne građevine. Ako je potrebno mogu se vršiti naknadne izmjene i dopune projektne dokumentacije, ali i izvedenih dijelova građevine. POKUSNA SIDRA NE SMIJU BITI SASTAVNI DIO GRAĐEVINE jer je njih potrebno opteretiti do čupanja, da bi se dobili potrebni podaci za ispravne proračune i što je važnije ,ugradnju i prednaprezanje sidara.

U sastavu sidara sidrene potporne građevine nalaze se RADNA SIDRA i KONTROLNA SIDRA. Kontrolna sidra su ona koje je moguće provjeriti tijekom radnog vijeka građevine. Moraju biti tako izvedena da se sila u njima može povremeno provjeravati i da su dostupna za takvu provjeru.

### 7.2.1.3 Štapna sidra

Štapna se sidra mogu podijeliti na ona koja nose na trenje duž injektirane, sidrišne dionice i ona koja silu prenose točkasto u dublje slojeve tla. Injekcijska smjesa može biti cementna ali i od poliesterskih smola ([www.williamsform.com](http://www.williamsform.com)).

Najjednostavnija štapna sidra izvode se od betonskog čelika, glatkog, češće rebrastog. Dužina im ovisi o namjeni. Mogu biti usidrena duž cijele dužine tetive sidra, što je najčešći slučaj a mogu biti usidrena duž samo jednog dijela tetive. Mogu imati glavu s narezanim navojem i maticom, a mogu se jednostavno kukom na glavi štapa pričvrstiti za ono na površini za što su predviđena da pridržavaju. To može biti sidreni blok, rabić mreža, armaturna mreža ili armaturni koš dijela građevine koji leži na površini pokosa (rebro, roštilj i sl.).

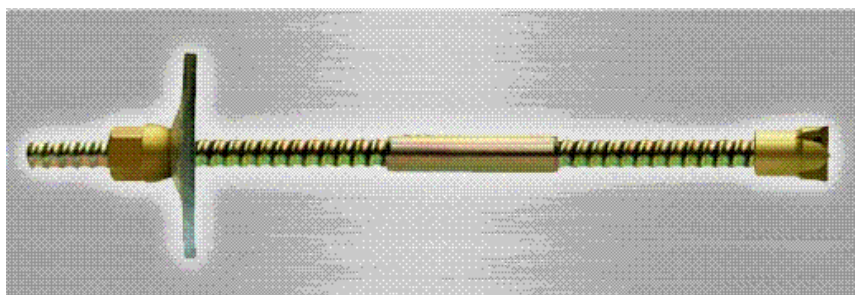
U literaturi se već odavno (Jašarević, 1987.) moglo naći podatke o štapnim sidrima izrađenim od poliesterske smole, armirane kontinuiranim staklenim nitima kao i šupljim štapnim sidrima od poliesterske smole. Sidra od plastičnih masa mnogo su manje podložna koroziji od sidara izrađenih od metala. Danas je ponuda mnogo veća.

Kratka štapna sidra (0,5 m - 2,0 m) se koriste za pridržanja površinskih slojeva pokosa i pridržanje zaštite površine pokosa kao što su na pr. zaštitne mreže, zatim rabić mreže na koje se nanosi prskani beton koji štiti površinu pokosa od rastrojbe uslijed utjecaja atmosferilija. Dužina im ovisi o debljini i nagibu slojeva u koje su usidrena.

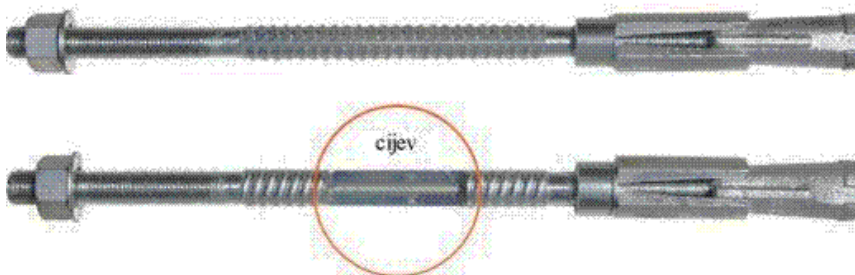
Duža štapna sidra (duža od 2,0 m), koriste se za sidrenje u dublje slojeve tla, uglavnom stijene, iza potencijalne klizne plohe ili površine kritičnog kliznog klina. Glava im se sastoji od podložne ploče, navoja narezanog na tetivi i matice. Za njih je preporučljivo koristiti rebrasto betonsko željezo. Ova sidra imaju sidrišnu i slobodnu dionicu. Ostaje potreba antikorozivne zaštite, ako je sidro trajno.

Složenija štapna sidra s patentiranim točkastim završetkom za prijenos sile u dubinu tla, koriste se za sidrenja u stijeni.

Na slici 7.18 prikazano je samobušaće sidro i nekoliko tipova štapnih sidara s točkastim završetkom.



samobušaće sidro

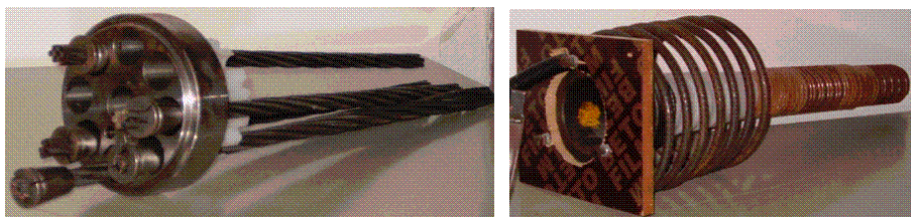


dva tipa sidra s navojem

Slika 7.138 Primjeri kratkih štapnih sidara za sidrenje u stijeni

#### 7.2.1.4 Sidra s kablovima

Sidra s kablovima sastoje se od niza užadi ispletenih od žica izrađenih od visokovrijednog čelika. Kablovi od polimera ojačanih karbonskim vlaknima najnoviji je proizvod ove vrste. Kablovi su radionički učvršćeni na oba kraja u ploču iz koje se ne mogu iščupati. Kraj koji ulazi u tlo naziva se NEPOMICIČNA GLAVA. Kraj koji izlazi na površinu naziva se naprosto GLAVA SIDRA. Glava sidra može se izvesti tako da se na nju može priključiti tijesak za prednapinjanje i/ili za provjeru sile u sidru. Na slici 7.19 a) prikazano je sidro s kablovima. Lijevo je glava sidra s kablovima i dijelovima za pričvršćenje. Desno se vidi glava s ležajnom oprugom, dio zaštitne košuljice, cijev za injektiranje i podložna ploča.



7.19 a) Dijelovi sidra: glava sidara, klinovi za učvršćenje i kablovi (lijevo); ležajna spirala, zaštitna limena košuljica i cijevi za injektiranje (desno)

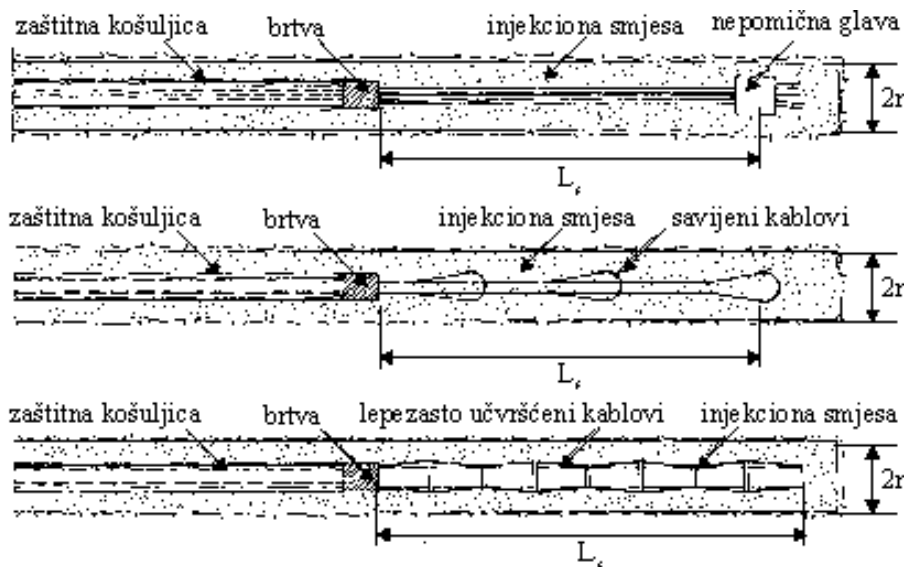
Na slici 7.19 b) prikazane su glave sidara spremnih za ugradnju.



Slika 7.19 b) Sidro od kablova nakon ugradnje svih dijelova sa zaštitnom kapom, čelične žice (lijevo), karbonska vlakna (desno)

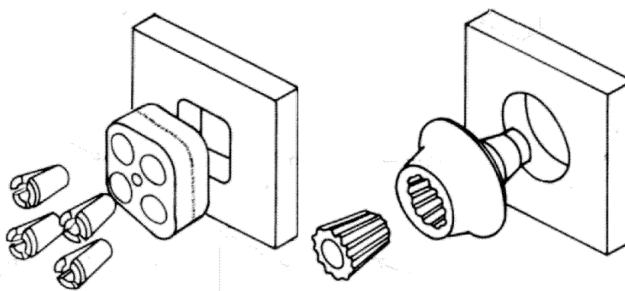
Slobodna dionica se štiti košuljicom od PVC-a ili neke druge plastične mase unutar koje se umeće sredstvo za antikorozivnu zaštitu. Sidra od karbonskih vlakana nisu podložna koroziji ali se također na slobodnoj dionici smještaju u zaštitnu plastičnu košuljicu. Slobodna dionica se smješta u košuljicu da bi joj se omogućilo slobodno izduženje pri prednapinjanju, a što je njena osnovna zadaća.

Na slici 7.20 prikazani su mogući načini smještaja žica (kablova) unutar sidrišne dionice.



Slika 7.20 Način postavljanja žica u sidrišnoj dionici (Jašarević, 1987.)

Na slici 7.21 prikazani su načini učvršćenja kablova u pomičnu, vanjsku, glavu.



Slika 7.21 Dijelovi vanjske glave sidra za učvršćenje žica (kablova): lijevo pojedinačnim klinovima; desno jednim klinom

Sidra s kablovima široko se primjenjuju u geotehničkoj praksi. Sidrišna im se dionica povezuje s okolnim tлом utiskivanjem injekcijske smjese pod pritiskom u prostor sidrišne dionice. Ova sidra prenose naprezanje u tlo trenjem između žica i sidrenog tijela s jedne strane i sidrenog tijela i okolnog tla s druge strane. Mogu biti tako konstruirana da nepomična glava vrši pritisak na sidreno, valjkasto tijelo i izaziva u njemu tlačna naprezanja. Ovaj način prijenosa sile povoljan je stoga što u injekcijskoj masi ne mogu nastati vlačne pukotine koje pogoduju pojavi korozije na žicama u sidrišnoj dionici.

### 7.2.2 Izvedba sidara

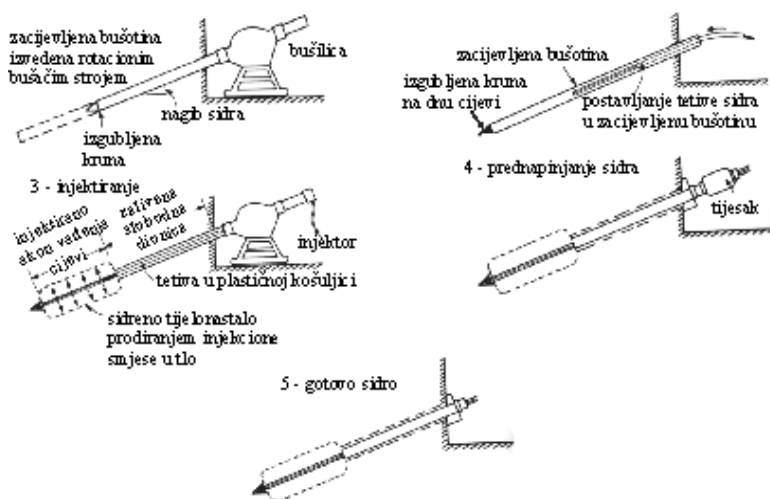
Kratka štapna sidra ugrađuju se u unaprijed pripremljene bušotine u stijeni. Ove se bušotine mogu izvesti udarno s ispuhivanjem kao bušotine za ugradnju mina. Kako se izvode u stijeni nema potrebe za zacijevljenjem jer je promjer bušotine stabilan. Ugrađena sidra se naknadno zalijevaju cementnim mortom koji nema svrhu povezivanja sidra i stijenske mase već samo antikorozivnu zaštitu. Za tu se zaštitu mogu koristiti i druga sredstva.

Štapna sidra, bez sidrišne dionice, mogu se izvoditi na više načina. Jedan je taj da se izvede bušotina nešto duža od dužine sidra, u nju pod pritiskom ugradi malter i zatim ugura rebrasti čelik projektirane dužine. Drugi je način da se u bušotinu ugradi rebrasti čelik i cjevčica za injektiranje koja je nešto duža od samog sidra. Kada je sidro ugrađeno tada se kroz cjevčicu injektira smjesa za povezivanje sidra s okolnim tлом. Pretpostavka je da je tlo takvih svojstava da bušotina može opstati bez zacijevljenja dok se ne ugradi sidro.

Postoji mogućnost izvedbe štapnih sidara i mlaznog injektiranja na način da se izvede sidreno tijelo mlaznim injektiranjem a da se zatim u svježu mješavinu tla i maltera ugura špika sidra. Sve tri gore navedene metode izrade sidara nisu preporučljive za prednapeta sidra jer nemaju slobodnu dionicu. Ona se samo pritežu na neku minimalnu silu a kasnije se kod tih sidara očekuje izvjesno samo naprezanje, ali ne toliko da bi došlo do pucanja obloge oko tetive, što bi moglo uzrokovati koroziju. Ovakva se sidra često koriste kao privremena.

Na slici 7.22 prikazan je postupak ugradnje dugih, geotehničkih sidara.

Duga, geotehnička sidra koja se sa tlom spajaju injektiranjem cementnim mortom, izvode se tako da se rotacionim bušenjem izvede bušotina, koja se zacijevi. Kada se bušotina ne bi zacijevljivala ona bi se u svim materijalima, osim u stijeni, zatvarala te se ne bi moglo ugraditi sidro. U tako izvedenu bušotinu ugradi se sidro unutar kojeg se nalazi cijev za injektiranje sidrišne dionice. Na dužini sidrišne dionice postepeno se vadi cijev i utiskuje injekcijska smjesa pod pritiskom. Između sidrišne i slobodne dionice nalazi se brtva (paker) koja sprječava ulaz injekcijske smjese pod pritiskom u područje slobodne dionice. Ovim se postupkom ne mogu postići veliki pritisci injektiranja te je učinak sidrišne dionice upitan.



Slika 7.22 Postupci pri ugradnji injektiranog sidra (Hanna, 1985.)

Da bi se povećala kakvoća sidrišne dionice koristi se postupak ponovnog bušenja (redriling). Ovaj se postupak sastoji od izvedbe bušotine, injektiranja sidrišne dionice pod visokim pritiskom, ponovnog bušenja kroz injektiranu sidrišnu dionicu, ugradnje sidra i zalijevanja sidrišne dionice injekcijskom smjesom kroz cijev ugrađenu u tijelo sidra. Na taj se način može postići sidrišno tijelo većeg promjera i bolja prionjivost sidrišnog tijela uz tlo, injekcijske smjese uz sidrišno tijelo i tetive sidra uz injekcijsku smjesu.

Slobodna dionica smještena je u plastičnu cijev i zaštićena nekim od sredstava protiv korozije. Time je osiguranja slobodna deformacija ovog dijela sidra.

### 7.2.3 Zaštita trajnih sidara od korozije

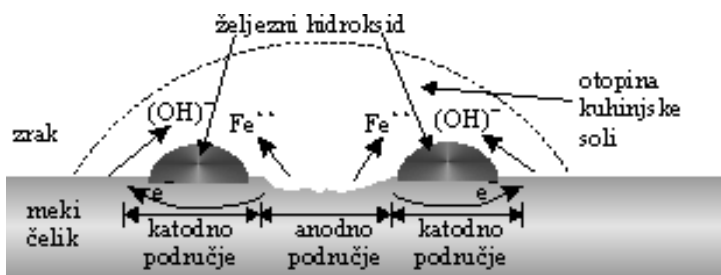
Prema vremenu trajanja sidra kao nosivog dijela građevine, mogu se ona podijeliti na privremena i trajna. Postavlja se pitanje koja je to vremenska granica postojanja ili djelovanja između privremenih i trajnih sidara. Prema uputama proizvođača (Williams, 2005.), sidra za koje je projektirano vrijeme trajanja duže od 24 mjeseca moraju se smatrati trajnim sidrima i zaštititi od korozije.

### 7.2.3.1 Korozijska

Korozijska je elektro–kemijski proces koji se odvija na površini svakog metala, ako metal dolazi u dodir s kisikom i vodom. Razlog tome je što su metali u prirodi stabilni spojevi samo kad su u obliku svojih oksida. Oksidi metala nisu ništa drugo već sirovina, rudača iz koje se metali dobivaju. Stoga čisti metali i njihove slitine u prirodi nisu stabilni spojevi. Svi su metali podložni korozijski, ali ne jednako brzo i ne na jednaki način. Neki metali stvaraju sami sebi zaštitni film na površini te korozijska ne napreduje u dubinu. Ako se ovaj film ošteti korozijska će se ponovo javiti. U dodiru s kisikom i vodom nastoje se vratiti u svoj prvobitni stabilni oblik oksida na slijedeći način:



Ova kemijska reakcija dovodi do nestanka metala i konverzije vode i kisika u OH ionsku grupu. Ova je pojava idealizirano prikazana na slici 7.23. Područje koje napuštaju ioni metala i odlaze u otopinu, postaje anodno dok rubovi, na kojima se nalaze hidroksilne (OH)<sup>-</sup> skupine iz otopine nastale migracijom negativnih iona iz željeza, tvore katodna područja. Tamo gdje se susreću ioni anodnog i katodnog područja nakuplja se željezni hidroksid.

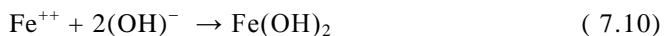


Slika 7.23 Idealizirana galvanjska korozijska (Hanna, 1982.)

Reakcija na katodi se najjednostavnije može napisati kao :



dok željezni hidroksid nakupljen na dodiru anodnog i katodnog područja nastaje kao:

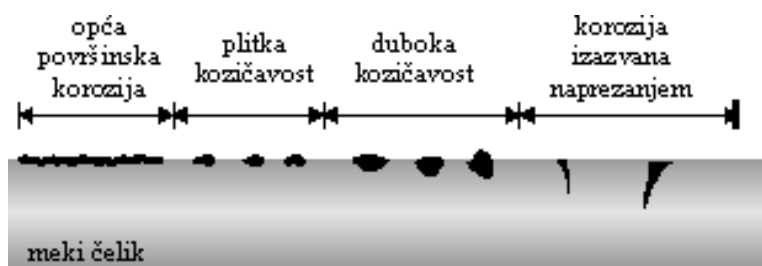


Korozijska nije tako jednostavan proces kako je naprijed opisano. Da bi se korozijska pojavila moraju se steći uvjeti za nastanak mikro galvanjskog članka. U tlu u koje se ugrađuju sidra uvijek postoji barem neki od tih uvjeta. Može ih se nabrojati kako slijedi:



1. Električni otpor tla: tlo je agresivno ako mu je električni otpor manji od 2000 ohm-cm;
2. pH vrijednost tla: tlo je agresivno ako ima  $\text{pH} < 5.5$ ;
3. Kemijska svojstva podzemne vode, stijene ili tla: slana voda, nasip šljake, industrijski otpad, organski nasip i sl.;
4. Vlaženje;
5. Prisustvo kisika: ovo je najvažniji čimbenik za nastanak korozije;
6. Lutajuće struje.

Na metalnoj šipci može se razlikovati nekoliko vrsta korozija prikazanih na slici 7.24.



Slika 7.144 Vrste korozije na čeličnoj šipci

BAKTERIJSKA korozija javlja se u sulfatnim tlima djelovanjem sulfatnih bakterija. Ove bakterije proizvode sulfidne ione koji reagiraju s metalima. Proces je složen a utječe na čelik, ali i na beton (BRE Digest, 1975.; Denber, 1953.; King i Miller, 1953.)

Poznata je i korozija na mjestima prsline nastalih vlačnim naprezanjem ili povećanjem krutosti pomoću vodika. Ona nastaje zajedničkim djelovanjem naprezanja materijala i lokalne korozije. Ova dva čimbenika zajedno mogu učiniti mnogo veću štetu nego svaki od njih pojedinačno.

### 7.2.3.2 Područja i način zaštite

Sidro se glede zaštite od korozije može podijeliti u tri područja.

Prvo je područje GLAVE SIDRA. Ono je najosjetljiviji dio sidra i najteže ga je zaštititi. Imaju ga sva sidra bez obzira jesu li kratka, štapna, za sidrenje u stijeni ili su geotehnička duga sidra od štapova ili kablova. Glava sidra izložena je zraku (kisiku) i vlazi, (kiši, snijegu i atmosferskoj vlazi). U glavu sidra spada metalna, najčešće čelična, podložna, nosiva ploča, zatim matica za napinjanje i dio šipke koji viri iz matice, odnosno složena glava s ukotvljenim kablovima. Ulaz sidra u stijenu ili betonski nosivi element, osigurava se najčešće ugradnjom plastične cijevi. Vanjski dijelovi, izloženi atmosferilijama se galvaniziraju u tvornici ili

proizvodnom pogonu. Druga je mogućnost prekrivanje epoxy preparatima. Galvanizirani dijelovi su manje osjetljivi od onih premazanih epoxy preparatima na oštećenja, ogrebotine i slično, a što se može dogoditi prilikom prijevoza i rukovanja. Glave sidara koje leže na površini štite se plastičnim ili čeličnim kapama. Vrsta kape ovisi o tome je li sidro radno ili kontrolno, tj. treba li postojati mogućnost priključka na tijesak ili moment ključ ili ne. Proizvođači sidara uglavnom nude ove zaštite u sklopu ponude sidara.

Drugo područje zaštite je sidrišna dionica kod sidara, koja se učvršćuje injekcijskom smjesom. U tom području injekcijska smjesa štiti metalnu tetivu. Sidreno tijelo potrebno je izvesti tako da se u njemu ne pojave prsline, kroz koje će do metala tetive doći vlaga i druge agresivne tvari i započeti koroziju. Iz tog su razloga povoljna sidra sa završetkom u obliku sidrene ploče. Sidrena ploča tlači sidreno tijelo i sprječava stvaranje pukotina. Vrlo je važno da se sidro tako ugradi da tetiva stvarno leži u sredini bušotine i da sa svih strana bude jednoliko obavijena injekcijskom masom. U tu svrhu služe različite vrste distancera. Proizvođači u svojim programima nude i razne vrste zaštite sidrišne dionice.

Treće je područje sama tetiva. Tetiva se u većini slučajeva štiti tvornički i kao takva dolazi na gradilište. Neki od postupaka zaštite mogu se provoditi i na gradilištu. Prije svake zaštite od korozije, šipke i užad moraju biti potpuno čisti. Čelici visokih čvrstoća moraju se čistiti mehanički, nikako pranjem da bi se izbjegla reakcija čelika s vodikom.

Najčešća zaštita od korozije je galvanizacija šipki i užadi. Galvanizirane šipke pokazuju dobru prionjivost uz injekcijsku smjesu i ne zahtijevaju daljnju zaštitu kao pri primjeni na pr. zaštite epoksi premazima. Osim toga ova je zaštita jeftina i vrlo otporna na abraziju u transportu. Sastoji se u elektrolitičkom postupku presvlačenja čelika slojem cinka. U tabeli 7.1 prikazano je nekoliko vrsta zaštite od korozije s nekim od bitnih podataka o pojedinoj vrsti.

Epoksidna obloga povoljna je zbog kemijske stabilnosti epoksidnih tvari. S druge strane ova je obloga vrlo osjetljiva na ogrebotine prilikom prijevoza i rukovanja. Na gradilištu se koristi epoksi sprej za popravke nastalih oštećenja. Pribor za ovako zaštićene šipke se ipak češće galvanizira, zbog toga jer ga je teško zaštititi od ogrebotina (abrazije).

Metoda pre-injektiranja sastoji se u oblačenju tetiva u rebraste polietilenske cijevi u koje se zatim ubrizga malter. Ovo je metoda visoke zaštite i pod takvim se imenom sidra pojavljuju na tržištu. Koriste se za vrlo agresivne sredine.

Zaštita ekstrudiranim polietilenom je postupak presvlačenja tetive polietilenom visoke gustoće. Polietilenska košuljica lijepi se na tetivu bituminoznim ljepilom (mastiksom). Na taj su način tetive zaštićene od utjecaja vlage i kisika. Pribor se štiti protukorozijskim trakama i zaštitnim kapama. Zaštita je jeftinija od polietilenske košuljice.

Tabela 7.1 Vrste i pripadna svojstva zaštite od korozije tetiva (šipki i kablova) sidara (Williams, 2005.)

vrsta zaštite	otpornost na abraziju (4=najbolje)	tipična debljina [mm]	odnos cijene koštanja, relativni (4=najviše)	mogućnost primjene i na pribor	mogućnost nanošenja na gradilištu
vruća, duboka galvanizacija	4	3 - 4	2	da	ne
epoksidna obloga	1	7 - 12	1	da	ne
pre-injektirane šipke	3	zacijevljenje od 2", 3" ili 4"	3	ne	ne
ekstrudirana polietilenska obloga	2	23 - 25	1	ne	ne
protukorozijske trake	2		3	da	da
epoksidni ugljeni katran	3	više od 35	2	da	da
masni premaz i obloga	2		2		da

Zaštita ekstrudiranim polietilenom je postupak presvlačenja tetive polietilenom visoke gustoće. Polietilenska košuljica lijepi se na tetivu bituminoznim ljepljivom (mastiksom). Na taj su način tetive zaštićene od utjecaja vlage i kisika. Pribor se štiti protukorozijskim trakama i zaštitnim kapama. Zaštita je jeftinija od polietilenske košuljice.

Zaštita protukorozijskim trakama sastoji se u omatanju tetiva trakama od geotekstila impregniranim vodootpornim neutralnim naftnim derivatima. Ovaj način zaštite otporan je na široki raspon temperatura, može se izvoditi na gradilištu.

Premazi epoksidnim ugljenim katranom pokazuju dobar otpor na ogrebotine, ekonomični su i trajni.

Zaštita masnim premazima i PVC košuljicom koristi se za neopterećene dionice sidara. Zaštitne PVC košuljice primjenjuju se za zaštitu u transportu. Masti služe kao zaštitno sredstvo u nekim posebnim dijelovima sidara kao na pr za zaštitu glave ispod zaštitnih kapa.

Svaki proizvođač nudi svoje mogućnosti zaštite sidara i pribora.

Katodna zaštita je još jedan način zaštite sidara od korozije. Primjenjuje se kao trajna zaštita. Radi na principu stavljanja sidara pod električni potencijal pri čemu su sidra katode, a anodni je članak potrošan. Sustav zahtijeva stalni nadzor i održavanje.

## 7.3 SIDRENE GRAĐEVINE

### 7.3.1 Općenito

Pod ovim se nazivom podrazumijevaju one građevine kod kojih su sidra ključni nosivi dijelovi. Sustav sidra – tlo djeluje kao jedna spregnuta cjelina unutar koje vladaju vlačna naprezanja u sidru dok pritisak preuzimaju oslonci na vanjskom licu i u tlu. Ova vlačna naprezanja koja drže potpornu građevinu unose se sustavom u dublje slojeve tla, koji imaju dovoljnu vlačnu čvrstoću za preuzimanje unešenih naprezanja. Sam način djelovanja je bitno različit od potpornih zidova i zagatnih stijenki, koje preuzimaju opterećenje tlom. Sidrene građevine prenose opterećenje u tlo. Iz tog razloga ne moraju imati temelje i mogu se izvoditi obrnutim redoslijedom, odozgo prema dolje. Ovaj obrnuti redoslijed je kod nekih izvedbi ključan. On omogućava postepeno pridržavanje prvo plićih a zatim sve dubljih dijelova iskopa bez opasnosti po ljude i materijalna dobra na dnu iskopa.



Slika 7.25 Potporna sidrena građevina (u izvedbi), poduprta isključivo sidrima

Na slici 7.25 vidi se sidrena potporna građevina bez površinske zaštite. To je jedna mogućnost izvedbe ovakvih potpornih građevina.

Ako je iz najrazličitijih razloga potrebno, mogu se po površini izvoditi dodatni dijelovi građevine koji za smisao građevine nisu bitni, ali su nužni za njezino potpuno djelovanje.

To mogu biti sidreni armirano-betonski blokovi. Oni mogu pridržavati određenu površinu koju je potrebno usidriti a koja nema dobro izraženu kompaktnu i čvrstu plohu na koju bi se mogla osloniti glava sidra.

Drugi zahvat na površini je sloj prskanog betona. On može biti nosiv na površini koju prekriva i prenositi opterećenje preko ugrađene armature na pojedinačna sidra, a može služiti i samo kao zaštita površina koje su osjetljive na utjecaj atmosferilija (na primjer kod sidrenja usjeka u laporima).

Na slici 7.26 prikazana je sidrena građevina sa sidrenim blokovima i međuprostorom zaštićenim prskanim betonom. Vidi se pribor za prednaprezanje sidra na skeli.

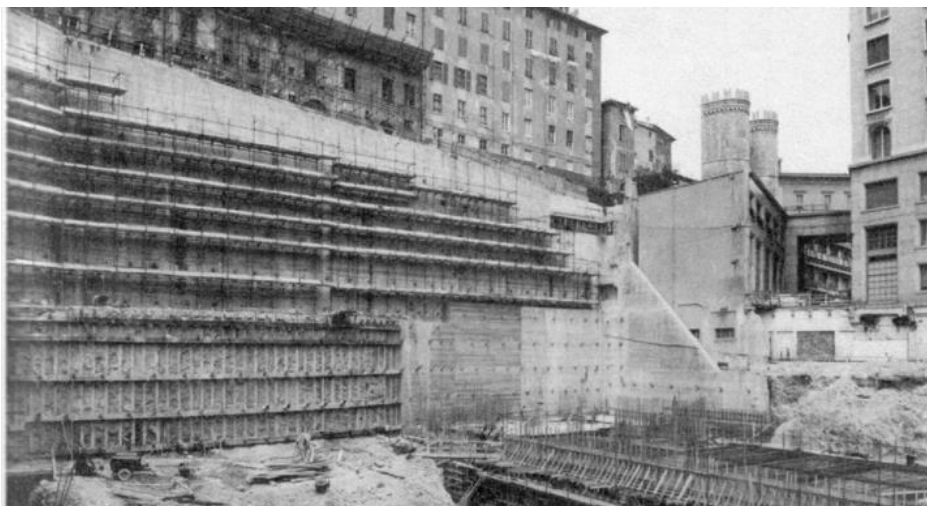


Slika 7.26 Sidra s blokovima i prskanim betonom (Hanna, 1985.)

Treći zahvat su površinske armirano-betonske ili čelične grede, koje pridržavaju površine sidrenih pokosa linijski. Postavljaju se prema potrebi i najčešće projektiraju na licu mjesta. Povezuju nekoliko sidara u jednu cjelinu.

Križanjem niza veznih greda nastaju vezni roštilji kojima sidra leže na križanju nosača. Roštilj pridržava nestabilnu površinu koja se podupire i prenosi opterećenja na sustav sidara. Dio građevine s pravilnim sidrenim roštiljem je prikazan na slici 2.27

Posljednja mogućnost je pridržanje površinskog plošnog nosača. Ova se kombinacija koristi kada se sidri rastresita površina (tlo) i kada se pridržavaju temelji postojećih zgrada koji će ostati visoko iznad dna iskopa.



Slika 7.27 Sidra s roštiljem i s pločom (Hanna, 1985.)



Slika 7.28 Složena sidrena građevina (BBR-CONEX, 1996.-1998.)



Slika 7.29 Tipična sidrena građevina koja se postepeno spušta, sastoji se od armiranobetonskog platna i niza sidara (snimio Ž. Reljanović)

Na slici 7.29 prikazana je zaštita AB platnom sa sidrima, ispod temelja postojeće zgrade. Vide se izvedene kampade bez temelja i nepravilno raspoređene glave sidara. Ova je slika znakovita po tome što se vidi da platno nije nosivi već obložni dio građevine. Sidra su ugrađena po određenom redu neovisno o pojedinim dijelovima platna, već ovisno o profilu i visini na kojoj su ugrađena. Ovaj sustav zaštite omogućuje vrlo slobodno odabiranje dijelova koji će se otkopavati i štititi a da se time ne ugroze građevine na površini kao ni stabilnost pokosa. U dnu slike vidi se iskop za novu kampadu dok su bokovi zaštićeni neiskopanim rebrima tla.



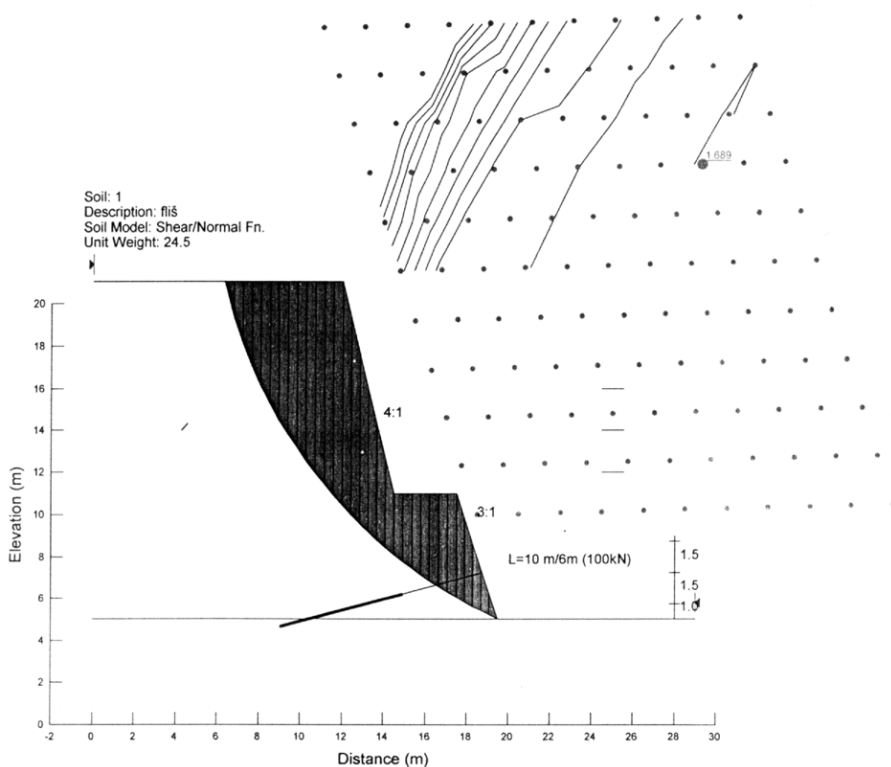
Slika 7.30 Usidreni pokos iskopa za brodsku prevodnicu na brani Tri klanca u Kini, sidra bez površinske zaštite pokosa



### 7.3.2 Proračun sidrenih potpornih građevina

Sidrene potporne građevine vrlo su složene glede proračuna. Sastoje se od dva dijela. Prvi je dio proračun stabilnosti pokosa bez sidara, za koji su potrebni parametri tla u pokosu koji se sidri. Drugi je korak određivanje potrebne sile u sidru, koje prihvaća određeni dio zapremine tla i stabilizira ju. Na tu silu se zatim odabiru i dimenzioniraju sidra.

Koriste se uglavnom sve poznate metode analiza stabilnosti kako grafičke tako grafoanalitičke i numeričke. Kada su sile u sidrima određene, dimenzioniraju se površinski nosivi dijelovi potporne građevine kao nosači kojima su mjesta sidrenja ležajevi. U proračunima ima mnogo pretpostavki te je nužno izvršiti parametarske analize i višestruke provjera. Za ovakve projekte i izvedbu potrebno je veliko iskustvo.



Slika 7.15 Rezultati proračuna računarnim paketom GEO SLOPE, sidrenog pokosa u laporima, zaštićenog torkretom (arhiva IGH PC Split)

Proračun sidrenih građevina u smislu projekta je uvijek samo bolja ili lošija pretpostavka. Prilikom rada na terenu u ovim su projektima česte izmjene i dopune. One se vrše temeljem rezultata ispitivanja probnih sidara. Dobiveni podaci mogu zahtijevati promjenu broja sidara kao i njihovu preraspodjelu.

### 7.3.3 Izvedba potpornih sidrenih građevina

Izvedba potpornih sidrenih građevina je posebna po tome što se NE GRADI OD TEMELJA. Da bi ovaj način osiguranja pokosa imao pravi smisao, izvedba kreće od površine terena i postepeno se spušta u dubinu. Mjesta sidara određena su geostatičkim proračunima i najprije se izvodi najviši red. Kako za prednapinjanje sidara treba izvjesno vrijeme da očvrсне sidrišno tijelo, to je pravilan raspored napredovanja vrlo važan kako bi se gubilo što manje vremena u praznom hodu i čekanju da očvrсне injekciona smjesa i betoni u betonskim dijelovima građevine.



Slika 7.32 Naizmjenična izvedba usidrenih platna (snimio Ž. Reljanović)

Na slici 7.32 prikazana je izvedba zaštitnih platana u šahovskom poretku i odozgo prema dolje, što je normalna izvedba kod ovih potpornih građevina.

Neobično je važno pravilno izvesti ležaj za sidro. Geotehnička sidra s kablovima imaju posebno oblikovane glave, koje je potrebno pažljivo ugraditi u betonski nosivi površinski dio građevine. Također je bitno slijediti upute za antikorozivnu zaštitu ulaza sidra u tlo a što je vrlo osjetljiv dio sidra.

Ovakvi se radovi vrlo često povjeravaju usko specijaliziranim izvođačima, koji često isporučuju i sidra, vrše prednapinjanje i daju garanciju za izvršeni posao.

## 8 GRAĐEVNA JAMA

### 8.1 OPĆENITO

Građevna jama je prostor unutar kojeg se izvodi temeljenje. Taj prostor mora biti siguran za rad i dostupan ljudima i strojevima. Kako će izgledati građevna jama i koje će sve privremeni i trajne mjere zaštite od raznih utjecaja sadržavati, ovisi o nizu čimbenika. Nonveiller (1979.) daje sistematizaciju uvjeta za rad i metoda izvođenja građevne jame prikazanu u tabeli 8.1.

Tabela 8.1 Uvjeti rada i metode izvođenja građevnih jama (Nonveiller, 1979. modificirano)

Položaj vode	Vrsta tla	Uvjeti rada		Način odvodnje
		neograničeni	ograničeni	
razina vode ispod temeljne plohe	koherentno	iskop bez ograničenja	uspravne stijenke iskopa	crpljenje kišnice iz jame
	bilo koje	iskop s privremeno stabilnim pokosom ( $F_s=1,2$ )	podupore*	crpljenje kišnice iz jame
plitko ispod površine tla	koherentni i šljunak	iskop s privremeno stabilnim pokosom uz moguće strujanje niz kosinu	podupore*	crpljenje kišnice i procjedne vode iz jame
	pijesak	iskop s privremeno stabilnim pokosom ( $F_s=1,2$ )	podupore*	crpljenje iz bunara u ili oko jame
			podupore* koje sprječava hidraulički slom tla	crpljenje iz jame
			podupore* uz iskop pod vodom	
			smrzavanje	
iznad površine tla	tlo bez samaca	zagati, otoci, bunari, kesoni	plivajući sanduci, bunari, kesoni, zagati s ispunom	iz jame između zagata
	tlo sa samcima i stijena	zagati, plivajući sanduci	čelijasti zagati	iz jame između zagata

\*podrazumijeva se bilo koja vrsta podgrade i/ili zagatne stijenke

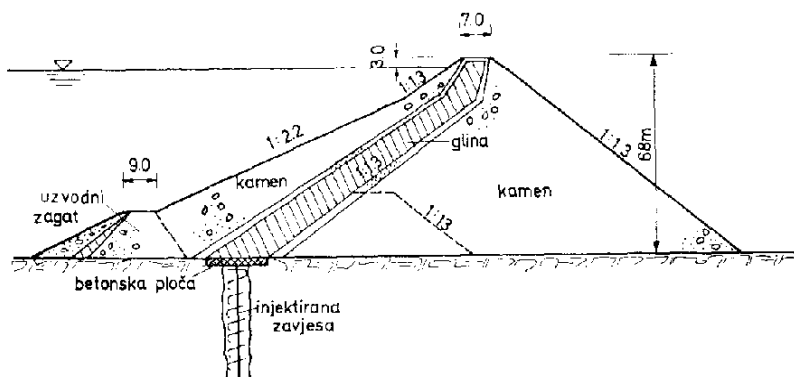
Nonveiller (1979.) kaže da je nemoguće opisati sve moguće načine izrade građevne jame te da je tabela samo podsjetnik na neke od mogućnosti.

Na slici 8.1 prikazana je vrlo složena građevna jama u uvjetima rada u gradskoj jezgri. Dolje desno vidi se berlinsko zide.



Slika 8.1 Građevna jama u gradskoj jezgri

Građevna jama je privremena građevina koja treba omogućiti izvedbu temelja i/ili dijela podzemne građevine za koju je projektirana. Nove tehnologije i sve zahtjevnije građevine uvjetuju, da svi dijelovi građevne jame ili barem neki od njih, ostaju trajni dio buduće građevine koju je građevna jama štitila u toku građenja. Primjera ima mnogo. Kod velikih nasutih brana, zagati, kojima je pregrađena rijeka, mogu se uklopiti u buduću veliku branu (slika 8.2).



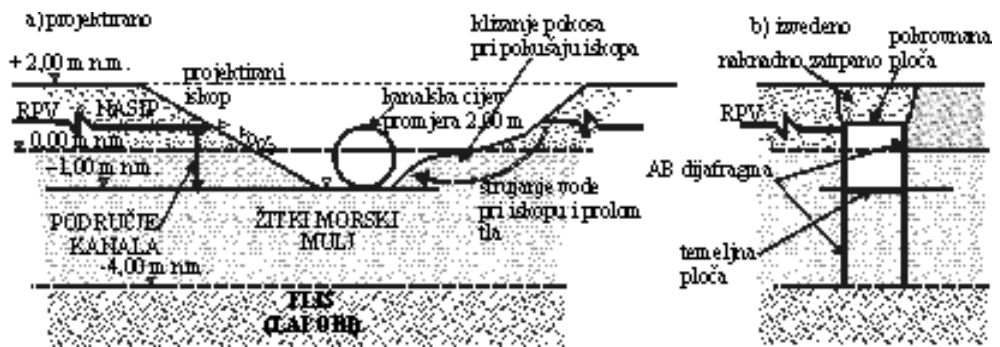
Slika 8.2 Brana Bear Creek s uklopljenim uzvodnim zagatom (Nonveiller, 1979.)

Armirano-betonske dijafragme su uvijek trajni dijelovi građevine. Primjer je dan na slici 8.3 gdje se na stijenama vide utori za povezivanje s međukatnom konstrukcijom. Ovdje su sidra samo privremena, kao i razupora dolje lijevo.



Slika 8.3 Građevna jama zaštićena armirano–betonskom dijafragmom (Jakl, 1999.)

Uvjeti izvođenja mogu dovesti do promjene koncepcije izrade građevne jame. Pri tom se nastoji dijelove zaštite uklopiti u građevinu, ako se već mora pristupiti izradi novog rješenja. Tipičan primjer je građevna jama odteretnog kanala Dujmovača u Splitu (slika 8.4).



Slika 8.4 Odteretni kanal Dujmovača, Split

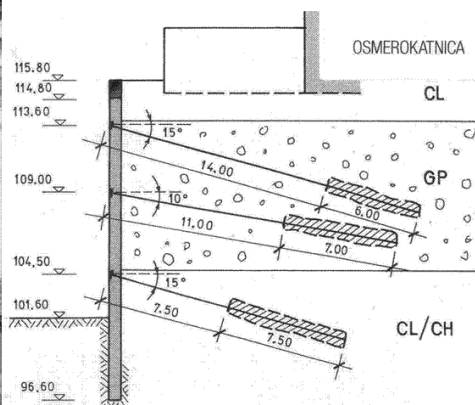
Kanal je trebao biti izveden u širokom iskopu u koji bi se položile betonske cijevi velikog promjera. Nakon prvih iskopa ustanovljeno je da je iskop nemoguće

izvesti prema projektu. Kombinacija lošeg tla i visoke razine podzemne vode uvjetovala je preprojektiranje na način da se kanal izveo pod zaštitom armirano-betonske dijafragme koja je ujedno tvorila stijenke kanala.

Sidrene armirano-betonske dijafragme mogu u potpunosti biti dijelovi buduće građevine, ali mogu biti projektirane tako da je stijenka trajna a sidra privremena. Opterećenje koje u početku nose sidra, može kasnije preuzeti građevina izvedena unutar građevne jame zaštićene takvom dijafragmom.



pogled na dijafragmu



projekt - poprečni presjek

Slika 8.5 Diјафрагма као трајни дио грађевине с привременим сидрима; Importane galerija, Zagreb (BBR, CONEX 1996.-1998.)

Iz definicije građevne jame jasno je da je svaki iskop za temelje građevna jama. Pitanje je samo je li poklapanje nepovoljnih uvjeta za izvedbu takvo, da bi građevna jama zahtijevala posebnu zaštitu ili ne. Kada se preklapi više nepovoljnih uvjeta kao što su velika dubina iskopa, visoka razina podzemne vode, tlo male čvrstoće, blizina susjednih građevina itd., građevna jama postaje geotehnička građevina za koju je potrebno izraditi PROJEKT, kao i za svaku drugu građevinu.

Projekt građevne jame ima dva temeljna dijela:

- 1) zaštita prostora od urušavanja tla pri iskopu;
- 2) zaštita od vode: oborinske, procjedne, vlastite.

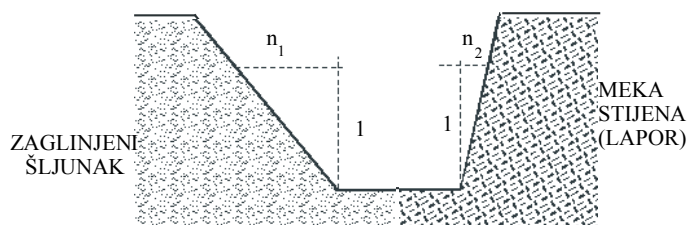
## 8.2 ZAŠTITA GRAĐEVNIH JAMA PRI ISKOPU BEZ PODZEMNE VODE

### 8.2.1 Plitke građevne jame – iskopi za kanale i plitke temelje

Plitki iskopi (do 2,0 m dubine) mogu se izvoditi bez zaštite. Oni su uvijek privremene građevine te se ta činjenica koristi pri njihovom izvođenju. One se ne smatraju građevinama za koje bi trebalo izraditi projekt, te se izvode iskustveno. U literaturi se mogu naći naputci za nagibe pokosa ovisno o materijalu. Weissenbach, (1975.) navodi nagibe prema DIN 4124 kako slijedi u tabeli 8.1

**Tabela 8.2 Kut nagiba pokosa građevne jame prema DIN 4124**

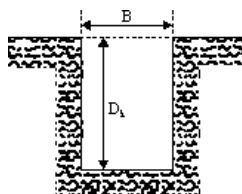
Vrsta tla	Kut nagiba pokosa $\beta$ [°]	Pokos 1/n
Nevezano i vrlo slabo vezano tlo	45	1:1
Čvrsto i polučvrsto koherentno tlo	60	1:0,58
Meka stijena	80	1 : 0,18
Čvrsta stijena	90	uspravno



Slika 8.6 Nagibi pokosa ovisno o vrsti tla

U KOHERENTNIM MATERIJALIMA koristi se svojstvo kohezije koje omogućava izvedbu uspravnih zasjeka bez podgrade. Kritična dubina,  $D_k$ , zasjeka može se proračunati iz jednadžbe 2.9 koja glasi:

$$D_k = \frac{2 \cdot c}{\rho \cdot g \cdot \sqrt{K_A}} \quad (2.9)$$



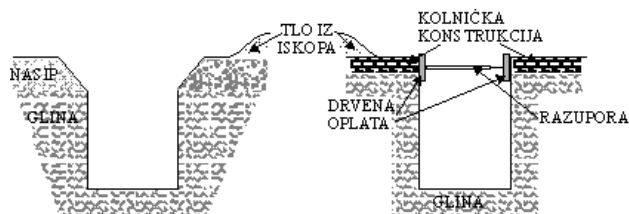
Slika 8.7 Iskop u glini, bez podgrade, do dubine,  $D_k$ , prema jednadžbi 2.9, do koje nema pritiska na podgradu.



Prema jednadžbi 2.11, teoretski nema pritiska na podgradu do dubine,  $2 \cdot D_k$ , sve dok se ne javi vlačna pukotina. To znači da se u nekim slučajevima, kao što je na primjer izvedba kanala za instalacije koji se mogu brzo zatrpati, može iskop bez podgrade izvoditi i dublje od kritične dubine,  $D_k$ , uz uvjet da iskop ostane otvoren vrlo kratko. *Pri tom treba poštivati zakonske odredbe zaštite na radu.*

Kada je koherentno tlo prekriveno slojem nasipa, koji ne može stajati uspravno, može se izvesti iskop s pokosom u dijelu nasipa kao na slici 8.8. Ako se izvode iskopi u kolničkoj konstrukciji, može se pridržati samo taj dio kako je prikazano na slici 8.8.

Kada iskopano tlo ostaje na gradilištu, da bi kasnije služilo za zatrpavanje, treba ga odložiti nešto dalje od rova da se ne bi u njega obrušavalo i da ne smeta kretanju uz rov. Potrebno ga je toliko odmaknuti od ruba iskopa da njegova težina nema utjecaja na povećanje opterećenja na aktivni klin. U protivnom bi težina odloženog materijala mogla uzrokovati odron materijala u jamu. Ova širina ovisi o dubini iskopa, a u literaturi se može naći da je to minimalno 0,6 m.



Slika 8.8 Plitki iskopi rovova (Weissenbach, 1975.)

Građevna jama ne smije ostati nepodgrađena u slučajevima kada je moguć pristup vozilima i/ili građevinskim strojevima u blizinu njenog ruba. Ako postoji sumnja da bi se to moglo dogoditi, potrebno je jamu bez obzira na ostale povoljne uvjete, podgraditi na način da se računski može dokazati da neće doći do urušavanja pokosa iskopa uslijed pristupa vozila. Ponekad je tehnologija iskopa takva da stroj mora doći blizu ruba iskopa (slika 8.9)



Slika 8.9 Iskop rova između gusjenica

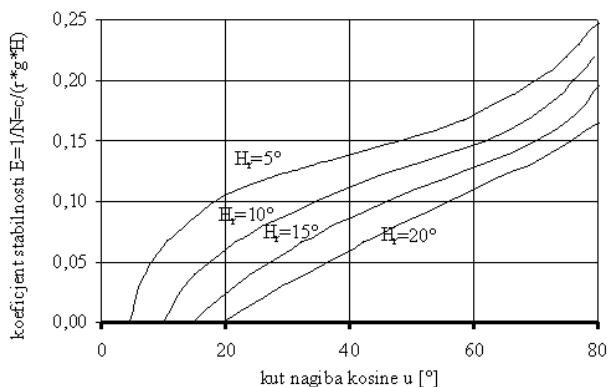
Ako se ne može osigurati brzo napredovanje radova, potrebno je rovove dublje od računске dubine,  $D_k$ , podgrađivati ili barem razupirati građevnu jamu. Kada ima prostora može se izvesti iskop s pokosom koji će zadovoljiti stabilnost za privremene građevine. U koherentnim materijalima ovi pokosi su vrlo strmí.

Na slici 8.10 dani su dijagrami za približnu ocjenu nagiba stabilnog pokosa u koherentnim materijalima ovisno o visini kosine,  $H$ , i parametrima čvrstoće na smicanje,  $c$ , i  $\phi$ . Na osi apscisa je mogući kut nagiba ravne kosine u stupnjevima, a na osi ordinata bezdimenzionalni BROJ STABILNOSTI izražen kao:

$$E = \frac{c_r}{\rho * g * H} \quad (8.1)$$

U našoj se literaturi (Nonveiller, 1979.) mogu naći slični dijagrami odraznih autora, (Taylor, Bishop, Morgenstern) s tom razlikom da je broj stabilnosti recipročna vrijednost onog kod ruskih autora, tj.:

$$N = \rho * g \frac{H}{c} = \frac{1}{E} \quad (8.2)$$



Slika 8.10 Dijagram za procjenu stabilnog nagiba kosine (Maslov i sur., 1975.)

Kod upotrebe ovih dijagrama važno je napomenuti da treba koristiti računске parametre čvrstoće na smicanje tj. da je:

$$c_{\text{računsko}} = c/F_{sc} ; \quad (8.3)$$

$$tg\phi_{\text{računsko}} = tg\phi/F_{s\phi}, \quad (8.4)$$

gdje su,  $F_{sc}$ , i  $F_{s\phi}$ , parcijalni faktori za koheziju i kut unutarnjeg trenja materijala. Ovi faktori sigurnosti ovise i o pretpostavljenoj dužini trajanja iskopa, značaju građevne jame (dubini) i, u nekim područjima, o stupnju seizmičnosti. Raspon vrijednosti im je (Maslov i sur., 1975.) od 1-1,2 za zonu 7° seizmičnosti do 1,2 -

1,45 za zonu 9° seizmičnosti. Pri upotrebi ovih izraza i dijagrama potrebno je provjeriti predložene vrijednosti parcijalnih faktora u EUROCOD 7.

Stabilnost kosina u koherentnom tlu ovisi o konzistentnom stanju tla. Konzistentno stanje ovisi o vlažnosti i porozitetu. Maslov i sur. (1975.) daju tablicu vrijednosti kohezije,  $c$ , i kuta unutarnjeg trenja,  $\varphi$ , ovisno o ova dva parametra tla. Podaci su dani u tabeli 8.3. Maslov i sur. (1975.) navode da su to «normativne vrijednosti» što bi značilo da su to statistički obrađeni podaci parametara tla za koje se može statističkim testovima pokazati da spadaju u istu vrstu materijala.

Tabela 8.3 Ovisnost kohezije i kuta trenja  $\varphi$ , o vlažnosti na granici plastičnosti  $W_p$  i koeficijentu pora  $e$

$W_p$ [%]	$c$ [kN/m <sup>2</sup> ] za koeficijent pora $e$ u rasponu od - do					
	0,41-0,5	0,51-0,6	0,61-0,7	0,71-0,8	0,81-0,95	0,96-1,1
9,5-12,4	12	8	6			
12,5-15,4	42	21	14	7		
15,5-18,4		50	25	19	11	8
18,5-22,4			68	34	28	19
22,5-26,4				82	41	36
26,5-30,4					94	47
$W_p$ [%]	$\varphi$ [°] za koeficijent pora $e$ u rasponu od - do					
	0,41-0,5	0,51-0,6	0,61-0,7	0,71-0,8	0,81-0,95	0,96-1,1
9,5-12,4	25	24	23			
12,5-15,4	24	23	22	21		
15,5-18,4		22	21	20	19	18
18,5-22,4			20	19	18	17
22,5-26,4				18	17	16
26,5-30,4					16	15

Vrijednosti iz tabele mogu, uz veliki oprez, poslužiti za približne proračune pomoću dijagrama na slici 8.10. Kada god je moguće treba podatke odrediti pokusima u laboratoriju i na terenu.

U NEKOHERENTNIM MATERIJALIMA nije moguće izvesti iskop uspravnih stijenki bez podgrađivanja. Nekoherentno tlo nema nikakvu vlačnu čvrstoću i može stabilno stajati samo uz odgovarajući pokos koji je ovisan o kutu unutarnjeg trenja tla i o visini kosine. Najmanji mogući kut unutarnjeg trenja tla je kut prirodnog pokosa. On se javlja kod rahlo nasutog materijala. U prirodi se ovaj kut javlja rijetko zato jer je tlo u prirodi zbijenije od rahlog stanja i rijetko se javljaju čisti

nekoherentni materijali. S druge strane teško je izravno (pokusom smicanja) odrediti kut trenja prirodnog nekoherentnog materijala. Za plitke iskope ovo se može odrediti iskustveno.

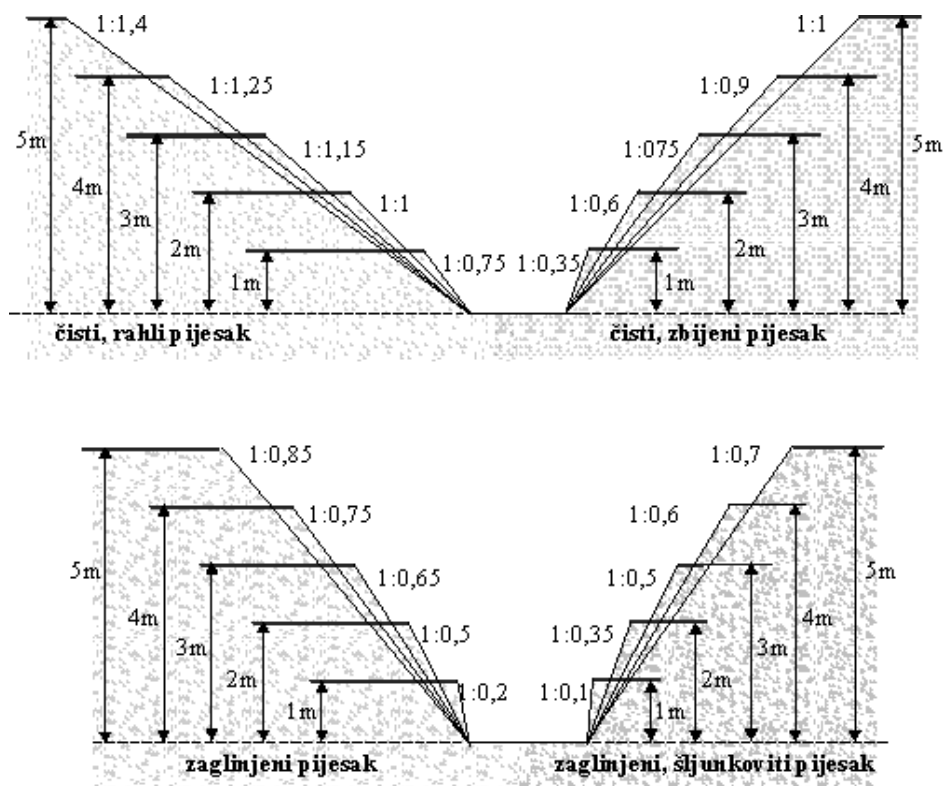
Pokos mora zadovoljiti uvjet da je:

$$\frac{1}{n} = \frac{\text{tg}\varphi}{F_s} \quad (8.5)$$

Kada je razina podzemne vode ispod površine tla, ali iznad dna iskopa, potrebno je ublažiti nagib dijela kosine ispod razine vode, uz pretpostavku da se voda crpi iz građevne jame. Zbog djelovanja strujne sile (uz pretpostavku tečenja usporedno s nagibom kosine), na ovaj dio kosine, nagib kosine mora zadovoljiti uvjet (Roje-Bonacci, 2003.) na način da bude:

$$\frac{1}{n} = \frac{(\rho - \rho_w)}{\rho} \frac{\text{tg}\varphi}{F_s} \quad (8.6)$$

Na slici 8.11 prikazan je nagib pokosa iskopa u nekoherentnom materijalu ovisno o vrsti tla i dubini iskopa prema preporukama Bellina (1951.).



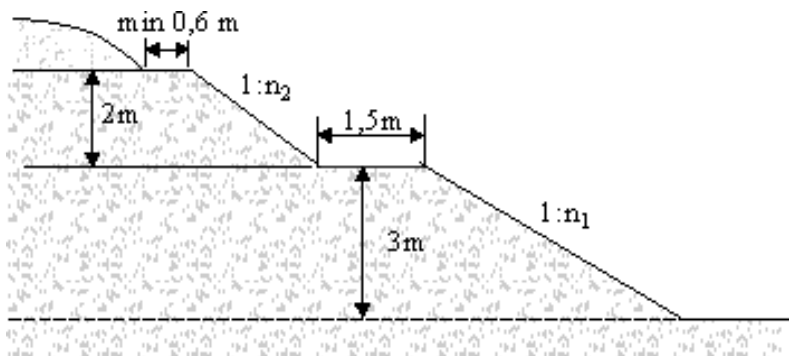
Slika 8.11 Pokosi u nekoherentnom materijalu ovisno o vrsti tla i dubini iskopa

Kada iskop po visini obuhvaća dva ili više slojeva različitih svojstava, potrebno je prilagoditi kosinu iskopa svojstvima materijala kako je to prikazano na slici 8.12.



Slika 8.12 Iskopi promjenjivih nagiba pokosa

U homogenom materijalu može se stabilnost pokosa osigurati promjenjivim nagibom kosine po visini kako je to pokazano na slici 8.12. Kosine veće visine, u nekoherentnim materijalima, mogu se izvoditi s bermom kao na slici 8.13.



Slika 8.13 Iskopi na slobodnom prostoru, većih dubina, suhi s bermom

Berma služi za prekid nagiba kosine, ona smanjuje nagib kosine ukupne visine, a ujedno često služi i kao komunikacija između dna građevne jame i okolnog terena. Pritom treba voditi računa o nekoliko detalja kao na pr.: odloženi materijal treba odmaknuti od ruba iskopa za barem 0,6 m kako ne bi djelovao kao dodatni teret na vrhu kosine i kako bi se osiguralo slobodno kretanje uz rub građevne jame; berma treba biti širine najmanje 1,5 m, da bi djelovala kao prekid pokosa; pokosi se tada mogu odrediti za visinu od dna jame do berme i od berme do berme, ako ih ima više od jedne.

U nekoherentnim materijalima kosine treba dimenzionirati tako da imaju faktor sigurnosti barem  $F_s=1,3$ .

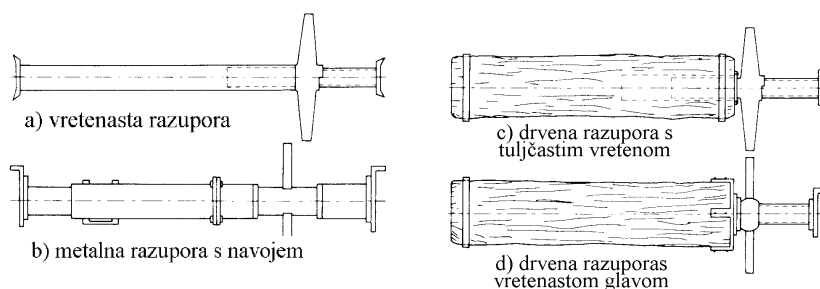
## 8.2.2 Iskopi s poduporom

U poglavlju 5 bilo je već govora o podgrađivanju uspravnih iskopa. Tamo je dan proračun i dimenzioniranje sustava za podgrađivanje. Izvedba podgrada je opisana oskudno. Iz tog razloga će u ovom poglavlju naglasak više biti na izvedbu i mogućnosti današnjih tehnologija.

Svi iskopi u nekoherentnom materijalu i skućenom prostoru moraju se podgraditi. Vrste podgrada su vrlo različite, od vrlo jednostavnih od priručnog materijala – dasaka i greda, do gotovih namjenski proizvedenih oplata za podgrađivanje. Između te dvije krajnosti na raspolaganju je niz varijanti ovisno o dubini, vrsti tla, položaju gradilišta i slično.

Razlikuju se razuprte podgrade i pridržane podgrade. Razupiru se podgrade rovova kojima su stranice dovoljno blizu. Pridržanja (kosnici, zatege, sidra) se koriste kada nije moguće oplatu razuprijeti.

Podupore rovova mogu biti izvedene na licu mjesta. Danas postoji veliki broj gotovih sustava oplata za pridržanje rovova. U nastavku će biti prikazani neki od njih. Ove se podupore uvijek razupiru. Razupore mogu biti drvene, učvršćene klinovima i/ili čelične s navojem i maticom za učvršćenje ili kombinirane. Na slici 8.14 prikazane su neke od mogućih razupora koje se koriste za razupiranje oplata u rovovima. One moraju biti jednostavne za postavljanje i skidanje i prikladne za višekratnu upotrebu.



Slika 8.14 Razupore

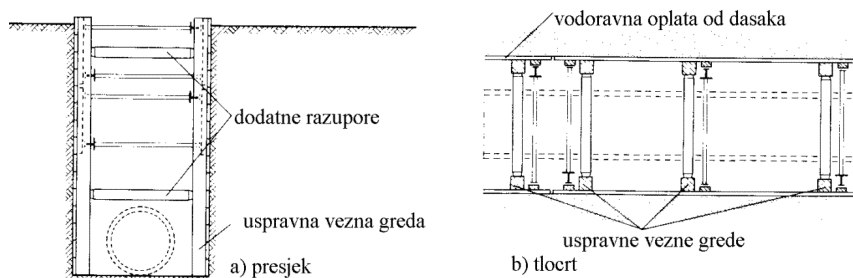
Temeljno se razlikuju dvije vrste podgrada:

- 1) podgrade koje nisu zabijene u tlo ispod razine dna građevne jame i
- 2) podgrade zabijene u tlo ispod razine dna građevne jame.

O dimenzioniranju ovih podgrada bilo je govora u poglavlju 5.2.

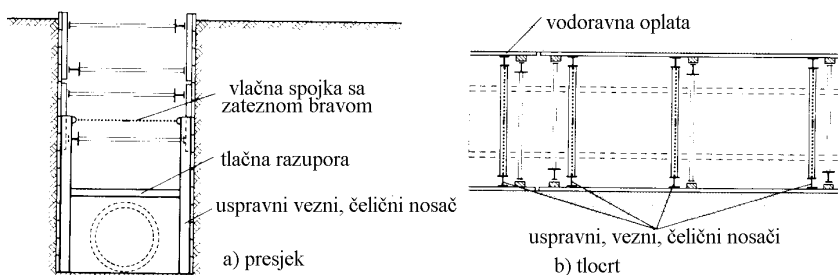
Kanali za infrastrukturu podgrađuju se s razupiranjem, jer su dovoljno uski da ih se može razuprijeti. Za plitke iskope (1-2 m dubine) koriste se podgrade koje nisu zabijene u tlo već sežu do dna građevne jame. Kao obloga podgrada kanala služe vodoravno položene daske. Na slici 8.15 i 8.16 prikazani su načini podgrađivanja iskopa za kanale pomoću podgrada koje nisu zabijene u tlo ispod dna kanala s oplatom od vodoravno položenih dasaka.

Noviji tipovi podgrada sastoje se od elemenata koje se mogu kombinirati prema potrebi. Jednostavnije su za rad, zabijaju se kašikom bagera. Poteškoće nastaju kada ih je potrebno zabiti u nekontrolirane nasipe i tlo u kojem se mogu pojaviti krupniji samci. Ove su oplata i razupore prikazane na slici 8.19.



Slika 8.15 Podgrada iskopa za kanal s vodoravnom oplatom, pomoću dodatnih uspravnih veznih greda i dodatnih razupora (Weissenbach, 1975.)

Podgrada, koja nije zabijena u tlo ispod dna kanala, podložna je deformaciji na način da se stiska u dnu iskopa (slika 5.2). Kako bi se osigurao slobodan prostor za ugradnju cijevi potrebno je ovo stiskanje spriječiti. Jedna je mogućnost na podgradu na određenim razmacima postaviti dodatne uspravne razuprte grede po cijeloj visini kako je to prikazano na slici 8.15. Druga je pridržanje dodatnom konstrukcijom, koja seže od dna kanala do polovice njegove visine a sastoji se od uspravnih nosača vlačno pričvršćenih i prednapetih na vrhu (u polovici visine iskopa kanala ) i tlačno razuprtih na polovici svoje visine, ali tako da još ostane mjesta za ugradnju cijevi. Na taj način uspravni nosači djeluju kao konzole koje preuzimaju pritiska s donjeg dijela kanala i sprječavaju njegovo stiskanje (slika 8.16).

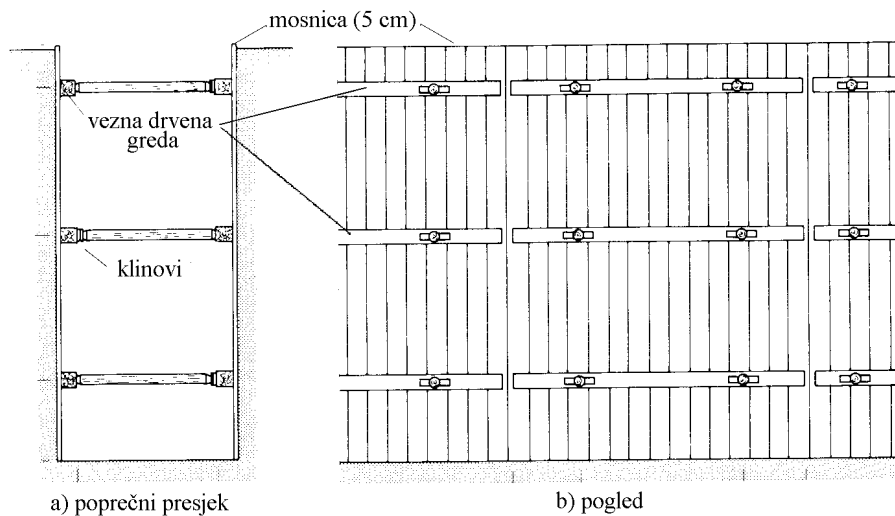


Slika 8.16 Podgrada iskopa za kanal pomoću uspravnih veznih greda, vlačnih spojki i dodatnih tlačnih razupora (Weissenbach, 1975.)

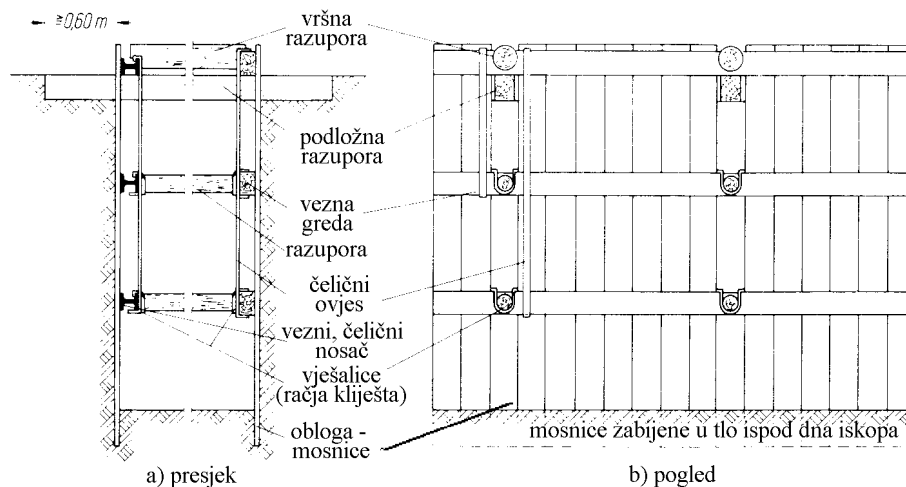
Za dublje iskope koriste se podgrade s uspravno položenom oplatom. Razlikuju se tri temeljna tipa iskopa:

- 1) s jednostavnom uspravnom podgradom;
- 2) sa stepenastom uspravnom podgradom;
- 3) sa zabijanom uspravnom podgradom.

Na slikama 8.17 i 8.18 prikazane su oplata s uspravno položenim mosnicama i raznim načinima razupiranja. Koriste se za dublje iskope (3 – 4 m) i slabije vezana tla.



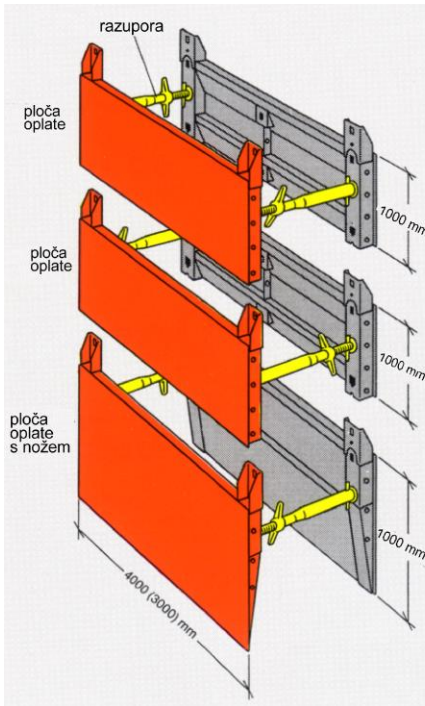
Slika 8.17 Jednostavna, uspravna, razuprta oplata za dubine do 4,00 m (Weissenbach, 1975.)



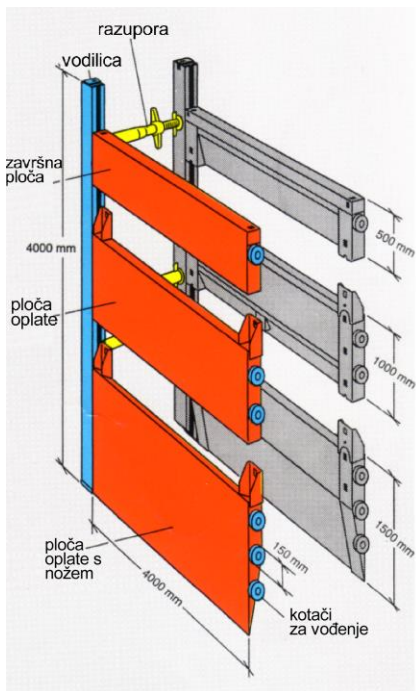
Slika 8.18 Složena, uspravna, razuprta oplata zabijena na dnu za dubine do 4,5 m (Weissenbach, 1975.)

Usko specijalizirani izvođači i visoko razvijena industrija u području oplata za razupiranje, nudi na tržištu svoje patentirane proizvode. Jedan od njih je sustav oplata prikazan na slici 8.19 i 8.20. Ove se oplata zabijaju u tlo kašikom bagera.



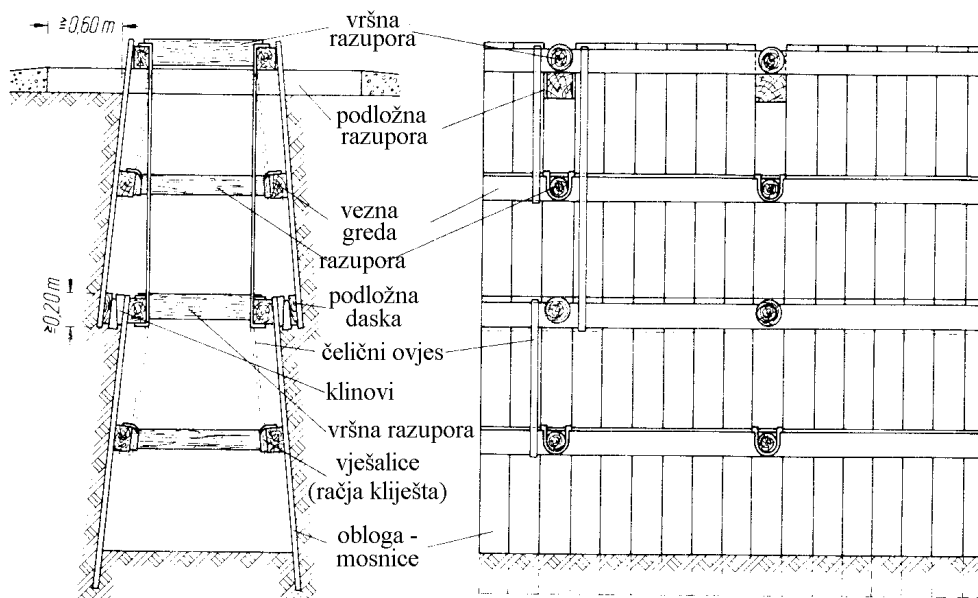


Slika 8.19 Sustav oplata za iskop kanala s pločama

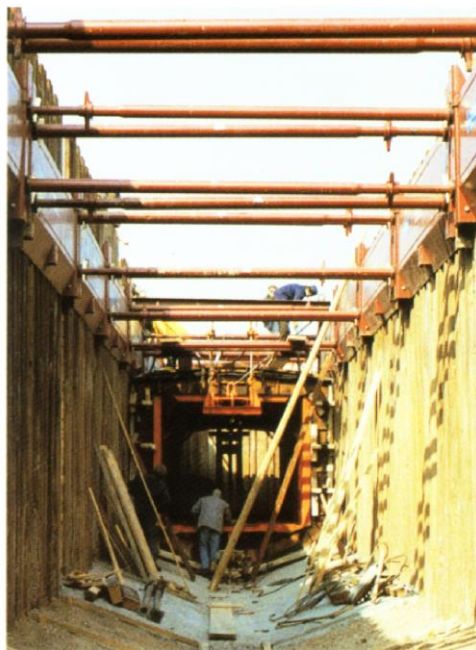
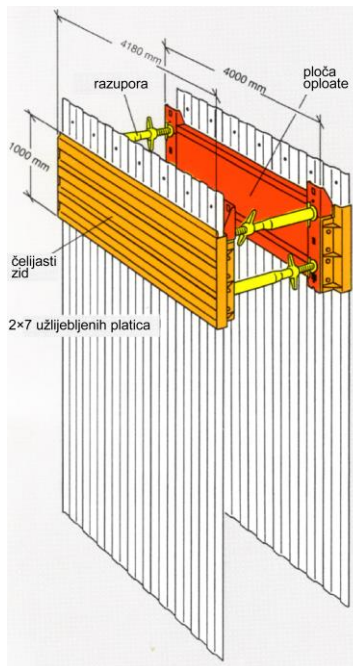


Slika 8.20 Sustav oplata s pločama i vodilicama

Za vrlo teške uvjete rada i veće dubine (do 6 m) koristi se zabijena oplata prikazana na slici 8.21 i oplata sa čeličnim platicama, koje se ugrađuju makarom.

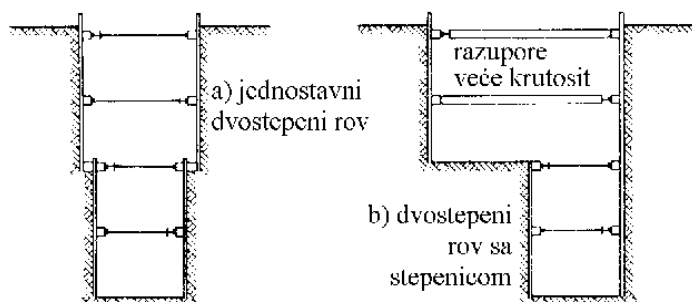


Slika 8.21 Zabijena oplata (Weissenbach, 1975.)



Slika 8.22 Sustav oplata od čeličnih platica, vodoravne ukrute i razupora

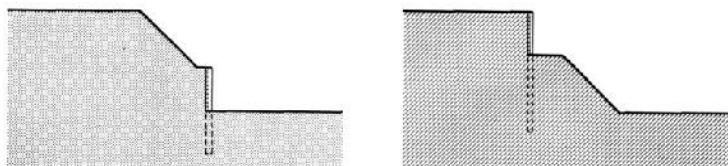
Veće dubine (do 6 m) mogu se savladavati i stupnjevanim podgradama kako je to prikazano na slici 8.23.



Slika 8.23 Stupnjevana podgrada za duboke kanale do 6m

U podgrade zabijene u tlo još spadaju berlinsko zide, za jame s razinom podzemne vode ispod njenog dna ili čelično žmurje, armirano betonske dijafragme, stijenke od mlazno injektiranih stupnjaka i sl. Ove se podgrade koriste za iskope većih dubina kako kanala, koji se mogu razupirati tako i građevnih jama većih širina.

Građevne jame mogu se izvoditi na način da se dio iskopa izvodi s pokosom a dio da se podupire nekom od zagatnih stijenki. Na slici 8.24 prikazane su dvije mogućnosti takvog iskopa građevnih jama.



Slika 8.24 Djelomično podgrađen iskop građevne jame

Na fotografiji (slika 8.25) je prikazana jedna ovakva djelomična zaštita pokosa iskopa berlinskim zidom.

Građevne jame većih širina podupiru se ili slobodno stojećim žmurjem ili poduprtim odnosno usidrenim žmurjem, ovisno o potrebama koje su dokazane proračunima. Proračuni su dani u poglavlju 5.

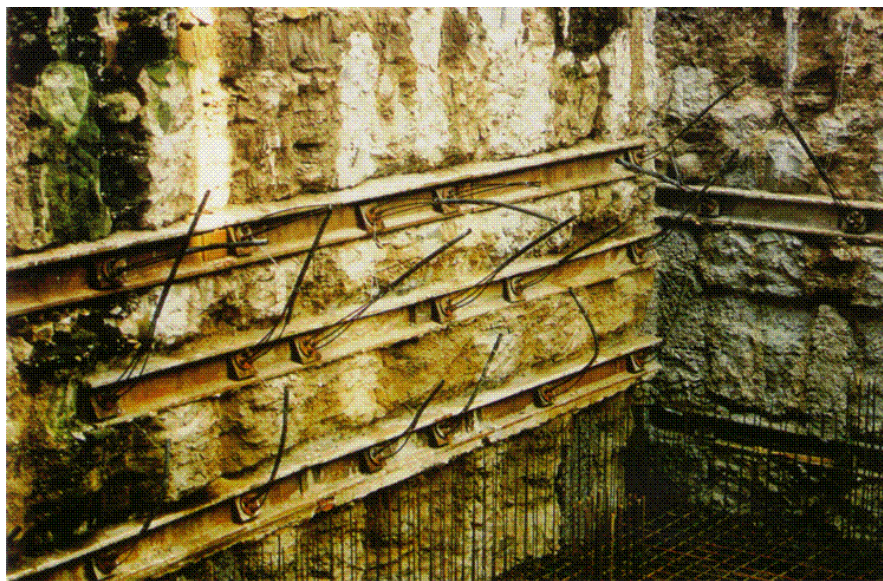
Podupore i sidra zahtijevaju povezivanje dijelova žmurja, da bi se pritisak tla mogao prenijeti na točkaste ležajeve – kosnike, razupore i/ili sidra. Na slici 5.1 prikazana je građevna jama poduprta čeličnim žmurjem sa složenom konstrukcijom čeličnih kosnika i razupora. Vidi se čelični okvir o koji se oslanjaju razupore.

Na slikama 8.26 i 8.27 prikazan je način izvedbe veznih greda koje povezuju geotehnička sida. To mogu biti armirano-betonske grede, izvedene na licu zagatne stijenke, čelični profili oslonjeni na lice stijenke, ali mogu biti i skrivene grede, oblikovane u armirano betonskoj dijafragmi, na način da je armaturni koš unaprijed pripremljen da prihvati sidra ili razupore.



Slika 8.25 Berlinsko ziđe u dnu građevne jame

Na slici 8.26 prikazana je zagatna stijenka od mlazno injektiranih stupnjaka i mikropilota povezana vodoravnim čeličnim profilima na koja su učvršćena geotehnička sidra. Može se primijetiti kako raspored veznih nosača nije jednak na desnoj i lijevoj stijenci građevne jame. Mjesta postavljanja veznih nosača određuju se geostatičkim proračunom.



Slika 8.26 Vodoravne čelične vezne grede i sidra (Zakladani staveb, 1999.)

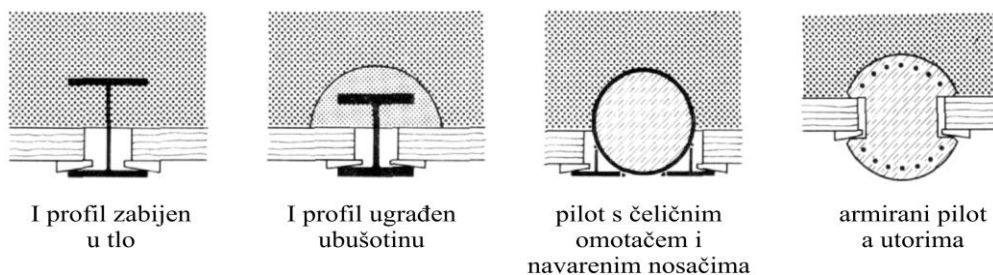
Na slici 8.27 prikazana je armirano betonska dijafragma od predgotovljenih panela s nizom vodoravnih i uspravnih veznih greda. Uspravne vezne grede nalaze se na spojevima predgotovljenih panela. Stijenka je usidrena trajnim geotehničkim sidrima.



Slika 8.27 Nosači za prijenos sila s dijafragme na geotehnička sidra (Zakladani staveb, 1999.) .

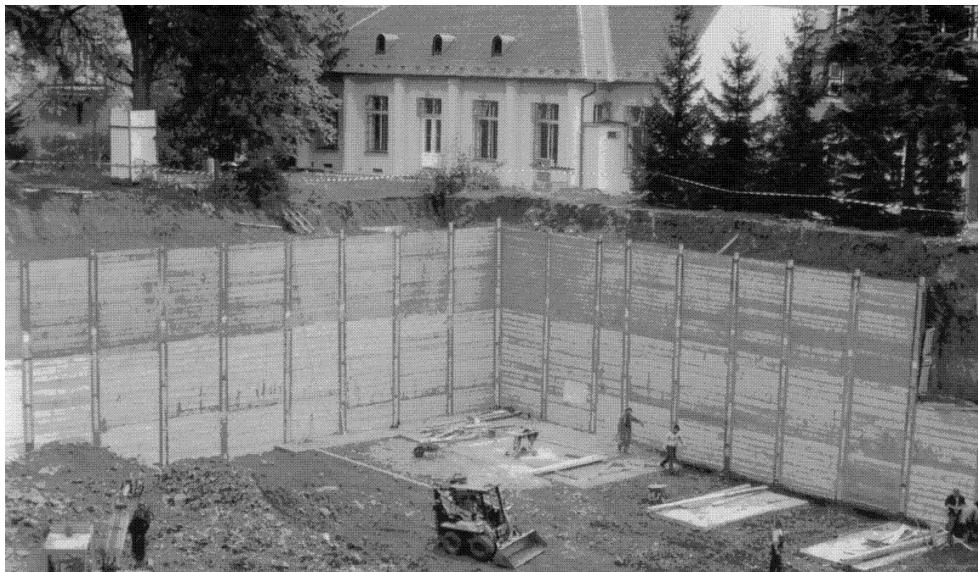
Pri podgrađivanju dubokih iskopa kod kojih razina podzemne vode nije visoko iznad dna jame ili je ispod dna, često se koriste različite vrste berlinskog zida. Bit izvedbe je da se prije početka iskopa izvedu uspravni nosači, koji će kasnije, tijekom napredovanja iskopa nositi oplatu.

Na slici 8.28 prikazane su razne vrste uspravnih nosača za berlinsko zida. Na slici 8.29 prikazana je građevna jama zaštićena berlinskim zidom s drvenom oplatom.



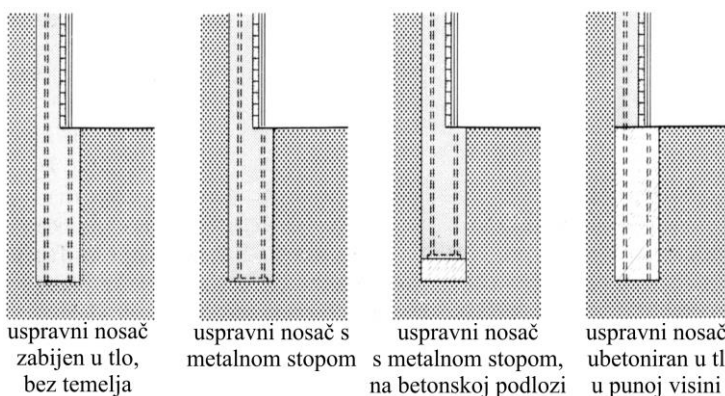
Slika 8.28 Poprečni presjeci uspravnih nosača za oplatu berlinskog zida

Uspravni se nosači zabijaju u tlo ili ugrađuju u prethodno izvedene bušotine. Mogu biti izvedeni od čeličnih profila ili kao armirano-betonski piloti različitih profila. Zabijaju se u tlo ili ugrađuju u bušotine do dubine uklještenja utvrđene proračunom. Proračun je dan u poglavlju 5.



Slika 8.29 Berlinsko zide

Na slici 8.30 prikazan je način oslanjanja uspravnih nosača berlinskog zida u tlo.



Slika 8.30 Učvršćenje uspravnih nosača berlinskog zida u tlo

Oplata, koja se ugrađuje između nosača može biti od drvenih greda, drvenih oblica, starih željezničkih šina, armirano-betonskih greda, čeličnih I profila, metalnih profiliranih ploča, prskanog betona i slično. Berlinsko se zide kod većih visina može sidriti. Ovakva zaštita građevne jame uvijek služi kao privremena građevina.

Berlinsko zide se može koristiti i onda kada se u tlu nalaze samci ili veći komadi kamena, nasipi raznog materijala i slično. Najpogodniji su za srednje do dobro zbijene pijeske i pjeskovite šljunke.

Sve ostale vrste zagatnih stijenki mogu se koristiti za iskope s podgradom u skućenom prostoru, kada nema podzemne vode. Kako su one uglavnom i vododržive te se koriste za iskope duboko ispod razine podzemne vode, biti će opisane u posebnom poglavlju.



**Slika 8.31** Građevna jama, prva faza, iskop u šljunku s kosinom i bermom (Keller, interna arhiva)

### 8.3 ZAŠTITA GRAĐEVNIH JAMA OD OBORINSKE I PODZEMNE VODE

Građevna jama je prostor koji mora biti suh. Građevna jama je gotovo uvijek udubina u tlu iz koje voda ne može gravitaciono isteći. Iz tog razloga potrebno je građevinskim zahvatima osigurati odvodnju građevne jame.

Odvodnju je moguće izvesti pomoću SAKUPLJAČA VODE koji ju odvede do mjesta na kojem postoji prostor za prikupljanje ove vode, a koji se povremeno prazni. Pod tim se podrazumijeva sustav kanala koji imaju blagi pad dna prema lokalnom recipijentu unutar građevne jame. Iz recipijenta se izbacuje voda koja se pojavi povremeno. To je vlastita i/ili vanjska oborinska voda u područjima u kojima kiše nisu intenzivne.

Za veće količine i stalan dotok potrebno je osigurati CRPNU STANICU. Crpnih stanica ima raznih kapaciteta i vrsta na tržištu. Koriste se za trajno crpljenje vode iz građevne jame. Nužno je imati rezervni pogon i rezervne crpke da se gradilište osigura od poplave i u najsloženijim situacijama.

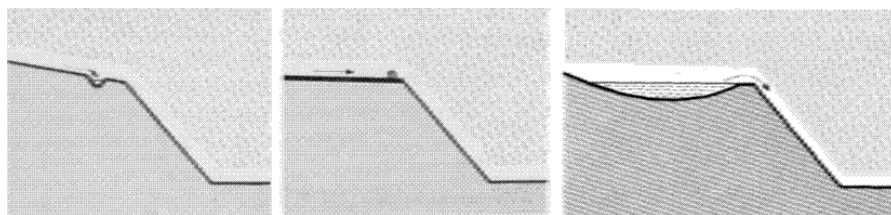
Pri određenim geološko – geotehničkim uvjetima u tlu, može se voda iz građevne jame upuštati u UPOJNI BUNAR. Upojni bunar je bušotina u dnu građevne jame u koju se dovodi voda i upušta u dublje slojeve tla kada je podzemna voda duboko, a tlo dovoljno propusno.

#### 8.3.1 Zaštita od oborinske vode

Svaku je građevnu jamu potrebno osigurati od vanjske i vlastite oborinske vode. Razina osiguranja od oborinske vode ovisi o režimu kiša u području gradilišta, godišnjem dobu, razini podzemne vode, konfiguraciji okolnog terena i slično. Za velike građevne jame potrebno je kako za vanjske tako i za vlastite vode izraditi hidrološku analizu projektiranih pljuskova. Temeljem takvih podataka dimenzioniraju se uređaji za zahvat i odvodnju ovih voda.

##### 8.3.1.1 Zaštita od vanjske oborinske vode

Ova zaštita se mora provesti tako da spriječi dotok vanjske vode u jamu. To se postiže izradom odvodnih jaraka, kanala i/ili bazena uz rub građevne jame. Zahvaćena voda odvodi se u prirodni recipijent ili u najbližu kanalizaciju. Na slici 8.23 prikazano je nekoliko primjera vanjske odvodnje oborinske vode.



odvodni jarak

zaštitni zečji nasip

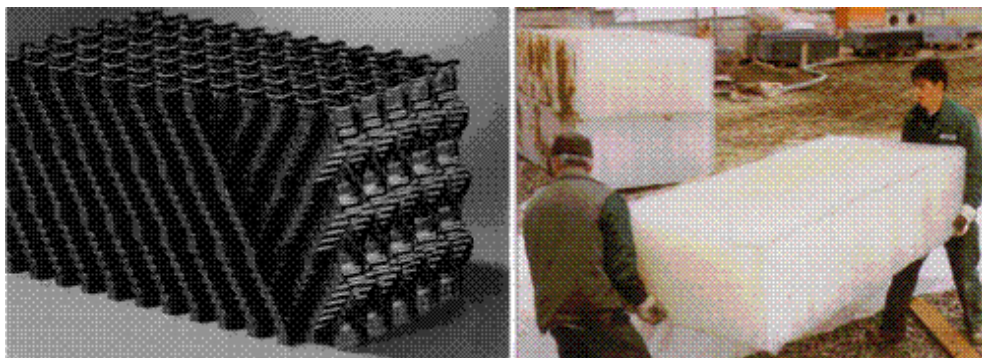
bazen za prikupljanje vode

Slika 8.23 Zaštita građevnih jama od vanjske, oborinske vode (Weissenbach, 1975.)



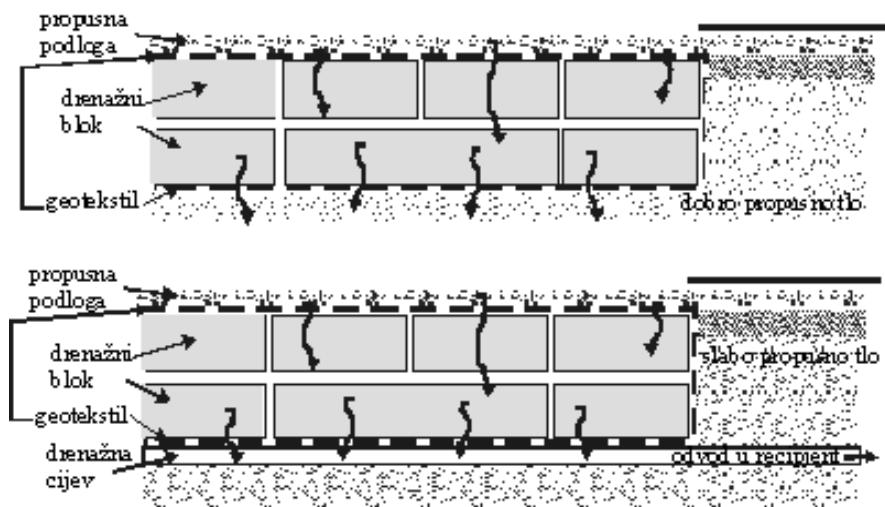
Danas na tržištu postoje sačasti blokovi koje je moguće ugraditi u rov oko gradilišta. Ovi sačasti blokovi vrše ulogu retencionog prostora kod jakih pljuskova. Kada je tlo izrazito nepropusno, potrebno ih je ugraditi iznad drenažnih cijevi, koje će vodu odvesti u recipijent ili bunar. Ako leže na propusnom tlu, nije potrebno postavljanje drenažnih cijevi. Iz blokova će se voda nakon prestanka kiše postepeno ocijediti u tlo.

Blokova ima različite kakvoće od onih za pješački promet (laki blok) do onih velike čvrstoće koji mogu izdržati hod građevinskih strojeva (teški blok). Na tržištu se nalaze pod raznim proizvođačkim imenima. Blokovi su prikazani na slici 8.33.



Slika 8.33 Teški (lijevo) i laki (desno) blok za zadržavanje vode kod velikih pljuskova

Na slici 8.34 prikazan je način djelovanja i ugradnje ovih blokova u dobro propusno i slabo propusno temeljno tlo.

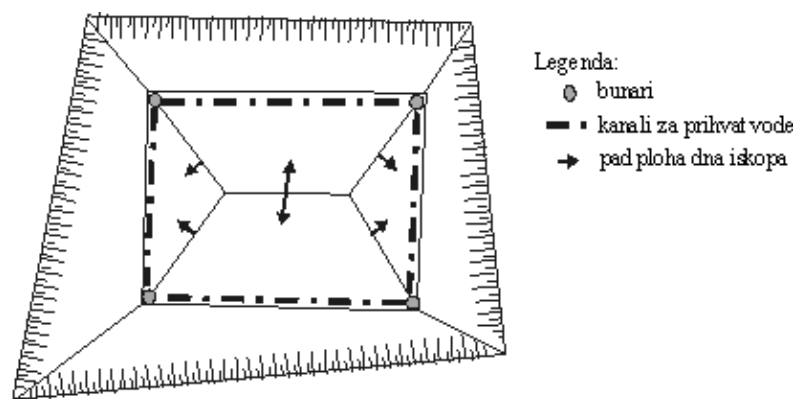


Slika 8.34 Ugradnja i djelovanje retencionih blokova sa i bez drenažnih cijevi

### 8.3.1.2 Zaštita od oborinske vode koja padne u jamu

Uski kanali štite se na način da se izvode u uzdužnom padu. Na najnižoj točki izvodi se privremeni bunar iz kojeg se može iscrpiti prikupljena kišnica. Napredovanjem radova pomiče se privremeni bunar te na taj način rov uvijek ostaje suh. Iscrpljena se voda odvodi u obližnji recipijent ili najbližu kanalizaciju.

Građevne jame velikih tlocrtnih površina potrebno je pažljivo i kontrolirano odvodniti od vlastitih oborinskih voda. Temeljem hidroloških podloga potrebno je odrediti razinu zaštite građevne jame (100 godišnje, 200 godišnje ili 500 godišnje povratno razdoblje projektiranog pljuskaja), a temeljem toga broj bunara (i crpki) iz kojih će se crpiti voda. U tu se svrhu dno izvodi u blagim padovima prema određenim mjestima na kojima se nalaze stalni bunari iz kojih se crpi nakupljena voda. U bunare se ugrađuju automatske crpke, koje rade neprekidno. Pretpostavlja se neprekidna opskrba gradilišta potrebnom energijom za rad crpki i automatike. Odvodnja se projektira s dvostrukim osiguranjem tj. svaka crpka mora imati zamjenu u slučaju kvara. Voda se odvodi u recipijent ili najbližu kanalizaciju. Na slici 8.35 prikazana je shema odvodnje oborinske vode iz jedne građevne jame većih tlocrtnih dimenzija.

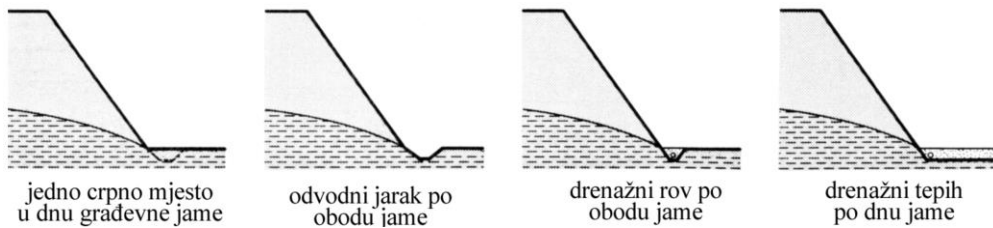


Slika 8.35 Shema odvodnje oborinskih voda iz građevne jame većih tlocrtnih dimenzija

### 8.3.2 Zaštita širokih iskopa od podzemne vode

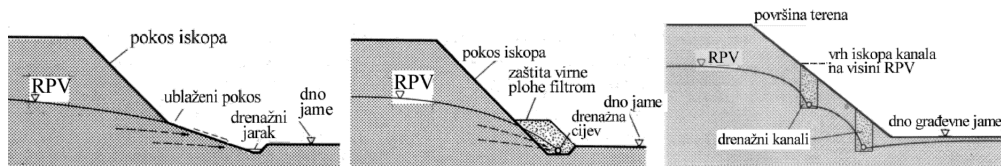
#### 8.3.2.1 Odvodnja iz jame

Voda se može prikupljati u građevnoj jami, a iz nje odvoditi na jedno crpno mjesto padom dna jame, odvodnim jarcima, obodnim drenažnim rovovima ili drenažnim tepihom i padom dna iskopa ispod tepiha. Iz crpnog mjesta (bunara) voda se, ovisno o dotoku, crpi povremeno ili stalno i odvodi u recipijent. To može biti vodotok, kanalizacija, upojni bunar ili nešto drugo prikladno za prihvatanje vode s prostora gradilišta. Na slici 8.36 prikazane su navedene mogućnosti.



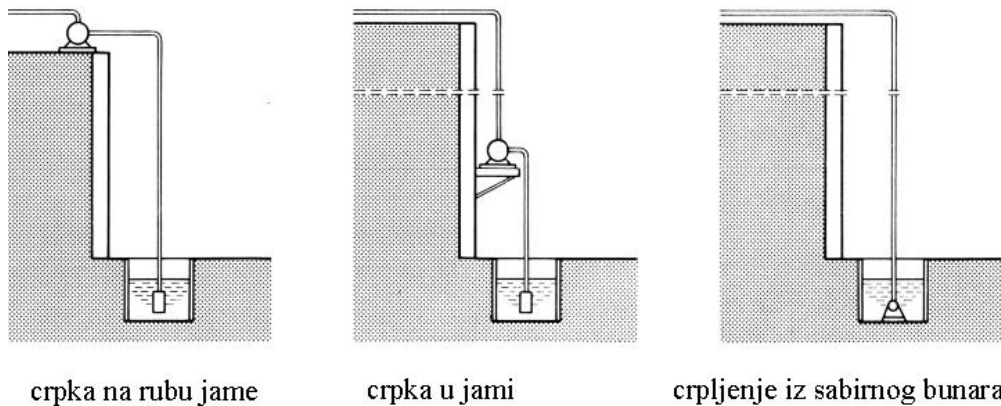
Slika 8.36 Odvodnja procjedne podzemne vode iz građevne jame

Pri ovakvoj odvodnji građevne jame od podzemne vode, potrebno je osigurati da ne dođe do hidrauličkog sloma na virnoj plohi. Na slici 8.37 prikazana su tri moguća detalja zaštite pokosa iskopa građevne jame od hidrauličkog sloma, kod načina odvodnje prikazanih na prethodnoj slici (Weissenbach, 1975.)



Slika 8.37 Detalji zaštite pokosa pri odvodnji procjedne vode iz građevne jame

Kada se podzemna voda crpi iz same građevne jame, potrebno je, sabirne jarke i drenove, padovima prilagoditi tako da se voda prikuplja na mjestima iz kojih se crpi. Dno jame treba izvoditi u padu slično kao na slici 8.35, tako da ima pad prema sabirnim kanalima. U nekim se slučajevima izvode provizorne sabirne jame koje se povremeno premještaju, tako da ne smetaju radovima u jami. Crpljenje se može izvoditi stalno ili povremeno ovisno o veličini dotoka, veličini jame, vrsti temeljnog tla i osjetljivosti radova na pojavu vode na dnu jame. Na slici 8.38 prikazani su mogući položaji crpki pri crpljenju iz jame (služi pri odvodnji bilo koje vode iz jame i za bilo koji način zaštite građevne jame).



Slika 8.38 Mogući položaji crpki za crpljenje vode iz građevne jame

Kod viših razina podzemne vode u odnosu na dno građevne jame i kod većih dotoka, prikladnije je sniziti razinu podzemne vode izvan prostora građevne jame. Za to postoji niz mogućnosti koje će biti opisane u nastavku.

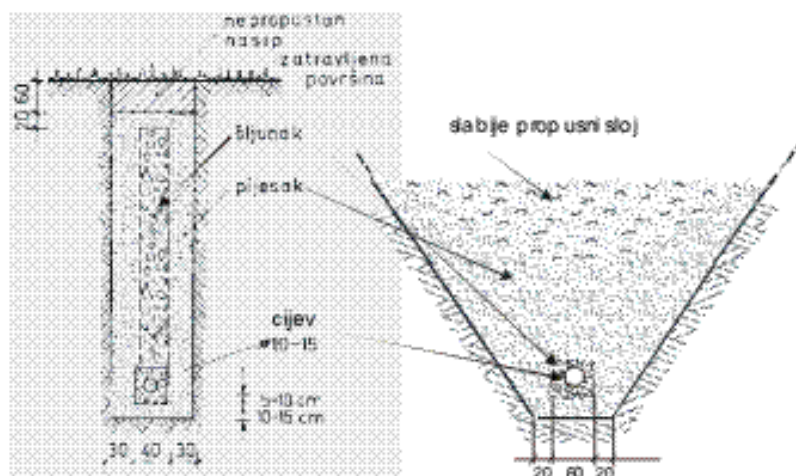
### 8.3.2.2 Vodoravne drenaže

Kada nije moguće zaštititi pokos od erozije uslijed procjeđivanja, a ima dovoljno prostora, drenaža se može izvoditi izvan prostora građevne jame. Položaj drenažnih rovova ovisi o hidrogeološkim prilikama na gradilištu. Vodoravne drenaže se izvode za manja sniženja razine podzemne vode koja se nalazi u sloju tla u kojem se nalazi i građevna jama tj. kada se drenira podzemna voda sa slobodnim vodnim licem.

U vodoravne drenaže spadaju OTVORENI DRENAŽNI KANALI, DRENAŽNI ROVOVI punjeni drenažnim materijalom sa i bez drenažne cijevi, PODZEMNE GALERIJE – ŠTOLNE, za odvodnju oko podzemnih građevina i VODORAVNE BUŠOTINE. Katkada se vodoravne bušotine, na većim dubinama, izvode zrakasto iz bunara (reni-bunari).

Drenažni rovovi za potrebe vodoravne drenaže, mogu biti dubine do 6 m, a najviše do 8 m (Maslov i sur., 1975.). Veće dubine rovova se ne preporučuju, a u praksi su obično manje od 6 m. Plići drenažni kanali mogu se izvoditi kao otvoreni. Iskopi za drenažne rovove se mogu izvoditi s pokosima, ako nisu previše duboki i ako ima dovoljno slobodnog prostora. Ako su većih dubina izvode se kao rovovi s podgradom.

Na slici 8.39 prikazani su poprečni presjeci dva drena ispunjena filtarskim materijalom s ugrađenom cijevi.



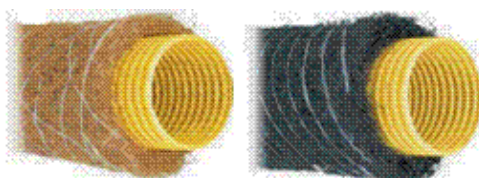
Slika 8.39 Poprečni presjeci drenažnih rovova

Pad dna otvorenih kanala mora biti takav da tekućica ne erodira kanal, ali i da u njemu ne ostavlja talog. Minimalni uzdužni pad preporuča se 0,3‰, rjeđe 0,2‰.

Otvoreni se kanali, ako je potrebno, mogu obložiti da bi se zaštitili od erozije. U tom je slučaju bolje izvoditi drenažne rovove. Drenažni rovovi mogu, ali i ne moraju, imati cijev za odvod vode. Kada se očekuju manji dotoci dovoljno je umjesto cijevi ugraditi jače propusni materijal, na primjer kamen šakavac.

Drenažni se rovovi izvode kao i svi ostali rovovi, uz sve potrebne mjere zaštite. Na dno rova polaže se propusna posteljica. Vrsta materijala, od kojeg će posteljica biti, ovisi o krupnoći tla u kojem se izvodi drenažni rov. Mora se poštivati filtarsko pravilo. Na posteljicu se polaže perforirana drenažna cijev.

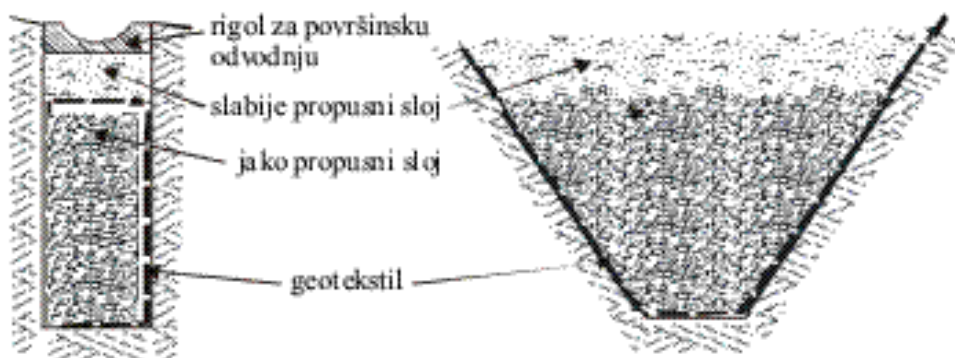
U drenaže se ugrađuju plastične, savitljive, perforirane cijevi, koje se danas proizvode i s već navučenim filtrom od geotekstila ili kokosovog runa. Na slici 8.40 prikazane su takve drenažne cijevi.



Slika 8.40 Korugirane drenažne cijevi, zaštićene runom od zamuljenja

Pojavom geotekstila, nema više potrebe ugrađivati pažljivo odabrane granulirane materijale prema filtarskom pravilu. Rovovi se mogu oblagati uz vanjski rub geotekstilom, a sredina puniti krupnim vodopropusnim materijalom. Na taj se način rovovi mogu izvoditi mnogo brže i ekonomičnije. Mogu se izvoditi sa i bez drenažne cijevi kao na slici 8.41.

Za drenažne je rovove bitno da u njim ne ulazi površinska, oborinska voda. U tu se svrhu vrhovi drenažnih rovova mogu zatvoriti glinenim čepom, a za hvatanje oborinske vode, u glineni čep se može ugraditi predgotovljeni betonski rigol. Drenove je potrebno voditi prema mjestu na kojem se voda može površinski odvesti u recipijent ili gdje će se skupljati i odvoditi crpljenjem.



Slika 8.41 Geotekstil umjesto filtarskog sloja kod vodoravnih drenaža (bez cijevi)

Kada se kopaju rovovi s pokosom preporučljivo je kosine izvoditi s nagibima koji ovise o vrsti materijala u kojem se rov izvodi. i o dubini rova. U tabeli 8.4 dane su preporuke za nagibe pokosa iskopa drenažnih rovova koji se izvode s pokosom bez podgrađivanja.

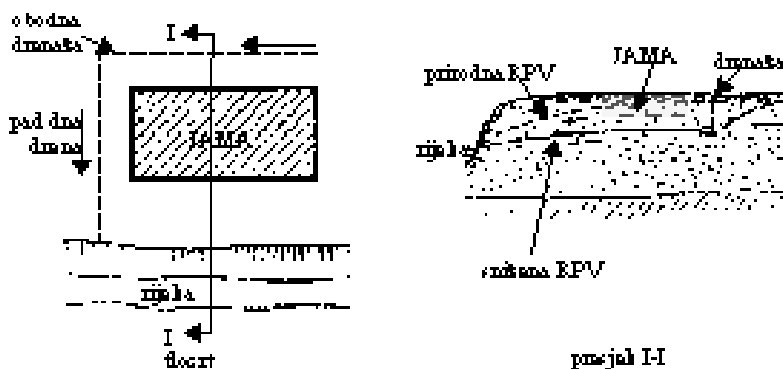
Tabela 8.4 Nagibi pokosa pri iskopu drenažnih rovova (Maslov i sur., 1975.)

Vrsta tla	Nagib kosine za dubinu rova u m		
	< 1,5	1,5 – 3,0	3,0 – 5,0
nasip	1:0,25	1:1	1:1,25
vlažni šljunci i pijesci ( $Sr < 1$ )	1:0,5	1:1	1:1
zaglinjeni pijesak	1:0,25	1:0,67	1:0,85
pjeskovita glina	uspravni iskop	1:0,5	1:0,75
glina	uspravni iskop	1:0,25	1:0,5
suhi les	uspravni iskop	1:0,5	1:0,5

Za dubine veće od 5,0 m potrebno je izvršiti analizu stabilnosti pokosa.

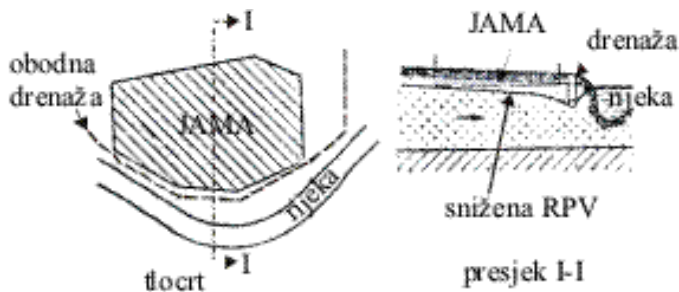
Na nekoliko slijedećih crteža prikazani su položaji vodoravnih drenažnih sustava za osigurane građevne jame od dotoka podzemne vode. Način osiguranja građevne jame od podzemne vode vodoravnim drenažama ovisi o odnosu građevine i smjeru dotoka podzemne vode kao i o odnosu visina dna jame i razine podzemne vode (Maslov i sur. , 1975).

Na slikama 8.42 i 8.43 prikazana je obrana gradilišta koje je smješteno uz vodotok. Ovisno o odnosu razina vode u vodotoku i podzemne vode, može se vodoravna drenaža smjestiti dvojako. Zaštita od zaobalne vode koristi se kada nema mogućnosti velikih oscilacija razine vode u vodotoku, a podzemna je voda visoko.



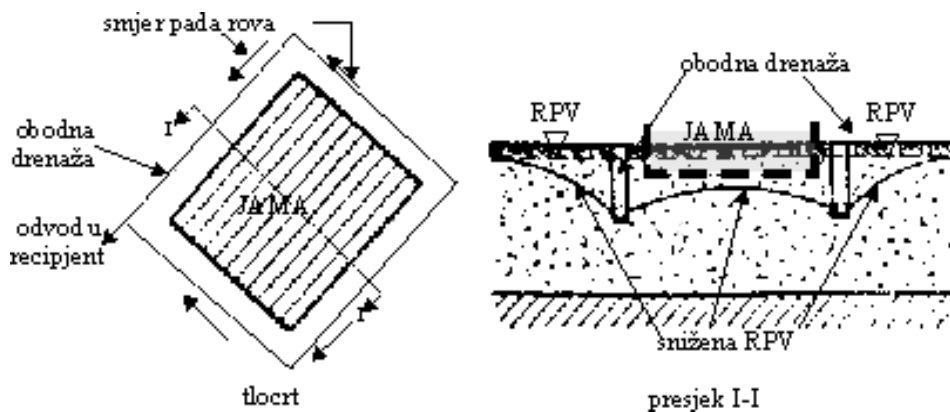
Slika 8.42 Zaštita građevne jame od zaobalne podzemne vode

Kod velikih kolebanja vode u rijeci i ustaljenog režima podzemne vode povoljnija je priobalna drenaža.

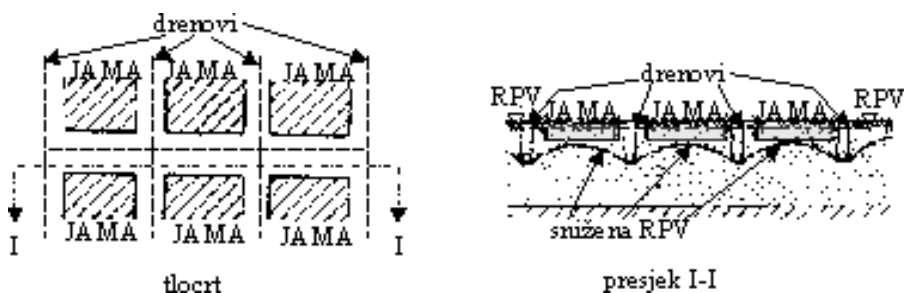


Slika 8.43 Zaštita građevne jame od priobalne podzemne vode

Za osiguranje građevnih jama u području visoke podzemne vode daleko od vodotoka prikladan je način osiguranje prikazan na slikama 8.44 i 8.45.



Slika 8.44 Prstenasta drenaža za građevne jame manjih površina



Slika 8.45 Sustavna drenaža za građevne jame velikih površina s mogućnošću rada u više odvojenih polja

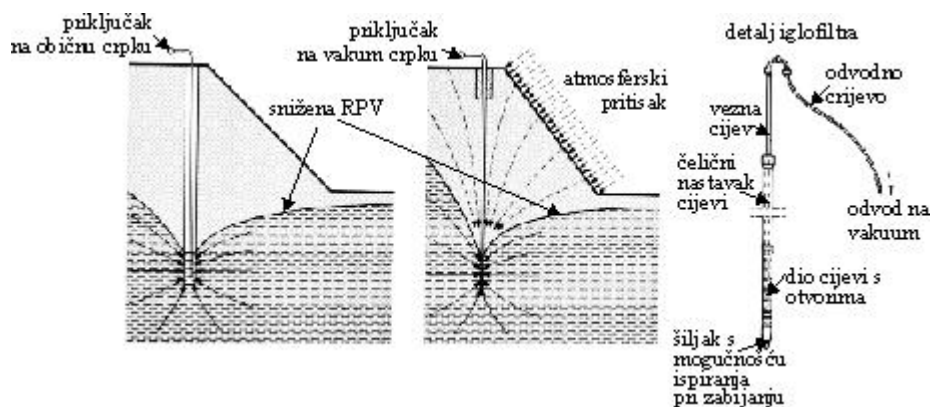
Za svaku od naznačenih mogućnosti dreniranja postoje u literaturi obrasci za proračun utjecaja drenova (Maslov i sur., 1975.). Da bi se mogli koristiti potrebno je izvršiti terenska i laboratorijska ispitivanja u svrhu određivanja koeficijenta propusnosti tla. Bez tog podatka proračuni nisu mogući..

### 8.3.2.3 Uspravne drenaže

Kada nije moguće dovoljno sniziti razinu podzemne vode drenažnim rovovima, mora se primijeniti odvodnja pomoću bunara. Njihovim pravilnim razmještajem i neprekidnim crpljenjem vode, mogu se postići zadovoljavajuća sniženja podzemne vode. Postoje dvije različite vrste uspravnih drenaža.

Jedna je snižavanje razine podzemne vode moguće je pomoću klasičnih bunara većeg promjera. Njih se može izvoditi u nizu, pravilnim i/ili nepravilnim razmacima, ovisno o potrebni sniženja razine podzemne vode i o obliku prostora koji treba zaštititi. Drugi način snižavanja razine podzemne vode je pomoću cijevnih bunara. Vakuum u sustavu cijevnih bunara pojačava učinak dreniranja. Pomoću njih se razina podzemne vode može sniziti za 4-5m.

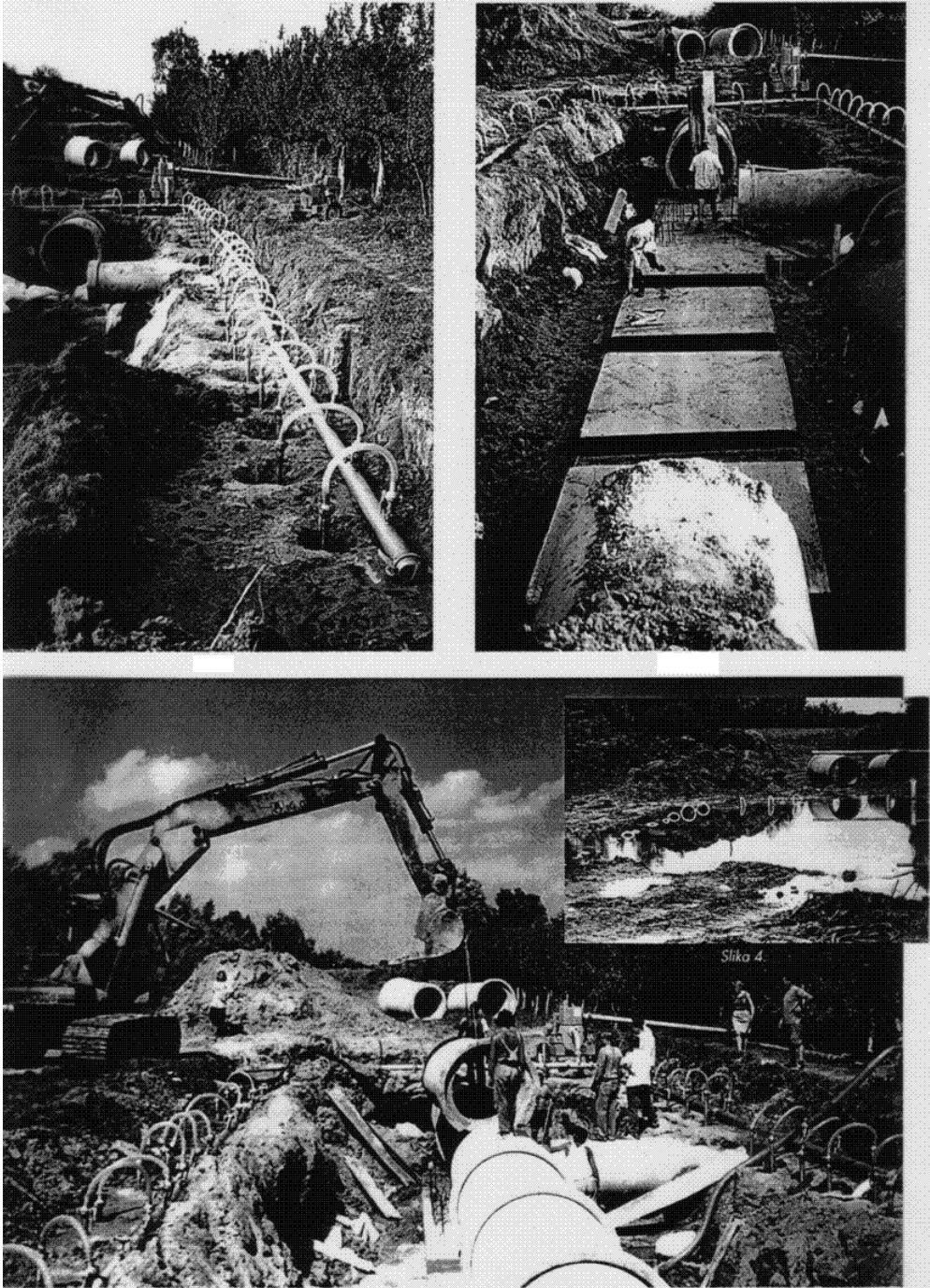
Na slici 8.46 prikazan je način djelovanja bunara i cijevnih bunara kao i detalj jedne cijevi s opremom za cijevni bunar.



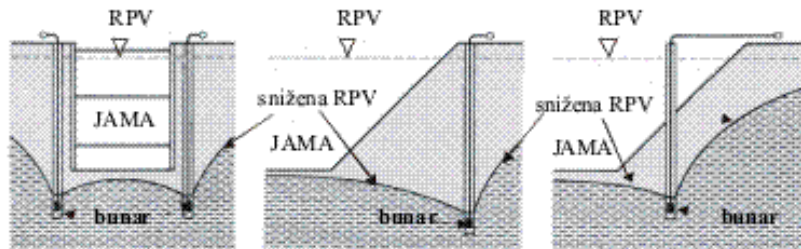
Slika 8.46 Način odvodnje pomoću bunara i pomoću sustava cijevnih bunara s detaljem jednog cijevnog bunara

Bunari i cijevni bunari mogu biti smješteni različito u odnosu na građevnu jamu. Koriste se kod izvođenja građevnih jama s kosinama kao i kod građevnih jama s podgradom. Na slici 8.47 prikazani su poprečni presjeci kroz građevne jame s mogućim položajem bunara.



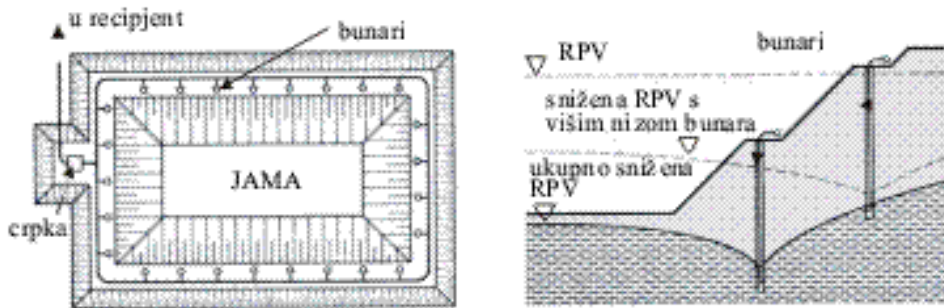


Slika 8.46a Zaštita građevne jame cijevnim bunarima



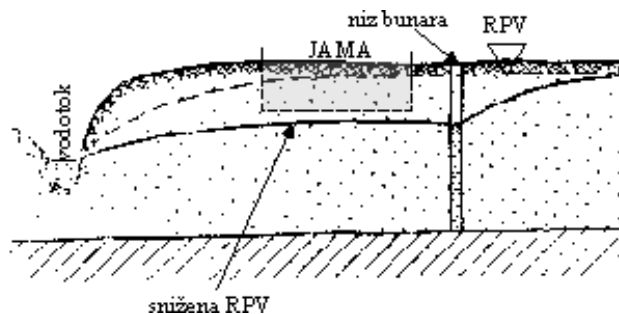
Slika 8.47 Položaj bunara u odnosu na građevnu jamu u poprečnom presjeku

Ponekad nije moguće dovoljno sniziti razinu podzemne vode s jednim nizom bunara. Tada se bunari mogu izvoditi u dvije visine kao na slici 8.48



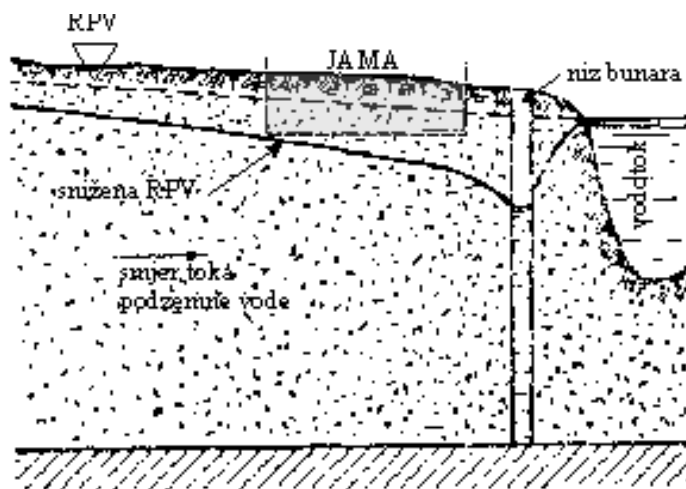
Slika 8.48 Sustav bunara u dvije visine

Na slikama koje slijede prikazane su mogućnosti rasporeda bunara u odnosu na građevnu jamu u tlocrtu i poprečnom presjeku za uspravnu odvodnju (Maslov i sur., 1975.). Za svaki od ovih načina odvodnje potrebno je izvršiti proračun razmaka bunara i njihov polumjer utjecaja, kako bi se osiguralo stalno sniženje razine podzemne vode u području građevne jame na način da ona uvijek bude suha. To ne isključuje osiguranje jame od zaobalnih površinskih dotoka i odvodnju kiše iz same jame.



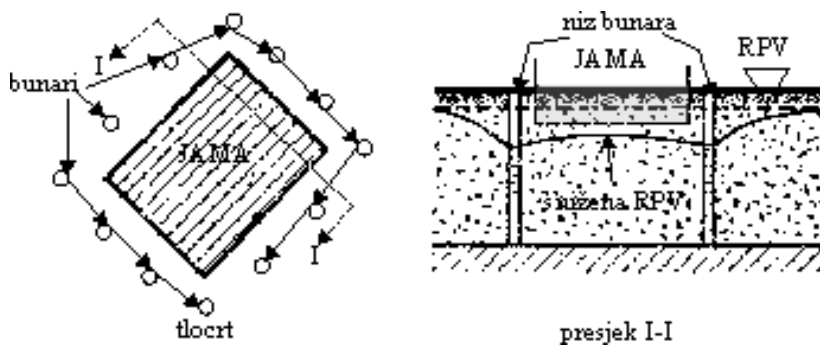
Slika 8.49 Odvodnja zaobalnih voda bunarima

Na slici 8.50 prikazan je način zaštite građevne jame od vode iz vodotoka. Kod vodotoka koji naglo i značajno mijenjaju protok, a time i razinu vodnog lica, potrebno je prethodno izraditi hidrološku studiju vodotoka i odrediti povratno razdoblje na koje će se dimenzionirati odvodnja građevne jame. Sto postotna sigurnost nije uvijek optimalna.



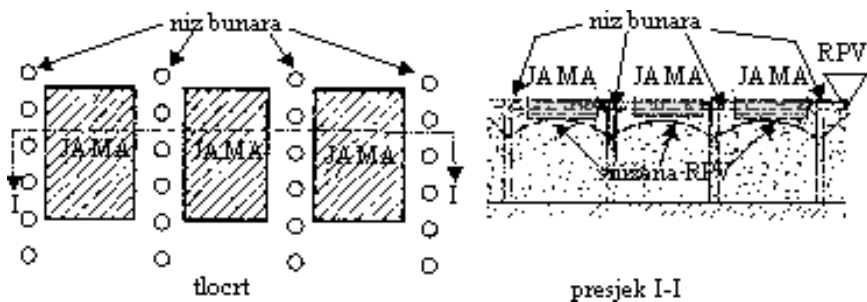
Slika 8.50 Odvodnja priobalnih voda bunarima

Na slici 8.51 prikazana je odvodnja prstenastim sustavom bunara izvan granica građevne jame.



Slika 8.51 Prstenasta uspravna drenaža nizom bunara

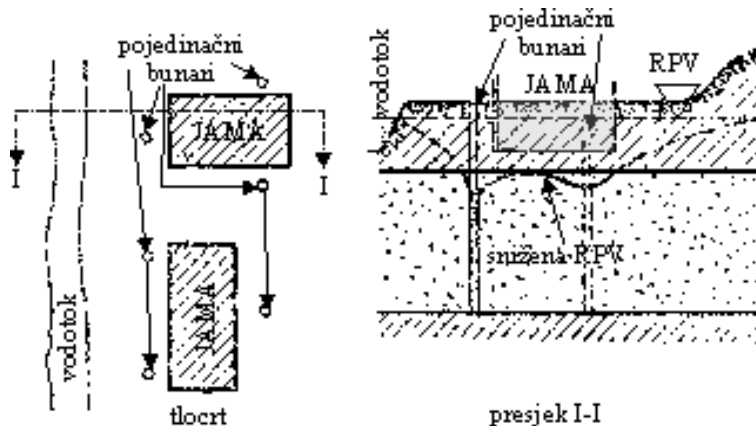
Za veće tlocrtne površine nije moguće upotrijebiti samo prsten izvan građevne jame, već je potrebno sustav bunara ugraditi unutar građevne jame. Ovakav je način odvodnje prikazan na slici 8.52.



Slika 8.52 Sustavna uspravna drenaža s nizom bunara između branjenih jama

Slično nizu bunara moguća je odvodnja pomoću cijevnih bunara, sustava iglofiltera. Oni rade na principu vakuuma. To je sustav međusobno povezanih, djelomično perforiranih cijevi zabijenih u tlo. Ugrađuje se oko građevne jame. Za veće sniženje razine podzemne vode mogu se i oni ugraditi na dvije različite visine i tako postići potrebno sniženje razine podzemne vode. Cijevi cijevnih bunara su uvijek smještene na međusobno pravilnim, proračunom dokazanim udaljenostima. Sustavi cijevnih bunara se nakon korištenja vade i ponovo koriste na drugom mjestu što kod pravih bunara nije moguće.

Osim u pravilnom rasporedu, bunari mogu biti smješteni i nepravilno kada to zahtijevaju hidrogeološki uvjeti na terenu, kao na slici 8.53.

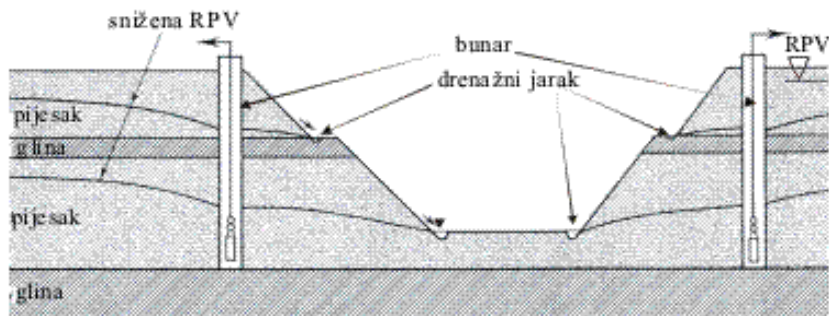


Slika 8.53 Uspravna drenaža s nepravilno raspoređenim bunarima

Ima razina podzemne vode koje nije moguće sniziti samo uspravnom drenažom. Tada se koriste kombinacije prethodnih.

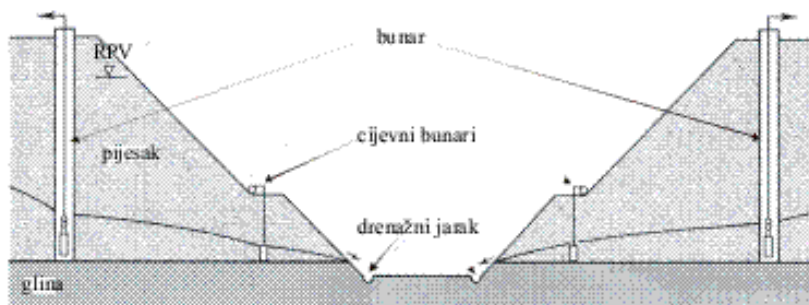
### 8.3.2.4 Kombinirane drenaže

Ove se drenaže koriste kada je potrebno zahvatiti površinski i duboki vodonosni sloj. Mogu se kombinirati drenažni kanali i bunari, drenažni rovovi i bunari, bunari i cijevni bunari, kao i sve tri grupe zajedno. Na slici 8.54 prikazan je poprečni presjek kroz sustav bunara i odvodnih jaraka.



Slika 8.54 Kombinacija bunara i otvorenih drenažnih jaraka

Kod značajnih sniženja razine podzemne vode i značajnih dotoka zbog veće propusnosti tla, nije moguće odvodnju riješiti jednim nizom bunara. Često se tada u upotrebi javlja kombinacija s cijevnim bunarima slično kao što je to prikazano na slici 8.55. Ovi sustavi ovisni su o stabilnom napajanju energijom, te je stoga gradilištu potrebno osigurati ili priključak na lokalnu električnu mrežu ili napajanje osigurati sustavom agregata. Na gradilištu je potrebno osigurati dovoljan broj rezervnih crpki i pojedinačnih cijevnih bunara, da bi se moglo pravovremeno izvršiti potrebne zamjene, popravke i/ili nadopune sustava za crpljenje. O njihovoj učinkovitosti često zavisi djelotvornost i uspješnost svih radova koji su ovisni o sniženjima razine podzemne vode i održavanju građevne jame suhom.

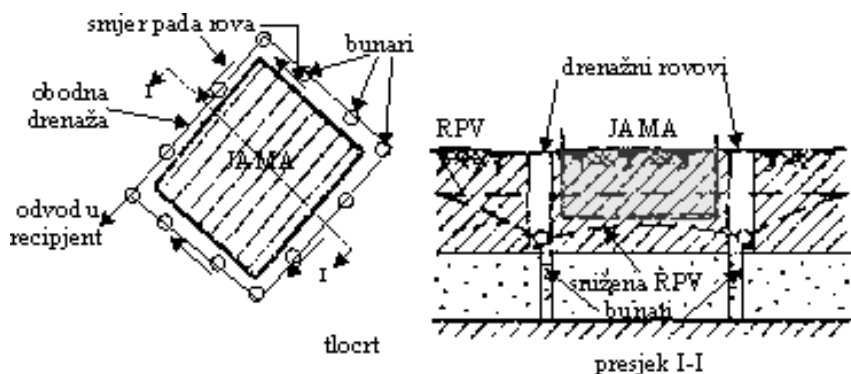


Slika 8.55 Kombinacija bunara, cijevnih bunara i otvorenih drenažnih jaraka

Na slijedećim crtežima prikazane su kombinacije drenažnih rovova i sustava bunara za nekoliko slučajeva kombinirane odvodnje. Ovi sustavi prihvatljivi su kada se vodonosni sloj nalazi ispod relativno slabo propusnog sloja, koji je moguće

odvodniti drenažnim rovovima, dok se vodonosni sloj, koji može imati i subarteški ili čak arteški pritisak, odvodni pomoću bunara. Složenost sustava ovisi o složenosti i veličini tlocrta gradilišta.

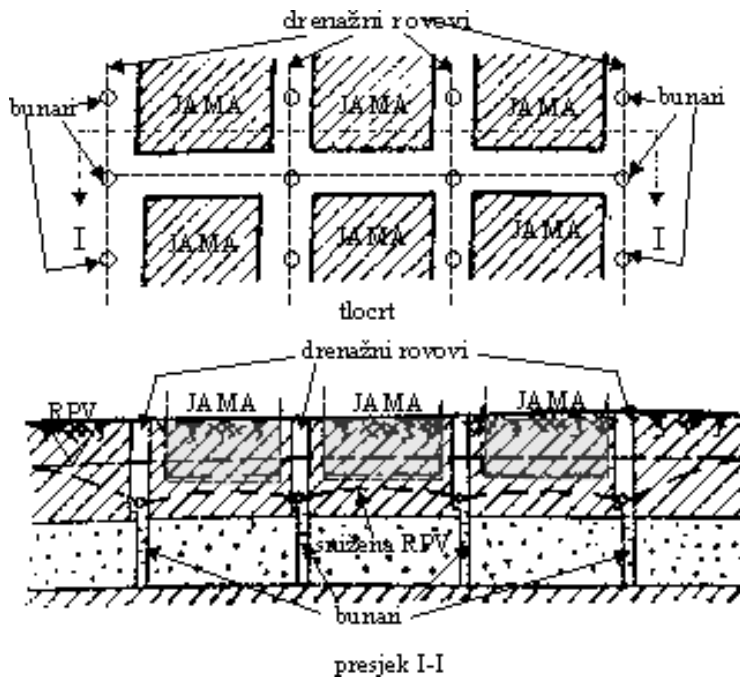
Na slici 8.56 prikazana je kombinirana odvodnja pravilnog tlocrta gradilišta manje površine, koju svojim radijusom utjecaja mogu obuhvatiti bunari po obodu tlocrta.



Slika 8.56 Složena drenaža jednostavnog tlocrta

Na slici 8.57 prikazana je odvodnja kombiniranom drenažom složenog, površinski široko rasprostranjenog tlocrta, unutar kojeg je potrebno održavati razinu podzemne vode dugotrajno ispod dna građevne jame. Na crtežima 8.56 i 8.57 prikazana je samo položajna i visinska raspodjela bunara i rovova dok način crpljenja nije određen. Crteži su preuzeti iz Maslova i sur. (1975.).

Kada je građevna jama vrlo slabo propusna, može se odvodnja izvesti pomoću drenažnog tepiha. Dno iskopa potrebno je izvesti u padu prema odvodnim jarcima (kao na slici 8.35). Na temeljno tlo je potrebno položiti geotekstil da ne dođe do miješanja čestica temeljnog tla drenažnog zasipa. Geotekstil je nadomjestak za obrnuti filter koji se mora izvoditi ako nema geotekstila, da ne dođe do miješanja čestice i stavljanja drenažnog sloja van funkcije. Voda se prikuplja u jarcima sa ili bez cijevi i odvodi na sabirna mjesta – bunare, iz kojih se crpi. Ovakva se drenaža može koristiti kod malih dotoka.

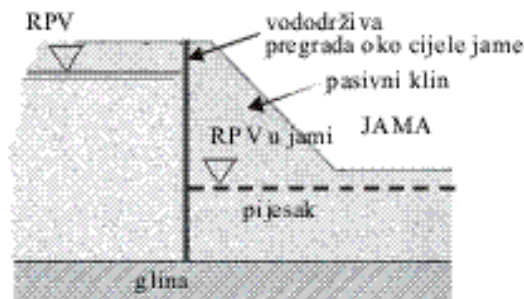


Slika 8.57 Složena kombinirana drenaža velike površine

### 8.3.2.5 Vodonepropusne građevine

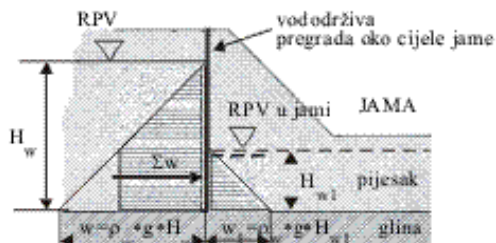
Za vodonepropusne građevine mogu se koristiti različite vrste zagatnih stijenki. Ova vrsta zaštite građevnih jama od dotoka podzemne vode koristi se kada postoji slobodan prostor i nepropusna podloga na građevinski dohvatljivoj dubini. Tada se u zaleđu iskopa može izvesti vodonepropusna zavjesa od čeličnih platica, glinobetska kontinuirana dijafragma ili sličan zahvat. Bitno je da u jamu voda ili gotovo ne dolazi iz podzemlja ili dolazi u vrlo malim količinama, koje se mogu jednostavno iscrpiti.

Takva zagatna stijenka ima isključivo vodonepropusnu zadaću i nije nosiva. Iz tih se razloga može izvoditi od čeličnih platica male krutosti ili od glinobetona. Nosivi dio ovih vododrživih zagatnih stijenki je tlo između njih i kosine iskopa. Na slici 8.58 prikazan je položaj jedne vodonepropusne zavjese u odnosu na građevnu jamu s kosinama.



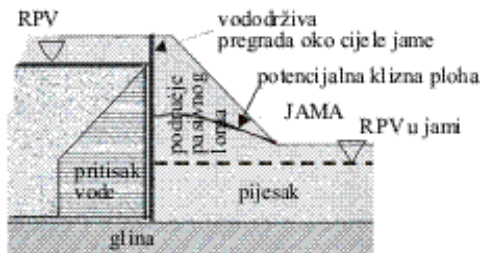
Slika 8.58 Vododrživa zavjesa u zaleđu građevne jame

Tijekom iskopa crpi se zarobljena voda u građevnoj jami. Ispod odabrane kote u jami ostaje dio vode, koji ima pozitivan učinak na veličinu hidrostatičkog tlaka s vanjske strane. Na slici 8.58 prikazan je učinak pritiska vode na vododrživnu zavjesu. Sličan je učinak vode na nepropusnu jezgru nasute brane.



Slika 8.59 Hidrostatički pritisci na vododrživu zavjesu

Uslijed razlike visina vode javlja se pritisak na vododrživu zavjesu, koja se naslanja na preostali klin tla između zavjese i jame. Na slici 8.60 prikazana je moguća ploha sloma u pasivnom području koja se javlja slično kao kod nasutih brana s glinenom jezgrom.



Slika 8.60 Područje moguće pojave kritične klizne plohe

Kako se vododrživa zavjesa oslanja na tlo i zbija ga, tako se u tlu između zavjese i jame javlja područje pasivnog otpora. Unutar tog područja potrebno je naći kritičnu kliznu plohu, koja mora imati zadovoljavajuću sigurnost od pasivnog loma. Na taj se način dimenzionira udaljenost vododržive zavjese od ruba dna građevne jame. Položaj i oblik ovakvih kliznih ploha izučavao je Nonveiller (1957.). Rezultati njegovih istraživanja prikazani su u poglavlju 2.3.1.1.

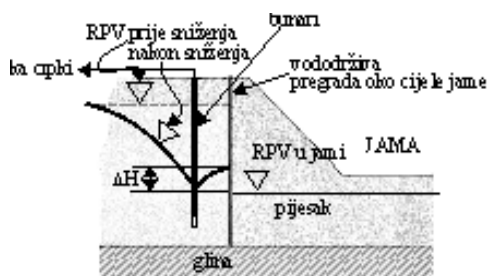
Oborinska se voda prikuplja i crpi kako je to prikazano u poglavlju 8.3.1.2.

### 8.3.2.6 Vodonepropusne građevine i crpljenje iz bunara

Kada sustav iz prethodnog poglavlja ne zadovoljava potrebe i mogućnosti sniženja razine podzemne vode u građevnoj jami, moguće ga je kombinirati s crpljenjem vode sustavom bunara s vanjske strane vododržive zavjese. Na taj se način smanjuje razlika visina vodnog stupca koji vrši hidrostatički pritisak na



zavjesu. Zavjesa se tada može izvesti bliže rubu jame. Na taj se način smanjuje potreban gradilišni prostor.

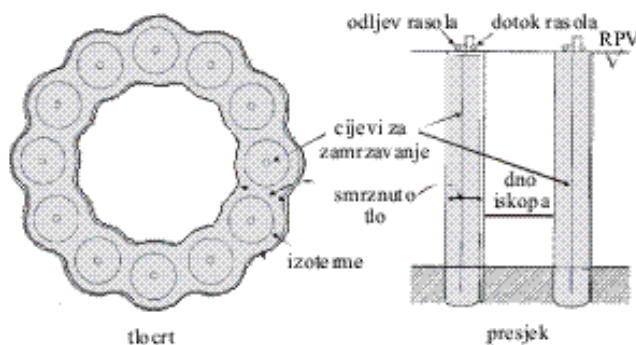


Slika 8.61 Smanjenje hidrostatičkog pritiska na vododrživu zavjesu pomoću bunara

Na ovaj način je znatno smanjen dotok u građevnu jamu u kojoj je nekim od načina odvodnje moguće sniziti razinu zarobljene vode. Ujedno je bitno smanjen i hidrostatski pritisak na vododrživu zavjesu koja može biti znatno bliže rubu građevne jame. Razina vanjske vode može se regulirati sustavnom bunara tako da se postigne ona razlika hidrostatskih pritisaka koje pasivni klin svojom veličinom može preuzeti s dovoljnom sigurnošću.

### 8.3.2.7 Zamrzavanje tla

Ova je metoda vrlo razvijena u zemljama koje obiluju pješčanim tlima, gdje se pokazala vrlo učinkovita. Zamrzavanje se vrši oko građevne jame ili samo s jedne njene strane kao bi se dobila vodonepropusna pregrada. Postoji više tehnologija zamrzavanja tla. Jedno je pomoću slane otopine (rasola) koji se hladi i utiskuje u tlo dok se ne dobije dovoljno debeli zamrznuti sloj tla. Na slici 8.62 prikazan je jedan takav primjer osiguranje građevne jame od utjecaja podzemne vode. U ovom slučaju zaleđeno tlo osim što je vododrživo mora biti i nosivo.



Slika 8.62 Osiguranje građevne jame zamrzavanjem tla (Patric Powers, 1991.)

Osim pomoću slane otopine zamrzavanje se može postići pomoću tekućeg dušika. Ovaj je postupak skuplji, ali se koristi za kratkotrajne manje radove kada se proizvođač tekućeg dušika nalazi u blizini.

Ledena pregrada može se izvoditi kao i druge vododržive zavjese, tj. tako da služi samo za obranu od vode dok pritiske na nju preuzima pasivni klin tla kao kod zavjesa iz poglavlja 8.3.2.6.

### 8.3.3 Zaštita iskopa u ograničenom prostoru pri visokoj podzemnoj vodi

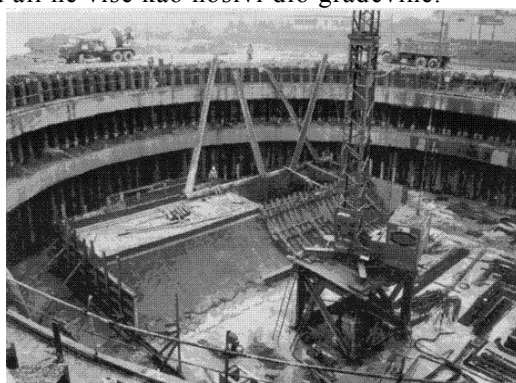
#### 8.3.3.1 Tipovi zaštita

Za duboke iskope u ograničenom prostoru, pri visokoj podzemnoj vodi koriste se razne vrste ZAGATNIH STIJENKI. One su opisane u poglavlju 5.

Za *privremene građevine* koristi se čelično žmurje. Njegova je upotreba naročito rasprostranjena u zemljama s razvijenom industrijom čelika ali i u zemljama koje imaju pogodno tlo za zabijanje čeličnog žmurja. Za takve je građevine pogodno pjeskovito i glinovito–pjeskovito tlo. Čelično žmurje može se upotrijebiti višekratno ako se nakon izvedbe građevine unutar građevne jame koju je štutilo, izvadi. Ono se može vaditi i samo djelomično kada je potrebno da građevina unutar građevne jame nakon dovršetka dođe u dodir sa svojim okolišem, na primjer vodom. Ovo nije rijedak slučaj u izvedbi raznih crpnih stanica, brodskih prevodnica i slično.

Tlo u kojem se mogu očekivati samci i veći komadi kamena nije pogodno za upotrebu čeličnih platica. Za takva tla pogodnije je koristiti neku drugu tehnologiju kao što je *armirano betonska dijafragma*, *nizovi zasječenih bušenih pilota* ili *mlazno injektiranje*. Kada se u tlu ne očekuju veći komadi kamena ali je ono pokriveno nekontroliranim nasipom, može se po trasi zagatne stijenke izvršiti zamjena materijala ako nasip nije znatne debljine. Ovo je ponekad korisno učiniti i kada se radi o dijafragmi, da bi se olakšao iskop u površinskom dijelu tla.

Na slici 8.63 prikazana je zaštita građevne jame čeličnim žmurjem. Građevna jama služila je za izvedbu brodske prevodnice uz branu Port-Mort kod la Garenne u Francuskoj. Čelično žmurje je privremena građevina unutar koje će se izvesti zidovi prevodnice. Dio žmurja će se odstraniti nakon što zidovi budu gotovi a dio će trajno ostati u tlu ali ne više kao nosivi dio građevine.



Slika 8.63 Zaštita građevne jame brodske prevodnice uz branu Port-Mort (Peyronnet, 1979.)

Za *trajne građevine*, koje postaju sastavni dijelovi budućih zgrada koriste se razne vrste neprekinutih armiranobetonskih zagatnih stijenki.

Najčešće su to armiranobetonske *dijafragme*. Na slici 8.64 prikazana je armiranobetonska dijafragma sa sidrima. Vidi se vlaženje i blago procjeđivanje vode kroz spojeve dijelova dijafragme.

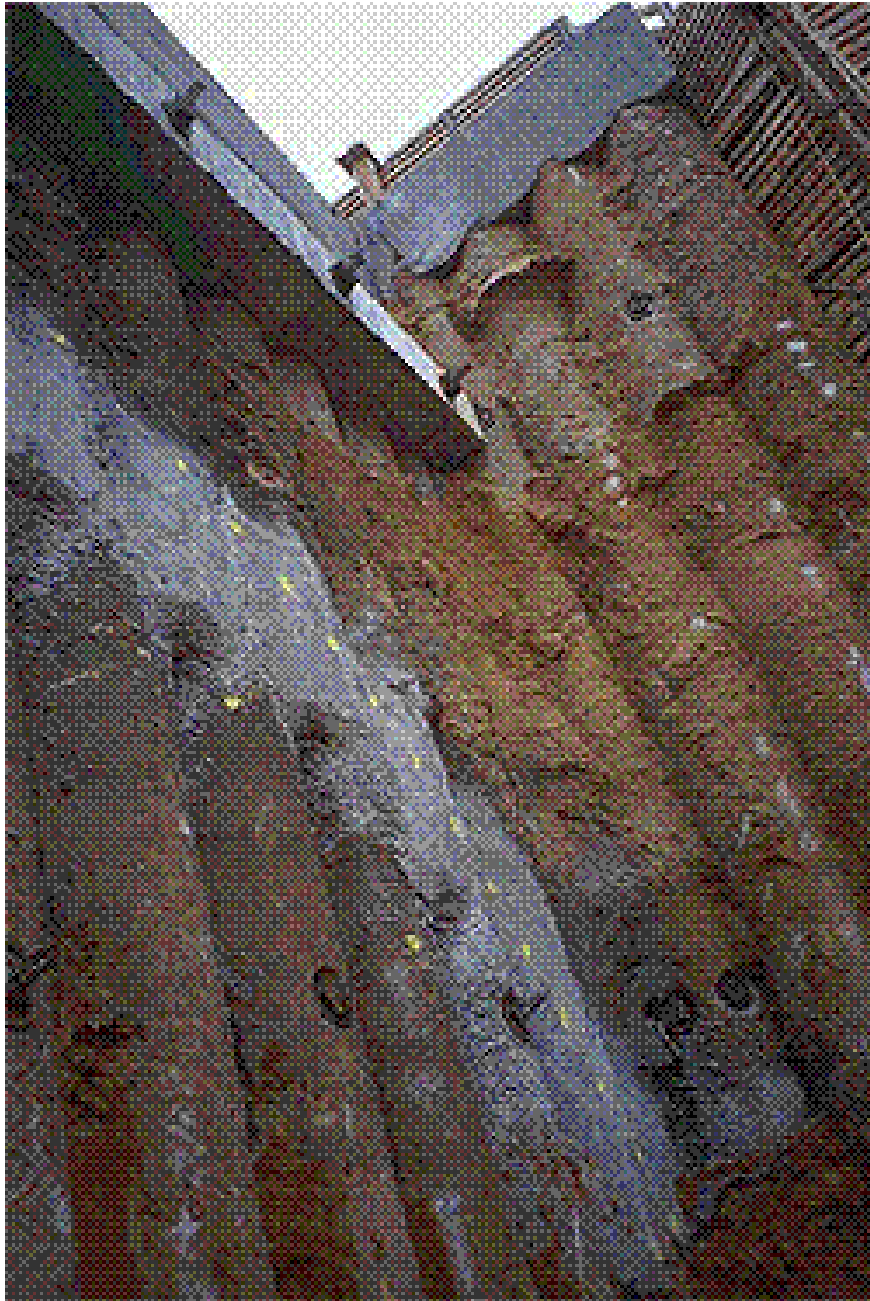
*Piloti velikog promjera* također se koriste za zaštitu građevne jame i ujedno kao buduća gotova građevina. Oni su najčešće u upotrebi za osiguranje i izvedbu zasjeka i usjeka, ali i za osiguranje dubokih građevnih jama. Koriste se tamo gdje se očekuje pojava takvog tla u koje nije moguće zabiti žmurje, a i izvedba kontinuirane dijafragme je upitna (slika 8.65).

Za zaštitu građevnih jama i prihvaćanje temelja susjednih zgrada, uz koje se izvode duboki iskopi, koriste se zavjese izvedene pomoću *mlaznog injektiranja* (slika 8.66, 8.67) i drugih trenutno raspoloživih tehnologija. Velika većina ovih zagatnih stijenki se sidri kao na slici 5.31.



Slika 8.64 Građevna jama zaštićena usidrenom dijafragmom (Zakladany staveb, 1998.)

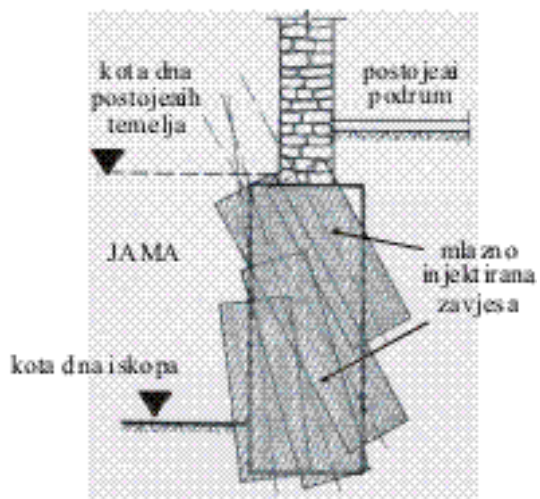
Na slici 8.64 vide se ugrađena sidra. Očito da je unutar tijela dijafragme skrivena greda za vodoravno povezivanje sidara.



Slika 8.65 Pogled iz građevne jame na zavjesu od pilota velikog promjera

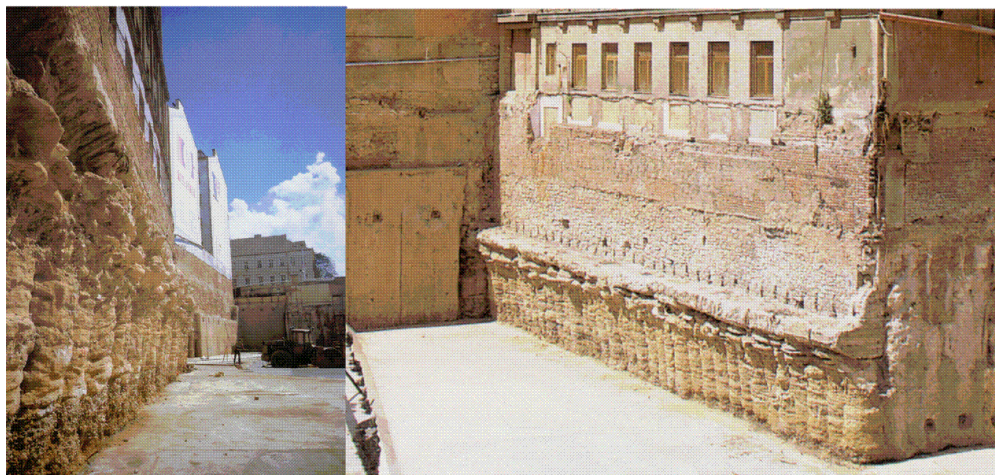
Na slici 8.65 vidi se vezna greda na vrhu stijenke od pilota velikog promjera i vodoravna greda za povezivanje sidara.

Na slici 8.66 je shematski prikazana zaštita građevne jame i prihvaćanje temelja postojeće zgrade mlaznim injektiranjem. Gustoćom bušotina u više redova postiže se vodonepropusnost.



Slika 8.66 Shematski prikaz izvedbe mlazno injektirane zavjese ispod temelja i ujedno kao zaštite građevne jame (Čorko i sur., 1997.)

Na slici 8.67 prikazane su dvije otkopane građevne jame zaštićene zavjesom od mlazno injektiranih stupnjaka.



Slika 8.67 Dva primjera zaštite građevne jame uz postojeće građevine mlaznim injektiranjem (Zakladany staveb, 1998.)

### 8.3.3.2 Savladavanje velikih hidrostatičkih pritisaka

Zagatne stijenke moraju podnijeti pritisak tla ali i štititi građevnu jamu od dotoka podzemne vode. Iz toga se daje zaključiti da spojevi dijelova od kojih su izvedene moraju biti vododrživi.

Kod čeličnih platica, vododrživost je osigurana precizno izrađenim ključevima i bravama pomoću kojih se one spajaju prilikom zabijanja.

Kod armiranobetonskih zagatnih stijenki to se postiže umetanjem cijevi pri iskopu tako da su spojevi polukružnog oblika i trebali bi osigurati vodonepropusnost. Kod ugradnje gotovih panela u iskop za armirano – betonsku dijafragmu (slika 5.29), ostavljaju se polukružna udubljenja na uspravnim rubovima panela. Nakon njihove ugradnje spojevi se brtve ugradnjom posebnih smjesa u ove otvore. Postoje i različiti tipovi brtvi koje se mogu ugraditi između pojedinih dijelova armiranobetonske dijafragme za bolje brtvljenje. Uvijek međutim ostaje upitna precizna ugradnja ovih brtvi.

Zagatne stijenke od pilota vododrživost ostvaruju preklapanjem odnosno zasijecanjem pilota ili izvedbom pilota u dva reda s pomakom za pola promjera (slika 8.65 vidi se zasijecanje pilota u pilot.).

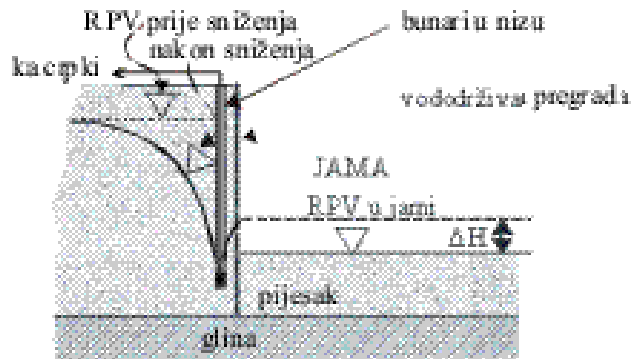
Mlazno injektirane zagatne stijenke i stijenke izvedene miješanjem na licu mjesta (mixed in place) samom tehnologijom ubacivanja cementne injekcijske smjese u masu tla izazivaju povećanu gustoću smjese i povećavaju vodonepropusnost na mjestu zavjese. Kod ovih tehnologija, glede vododrživosti, potrebno je ispravno projektirati razmake između mjesta ugradnje injekcijske smjese (bušotina ili položaja svrdala) tako da nastane dobar preklop.

Kod građevnih jama štićenih zagatnim stijenama bilo koje vrste, voda se crpi iz jame. Na taj se način odvodi procjedna voda i oborinska voda.

Usljed crpljenja vode iz jame, nastaje razlika hidrostatičkog pritiska između razine vode u jami i razine podzemne vode iza zagatne stijenske, u tlu. Ovu razliku pritisaka mora preuzeti zagatna stijenska. Taj pritisak može biti znatan. Time se povećavaju zahtjevi na debljinu, krutost i druga statička svojstva zagatnih stijenki. Kod velikih razlika razina vode u tlu i građevnoj jami postoji više mogućnosti savladavanja pritisaka koji pri tom nastaju.

Jedan od njih je korištenje bunara za snižavanje razine podzemne vode sa strane tla tako da razlika hidrostatičkih pritisaka bude što manja. Na slici 8.68 prikazana je takva mogućnost.

To može biti niz pravilno ili nepravilno raspoređenih bunara kao i kod građevnih jama s pokosom (slike 8.51-8.53), a mogu biti i sustavi iglofiltera. Moguće je izvoditi sustave bunara ili iglofiltera kao i kod jama s kosinom, u dva reda, tako da jedan red bude s vanjske strane žmurja, a drugi s unutarnje strane u dnu jame. Ovaj se način primjenjuje kada se želi osigurati dno jame dodatno od hidrauličkog sloma tla ili djelovanja uzgona do časa dok građevina dovoljno ne oteža da može vlastitom težinom savladati uzgon.



Slika 8.68 Sniženje razine podzemne vode iza zagatne stijenke u svrhu smanjenja hidrostatičkog pritiska

Smanjena razlika pritisaka uglavnom se može postići samo kod privremenih radova. Ako zagatna stijenka kasnije služi kao dio građevine, za trajno se stanje mora dimenzionirati na puni hidrostatički pritisak.

### 8.3.3.3 Metode iskopa

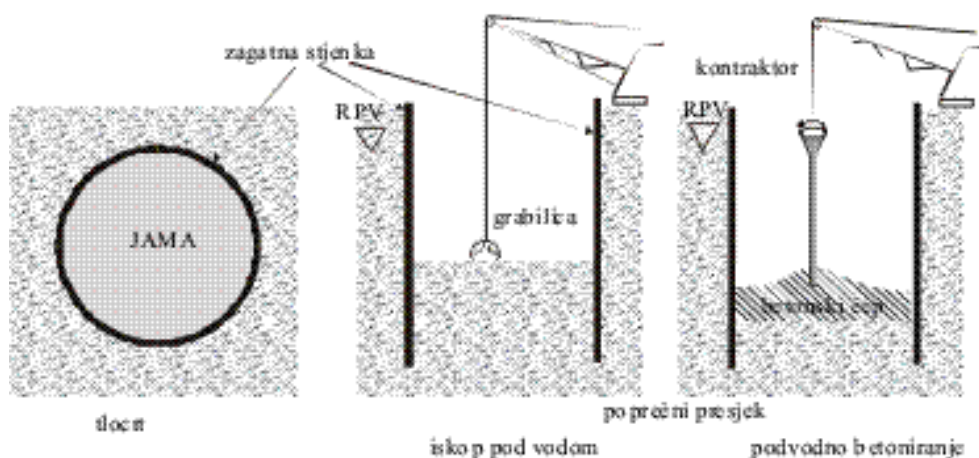
Građevne jame zaštićene zagatnom stijenkom mogu se glede iskopa izvoditi na različite načine. Kada nisu slobodno stojeće, a to je uvijek slučaj kod dubljih iskopa, iskop se vrši u etažama prema potrebama pridržajnih mjesta, najčešće sidara, uz crpljenje vode iz jame.



Slika 8.69 Široki iskop u građevnoj jami

Ako postoji bojazan od hidrauličkog sloma dna građevne jame, iskop se može vršiti pod vodom, bez crpljenja. Tada nema razlike hidrostatičkih pritisaka ili je ona vrlo mala, ali ostaje problem ugradnje razupora ili sidara. Razupore i/ili sidra mogu se ugrađivati postepeno usporedno s crpljenjem vode iz jame odnosno s povećanjem hidrostatičkog pritiska. Najjednostavnije je na vrhu zagatne stijenke izvesti veznu gredu koja povezuje njene dijelove, a samo veznu gredu razupirati ili ako je moguće pričvrstiti zategama u tlo. Moguća je i izvedba geotehničkih sidara iz jame, ako ima dovoljno prostora.

Tehnologija iskopa bez crpljenja može se koristiti kod građevnih jama koje se štite zagatnom stijenkom kružnog tlocrta, koja preuzima pritisak svojim tlačnim prstenom te nema potrebe za razupiranjem. Tada se dno zaštiti podvodno izvedenim slojem betona potrebne debljine da se savlada uzgon, iscrpi se voda i izvede građevina unutar osiguranog prostora u suhom.



Slika 8.70 Iskop pod vodom

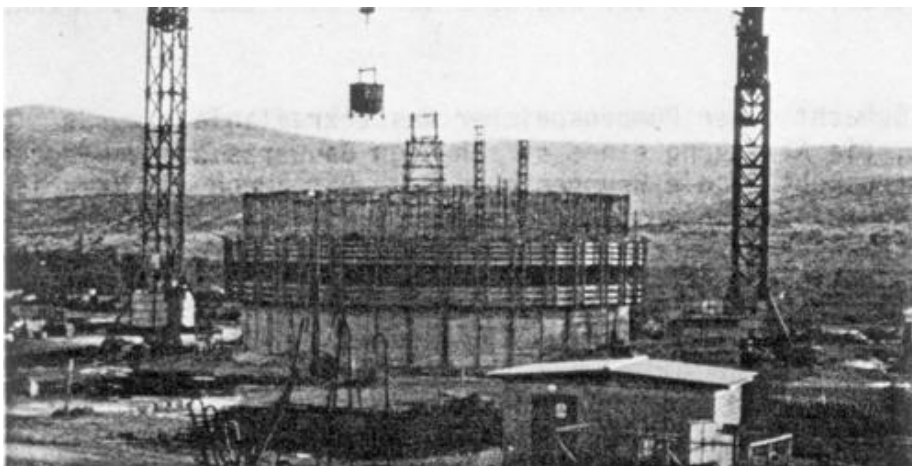
Sličnim sustavom mogu se izvoditi BUNARI – vrsta dubokih temelja koji se spuštaju u tlo potkapanjem nožice.

Bunari inače spadaju u skupinu dubokih masivnih temelja i koriste se, kao i piloti, za temeljenje u većim dubinama kada pliće nema nosivih slojeva.

Građevna se jama štiti betonskom građevinom koja se postepeno nadograđuje na površini i spušta u dubinu. Bunar je dio građevine i ujedno zaštita građevne jame. Iskop se može vršiti u suhom, ali i podvodno kako je to prethodno opisano. Na slici 8.71 prikazan je nadzemni dio bunara u Obrovcu. Vidi se da je na njemu klizna oplata pomoću koje se bunar nadograđuje

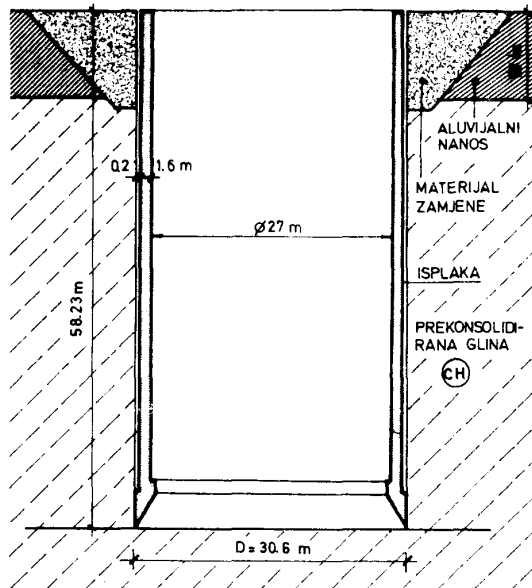
Na slici 8.72 prikazan je shematski poprečni presjek bunara za strojarnicu reverzibilne HE «Obrovac» uzvodno od Obrovca, uz rijeku Zrmanju. Bunar je izveden u nepropusnim prekonsolidiranim glinama, bez pojave vode.





Slika 8.71 Pogled na nadzemni dio bunara u Obrovcu (Vrkljan i sur., 1983.)

Spuštanje bunara zahtjeva vrlo pažljiv rad. Trenje, koje se javlja po plaštu mora se savladati težinom bunara, ali tako da bunar potone u svakom koraku upravo za odabranu veličinu. Trenje se može smanjiti ugradnjom bentonitne isplake između plašta bunara i tla, kako je to prikazano na slici 8.72.



Slika 8.72 Poprečni presjek bunara u Obrovcu (Lisac i sur., 1980.)

Poteškoće nastaju kada se bunar počne naginjati. Iz tog razloga ovaj način izvedbe građevne jame koristi se samo u homogenom tlu. Posebna pažnja treba biti posvećena temeljnoj ploči. Ona mora izdržati pritisak tla od proloma dna.

Ako postoji mogućnost pojave uzgona kojeg tlo unutar građevne jame nakon crpljenja vode iz bunara ne bi moglo izdržati, potrebno je na dno ugraditi temeljnu ploču – čep, koji će svojom težinom preuzeti uzgon. Ova se ploča – čep posebno dimenzionira. Može se kombinirati s djelomičnim crpljenjem vode bunarima iz tla ispod dna građevne jame do određene mjere da čep ne bude prevelik. Zadovoljavajući se kontra teret postiže izgradnjom dijela građevine, koji tada svojom težinom zajedno s pločom – čepom savladava uzgon. Kada je ukupno opterećenje dovoljno obustavlja se crpljenje unutar jame.

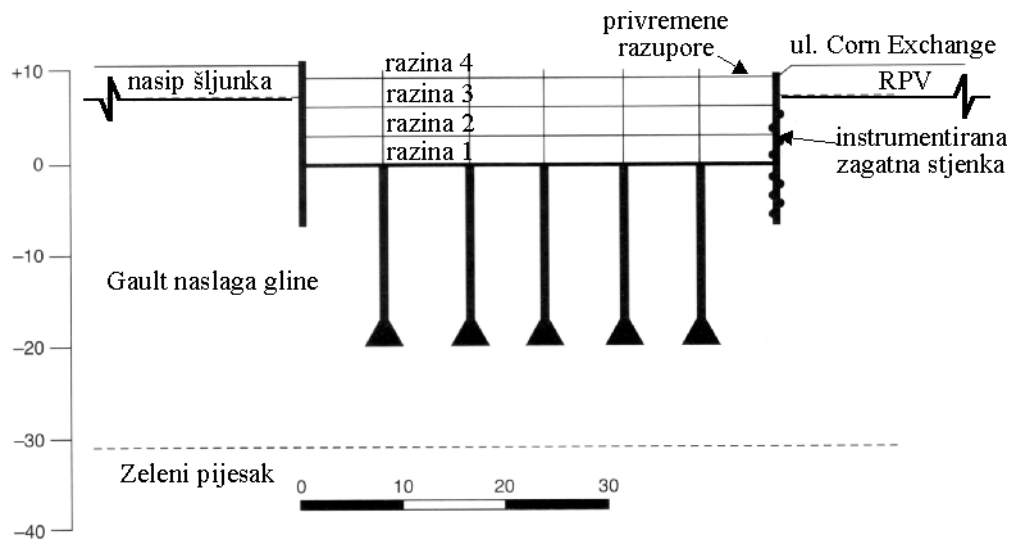
Treća mogućnost iskopa unutar građevne jame u skućenom prostoru, kada je iz bilo kojih razloga nemoguće sidrenje, a razupiranje unutar jame ometa rad, je metoda slična rudarskoj. Izvede se obodna, armirano-betonska dijafragma kao trajni dio buduće podzemne građevine, stupovi se izvedu tehnologijom pilota, a zatim se iskop vrši po etažama, odozgo prema dolje. Potrebno je dimenzionirati i izvesti konstruktivne dijelove svake etaže tako da ujedno služe kao oslonci (razupore) za dijafragmu i na taj način postepeno napredovati u dubinu. Ova je tehnologija skupa, ali ponekad u gusto naseljenim gradskim prostorima jedina moguća. Primjer ovakvog iskopa je građevna jama na Lion Yard u Cambridgeu, UK (Ng i sur. , 2004). Na slikama koje slijede prikazani su dijelovi ove vrlo složene građevne jame.



Slika 8.73 Situacija građevne jame Lion Yard u Oxfordu (Ng i sur., 2004.)

Razina podzemne vode u Gault glini bila je negdje na  $-3,0$  m ispod površine terena odnosno oko  $7,0$  m iznad dna građevne jame. Sidrenje u ovu glinu nije

davalo dovoljnu sigurnost, te je odlučeno da se primjeni metoda iskopa uz istovremeno pridržanje zagatne stijenke samom građevinom.



Slika 8.74 Poprečni presjek kroz podzemni dio građevine Lion Yard

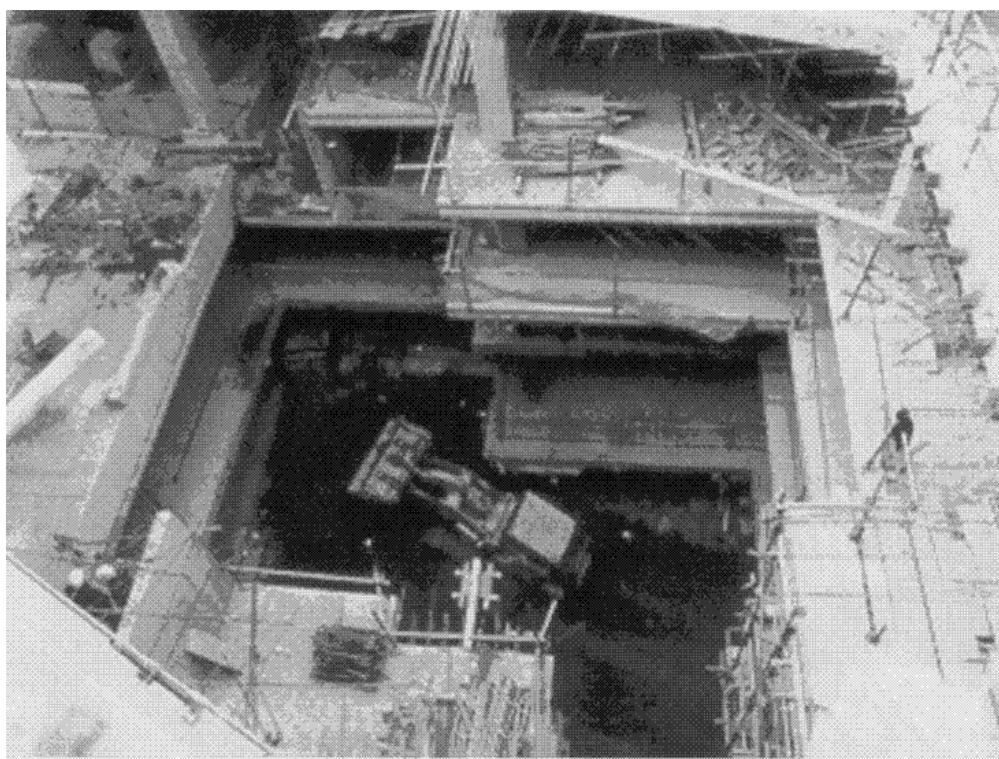


Slika 8.75 Privremene čelične razupore, i vezna armatura (Lion Yard)

Tijek izvedbe je bio sljedeći:

Izvedena je dijafragma i piloti, a na pilote su nastavljeni čelični stupovi (slika 8.74). Kad je ovo završeno, izvedena je podna ploča razine 4. Unutar ove ploče ostavljena su dva otvora veličine  $3,5 \times 19$  m potrebni za ulaz i izlaz u podzemni prostor gradilišta. Lijevi otvor služio je za vađenje iskopanog materijala (slika 8.68). Kada se dosegla razina 3 izvedena je sljedeća podna ploča i tako sve do dna građevine.

Na fotografiji 8.75 vidi se razupiranje dijela zagatne stijenke na nedovršenim dijelovima podzemnih etaža i vezna armatura za vezu dijafragme s pločom, a na slici 8.76 pogled u jamu pri iskopu.



Slika 8.76 Pogled kroz otvor za iskop u građevnu jamu Lion Yard

Zbog gusto naseljenog prostora oko gradilišta, zgradama povijesnog značenja kao i prometnim ulicama, postavljen je niz mjernih uređaja na zagatnu stijenku, u tlo (piezometri) i u bližem okolišu gradilišta. Rezultati opažanja mogu se naći u navedenom radu (Ng i sur., 2004.).

## 8.4 GRAĐEVNE JAME ZA TEMELJENJE U MIRNOJ I TEKUĆOJ VODI

Za temeljenje u dubokoj vodi postoje razne mogućnosti.

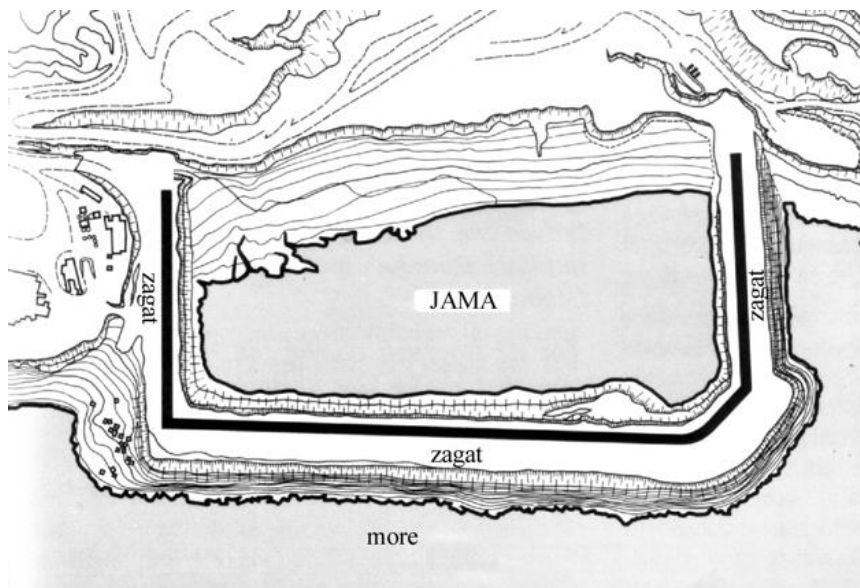
Jedna od njih je korištenje raznih vrsta dubokih temelja kao što su piloti velikog promjera, kesoni, bunari i plivajući sanduci. Dio ovih temeljenja može se izvoditi s površine vode dok je za druge potrebno izvesti umjetni otok te s njega izvoditi temeljenje.

Druga mogućnost, koju često traže opsežni građevinski zahvati kao što su izgradnja brana na vodotocima, brodskih prevodnica na plovnim putovima, suhih dokova u brodogradilištima i slično, je izvedba građevne jame zaštićene od vanjske vode pomoću zagata. Tada se unutar građevne jame temelji u suhom, kao na svakom drugom gradilištu. Ovaj je način najprihvatljiviji u pogledu izvedbe, ali nije uvijek moguć. Kada je dubina vode prihvatljiva, a prostor na kojem se gradi slobodan, građevne jame zaštićene zagatima su vrlo dobro rješenje.

Pri izvedbi građevnih jama zaštićenih zagatima javljaju se dvije mogućnosti: jama u mirnoj vodi (more, jezero) i jama u tekućoj vodi (najčešće kod izgradnje hidroelektrana, brodskih prevodnica, mostovnih stupova i slično). Na slici 1.9 prikazana je velika građevna jama zaštićena zagatima, na morskoj obali.

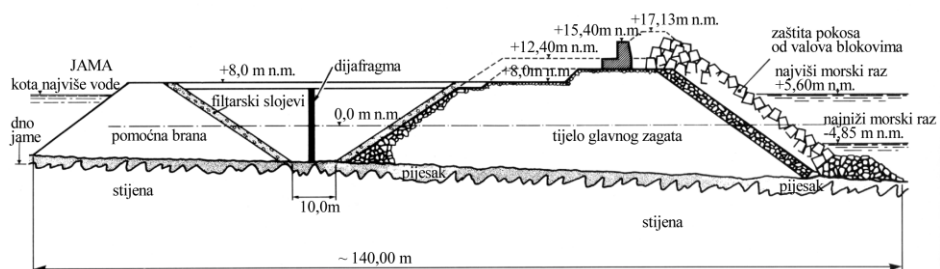
Zagatima, kao građevinama posvećeno je poglavlje 6. U ovom poglavlju više će pažnje biti posvećeno tlocrtnim rješenjima zaštite građevnih jama zagatima i nekim detaljima izvedbe.

Na slici 8.77 prikazan je tlocrt nasutog zagata s fotografije 1.9. Zagat je izveden na morskoj obali.



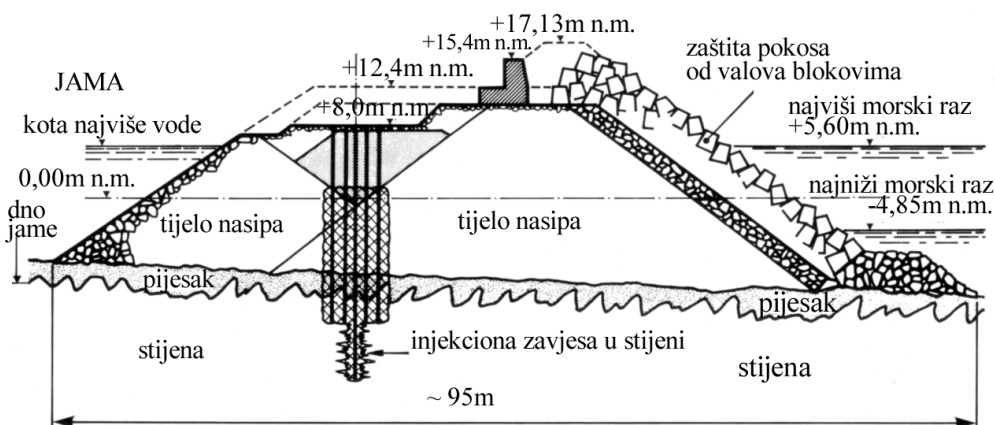
Slika 8.77 Tlocrt građevne jame zagata s fotografije 1.9 (Martin, 1980.)

Na slici 8.78 dan je projektirani poprečni presjek zagata s fotografije 1.9. U prvom koraku bilo je predviđeno izvesti vododrživu dijafragmu kroz tijelo nasipa.



Slika 8.78 Poprečni presjek projektirano zagata (Martin, 1980.)

Ispitivanja su pokazala da je vrlo teško u nasipu predviđene krupnoće izvesti dijafragmu te je nakon niza prijedloga odabrano rješenje s injektiranjem. Na slici 8.79 prikazan je poprečni presjek izvedenog zagata s fotografije 1.9. Izvedeni zagat užji je od projektiranog za 50 m. Vododrživost je postignuta injektiranjem. Kroz tijelo nasipa izvedena je višeredna injekcijska zavjesa dok je stijena u dublji slojevima injektirana cementno-silikatnim mješavinama u jednorodnoj zavjesi.



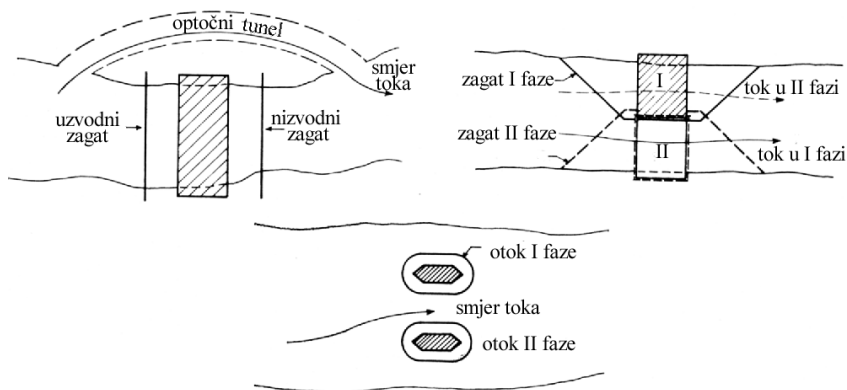
Slika 8.79 Poprečni presjek izvedenog zagata (Martin, 1980.)

Zagat je za vrijeme izvedbe građevine služio kao zaštita građevne jame, a kasnije je ostao kao zaštita radnog platoa izvedene elektrane. Radni je plato ostvaren osvajanjem mora, što je s današnjeg gledišta zaštite okoliša neprihvatljivo.

Ovaj je zagat izveden u «mirnoj» vodi, ali kod razlike razine mora za plime odnosno oseke od 10,45m.

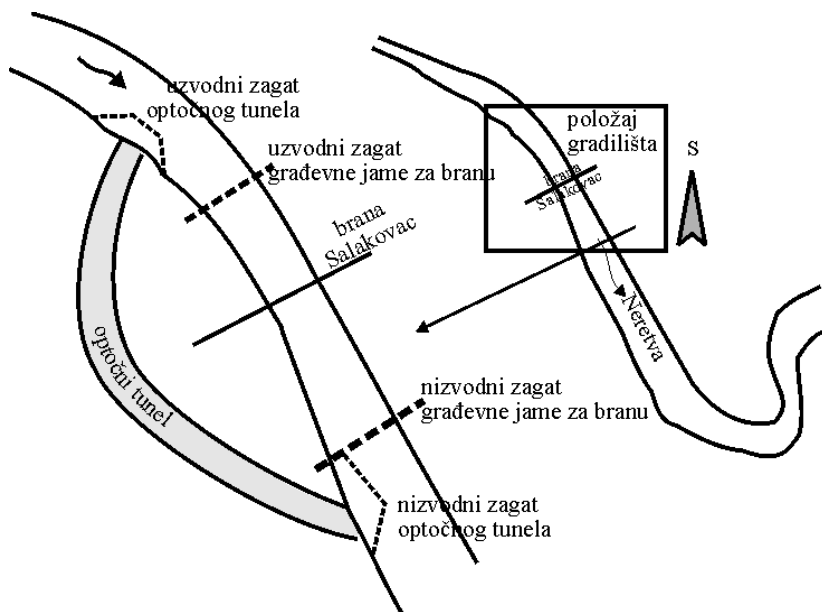
Još su složenije građevne jame u tekućoj vodi, ali se i tamo često izvode nasuti zagati.

Građevne jame u tekućoj vodi moraju biti tako izvedene da voda može negdje prolaziti. Za to postoje dvije mogućnosti prikazane na slici 8.80.



Slika 8.80 Mogući položaji zagata u tekućoj vodi (Nonveiller, 1979.)

Kod rijeka manjih širina, a koje nisu plovne, moguće je rijeku pregraditi u punoj širini. Voda tada mora prolaziti kroz unaprijed izvedeni optočni tunel ili kanal. Optočni tunel ili kanal izvodi se prije pregrađivanja rijeke. Ovisno o koti dna evakuacijskog organa i visine vode u vodotoku, potrebno je ponekad štititi i građevnu jamu ulaznog dijela evakuacijskog organa.



Slika 8.81 Shema zaštite građevne jame brane Salakovac na Neretvi

Kod ovakvih gradnji, javlja se čitav sustav različitih geotehničkih građevina. Neke od njih nastoje se tako projektirati i izvesti da najprije služe za zaštitu građevne jame a kasnije se uklope u pojedine dijelove gotove građevine. To naročito vrijedi za odvodne tunele i kanale kao i dijelove zagata kod nasutih brana. Uzvodni zagat često postaje dio same brane.

Kod širokih rijeka, na pr. Dunav, Žuta rijeka, Nil i sl. koje su ujedno i plovne, može se pregraditi polovica vodotoka, dok kroz preostali dio prolazi voda i promet. Na slici 8.80 je fotografija gradilišta brane Tri klanca na Žutoj rijeci, s uređenim plovim putem na dijelu rijeke i gradilištem na dijelu protočnog profila. U poglavlju 6 na slici 6.4 prikazan je poprečni presjek uzvodnog zagata građevne jame za elektranu na brani Tri klanca.



Slika 8.82 Građevne jame za građevine na brani Tri klanca u Kini

Nakon izvedbe dijela elektrane i uređaja plovnog puta, pregradit će se preostali dio rijeke bez propuštanja vode, da bi se napunio dio jezera i omogućio promet rijekom. Zatim će se staviti u pogon dovršeni dio elektrane i izvoditi preostali dio elektrane na pregrađenom i zaštićenom dijelu rijeke.

Veliki građevinski zahvati na rijekama osim nasutim zagatima mogu se štititi i drugim vrstama zagata.





**Popis upotrijebljenih oznaka:**

$a_d$  – projektna veličina dimenzije

$a_k$  – svojstvena veličina dimenzije

A – rubna točka na potpornoj građevini i/ili kliznom klinu (gornja)

b – širina temeljne stope

$b_1$  – povećana širina temeljne stope

B – rubna točka na potpornoj građevini i/ili kliznom klinu (donja); širina iskopa

C – rubna točka na kliznom klinu (uz tlo)

c – kohezija

$c_z$  – athezija između podupore i tla

ctg – kotangens kuta

c' – kohezija, efektivna naprezanja

$C_{d;S}$  – računska uporabivost (granična vrijednost)

d – dubina zabijanja žmurja

D – debljina sloja nasipa kod armiranog tla

$D_k$  – kritična dubina

e – krak sile; krak sile  $E_A$

$e_A$  – bočno naprezanje, aktivno

$e_P$  – bočno naprezanje, pasivno

E – koeficijent stabilnosti

E – Yungov modul elastičnosti

$E_A$  – sila aktivnog pritiska

$E_{d;S}$  – projektna veličina uporabivosti

$E_{d;U}$  – projektna veličina nosivosti

$E_P$  – sila pasivnog otpora

$E_x$  – vodoravna sila pritiska na zid

$E_y$  – uspravna sila pritiska na zid

f – baza trokuta pasivnog otpora

f\* – prividni koeficijent trenja

F – površina poprečnog presjeka

$F_d$  – projektna vrijednost opterećenja

$F_k$  – svojstveno opterećenje

$F_s$  – faktor sigurnosti

$F_{sč}$  – faktor sigurnosti na čupanje

$F_{sk}$  – faktor sigurnosti na klizanje

$F_{sp}$  – faktor sigurnosti na prevrtanje

g – Zemljina gravitacija, krak sile G

G – težina kliznog klina, prizme tla, vlastita težina zida

$G_{1,2}$  – težina dijela kliznog klina; težina zasipa; težina nasipa kod armiranog tla

$G_t$  – težina temelja

$h_{p(1,2)}$  – pijezometarska visina

H – visina (zida, slobodna visina); vodoravna sila

$H_1$  – računska visina

$H_w$  – sila hidrostatičkog pritiska

$H_0$  – visina zasjeka, do koje je zbroj aktivnih pritisaka jednak nuli

K – koeficijent bočnog tlaka; sila otpora trenja duž kliznog klina u koherentnom tlu

$K_A$  – koeficijent aktivnog bočnog tlaka

$K_P$  – koeficijent pasivnog otpora

$K_0$  – koeficijent tlaka mirovanja

$l_z$  – dubina klizne plohe okomito na poduporu

$l_{w1,w2,A,G}$  – krakovi sila pri globalnoj analizi stabilnosti zida

L – dužina; duljina ekvivalentne grede

$L_a$  – dužina usidrenja armature

$L_f$  – dužina slobodne dionice sidra

$L_s$  – dužina sidrišne dionice sidra

m – koeficijent redukcije pritiska na oplatu

M – moment zaokreta

N – okomita (normalna) sila; broj stabilnosti

$N_c$  – faktor nosivosti

O – središte vrtnje

p – regionalno opterećenje na površini tla

P – koncentrirana sila

q – reaktivni pritisak temeljnog tla; jednoliko raspodijeljeno uspravno vanjsko opterećenje

$q_{max}$  – najveća vrijednost reaktivnog pritiska temeljnog tla

Q – ukupna sila otpora tla; reakcija podloge na težinu kliznog klina

r – polumjer; krak sile

R – rezultanta sila, ležajna reakcija

RPV – razina podzemne vode

$R_{d,U}$ – računska nosivost (granična)	$\Delta a$ – dodatak dimenziji
$s$ – veličina pomaka podupore; strelica parabole pasivnog otpora	$\Delta h$ – razlika potencijala
$\sin$ – sinus kuta	$\Delta H$ – razmak slojeva armature
$S$ – sila u zatezi, sidru	$\Delta l_e$ – izduženje pri prednaprezanju
$T$ – sila trenja između: podupore i klina tla, između temelja zida i tla, na kritičnoj kliznoj plohi iza zida; tangencijalna sila; točka na zagatnoj stijenci u kojoj je bočni pritisak jednak nuli	$\Delta \sigma$ – dodatno naprezanje od opterećenja na površini
$T_a$ – vlačna sila u armaturi	$\varepsilon$ – relativna deformacija
$T_{arm}$ – vlačna čvrstoća armature	$\vartheta$ – kut kritične klizne plohe
$tg$ – tangens kuta	$\rho$ – gustoća tla
$u$ – uzgon, jedinični	$\rho_w$ – gustoća vode
$U$ – ukupna sila uzgona	$\sigma'_3$ – efektivno naprezanje, glavno, manje (vodoravno)
$W$ – težina prizme tla	$\sigma'_1$ – efektivno naprezanje, glavno, veće (uspravno)
$x$ – udaljenost od lica podupore prema tlu; udaljenost točke infleksije od dna iskopa 171	$\sigma'_n$ – efektivno naprezanje, okomito (normalno)
$X$ – udaljenost od lica zida	$\sigma'_1$ – efektivno naprezanje, glavno, veće (uspravno)
$X_d$ – projektna vrijednost svojstva gradiva	$\sigma'_3$ – efektivno naprezanje, glavno, manje (vodoravno)
$X_k$ – svojstvena vrijednost svojstva gradiva	$\sigma_1$ – naprezanje, glavno, veće (uspravno)
$z$ – udaljenost od površine tla	$\sigma_3$ – naprezanje, glavno, manje (vodoravno)
$z_0$ – dubina pojave vlačnih naprezanja u koherentnom tlu, dubina vlačne pukotine; visina zasjeka za koji je aktivni pritisak jednak nuli	$\sigma'_h$ – efektivno naprezanje, vodoravno
$z_w$ – dubina vode	$\sigma'_n$ – efektivno naprezanje, okomito (normalno)
$Z_0$ – Visina podupore nakon nastanka vlačne pukotine u koherentnom tlu	$\sigma'_v$ – efektivno naprezanje, uspravno
	$\sigma'_0$ – efektivno naprezanje, kritično (sloma)
$\alpha$ – koeficijent athezije; kut nagiba podupore prema vodoravnoj ravnini, kut rasprostiranja dodatnog naprezanja kroz tlo	$\sigma_h$ – naprezanje, vodoravno
$\beta$ – kut nagiba površine tla; kut nagiba pokosa iskopa	$\sigma_n$ – naprezanje, okomito (normalno)
$\gamma_F$ – parcijalni faktor sigurnosti za opterećenje	$\sigma_v$ – naprezanje, uspravno
$\gamma_m$ – parcijalni faktor sigurnosti za svojstva gradiva	$\sigma_0$ – naprezanje, kritično (sloma)
$\delta$ – kut trenja između podupore i tla	$\Sigma$ – zbroj
$\Delta$ – pomak	$\tau'$ – čvrstoća na smicanje u efektivnim naprezanjima
	$\tau_f$ – lomna (granična) čvrstoća na smicanje
	$\tau$ – čvrstoća na smicanje
	$\varphi$ – kut unutarnjeg trenja, (veličina deformacije, Dubrova)
	$\varphi_z$ – deformacija po dubini $z$ , (Dubrova)

- $\varphi'$  – kut unutarnjeg trenja, efektivna naprezanja
- $\Psi$  – kut nagiba klizne plohe po dubini zasjeka iza krutog zida, (Dubrova); kut trenja između temeljne plohe i temeljnog tla
- $\omega$  – kut između težine kliznog klina i sile aktivnog pritiska

## Kazalo pojmova

### A

adhezija.....	42,79
aktiviranje	
pasivnog otpora.....	17,80,81
aktivni	
klin.....	40,103,129
pritisak.....	77
tlak.....	17,22
aktivno stanje granične ravnoteže... <b>28, 37,38</b>	
aktivno stanje naprezanja.....	32
analiza stabilnosti.....	21,242
armatura.....	116
dužina.....	130
metalna.....	116
od plastičnih masa.....	<b>117</b>
proračun na čupanje.....	133
proračun na pucanje.....	133
raspodjela naprezanja.....	128
ugradnja.....	177
vlačna čvrstoća.....	128
armaturni koš.....	<b>177</b>
armirani beton.....	3
armirano betonska dijafragma.....	
11,17,164,174,184,282	
izvedba.....	<b>174</b>
redoslijed.....	177
usidrena.....	164
armirano tlo.....	15,16,40

### B

barbakana.....	5,87, <b>89</b>
beskonačni poluprostor.....	27
Berlinsko ziđe (Berlinski zid).....	
8,17, <b>141</b> ,168,260,262	
dimenzioniranje.....	145
izvedba.....	<b>157</b>
raspodjela pritiska.....	145
stupovi.....	146
berma.....	205
betoniranje	
dijafragme.....	178
kontraktor postupkom.....	<b>178</b>
prekid.....	179
Blum (metoda proračuna).....	171
bočni pritisak.....	3,15,21,23,73
aktivni.....	15,38

pasivni.....	15
bočno naprezanje	
aktivno.....	39
brana	
Camerford.....	71
Tri klanca.....	6,7,197,241,296
brodska prevodnica.....	6,7,69
broj stabilnosti.....	<b>142</b> ,144
brtva.....	230
brtveni sloj.....	89
bujična pregrada.....	97
bunar.....	273,277,288
<b>C</b>	
Coulomb.....	4,27
metoda.....	4
Coulombova teorija zemljanog pritiska.....	37
crpljenje iz bunara.....	281
crpna stanica.....	6,265
Culmann.....	37
grafička konstrukcija.....	40
<b>Č</b>	
čelične platice.....	159
čavlasto tlo.....	112
čelično žmurje.....	12,164
jednoredno.....	205
čupanje.....	134
čvrstoća za smicanje.....	4
rezidualna.....	31
<b>Ć</b>	
ćelija	
izdužena.....	207
kružna.....	207
ćelijasti zagat.....	204, <b>207</b>
<b>D</b>	
deformacija.....	17,46,47,134,189
nedozvoljena.....	152
reguliranje veličine.....	189
slobodne dionice sidra.....	189
vodoravna.....	28
denivelacija.....	30
diferencijalno slijeganje.....	76
dijafragma.....	8
dimenzije.....	60
distancer.....	178
dizalica.....	2
dno rova	
izdizanje.....	143

dodatni teret.....	94	geotehnički	
dodatno		projektни izvještaj.....	<b>62</b>
naprezanje .....	52	proračun .....	21
opterećenje.....	77	razred.....	<b>56</b>
dodirna ploha temelj-tlo .....	79	geotehničko sidro .....	18, <b>189</b>
drenaža .....	16,49,51,56,85	geotekstil .....	3,87, <b>117</b>
kombinirana .....	277	kombinirani .....	119
uspravna .....	273	netkani .....	117
vodoravna .....	269	tkani .....	118
drenažna cijev .....	88,89,270	geomreža .....	116, <b>120</b>
drenažni		Gerberov nosač .....	171
kanal .....	269	glava sidra .....	105,216,218,229
rov .....	269	vanjska.....	230
pokos pri iskopu .....	249,271	glavno naprezanje .....	24
zasip.....	72,86,87	glinena jezgra .....	35
drveni pilot .....	2	glinobetska dijafragma .....	174
dubina zabijanja .....	148,152,155,170,172	izvedba .....	<b>174</b>
duboka voda.....	49	globalna stabilnost .....	83
duboki temelj .....	2	grabilica .....	175
dužina armature.....	130	građivo.....	3
dužina usidrenja .....	133	građenje .....	54
<b>E</b>		građevina	
efektivni pritisak .....	50	vodonepropusna.....	279,281
efektivno naprezanje.....	50,51	građevna jama .....	2,3,6,8,19,49,140,172, <b>245</b>
ekvivalentna greda.....	172	metode izvođenja.....	245
elipsa naprezanja.....	32	plitka.....	249
erozija.....	56	privremena zaštita .....	167
Eurokod 1.....	55	u dubokoj vodi .....	293
Eurokod 7.....	15, <b>55</b>	uvjeti rada.....	245,247
<b>F</b>		grafička metoda.....	4
faktor sigurnosti .....	55, <b>76</b>	grafičko rješenje.....	4
na čupanje .....	134	grafička konstrukcija	
na klizanje .....	<b>79</b> ,131	aktivnog pritiska.....	40,41
na prevrtanje .....	<b>78</b> ,131	grafostatička analiza.....	36
parcijalni .....	55,251	grafostatika .....	3
pasivnog otpora .....	150,152,170	granično stanje .....	55,57,60
povećanje .....	80	plastične ravnoteže.....	<b>27</b>
fašina .....	2	krajnje.....	60
filtrar .....	86	uporabivosti.....	61
filtrarsko pravilo .....	86	za potporne građevine .....	<b>63</b>
<b>G</b>		gravitaciona građevina.....	15
gabion.....	40	gravitacijski zid .....	15
galvanizirani čelik.....	116	gustoća tla.....	27
geometrijski		<b>H</b>	
podaci.....	64	HE Salakovac.....	200
uvjeti.....	29	hidraulički	
geotehnička građevina .....	3	gradijent.....	50

izlazni .....	<b>155</b>	proračun.....	79
kritični .....	155	temelja .....	63
sлом .....	152,155,170	klizna ploha.....	36
faktor sigurnosti od .....	156	kritična .....	<b>40,44</b>
hidrodinamička sila .....	50	u armiranom tlu .....	<b>127</b>
hidrodinamički tlak .....	49,77	zakrivljena .....	44
hidrostatički tlak (pritisak) .....	8,78,85,174	klizni klin	
opterećenje .....	17	aktivni .....	38,105
veliki .....	286	kritični .....	28,39
hidrotehničke građevine.....	173	pasivni.....	38,43,104
<b>I</b>		potencijalni .....	18
igłana građevina .....	18,112	klizno tijelo .....	36
igłofiltri .....	276	koeficijent	
injekcijska smjesa.....	230	aktivnog pritiska.....	23, <b>40,130</b>
injekcijska zavjesa.....	200	bočnog tlaka .....	23,130
injektiranje.....	3	pri nagnutoj površini tla.....	31
iskop.....	22,56	pasivnog otpora .....	<b>29,44</b>
dijafragme.....	175	tlaka mirovanja.....	23, <b>24,26,130</b>
duboki .....	139	trenja .....	<b>79</b>
građevne jame .....	287	prividni .....	132
plitki.....	139,249	kompozit .....	119
široki .....	287	koncentrirana sila.....	52
unutar građevne jame.....	287	konstitutivne jednadžbe.....	22
uspravni .....	139	kontinuirana zagatna stijenka.....	17
za kanale .....	<b>249</b>	kontrafor .....	4,15,107
za plitke temelje .....	249	kontraktor postupak.....	178
ispitivanje na modelima		konzola.....	101,146
armiranog tla .....	129	korozija .....	14,75, <b>232</b>
nasute brane.....	35	zaštita .....	232,235
isplaka .....	175	kosnik.....	8,141,186
ispuna.....	178	krak sile.....	78
ugradnja.....	<b>178</b>	krila upornjaka.....	69
istražni radovi.....	15	kritični	
izvedba		klizni klin .....	52
kampadna .....	85	kritični presjek .....	94
usjeka.....	85	krletka .....	203
potpornog zida .....	85	kruta građevina .....	15
<b>J</b>		kruto vođena šipka .....	175
jezgra presjeka.....	93	kružnica.....	44
<b>K</b>		<b>L</b>	
kampada.....	175	ležaj .....	53
kanal.....	141,157,161	linijska sila .....	52
karbonska vlakna.....	3	logaritamska spirala.....	44
keson .....	2	luka.....	2,188
klin tla .....	3,51	lukobran .....	53
klizanje.....	76		
građevine od armiranog tla.....	126		

<b>M</b>	
mehanizam sloma .....	76
mehanizam zbijanja .....	72
metalna traka .....	116
metoda	
ekvivalentne grede .....	171
elastične linije .....	171
izrada lica zida	
harmonike .....	136
klizna .....	137
teleskopska .....	136
mixed in place .....	167
neutralnog koeficijenta pritiska $K_0$ ....	145
opažanja .....	57
pilot do pilota .....	165, <b>180</b>
raspored .....	181
skošenja stope temelja .....	80
mixed in place metoda .....	167, <b>184</b>
mlazno injektiranje .....	3, 8, 13, 166, 182, 282
shema izvođenja .....	182
stupnjaci .....	182
modeli tla .....	21
nelinearni .....	22
model	
brane .....	35
proračunski .....	57
modelska ispitivanja .....	62
Mohrovi krugovi .....	28
Mohrova teorija .....	4
Mohr-Coulombov zakon .....	4, 22, 27
moment	
aktivnih sila .....	78
ključ .....	227
savijanja, najveći .....	152, 155
sila otpora na prevrtanje .....	78
montažni element .....	99
<b>N</b>	
nabijač .....	161
nabijanje .....	72
naginjanje .....	57, 77
naglavna greda .....	173, 179
nagli pljusak .....	51
naprezanje	
na plohi temelj-tlo .....	82
vlačno .....	83, 94
nasip .....	27, 93, 116
debljina sloja .....	130
pridržan potpornim zidom .....	7, 15
s nepropusnom jezgrom .....	11
s nepropusnim ekranom .....	11
slijeganje .....	136
zbijan u slojevima .....	26
zbijanje .....	72, 136
nasipavanje .....	135
nasipni materijal .....	<b>112</b>
nastavak	
za nabijanje platica .....	161
nasuta brana	
model .....	35
zonirana .....	34
nearmirani beton .....	94
nedrenirana osna čvrstoća .....	145, 152
nomogram .....	152
nosač	
uspravni .....	262
vodoravni .....	262
nosivost	
na čupanje .....	221
na vanjskom rubu .....	131
prekoračenje .....	76
<b>O</b>	
obalna građevina .....	69
obalni zid .....	2, 3
oblik građevine .....	64
oborinska voda	
zaštita od .....	<b>265</b>
obrambeni zid .....	1, 3
odvodni kanal .....	87
odvodnja	
iza zida .....	90
oborinske vode .....	265
iz jame .....	267
ojačano tlo .....	111
opća stabilnost .....	63
oplata .....	8, 103
višestruko pridržana .....	<b>144, 157</b>
zabijena u tlo .....	143
opća stabilnost .....	127
operativna obala .....	192
oplata .....	<b>256</b>
opterećenje .....	15, 21, 56, 58, 64
izvanredno .....	58
od zasipnog materijala .....	64
na potporni zid .....	<b>77</b>



nasipom .....	108
posebno .....	<b>72</b>
povremeno .....	58
površinsko .....	64
sredstvima za zbijanje .....	<b>72</b>
stalno .....	58
tlom .....	46
udarom vala .....	64
vodom .....	49,58,64
optimalna vlažnost .....	27
osiguranje kakvoće .....	55
oslonci .....	186
<b>P</b>	
parametri	
čvrstoće na smicanje .....	22,27
tla .....	3
parcijalni faktori sigurnosti .....	55,57,59
parni stroj .....	1,2
pasivni klin .....	43,105
pasivni otpor .....	17,72,77,104,146
aktivirani .....	17,105
najveći mogući .....	149
potrebni pomak .....	81
pasivno stanje granične ravnoteže .....	
.....	<b>28,33,34, 38, 43</b>
pilot .....	2,8,165,180,282
vodilica .....	17
platica .....	17,156, <b>159</b> ,201
spojna .....	204
za Berlinsko žiđe .....	145
ploha sloma .....	32,36,82
konkavna .....	34,35
plovni kanal .....	163
podgrada .....	140, <b>141,256</b>
proračun .....	141
razuprta .....	256
složena .....	257
stupnjevana .....	260
za veće dubine .....	259
podtemeljno tlo	
popravak .....	95
podupora uspravnog iskopa .....	<b>139</b>
podzemna	
galerija .....	269
parkirališta .....	8
skladišta .....	8
voda .....	49,56,78
visoka .....	282
zaštita od .....	<b>265</b>
željeznica .....	8,145
poligon sila .....	4
pomak .....	23,46,47,103,105
nedopustivo veliki .....	17
potreban za aktiviranje punog pasivnog otpora .....	80
poplava .....	56
porni pritisak .....	50
posebne geotehničke građevine .....	68
posmično naprezanje .....	129
potencijalno strujno polje .....	50
potporna građevina .....	1,3,5, <b>6</b> ,22,63,139
od armiranog tla .....	<b>113</b>
armatura .....	116
dimenzioniranje .....	126
građivo .....	116
izvedba .....	<b>135</b>
lice .....	114, <b>122,135</b>
od betonskih elemenata .....	123
od geotekstila .....	124
moguća oštećenja .....	162
proračun .....	<b>130</b>
vanjska stabilnost .....	131
tehnologija .....	114
privremena .....	6,163,141
trajna .....	6,163
potporni zid .....	3,6,15,51,56, <b>67</b>
armiranobetonski .....	67
betonski .....	94
izvedba .....	94
dimenzioniranje .....	<b>76</b>
izvedba .....	85,94
kampadna .....	85
lice .....	96
montažni .....	95
od gabiona .....	67,95
od montažnih elemenata .....	67
globalna stabilnost .....	83
gravitacijski .....	16,63,67, <b>92</b>
dimenzioniranje .....	93
izvedba .....	94
od gabiona .....	93
od montažnih elemenata .....	93,99
oblikovanje .....	92
primjena .....	92

s lomljenim stražnjim licem.....	93	primarno stanje naprezanja.....	29
s stepenastim stražnjim licem .....	93	priobalna građevina .....	170
konzolni.....	67	prirodna padina .....	7
masivni.....	<b>67,70,92</b>	prirodno tlo.....	27
dimenzioniranje .....	93	pristan .....	2,3,53,163,188
izvedba.....	94	pritisak sredstva za zbijanje.....	127
oblikovanje .....	92	privez broda.....	53
od gabiona .....	93	prividni koeficijent trenja .....	132
od montažnih elemenata.....	93	privremena građevina .....	140,154
primjena.....	92	prizma tla.....	38
s lomljenim stražnjim licem.....	93	probno opterećenje .....	<b>55,57,61</b>
s stepenastim stražnjim licem .....	93	procjedna voda.....	78
naginjanje.....	77	procjednica .....	5,87, <b>89</b>
odvodnja .....	90	Proctor .....	27
površinska.....	90,94	uređaj.....	27
olakšani .....	<b>70,101</b>	Proctorov pokus .....	136
oblikovane .....	101	modificirani.....	27
primjena .....	101	standardni .....	27
savitljivi.....	16	projektiranje	
sa zategom.....	<b>101,103</b>	po Eurokodu.....	54
izvedba.....	106	pomoću metoda opažanja.....	<b>61</b>
dimenzioniranje .....	103	pomoću probnog opterećena.....	<b>61</b>
s kontraforom.....	67	pomoću propisanih mjera.....	<b>61</b>
s konzolom.....	<b>101</b>	projektne okolnosti .....	<b>55,56,64</b>
dijagram bočnog pritiska.....	102	projektne veličine.....	58,60
dimenzioniranje .....	102	projektni	
izvedba.....	103	pljusak .....	90
složeni .....	63	scenarij .....	61
tankostijeni.....	<b>70, 107</b>	zahtjev .....	<b>55,57,60</b>
dimenzioniranje .....	108	proklizavanje armature .....	126
izvedba.....	110	proračun	
temelj.....	16	armature na pucanj.....	133
potres .....	56	deformacija .....	134
površina kliznog tijela.....	36	na čupanje .....	133
površina tla		na klizanje .....	<b>79</b>
nagnuta.....	31	na prevrtanje.....	<b>78</b>
vodoravna .....	28	po metodi Bluma .....	171
površinska		unutarnje stabilnosti.....	<b>132</b>
nosiva građevina .....	18	proračunski model.....	57
odvodnja .....	90	prosta greda.....	170
površinsko opterećenje.....	64	provjera nosivosti	
prekonsolidirano tlo.....	24	ispod temeljne stope .....	<b>81</b>
prednaprezanje.....	53,103,189, <b>219,223</b>	proračun	
prevrtanje zida.....	63,76,126	na prevrtanje.....	<b>78,131</b>
proračun .....	78,131	na klizanje .....	<b>79,131</b>
pridržanje .....	<b>53</b>	proračunski model.....	55,58,61
u zatezi .....	77	prskani beton .....	3

pucanje armature ..... 126

## R

računska nosivost ..... 60

Rankine ..... 21,27,28

Rankineova teorija graničnih stanja plastične  
ravnoteže ..... 28,72

raspodjela naprezanja ..... 47

raspodjela pritiska ..... 47

slobodno stojeće žmurje ..... 147

na Berlinsko zide ..... 145

na višestruko pridržane oplata ..... 144

prema Tschebotarioffu ..... 145

rastezanje ..... 28

rasuti teret, skladište ..... 6,8

razina vode ..... 64

podzemne ..... 139

razupora ..... 8,15,144,186,255

čelična ..... 187

dimenzioniranje ..... 156

drvena ..... 157,187

izvedba ..... 156

kosa ..... 187

vrste ..... 156

reakcija tla ..... 130

redukcija širine temeljne plohe ..... 83

regionalno opterećenje ..... 52

Reinforced Earth ..... 114

reška

radna ..... 78,85

stvarna ..... 85

reversni rasjed ..... 24

rezidualna čvrstoća na smicanje ..... 30,31

rigol ..... 90

rov ..... 141,250

iskop ..... 250

s poduporom ..... 255

s promjenjivim nagibom ..... 254

koherentni materijal ..... 249

nekoherentni materijal ..... 252

podgrađivanje ..... 250

pokos ..... 253

ocjena stabilnosti pokosa ..... 251

runo ..... 89,119

## S

sakrivena greda ..... 104

samonaprezanje ..... 53,104,219,222

sanacija klizišta ..... 217

sidrena građevina ..... 15,18,53,215,237

izvedba ..... 243

proračun ..... 212

sidrena užad ..... 189

sidreni

blok ..... 29,103,188,216,237

roštilj ..... 239

zid ..... 103,188

sidrišna dionica ..... 218,224

sidrišno tijelo ..... 218,226

sidrište ..... 218

sidro ..... 5,13,18,53,63,103,172,215,217,261

dijelovi ..... 218

dužina ..... 105

geotehničko ..... 189

izvedba ..... 231

nosivost ..... 105

na čupanje ..... 221

optimalni položaj ..... 220

pasivno ..... 218

područje primjene ..... 217

pokusno ..... 227

prednapregnuto ..... 218

privremeno ..... 218

radno ..... 228

samostalno ..... 216

sidrišna dionica ..... 189

sila u ..... 172

s kablovima ..... 229

slobodna dionica ..... 189

štapno ..... 228,229

trajno ..... 218

vrste ..... 218

sila

prednaprezanja ..... 221

u pridržanju ..... 64

u sidru ..... 172

uspravna ..... 52

u zatezi ..... 105,172

sjena od konzole ..... 102

skladište ..... 2

slijeganje, prihvatljivo ..... 57

slobodna dionica ..... 218

slobodno stojeća zagatna stijenka ..... 146

složena potporna građevina ..... 13,15,163

stabilnost

unutrašnja.....	127,130
vanjska .....	127,130
standardni penetracijski pokus .....	152
stanje	
aktivno.....	23
mirovanja .....	23,24
pasivno .....	23
suha gustoća .....	27
suhi dok.....	6,69,163
suhozid .....	1
svojevne vrijednosti .....	59
<b>Š</b>	
štapno sidro .....	228
širina temeljne stope .....	79
štedni otvor.....	70
<b>T</b>	
tečenje u tlu .....	51
temelj.....	216
na stijeni .....	81
susjednih građevina .....	52
temeljna stopa .....	80
nagnuta.....	80
proširenje .....	80
redukcija.....	83
temeljenje	
na bunaru.....	68
na drvenom roštilju.....	68
na pilotima .....	68
temeljno tlo, lom .....	63
temperaturna promjena.....	85
temperaturni učinak .....	64
teorija	
elastičnosti.....	22
graničnog stanja plastične ravnoteže ....	4,21
plastičnog sloma .....	21
Terre Armee.....	116
tetiva .....	218
težina	
temelja.....	77
vlastita .....	77
težište.....	36
tijesak.....	228
tlačna linija .....	93
tlak mirovanja .....	17,24
tlo	
nabijanje.....	72
zbijanje.....	72
trajna građevina.....	163,167
trajnost .....	57
trakasto opterećenje .....	52
translatorni pomak .....	31
trenje.....	47
između podupore i tla .....	<b>32</b>
na plohi temelj-tlo .....	77
nasipa o zid .....	71
tunel	
predulaz.....	69
predusjek.....	7,8
<b>U</b>	
udar .....	64
broda.....	53
vala .....	53
vozila .....	53
ugradnja ispune .....	178
ukruta .....	177
umjetni otok .....	173
unutrašnja stabilnost.....	127,130,132
uporabivost građevine.....	57
upojni bunar .....	265
uporni zid.....	6
upornjak, mosta.....	6,68,107,127
usjek.....	7
uspravno opterećenje .....	107
uvodni kanal.....	174
uzorak	
umjetni.....	<b>27</b>
<b>V</b>	
valobran.....	69
vanjska	
sila.....	43,77
stabilnost .....	131
uzdužna greda .....	104
verižni poligon .....	37
vibro ploča.....	72
vibro valjak.....	73
Vidal .....	114,136
vijek trajanja.....	54
vlačna	
pukotina.....	31,42
sila.....	105,191
vlastita težina .....	77
voda	
otvorena.....	49
podzemna .....	49

vodilica .....	202
vododrživi ekran.....	174
vododrživost.....	174
vodonepropusna jezgra .....	194
vodoravna	
bušotina .....	269
deformacija.....	27,131
drenaža.....	<b>269</b>
sila.....	<b>3,53,77</b>
vezna greda.....	156,165,261
skrivena .....	104
vodoravni	
nosač .....	188
pomak .....	22
pritisak na podgradu.....	<b>144</b>
vodoravno uslojeno tlo.....	24
vrste sidara.....	218
<b>Z</b>	
zagat.....	4,11,12,15,19,173, <b>193</b> ,246,293
čelijasti.....	204,207
dimenzioniranje.....	<b>209</b>
izvedba.....	211
od čeličnog žmurja.....	201, <b>203</b> ,206
od drvenog žmurja .....	<b>201</b>
od krletki.....	<b>203</b>
opterećenje .....	209
ostale vrste.....	212
nadvišenje.....	199
nasuti.....	196
izvedba .....	199
otok .....	194
privremeno nadvišenje.....	194
prelijevanje .....	196
proračun.....	197
analize stabilnosti.....	198
procjeđivanje.....	197,198
slijegane.....	198
rušenje.....	194
s jezgrom .....	200
utjecaj valova .....	198
vododrživost.....	193
zagatna stijenka ....	4,8,15,17,63,140, <b>163</b> ,282
armirana.....	174
dimenzioniranje.....	169
iskop .....	174
izmiješana u tlu (mixed in place) ....	<b>184</b>
izvedba.....	<b>172</b>
izvedena u tlu.....	173
kruta .....	147
nearmirana .....	174
oblikovanje .....	<b>174</b>
od čeličnih platica .....	162
od mlazno injektiranih stupnjaka.....	166, <b>183</b>
pilot do pilota .....	165
pomak .....	147
popuštanje oslonca .....	169
primjena.....	174
proračun.....	<b>169</b>
razuprta .....	165
redosljed izvedbe .....	177
slobodno stojeća.....	49, <b>146</b>
translacija.....	63
usidrena.....	164,167
vrste sloma.....	169
zaokretanje.....	63
zakon čvrstoće na smicanje.....	27
Zakon o građenju.....	54
zamrzavanje tla.....	281
zasipni materijal.....	64
zasjek .....	7
u stijenskoj masi .....	18
zaštita	
iskopa.....	163
na radu .....	250
zaštitna ograda .....	53
zaštitni sloj .....	178
zatega .....	15,53,103, <b>104</b> , <b>169</b> , <b>187</b>
od betonskog željeza .....	187
od čelične užadi .....	187
zavjesa	
od mlazno injektiranih stupnjaka ....	184
zbijanje.....	28
nasipa.....	136
sredstvo za .....	72
tla.....	43,72
u slojevima.....	73
zid	
prevrtanje.....	63
s konzolom .....	70
sa zategom .....	70
tankostijeni .....	70
<b>Ž</b>	
željeznica .....	2
željeznički kolosijek.....	2

žmurje.....	8,141, <b>146</b> ,159
čelično	
dvoredno .....	206
razuprto .....	205
kruto .....	148
platice .....	<b>159</b>
armiranobetonske .....	160
čelične .....	159
drvene.....	159
plitko zabijeno .....	170
s uklještenim ležajem u tlu .....	171
slobodno stojeće .....	146
zabijanje .....	161
zabijeno .....	173

## Literatura:

- Babić, B., Jašarević, I., Kvasnička, P., Prager, A., Schwabe, Ž., Šimetin, V. (1995.) *Geosintetici u graditeljstvu*. HDGI, Zagreb
- Baker, R., Klein, Y. (2004.) *An integrated limiting equilibrium approach for design of reinforced soil retaining structures: Part I – formulation*. Geotextile and geomembranes 22 (2004) 119-150
- Basma, A. A. (2003.) *Design of Reinforced Earth Walls*. Advanced Foundation Engineering, (vidi: [www.sarajah.com](http://www.sarajah.com)....)
- Bauer (2004.) (vidi: [www.bauer.com](http://www.bauer.com)...)
- BBR CONEX (1996.-1998.) Propagandni materijali, Zagreb
- Belidor, B.F. de (1729.) *La Science des Ingénieurs dans la Conduite des Travaux de Fortification et d'Architecture Civile*. Claude Jombert, PARIS
- Bellina, W. (1951.) *Einführung in den Grundbau, Flachgründungen*. G. Braun, Karlsruhe
- Belz, C.A. (1970.) *Cellular structure design methods*, u H.Y. Fang i T.D.Dismuke, ur. Proceedings, Conference on Design and Installation of Pile foundations and Cellular Structures, 319-388. Envo publishing Co., Lhigh Valley
- Blum, H. (1930.) *Einspannungsverhältnisse bei Bohlwerken*. Diss. tech. Hochschule Braunschweig
- Blum, H. (1931.) *Einspannungsverhältnisse bei Bohlwerken*. W. Ernst Sohn, Berlin
- BRE Digest No. 174 (2nd Series, 1975.) *Concrete in sulphate bearing soils and groundwaters*. HMSO, London
- Broms, B.B. (1971.) *Lateral earth pressure due to compaction of cohesionless soils*, Proceedings of the 4<sup>th</sup> Budapest Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 373-384
- Brooker, E.W., and Ireland, H.O., 1965. *Earth pressures at rest related to stress history*. Can. Geotech. J., 2:1-15.
- Caquot, A., Kérisel, J. (1967.) *Grundlagen der Bodenmechanik*, Springer – Verlag, Berlin/New York/Heidelberg
- Cernica, J.N. (1995.) *Geotechnical Engineering, Foundation Design*, John Wiley & Sons, Inc. New York, Chicester
- Clough, G.W., Duncan, J. M. (1991.) *Earth pressures*. U H.-Y. Fang (ur.) Foundation Engineering Handbuk, Chapman & Hall, London
- Coulomb, C.A. (1773.) *Sur une application des règles, de maximis et minimis à quelque problèmes de statique, relatifs à l'architecture*. Mém. Acad. Roy. Sci., Paris vol. 7. du Recueil des ouvrages présentés par les savants étrangers
- Craig, R.F. (1997.) *Soil Mechanics, 6<sup>th</sup> Edition, Lateral Earth Pressure*, E & FN Spon, Chapter 6, pp 179 – 247
- CTGPC, China Yangtze Three Gorges Project Development Corporation (2002.) *Three Gorges Project*, Sandouping
- Culmann, K., 1866. *Die Graphische Statik*. Zürich, Meyer und Zeller. Cummings, E.M. (1957.) *Cellular cofferdams and docks*, Transactions, ASCE, **125**, 13-34; Discussion, 34-35

- Čorko, D., Kovačić, D., Lovrenčić, D., Marić, B. (1997.) *Mlazno injektiranje*. CONEX, Zagreb
- Danish Geotechnical Institute (1978.) *Code of Practice for Foundation Engineering*. Danish Geotechnical Institute, Bulletin No. 32, 52
- Denber, C.G. (1953.) *Present status of bacterial corrosion investigations in United States*. Corrosion, Vol. 9, 95-99
- Dismuke, T.D. (1991.) *Retaining structures and excavations*. U H.-Y. Fang (ur.) *Foundation Engineering Handbook*, Chapman & Hall, London
- Dubrova, G.A. (1963.) *Interaction of Soil and Structures*. Izd. Rechniy Transport, Moskva
- Duncan, J. M., Clough, G. W., Ebeling, R. M. (1990.) *Behavior and design of gravity earth retaining structures*. Design and Performance of Earth Retaining Structures, P. C. Lambe and L. A. Hansen (eds.), American Society of Civil Engineers, New York
- Duncan, J.M., Seed, R. B. (1986.) *Compaction-induced earth pressure under  $K_0$ -conditions*. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, **112**, No. 1, 1-22
- Duncan, J.M., Williams, G.W., Sehn, A.L., Seed, R.B. (1991.) *Estimation earth pressures due to compaction*. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE **117**, No 12, 1833-1847; with important discussions and closure in Journal of Geotechnical Engineering, ASCE **119**, No 7, 1162-1177
- Earth Manual (1974.) *A Guide to the use of soils as foundations and as construction materials for hydraulic structures*. A Water Resources Technical Publication, second edition, U.S. Department of the interior, Bureau of reclamation, U.S., Washington
- Engesser, F. (1880.) *Geometrische Erdrucktheorie*. Zeitschrift für bauweswn, Bd. 49, s. 189
- Eurokod 7, ENV (1997.) *Europski Standard, Geotehničko projektiranje, Geotehničko dimenzioniranje, 1. dio: Opća pravila – neslužbeni hrvatski prijevod*
- Fowler, C.E. (1920.) *Engineering and Building Foundation, Vol. 1*. John Wiley, New York
- Gardey, J.-M., Guionnet, C. (1978.) *Le groupe SCREG et l'informatique*. Travaux, 516, 32-39
- Glavaš, T., Mulabdić, M., Mračkovski, D. (2002.) *Značaj pokusa izvlačenja za konstrukcije od armiranog tla*. U M. Mulabdić (ur.) *Geotehnika kroz Eurokod 7, Priopćenja 3. Savjetovanja Hrvatske udruge za mehaniku tla i geotehničko inženjerstvo, 2.-5.listopad 2002.*, Hvar
- Grupa autora (2001.) *Knjiga II, Zemljani radovi, odvodnja, potporni i obložni zidovi*. U P. Đukan, Z. Tomljanović (ur.) *Opći tehnički uvjeti za radove na cestama*, Institut građevinarstva hrvatske, Zagreb
- Hallos, A. (1979.) *Forum des Halles de Paris*. Travaux, 529, 46-71
- Hanna, T. H. (1982.) *Foundations in Tension, Ground Anchor*. Trans Tech publications, Series in rock and Soil Mechanic Vol. 6
- Harr, M.E. (1977.) *Mechanics of Particulate Media, a Probabilistic Approach*. Mc Graw-Hill, New York, London Paris, Tokio
- Havranek, A. (1999.) *Děčín – Most přes ploučnici v Litoměřické ul.* Zakládání 3/1999, ročník XI, Časopis Zakládání staveb, a.s., Praha



- Hoesch-Kölnneuessen (1937.) *Die stahlspundwand "Hoesch"*. Aktiengesellschaft für Bergbau und Hüttenbetrieb, Dortmund
- Hudec, M. (1987.) *Statika sidrenih podgrada podzemnih prostorija*. U I. Jašarević (ur.) Geotehnička sidra i sidrene konstrukcije, Društvo građevinskih inženjera i tehničara Zagreb
- Jakl, B. (1999.) *Stavbení jáma na náměstí Hrdinů v Praze*. Zkládání, Ročník XI, 2/1999, str.8
- Jaky, J. (1944.) *The Coefficient of Earth Pressure at Rest*. Journal for Society of Hungarian Architects and Engineers, October, 355-358
- Jaky, J. (1946.) *Tévedések földnyomáselméletben*. Magyar Technika
- Jašarević, I. (1987.) *Projektiranje, proračun, izvođenje i instrumentiranje štapnih adhezijskih sidara i sidrenih konstrukcija pri osiguranju pokosa, temeljenju i sanacijama objekata*. U I. Jašarević, (ur.), Geotehnička sidra i sidrene konstrukcije, DGIIT, Zagreb
- Jones, C.J.F.P. (1996.) *Earth reinforcement and soil structures*. Thomas Telford, London
- Keller Grundbau GmbH (2003.) *Referentni radovi*, GeoTechnik d.o.o., Varaždin
- Kézdi, Á. (1969.) *Handbuch der Bodenmechanik, Band I, Bodenphysik*. WEB Verlag für Bauwesen, Berlin
- King, R.A., Miller, J.D.A. (1953.) *Corrosion by sulphate reducing bacteria*. Nature, Vol. 233, No. 5320, 491-492.
- Lardner, W.E., Littlejohn, G.S. (1985.) *Suggested method for rock anchorage testing*. ISRM, Commission on testing methods, Pergamon press Ltd.
- Lisac, Z., Nonveiller, E., Szavirs-Nossan, A., Vrkljan, I., Višić, I. (1980.) *Geotehničke osnove projektiranja i gradnje okna strojarne reverzibilne hidroelektrane*. 5. Simpozij jugoslavenskog društva za mehaniku stijena i podzemne radove, knjiga 2, Split, 58-63
- Maccaferri S.p.A. (1997.) *Where the grass regrows*. Katalog ekološki prilagodljivih proizvoda, Officine Maccaferri S.p.A., Bologna
- Macnab, A. (2002.) *Earth retention systems*. McGraw-Hill, New York
- Martin, M. (1980.) *Éanchement d'une digue en mer par injection*. Travaux 513, 122-127
- Maslov N.N. i grupa autora (1975.) *Složeno fundiranje, stabilnost kosina i drenaže*. Građevinska knjiga, Beograd
- Mayne, P.W., Kulhawy, F.H. (1982.) *K<sub>0</sub>-OCR Relationships in Soil*. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol 108, No. GT6, June, 851-872
- Mesri, G., Hayat, T.M. (1993.) *Discussion on Estimation earth pressures due to compaction*. Journal of Geotechnical Engineering, American Society of Civil Engineers, New York, N.Y., U.S.A., Vol. 119, No 7, 1165-1168.
- Mitchell, J.K., Collin, J.G. (1984.) *Earth Walls*. In Cutting Edge Technologies, IV Transportation Technology, National Academy Press, Washington, D.C., 161-180 (<http://books.nap.edu/books/0309034892/html>)
- Mitchell, J.K., Schlosser, F. (1979.) *Mechanism, behavior and design methods for earth reinforcement*. General Report, International Conference on Soil Reinforcement: Reinforced Earth and Other Techniques, ENPC-LCPC, Paris, 23-74

- Moran, D.E. (1974.) *Pier foundation*. U R.B. Peck, W.E. Hanson i T.H. Thornburn, Foundation Engineering, John Wiley & Sons, INC., New York, London
- Moroto, N., Muramatsu, M. (1987.) *K<sub>0</sub> Value and Degree of Anisotropy of Overconsolidated Clay*. Proceedings, 9<sup>th</sup> Southeast Asian Geotechnical Conference, Sec. 5, 25-32
- Muhovec, I. (1987.) *Uloga i karakter geotehničkih sidara s osvrtom na značenje injekcijskog zahvat*. U I. Jašarević, (ur.), Geotehnička sidra i sidrene konstrukcije, DGIIT, Zagreb
- Ng, C.W.W., Simons, N., Menzies, B. (2004.) *Soil-structure engineering*. Thomas Telford, London
- Nonveiller, E. (1957.) *Stabilnost nehomogenih nasipa*. Hidrotehnički institut «Jaroslav Černi», posebna izdanja 7, Beograd
- Nonveiller, E. (1979.) *Mehanika tla i temeljenje građevina*. Školska knjiga, Zagreb
- Nonveiller, E. (1983.) *Nasute brane, projektiranje i građenje*. Školska knjiga, Zagreb
- Peck, R.B., Mesri, G. (1987.) *Discussion of "Compaction induced earth pressures under K<sub>0</sub>-conditions" by Duncan, J.M., Seed, R.B. (1991.)*. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, **113**, No. 11, 1406-1410
- Poncelet, J.V. (1840.) *Mémoires sur la stabilité des revêtements et de leurs fondations*. Mém. de l'Officier du Génie, No. 13
- Patrick Powers, J. (1991.) *Dewatering and groundwater control*. U H.-Y. Fang (ur.) Foundation Engineering Handbuk, Chapman & Hall, London
- Peyronnet, P. (1979.) *Le nouveau barrage écluse de la Grande-Bosse et la nouvelle écluse de Notre-Dame de la Garenne*. Travaux 532, juin 1979, 67-73
- Proctor, R.R. (1933.) *Fundamental principles of soil compaction*. Engineering News Record, vol. 111, No. 9
- Pintarić, N. (1987.) *Izrada i radioničke karakteristike prednapetih geotehničkih sidara BBR sistema*. U I. Jašarević, (ur.), Geotehnička sidra i sidrene konstrukcije, DGIIT, Zagreb
- Prudon, L. (1935.) *Travaux maritime, tome deuxième, (Bibliothèque de l'ingénieur de travaux publics)*. Dunod, Paris
- Prudon, L. (1936.) *Travaux maritime, tome troisième, (Bibliothèque de l'ingénieur de travaux publics)*. Dunod, Paris
- Rankilor, P.R. (1981.) *Membranes in Ground Engineering*. John Wiley & Sons, Chichester, New York, Toronto
- Rankilor, P.R. (1994.) *UTF geosynthetics manual*. UCO technical fabrics NV, Wewerslaan 15, b-9160 Lokeren, Belgium
- Rankine, W.J.M. (1857.) *On the stability of loose earth*. Proc. Roy. Soc. London 147
- Reimbert, M.L., Reimbert, A.M. (2001.) *Retaining structure and silos, experimental and theoretical comparisons*. Lavoisier Publishing, Paris
- Roje-Bonacci, T., Mišćević, P. (1997.) *Temeljenje*. Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu, Split
- Roje-Bonacci, T. (2003.) *Mehanika tla*. Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu
- Schlosser, F., Long, N.T., Guegan, Y., Legeay, G. (1972.) *Etude de la Terre Armée a l'appareil triaxial*. Rapport de recherche, No. 17, LCPC, Paris

- Schlosser, F., Bastick, M. (1991.) *Reinforced earth*. U H.-Y. Fang (ur.) Foundation Engineering Handbuk, Chapman & Hall, London
- Schneider, H. R. (1997.) *Definition and determination of characteristic soil properties*. Discussion Session 2.3, XII Int. Conf. Soil Mechanic and Geotechnical Engineering, Hamburg, Balkema, Vol. 4, 2271-2274
- Schulze W.E., Simmer K. (1978.) *Grundbau 2*. B.G. Teubner, Stuttgart
- Sherif, M.A., Ishibashi, I., and Lee, C.D., (1982), *Earth Pressures Against Rigid Retaining Walls*, Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 108, No. GT5, May, pp. 679-695.
- Sorić, I. (1987.) *Projektiranje, izvođenje i opažanje geotehničkih sidara pri sanacijama klizišta*. U I. Jašarević, (ur.), Geotehnička sidra i sidrene konstrukcije, DGIIT, Zagreb.
- Szavitz-Nossan, A., Ivšić, T. (1994.) *EUROCODE 7 – geotehnika*. Građevinski godišnjak '95, Hrvatsko društvo građevinskih inženjera, Zagreb, 153-208
- Szavits-Nossan, A., Stanić, B. (2002.) *Geotehničko projektiranje prema Eurokodu 7*. U M. Mulabdić (ur.) Geotehnika kroz Eurokod 7, Priopćenja 3. Savjetovanja Hrvatske udruge za mehaniku tla i geotehničko inženjerstvo, 2.-5.listopad 2002., Hvar, 199-208
- Šimić, V. (2002.) *Otpornost materijala I*. Školska knjiga, Zagreb
- Šuklje, L. (1979.) *Objašnjenje pravilnika o tehničkim normativima za projektiranje i izvođenje radova kod temeljenja građevinskih objekata*. Jugoslavensko društvo za mehaniku tla i temeljenje, Sarajevo
- Terzaghi, K. (1920.) *Old Earth Pressure Theories and New Test Results*. Engineering News Record, Vol. 85, 632.
- Terzaghi, K. (1934.) *Retaining Wall Design for Fifteen-Mile Falls Dam*. Engineering News Record, May 17: 632-636
- Terzaghi, K. (1943.) *Theoretical soil mechanics*. John Wiley & Sons, New York
- Terzaghi, K. (1972.) *Teorijska mehanika tla*, Naučna knjiga. Beograd
- Terzaghi, K., Peck B.R. (1967.) *Soil mechanics in ingeneering practice*. J. Wiley, New York
- Timošenko, S.S. (1965.) *Historija otpornosti materijala*. Građevinska knjiga, Beograd
- Tomlinson, M. J. (1980.) *Foundation Design and Construction*. Pitman Press, Boston, London.
- Tschebotarioff, G.P. (1973.) *Foundations, Retaining and Earth Structures*, sc. ed. McGRAW-HILL, New York, London, Toronto
- Vidal, H. (1969.) *The Principle of Reinforcement Earth*. Higway Res. Rec., 282: 1-16.
- Vrkljan, I., Nonveiller, E., Szavirs-Nossan, A., Lisac, Z., Višić, I. (1983.) *Controlled sinking of an open end caisson in weak rock*. 5. međunarodni kongres mehanike stijena, Međunarodno društvo za mehaniku stijena, Melbourne, D 337-D342
- Weissenbacg, A. (1975.) *Baugruben, Teil I, Konstruktion und Bauausführung*. Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin
- Werkos (2002.) *Tensar geomreže u graditeljstvu*. Vodič za proizvode i njihovu primjenu, Werkos, Osijek

- Whiffin, A.C. (1954.) *The pressure generated in soil by compaction equipment*. Symp. Dynamic testing od Soils; STP No. 156, ASTM, Philadelphia, 186-204
- Williams (2005).: <http://www.williamsform.com>
- Williams, G.W., Duncan, J.M., Sehn, A.L. (1987.) *Simplified chart solution if compaction – induced earth pressures on rigid structures*. Geotechnical Engineering Raport, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg
- Wilson S. D. (1974.) *Flexible earth-retaining structures*. U R.B. Peck, W.E. Hanson i T.H. Thornburn (urednici), Foundation engineering, J. Wiley & sons, New York, 446-472
- Yahiro, T., Yoshida, H., Nisihi, K. (1975.) *The developments and application of a Japanese grouting system*. Water power & Dam Construction, (83), 56-59
- Zakladani Staveb (1998.) *Monografija povodom 30 godina postojanja*. Prag
- Zakladani staveb (1999.) *Propagandni materijal*, Prag
- Žlender, B., Macuh B. (2004.) *Analiza potpornih konstrukcij po standardu EN 1997-1*. U M. Mulabdić (ur.) Geotehnika kroz Eurokod 7, Priopćenja 3. Savjetovanja Hrvatske udruge za mehaniku tla i geotehničko inženjerstvo, 2.-5.listopad 2002., Hvar, 209-217

WEB:

<http://www.bauer-spetialtiefbau/at/dt/spetialtiefbau/bauverfahren/pdf>

<http://www.kringsverbau.de>

<http://www.pilosio.com>

[http://www.sharjah.ac.ae/courseware/civil\\_eng/AdvFoundations/webpage/chap6/raf\\_eqs.pdf](http://www.sharjah.ac.ae/courseware/civil_eng/AdvFoundations/webpage/chap6/raf_eqs.pdf)

<http://www.kingston.ac.uk/~ku00323>

[http://www.williamsform.com/Ground\\_Anchors/Polyester\\_Resin\\_Rock\\_Anchors/polyester\\_resin\\_anchors.html](http://www.williamsform.com/Ground_Anchors/Polyester_Resin_Rock_Anchors/polyester_resin_anchors.html)

<http://www.zakladani.cz>