

# Temeljenje zgrada na slabonosivom tlu

---

**Mamić, Magdalena**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:078355>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-09-09**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,  
University of Zagreb](#)



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**GRAĐEVINSKI FAKULTET**  
**ZAGREB**

**ZAVRŠNI RAD**

Magdalena Mamić

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**GRAĐEVINSKI FAKULTET ZAGREB**

**ZAVRŠNI RAD**

**TEMELJENJE ZGRADA NA SLABONOSIVOM TLU**

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Silvio Bašić

Student:

Magdalena Mamić

Zagreb, rujan 2023.

**UNIVERSITY OF ZAGREB**  
**FACULTY OF CIVIL ENGINEERING**

# **FINAL PAPER**

**FOUNDATION OF BUILDINGS ON LOW-BEARING SOIL**

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Silvio Bašić

Student:

Magdalena Mamić

Zagreb, September 2023.



## TEMA ZAVRŠNOG ISPITA

Ime i prezime studenta: **Magdalena Mamić**

JMBAG: **0082063830**

Završni ispit iz predmeta: **Visokogradnje**

Naslov teme  
završnog ispita:

HR	<b>Temeljenje zgrada na slabonosivom tlu</b>
ENG	<b>Foundation of buildings on low-bearing soil</b>

Opis teme završnog ispita:

Gradnja na tlu slabe nosivosti za posljedicu ima primjenu posebnih tehničkih rješenja kojima se osiguravaju svi nužni zahtjevi za građevinu u pogledu njene stabilnosti i mehaničke otpornosti. Također, u ekstremnim uvjetima nužne su i prilagodbe nadzemne konstrukcije kako bi se ona maksimalno olakšala. U radu se istražuju moguća tehnička rješenja kojima se omogućuje gradnja na tlu slabe nosivosti, a teoretske postavke istraživanja se prezentiraju kroz analizu nekolicine primjera izvedenih zgrada.

Datum: **14.04.2023.**

Komentor:

(Ime i prezime komentora)

Mentor: **izv.prof.art.dr.sc. Silvio Bašić**

(Ime i prezime mentora)

(Potpis mentora)

## SAŽETAK

Gradnja na tlu slabe nosivosti za posljedicu ima primjenu posebnih tehničkih rješenja kojima se osiguravaju svi nužni zahtjevi za građevinu u pogledu njene stabilnosti i mehaničke otpornosti. Također, u ekstremnim uvjetima nužne su i prilagodbe nadzemne konstrukcije kako bi se ona maksimalno olakšala.

U radu se istražuju moguća tehnička rješenja kojima se omogućuje gradnja na tlu slabe nosivosti, a teoretske postavke istraživanja se prezentiraju kroz analizu nekolicine primjera izvedenih zgrada.

Ključne riječi: slabo nosiva tla, temelji, tehnička rješenja, nosivost, ekonomičnost

## **ABSTRACT**

Construction on soil with weak load-bearing capacity results in the application of special technical solutions that ensure all the necessary requirements for the building in terms of its stability and mechanical resistance. Also, in extreme conditions, adjustments to the overhead structure are necessary to make it as light as possible.

The paper investigates possible technical solutions that enable construction on weak load-bearing soil, and the theoretical assumptions of the research are presented through the analysis of several examples of constructed buildings.

Keywords: low-bearing soils, foundation, technical solutions, load-bearing capacity, cost-effectiveness

# SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. POVIJEST TEMELJENJA.....	2
2.1. POVIJESNI PREGLED.....	2
2.2. VRSTE TEMELJA.....	3
2.3. METODE OČUVANJA.....	8
3. SLABO NOSIVA TLA.....	13
3.1. STIŠLJIVA TLA.....	13
3.2. KOLAPSIBILNA TLA.....	17
3.3. EKSPANZIVNA TLA.....	20
4. PLITKI I DUBOKI TEMELJI.....	24
5. TEHNIČKA RJEŠENJA ZA TEMELJENJE ZGRADA NA SLABONOSIVOM TLU....	31
5.1. ZAMJENA MATERIJALA.....	31
5.2. ŠLJUNČANI STUPOVI.....	33
5.3. KOMBINIRANO TEMELJENJE - TEMELJNA PLOČA PILOTI.....	36
5.4. STABILIZACIJA TLA DODACIMA.....	38
6. PRIMJERI TEMELJENJA ZGRADA NA SLABO NOSIVOM TLU.....	39
7. ZAKLJUČAK.....	43
8. IZVORI.....	44
9. POPIS SLIKA.....	46



## 1. UVOD

Temeljenje zgrada na slabonosivom tlu podrazumijeva temeljenje objekata visokogradnje na terenima sa smanjenom sposobnošću nosivosti čiji su uzrok fizikalna i kemijska svojstva tla te različiti vanjski čimbenici koji utječu na ponašanje tla. Osim na temeljenje zgrada, slabonosiva tla imaju utjecaj i na temeljenje različitih geotehničkih i hidrotehničkih objekata te prometnica primjerice tunela, nasipa i kolničkih konstrukcija. Slabonosiva tla pronalazimo u močvarnim i muljevitim područjima kao i na obalama rijeka i jezera. Glavni uzročnik nepovoljnog ponašanja tla je voda u tlu čije se kretanje i utjecaj na građevinu proučava te bilježi prije same izgradnje. Tri skupine u koje ih je najprikladnije podijeliti su stišljiva tla, kolapsibilna tla i ekspanzivna tla. Glavni problemi na koje se nailazi su diferencijalna slijeganja temelja i temeljnog tla, pukotine i oštećenja čiji su uzroci različita stanja i ponašanja tla kao što su širenje, skupljanje, bubrenje i zamrzavanje tla.

Od davnina se nastojalo pronaći prihvatljiva rješenja za osiguranje građevina u takvim tlima pa su se tako primjerice koristili drveni stupnjaci koji su preteča današnjih pilota. Razvojem tehnologije i materijala inženjeri su za ovakve slučajeve tla ustanovili različita tehnička rješenja u sklopu plitkog i dubokog temeljenja uz poboljšanje tla različitim metodama te u ekstremnim slučajevima i olakšanje same konstrukcije. Neka od njih su zamjena materijala, šljunčani stupovi, kombinacija temeljne ploče i pilota te stabilizacija tla dodacima. Neovisno o kojoj se tehnici temeljenja radi, najvažnije je zadovoljiti dva osnovna uvjeta: slijeganje i nosivost. Izbor tehnike ovisi o uvjetima okolnog tla, vrsti građevine koja se gradi, ekonomskim aspektima te projektnom zadatku.

## 2. POVIJEST TEMELJENJA

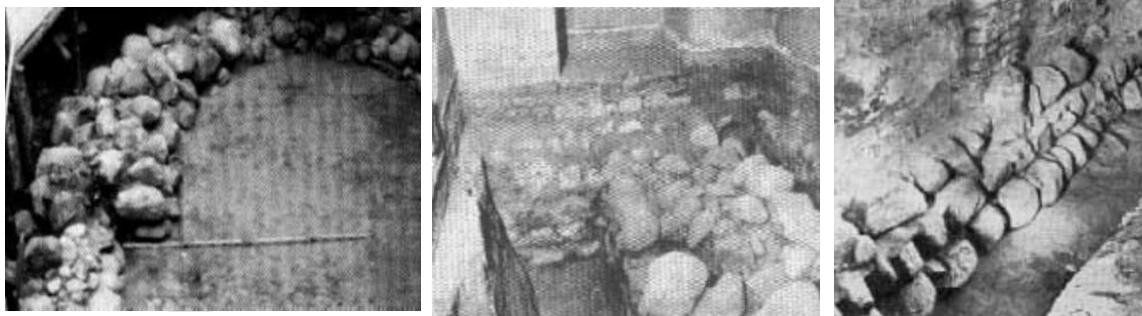
### Povijesni pregled

Temeljenje je jedna od najstarijih ljudskih aktivnosti u sklopu građevinarstva koja se primjenjuje još od ranih razdoblja ljudske civilizacije. Stanovnici Švicarske su u neolitiku prije više od 12 000 godina gradili svoje kuće na dubokim drvenim pilotama koje su zabijali mekana tla plitkih jezera kako bi se zaštitili od životinja i ostalih neprijatelja. Nekoliko tisućljeća kasnije, Babilonci su u poplavnim dolinama između Eufrata i Tigrisa pronašli duboko nanosno tlo koje se sleglo pod težinom njihovih građevina. Kako bi prevladali taj problem, pri izgradnji visokih spomenika kao temelj koristili su podlogu od trske koju su nastavili primjenjivati pri izgradnji visokih naselja čime su izbjegli negativne posljedice nestabilnog tla. Još jedan poznati primjer napredne izgradnje temelja su Egipatske piramide koje su temeljenje na kamenim blokovima. Stari Grci su također upotrebljavali kamen za izradu temeljnih kamenih platformi i stupova na kojima su izgrađeni brojni hramovi i amfiteatri. Najznačajniji napredak u inženjerstvu temelja ostvario se u antičkom Rimu. Rimljani su uveli stroga pravila i smjernice za izgradnju temelja koristeći napredne tehnike i materijale. Ključna inovacija bila je razvoj puozolanskog betona koji se sastojao od mješavine vapna, pijeska i vulkanske tvari puozolan koja je značajno pojačala trajnost i čvrstoću betona. Ova tehnika postala je nezaobilazna pri izgradnji raznih monumentalnih građevina Rimskog carstva uključujući ceste, mostove, akvadukte i prepoznatljive građevine poput Koloseuma. Ovi povijesni primjeri prikazuju rano ljudsko razumijevanje važnosti temelja u osiguravanju trajnosti i stabilnosti građevina. Tehnike izgradnje temelja razvile su se i postale naprednije tijekom stoljeća što je omogućilo primjenu raznolikih metoda u suvremenim građevinskim projektima. Povijesne su građevine tijekom vremena pretrpjele različita opterećenja kao što su vremenske nepravilnosti, potresi, poplave i ratovi. Neke su se srušile dok druge još uvijek posjeduju brojne pukotine i pate od problema sa stabilnošću. Mnoge od njih zahtijevaju značajniju obnovu i očuvanje zbog velikog kulturnog i povijesnog značaja. Obnova ovakvih građevina vrlo je složen pothvat zbog potrebnog razumijevanja karakteristika temelja i njihove interakcije sa konstrukcijom i okolnim tlom kao i utjecaja naprezanja na građevinu kroz povijest o kojima u većini slučajeva nemamo dovoljno podataka. Projekti obnove provode se od strane stručnih timova iz područja građevinarstva, arhitekture, geologije, arheologije i povijesti te

zahtijevaju kombinaciju povijesnih istraživanja, inženjerskog znanja kao i pažljivu analizu procjene stanja temelja. Ovaj postupak uključuje ne razorna ispitivanja, primjenu različitih mehaničkih modela ponašanja tla i alata za geotehnička ispitivanja, inspekcije na gradilištu te dubinsko poznavanje građevinskih tehnika koje su se koristile u vrijeme kada je građevina izgrađena. Obnova povijesnih građevina zahtijeva balansiranje očuvanja izvornog karaktera građevine i osiguranje njihove stabilnosti za nadolazeća razdoblja. [1]

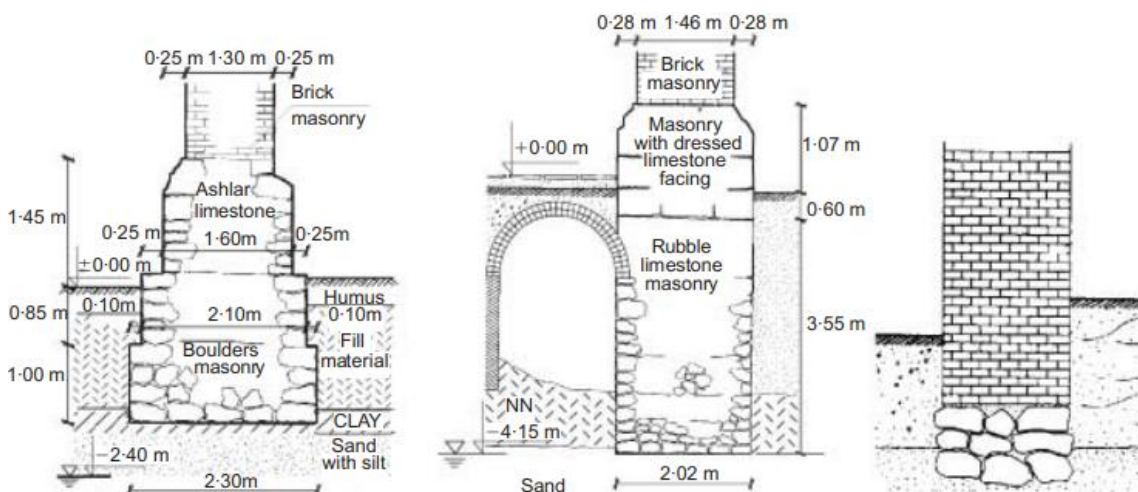
### Vrste temelja

Većina srednjovjekovnih zgrada gradila se na plitkim temeljima. U predromaničkom razdoblju (od 5. do 10. stoljeća) uobičajeni način temeljenja bio je ispuniti iskop otpadom od kamena ili šljunka i prelići ga slabim mortom. Širina iskopa bila je jednaka ili malo šira od podzemnog dijela građevine iz razloga što je širina temelja više ovisila o veličini raspoloživog prostora nego o opterećenju i nosivosti. Za romaničke su temelje od 13. do 11. stoljeća bili karakteristični krupni kameni blokovi koji su se postavljali s vanjske strane iskopa dok se sredina zapunjavala šljunčanim i kamenim otpadom. Temelj bi se naposljetku prelio vapnenom ili ilovačko-vapnenom žbukom. Primjeri takvih temelja prikazani su na slikama koje prikazuju temelje triju crkava u Poljskoj iz tog razdoblja u gradovima Glogovu, Mogilnou i Trzemesznom. [1]



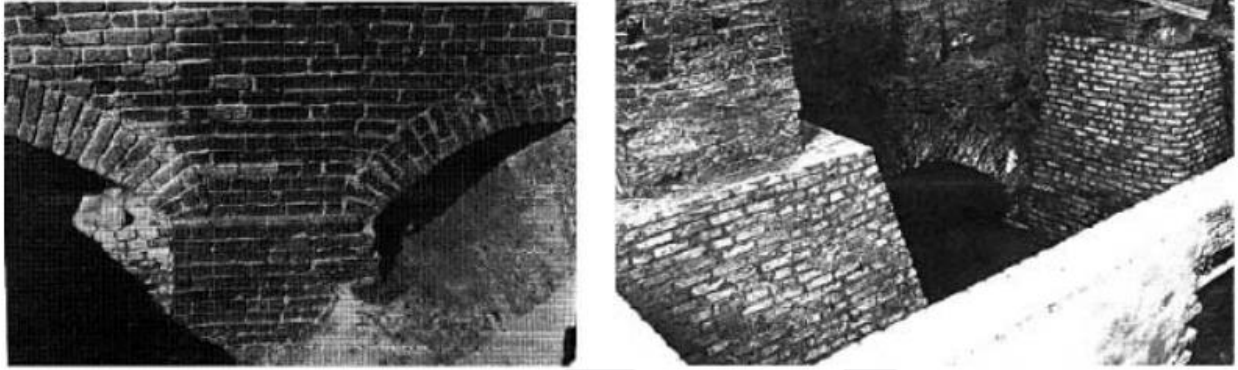
**Slike 1, 2 i 3** Temelji poljskih crkava u Glogovu, Mogilnou i Trzemesznom

Gotički temelji bili su adekvatniji, upotrebljavao se kvalitetniji mort, kameni blokovi bili su bolje oblikovani, a kasnije je u uporabu ušla i opeka. Više pažnje se posvetilo odabiru lokacije te povoljnijeg temeljnog tla. Vanjski zidovi temelja nerijetko su se oblagali klesanim kamenom. Mnoge povijesne zgrade nisu imale temelje već su se oni izrađivali kao produžeci zidova podruma te su bili jednake širine ili neznatno širi od same širine konstrukcije. Na slici je prikazan primjer takvog temelja gotičke Bazilike Blažene Djevice Marije u Krakowu (slika (b)) te Utvrde u Malborku nedaleko od Gdanska (slika c)).



**Slike 4 i 5** Primjeri gotičkih temelja Bazilike Blažene Djevice Marije u Krakowu i Utvrde u Malborku

Neki su se temelji od vlage štitili zatvaranjem glinom iznad razine podzemne vode što je spriječilo njezin kapilarni uspon do zidova. Gotičke su građevine u nekim slučajevima bile podržane na stupovima i lukovima. Ova se tehnika primjenjivala kada se tijekom iskopavanja naišlo na male izvore podzemne vode ili arheološke ostatke. Tada su se primjenjivali duboki iskopi u obliku stupova koji su se ispunili zidanim konstrukcijama od opeke, kamena i sličnih materijala povezanih mortom. Nakon toga su izgrađeni lukovi koji su povezivali vrhove stupova na određenoj razini. Primjeri takvih lučnih temelja su dvorac u Wrocławu te crkva Sv. Bartola u Gdanjsku. [1]



Slike 6 i 7 Lučni temelji dvorca u Wrocławu i crkve sv. Bartola u Gdanjsku

Renesansne i barokne građevine temeljile su se metodama primijenjenim u prethodnim razdobljima. Prekretnica u inženjerstvu temelja dogodila se u neoklasičnom razdoblju od 18. do 20. stoljeća koje je obilježio tehnološki napredak te primjena novih materijala kao što su hidraulički mort i čelik. [1]

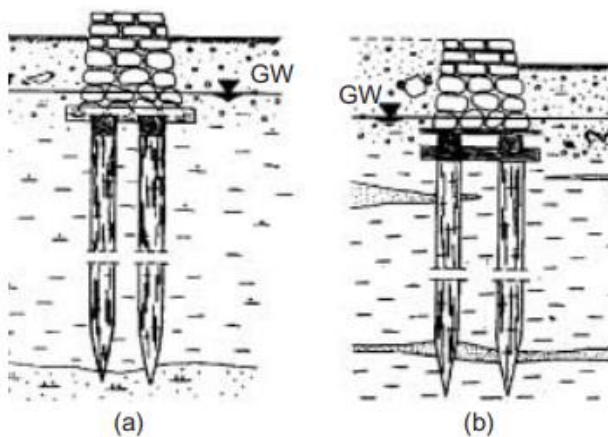
Mnogi povijesni gradovi nalazili su se uz rijeke gdje se pojavljivala visoka razina podzemne vode. Srednjovjekovne tehnike građenja nisu dopuštale iskope ispod nivoa podzemnih voda za postavljanje temelja pa iz tog razloga nije bilo moguće zamijeniti mekane nepovoljne slojeve tla pijeskom ili šljunkom, a učinkovite metode isušivanja iskopanih jama također nisu bile poznate. Iz tog su se razloga upotrebljavali kratki i gusto postavljeni (poput četke) drveni piloti čija je namjena bila zbiti tlo i prenijeti opterećenje u dublje nosive slojeve te time poboljšati nosivost temelja. Takav način temeljenja bio je najviše primjenjivan u gotici iako je poznat još iz antičkog razdoblja. U nekim su se slučajevima slabog i kompresibilnog tla uvjeti poboljšavali utiskivanjem kamenja ili postavljanjem ravnog glinenog sloja ili kaldrme na njegovo dno. Načelno, zgrade građene na mekim, nestabilnim tlima temeljile su se u nekoliko slojeva velikih kamenih blokova ili opeke koji su ležali na drvenim pilotima ili splavovima. Temelji su uglavnom bili u obliku zidova koji su se širili s dubinom sve do podloge od šljunka ili kamenog otpada koja je bila postavljena izravno na sloj mekog tla u koje su zabijeni kratki vertikalni drveni piloti. Ponekad su se šljunak, kameni nabačaj i slabi mort stavljali unutar drvenog okvira te utiskivali u tlo. Drveni piloti postavljali su se ispod najniže očekivane razine podzemne vode jer je već tada bilo poznato da drvo ne trune u vodi. Izrađivali su se od različitih vrsta drveta kao što su hrast, bor, joha i bukva te su se nakon uklanjanja grana uz minimalnu obradu zabijali u tlo s tanjim vrhom okrenutim prema dolje. Najjednostavniji tip temelja koji se koristio do 18.

stoljeća sastojao se od gusto postavljenih naoštrenih kratkih pilota duljine 1,5 do 3 metra (slika 10). Drugi tip drvenih temelja, karakterističan za srednji vijek, sastojao se od vodoravnih drvenih nosača koji su bili postavljeni uzdužno i poprečno ispod osnove temelja (slika 11) ili kombinacije kratkih pilota i rešetkastih drvenih nosača (slika 12). Kasnije su uslijedila poboljšanja povezivanjem drvenih elemenata stezaljkama ili uzicama te željeznim rebrima u obliku rešetki. [1]

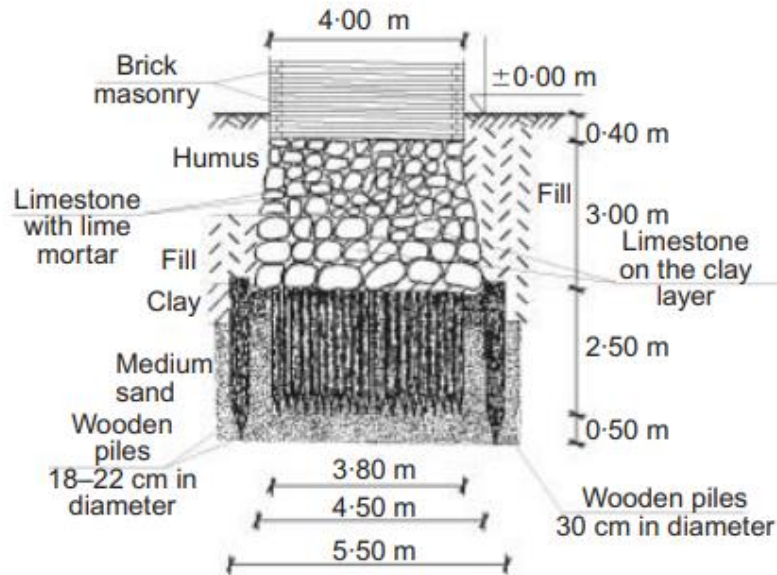


Slike 8, 9 i 10 Povijesni primjeri plitkih temelja

U 16. su se stoljeću počeli koristiti dulji i deblji piloti u kombinaciji s različitim vrstama rešetki koji su mogli prenositi opterećenje u dublje, stabilnije slojeve tla. Na slici 13 prikazan je primjer gotičkog temelja dvorca Malbork u Poljskoj. Zapadni zid načinjen od opeke temeljen je na sloju kamena koji je naslonjen na drvenu konstrukciju. Ona se sastoji od dvije linije pilota dugačkih 3 m te mnogo kraćih stupova postavljenih u sredini čija je svrha zbijanje tla ispod njih. [1]

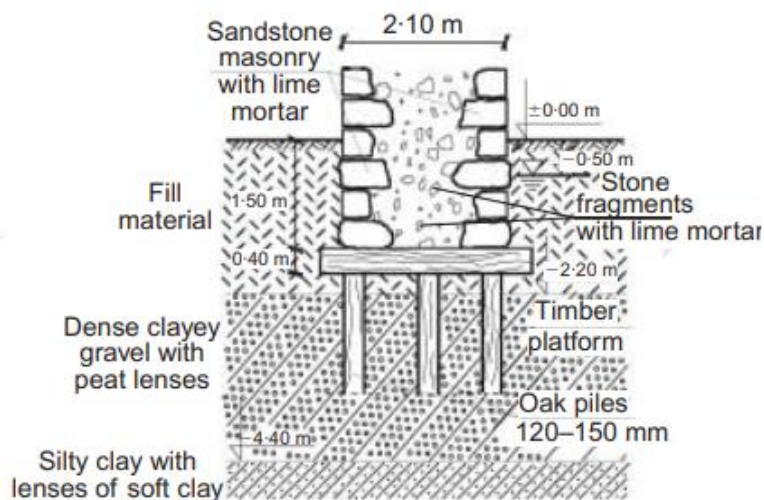


Slike 11 i 12 Povijesni primjeri dubokih temelja



Slika 13 Gotički temelj dvorca Malbork

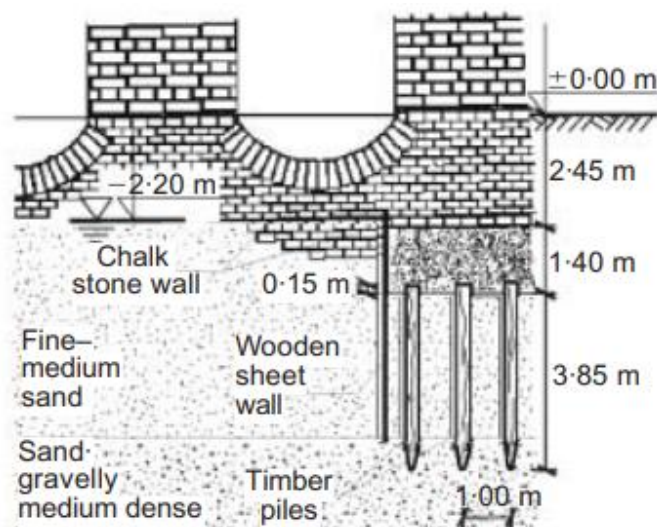
Na slici 14 prikazan je primjer cistercijanskog temelja na kojem je izgrađena cistercijanska opatija Lure u Francuskoj. Zidana konstrukcija izravno je postavljena na drvenu platformu oslonjenu na hrastove pilote promjera 120 do 150 mm i nepoznate duljine. Valja istaknuti da ni u ovom slučaju nije izvedeno proširenje temelja u odnosu na zid što i dalje ne pruža dovoljnu potporu građevini. Opatija je preuređena u 18. stoljeću, no ovakav način temeljenja zadržan je i tada. [1]



Slika 14 Temelj cistercijanske opatije Lure u Francuskoj



Temelj zgrade Reichstaga u Berlinu primjer je modernih temelja za koje su korišteni raznoliki temeljni elementi. Svrha im je učinkovito raspodijeliti težinu i opterećenje različitih dijelova konstrukcije na temelj pod njom te optimizirati upotrebu materijala. To se postiglo regulacijom debljine temelja ovisno o težini konstrukcije iznad njih te strateškim postavljanjem obrnutih lukova. Temelji ispod visokih stupova i nosivih zidova bili su veće debljine koja se postupno smanjivala prema dijelovima zgrade s manjom vlastitom težinom. Ova tehnika pomaže ravnomjerno raspodijeliti opterećenje i spriječiti nagle promjene pritiska koje bi mogle dovesti do pojave nestabilnosti. Obrnuti lukovi postavljali su se unaprijed određenim rasporedom kako bi usmjerili opterećenje zgrade prema temelju na način da uravnotežuju raspodjelu sila čime se osigurava stabilniji potporni sustav. Prije same izgradnje Reichstaga izvedeno je nekoliko iskopa i bušotina te su provedene analize stanja tla. Također, neki su se dijelovi iskopa štitili drvenim zidnim oblogama. [1]



Slika 15 Temelj zgrade Reichstaga u Berlinu

## Metode očuvanja

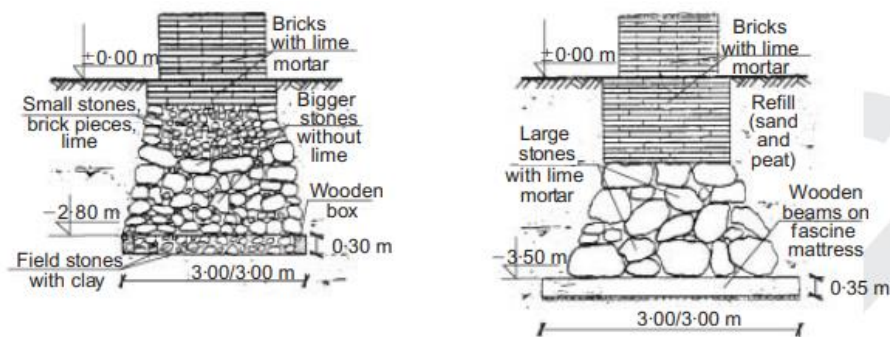
Povijesne zgrade i danas prolaze kroz različite promjene. Uzroci njihovog propadanja kroz povijest raznovrsnog su podrijetla, a ponajviše imaju veze s lošim načinom građenja i temeljenja te utjecajem vanjskih čimbenika kao što su promjena svojstava tla, promjene razine podzemne vode, utjecaj padalina, otapanje minerala stijena, prodiranje korijenja biljaka te utjecaj čovjeka u vidu restauratorskih radova, izgradnje susjednih zgrada te nepažljivog korištenja. Promjena



razine podzemnih voda ima najnepovoljniji utjecaj kod građevina na drvenim platformama i pilotima. Primarni je uzrok truljenja drveta posebno ako se temelj nalazi u pjeskovitom tlu, dok je u glinenom tlu taj proces manje izražen. Mnoge su povijesne građevine uništene zbog dugotrajne izloženosti vlazi poradi koje je došlo do propadanja materijala zidova i temelja. Kod zgrada koje su se gradile na temeljima prethodnih objekata došlo je do značajnih diferencijalnih slijeganja uslijed nepravilnog kontakta postojećeg temelja i nove građevine. [1]

Za proces očuvanja povijesnih građevina bitno je odrediti trenutno stanje konstrukcije, posebice temelja, za čije je određivanje potrebno poznavati opterećenja kojima je ona bila izložena tijekom povijesti. U većini slučajeva ih je vrlo teško odrediti zbog nedostatka potrebne dokumentacije, nepreciznih mjerenja u prošlosti te rekonstrukcija koje prekrivaju izvorni oblik građevine. Tip, dimenzije, vrsta materijala, dubina temelja i karakteristike tla određuju se istraživanjem podzemnih slojeva pomoću bušotina i jama. Ostali podaci potrebni za analizu dobivaju se različitim "in situ" metodama u kombinaciji sa modernom tehnologijom kao što su primjerice video kamere za određivanje strukture zidova i temelja. Strategija očuvanja temelji se na poboljšanju povijesnih građevina, temelja i temeljnog tla primjenom odgovarajućih metoda koje se prema Calabresiju i d'Agostinou mogu podijeliti u 6 grupa. [1]

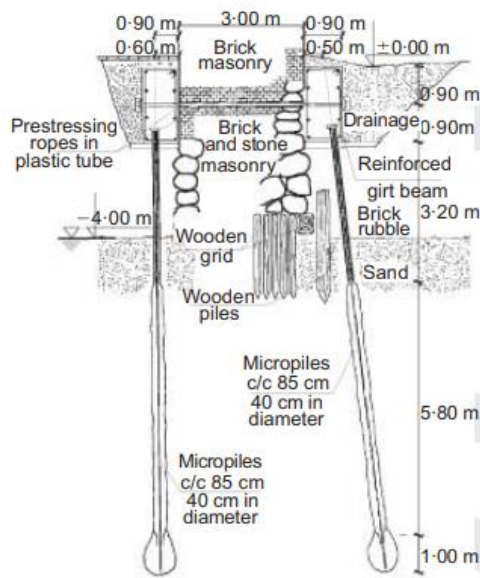
Prva grupa odnosi se na zamjenu cijele povijesne strukture ili njezinog temelja. Ova opcija je ogroman financijski poduhvat i odabire ju se u slučajevima kada je povijesno značenje građevine od iznimne važnosti. Moguće je rastaviti građevinu te ju ponovno izgraditi na drugom mjestu ili ju premjestiti bez rastavljanja. Na slici 18 prikazan je primjer potpune zamjene temelja ispod jednog od stupova crkve svetog Ivana u Gdanjsku izveden prije nekoliko stotina godina.



Slika 16 Zamjena temelja stupa crkve sv. Ivana u Gdanjsku

Nadalje, rekonstrukcija temelja očituje se u ojačanju, produbljivanju te proširivanju temelja. Temelj se ojačava injektiranjem mješavine cementa, pijeska, gline i vode. Produbljivanje temelja koristi se kada u tlu ispod ili oko građevine postoje šupljine ili jame ispunjene vodom koje ga čine nestabilnim. Povećanje dubine temelja opekom primjenjuje se u slučajevima većih oštećenja i pukotina nastalih u samoj građevini. Proširenje baze omogućuje temelju da ostane na postojećoj dubini zbog smanjenja opterećenja po jedinici površine. Ova se tehnika rabi isključivo u slučajevima konstrukcija sa manjim oštećenjima. [1]

Potporna od pilota izrađuje se u vertikalnim cijevnim bušotinama koje se ispune betonom s ojačanjem od čeličnih šipki. Kako bi se prenijelo opterećenje na pilote izrađuju se ploče koje su spojene na stari temelj prednapetom užadi. Danas su za potporu najčešće u uporabi mikropiloti čije su prednosti smanjen rizik od nejednolikog slijeganja za vrijeme ugradnje i relativno mali troškovi. Ova metoda omogućuje rad stroja u skućenom prostoru te ne izaziva razaranje starog temelja. Nedostatak ove tehnike je u tome što se opterećenje u cijelosti oslanja na stari temelj prije nego što se prenese na nove ploče za pilote. U većini je slučajeva potrebna instalacija velikog broja pilota zbog niske nosivosti pojedinog pilota, što može oslabiti povijesnu podlogu. Mikropiloti se sa konstrukcijom koju podržavaju povezuju na način da se buši kroz stari temelj, s jedne ili obje strane starog temelja te se sa zidom spajaju pomoću sidara, poprečnih nosača ili betonskih ploča. [1]

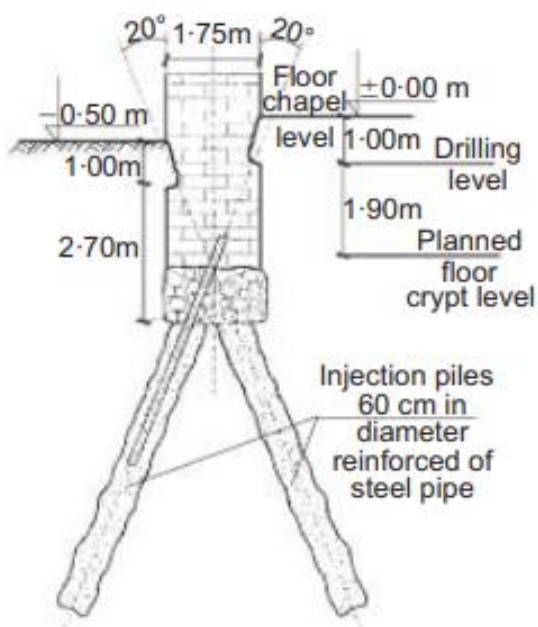


Slika 17 Potpora pomoću pilota dvorca Malbork

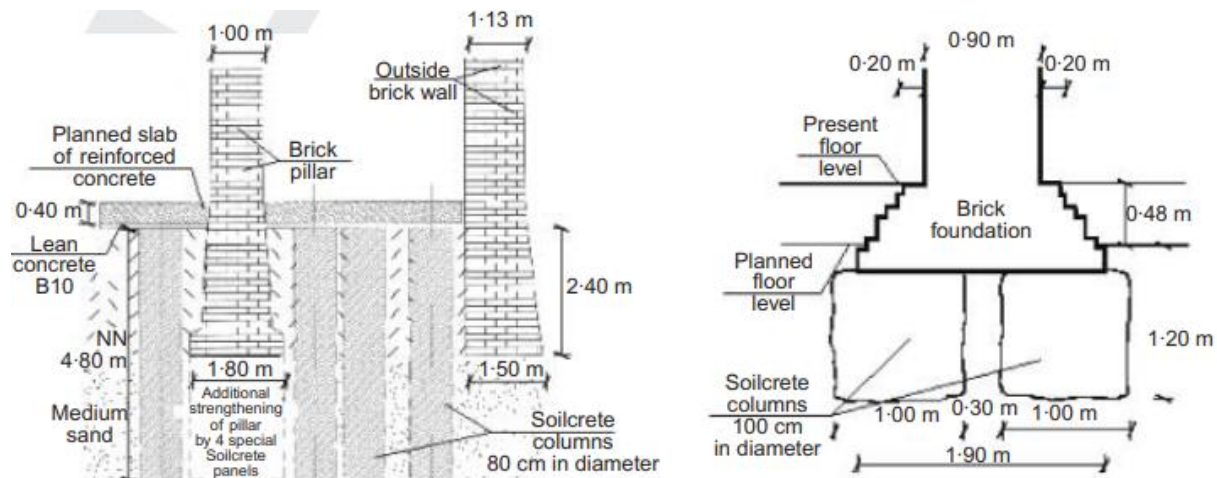


Slika 18 Detalji potpore pomoću pilota dvorca Malbork

Mlazno injektiranje (jet grouting) proces je stabilizacije tla visokotlačnim mlazom suspenzije cementa. Struktura tla razbija se pomoću visoko energetskih mlaznica sa tlakom veličine 20 do 40 MPa te brzinom izlaza mlaza od 100 m/s ili više. Kod potpore temelja starih zgrada pomoću ove tehnike kroz sloj kamenja i opeke provlače se šipke za bušenje i ubrizgavanje injekcijske smjese. Nakon toga se izvedu potporni stupovi promjera oko 3,5 metara u praksi te čvrstoće 1 MPa za organska tla i do 20 MPa za pjeskovita i šljunčana tla. Prije početka radova važno je provesti ispitivanja starih temelja i tla zbog mogućnosti neprihvatljivih dodatnih slijeganja te lokalnog otkazivanja postojećih temelja. [2]



Slika 19 Potpora mlaznim pilotima temelja kapelice dvorca u Raciborzu



Slike 20 i 21 Potpora pilotima za žitnicu u Bydgoszczu i hotel u Varšavi

Ostale metode potpore povijesnih građevina zasnivaju se na procesu zamjene lošeg tla ispod postojećih građevina, poboljšanju tla različitim kemijskim spojevima i primjeni drenažnog sustava. Vađenje tla primijenilo se za stabilizaciju tornja u Pisi tako da su se male količine tla precizno uklanjale s određenih mjesta ispod temelja pomoću cijevi. Za drvene temelje primjenjuje se metoda EUROBOR. To je suspenzija koja se sastoji od borovih spojeva koji ubijaju sve korozivne mikrobe i gljivice te štite drvo od ponovne infekcije. Kod sitnozrnih tala koja se urušavaju pod utjecajem vlage primjerice prapor ili les poduzimaju se posebne mjere za održavanje niske razine podzemnih voda kao što su ugrađivanje drenažnih sustava te sustava za odvodnju podzemnih voda. [1]

### 3. SLABO NOSIVA TLA

Slabo nosiva tla uključuju sve vrste tala koja ne mogu zadovoljiti minimalne zahtjeve kvalitete koje zahtijeva neki projekt ili opće vrijedeći propisi. Većinom se javljaju na močvarnim i muljevitim terenima primjerice riječna ušća, plitke lagune, obale jezera, stara korita naknadno zapunjena nanosom i slične lokacije. Za temeljenje na takvim tlima potrebno je odabrati posebna tehnička rješenja koja će osigurati nosivost i stabilnost temeljnog tla i građevine. Slabo nosiva tla možemo podijeliti u tri skupine ovisno o problematici koja se u njima javlja, a to su: stišljiva tla, kolapsibilna tla te ekspanzivna tla. [3]

#### Stišljiva tla

Stišljiva tla su tla vrlo osjetljiva na slijeganje. U prvoj skupini stišljivih tala nalaze se glina, mulj i treset. S obzirom da se takva tla nalaze na obalama rijeka, jezera te močvarnim područjima posebna pozornost se mora obratiti na visok postotak organske tvari (tresetna tla) te utjecaj vode na tlo i buduću građevinu. Zbog niskih značajki zemljišta na kojima se nalaze ovakva tla često dolazi do poplava što se rješava podizanjem razine tla dodavanjem zbijene ispune od povoljnijeg materijala. Pri dodavanju većih količina zbijene ispune javljaju se značajnija opterećenja tla koja mogu uzrokovati značajnija slijeganja što se mora imati u vidu pri projektiranju građevine.

Primjer takve građevine nalazimo u New Jerseyu gdje je 1980ih na obali rijeke Hackensack izgrađen sportski kompleks Meadowlands. Zabilježeno slijeganje tla na tom području iznosilo je čak 0,15 m sljedećih 10 godina od postavljanja ispune. [3]



Slika 22 Sportski kompleks Meadowlands



Ako se odluči izgraditi temelj na glinenom tlu, potrebno je uzeti u obzir njegovu tendenciju uzdizanja i ne zaboraviti na mjere koje mogu neutralizirati njegov utjecaj na zgradu. Glavni problem je neravnomjerno uzdizanje glinenog tla. Kada se tlo zamrzne tijekom hladne sezone, volumen tekućine u njemu poveća se za gotovo 10% čime tlo potiskuje ili naginje armirano betonske konstrukcije. [4]



**Slika 23** Oštećenja građevine uslijed uzdizanja glinenog tla

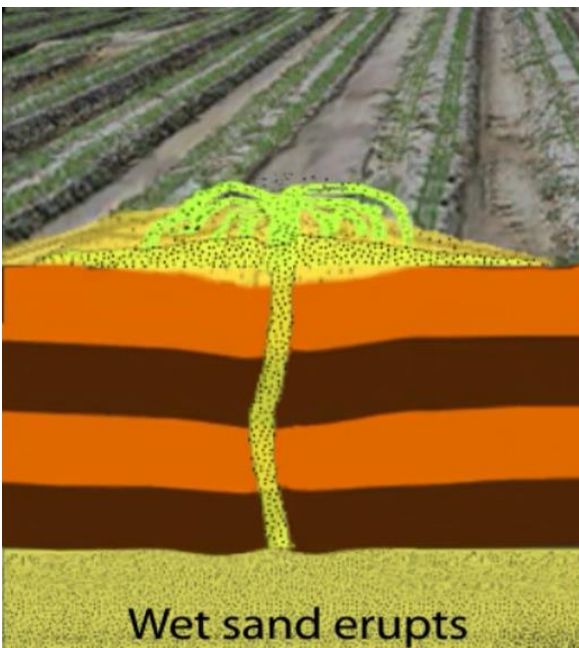
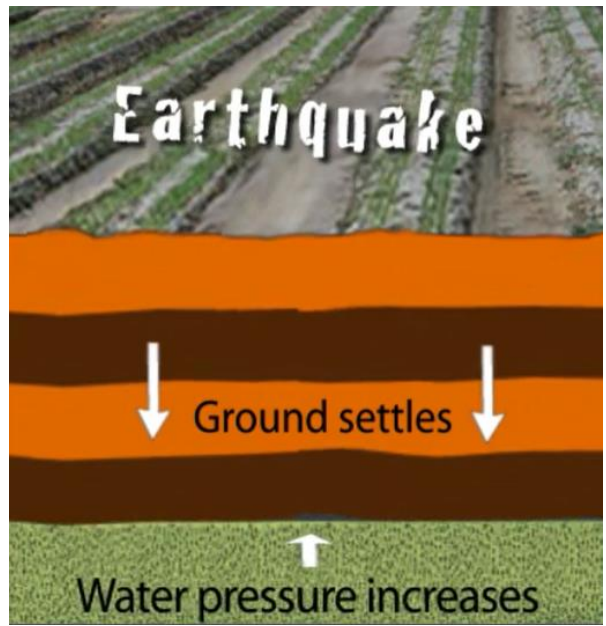
Mjere specifične za ovu vrstu tla usmjerene su na sprječavanje bubrenja mraza. Često se prakticira uklanjanje gornjeg sloja zemlje na mjestu budućeg temelja. Zamjenjuje se mješavinom pijeska i šljunka. Debljina takvog jastuka može biti 0,4-0,8 m. U područjima koja karakterizira veliki porast podzemne vode, obilje oborina ili drugi izvori vlage, takva struktura mora biti opremljena sustavom odvodnje. [4]

Slabo zasićene naslage pijeska koje se nalaze u seizmički aktivnim regijama sklone su ukapljivanju i taloženju pri jakom pomicanju tla. Proces ukapljivanja u pješćanim vulkanima dovodi do katastrofalnih posljedica potresa. Godine 1989. potres Loma Prieta na centralnoj obali Kalifornije uzrokovao je masovnu štetu na imovini i brojne smrtne slučajeve. Prouzrokovana pustoš bila je povezana s pješćanim vulkanima, budući da su se vidjele velike pukotine, a pijesak i voda izbacivani su iz tih pukotina u nečemu nalik vulkanskim fontanama. [5] [6]



Slike 24 i 25 Posljedice potresa Loma Prieta 1989. godine

Uzrok nastanka pješčanih vulkana pripisuje se likvefakciji – pojavi koja se javlja u rahlim, vodom zasićenim pijescima, uskog granulometrijskog sastava tijekom cikličkih promjena naprezanja uzrokovanih potresom. Cikličke promjene naprezanja uzrokuju vibracije tla što rezultira smanjenjem čvrstoće na smicanje i pretvaranjem tla u viskoznu tekućinu. Glavni faktori koji utječu na pojavu likvefakcije su stupanj zbijenosti tla, veličina čestica i stupanj zasićenosti vodom. Tlo mora biti ralo, zasićeno vodom te na dubini od 0 do 10 m ispod površine tla. Kada se uzmu u obzir svi ovi faktori, krupnozrnati materijali, kao što je pijesak najpodložniji su procesu likvefakcije. Razlog tomu je velika poroznost krupnozrnih materijala čije šupljine mogu primiti veći postotak vlage od sitnozrnih. Ako je takav materijal gotovo potpuno zasićen vodom te dođe do udara seizmičkog vala, dolazi do gubitka posmične čvrstoće tla. Čestice tla se tada počinju slobodno kretati u vodi te se tlo ponaša kao viskozna tekućina. Jačina potresa također igra veliku ulogu u mogućnosti pojave likvefakcije u tlu koje joj je sklono. Zbog toga je, osim svojstava tla, potrebno odrediti stupanj seizmičnosti područja. Najrašireniji način prevencije pojave likvefakcije je ugradnja šljunčanih stupova te vertikalnih šljunčanih drenova. Takvo se tlo također može kemijski stabilizirati cementom, no ova metoda nije u čestoj upotrebi zbog ekonomske neisplativosti. [7]



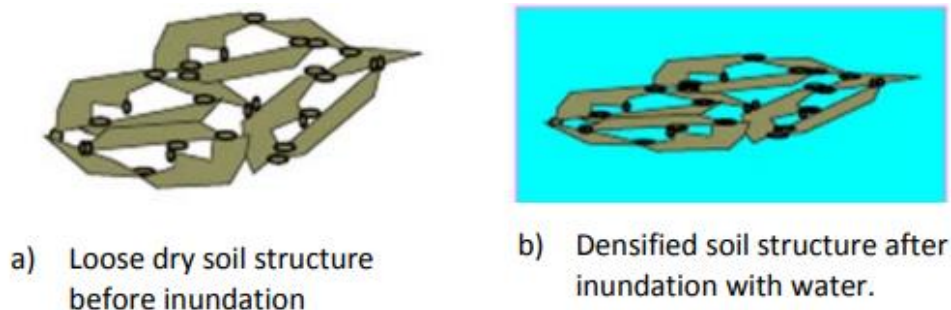
Slike 26, 27, 28 i 29 Nastanak pješčanih vulkana



Rješenja za temeljenje na stišljivom tlu pronalazimo u sklopu plitkog i dubokog temeljenja te poboljšanja temeljnog tla. Za slučaj dubokog temeljenja primjenjuju se piloti koji prodiru u dublje slojeve tla u kombinaciji sa ispunom za podizanje razine tla iznad razine poplave. Negativno trenje (prema dolje) pilota s tlom, koje nastaje kao posljedica slijeganja rješava se premazivanjem plašta pilota posebnim premazima. U velikoj upotrebi kod ovih vrsta tla su cijevni piloti koji se utiskuju u tlo. Nakon što se utisnu slijedi uklanjanje tla unutar cijevi pilota te se na to mjesto umeću nosivi piloti manjeg promjera. Kod plitkog temeljenja problem slijeganja rješava se nanošenjem predopterećenja na tlo, no zbog male propusnosti gline taj proces može biti dugotrajan što se rješava umetanjem pješčanih drenova. Metode poboljšanja tla koje se koriste u ovakvim slučajevima tla su uklanjanje i zamjena materijala, privremeni nasipi, vibrozbijanje te kemijska stabilizacija. Uklanjanje i zamjena materijala izvodi se kada je nepovoljan sloj tla relativno malen, razina podzemne vode duboka te zamjenski materijal lako dostupan. Privremeni nasipi grade se na mjestima planiranog objekta te se uklanjaju prije početka njegove izgradnje. Cilj je da na takvom prekonsolidiranom tlu buduća slijeganja budu znatno manja. Vibrozbijanje se koristi za rahla pjeskovita tla dok se kemijskom stabilizacijom glina i sitni pijesak miješaju s vapnom ili pepelom iz termoelektrana (PFA) te vodom u porama tla kako bi se tlo ojačalo i time smanjilo slijeganje. [3]

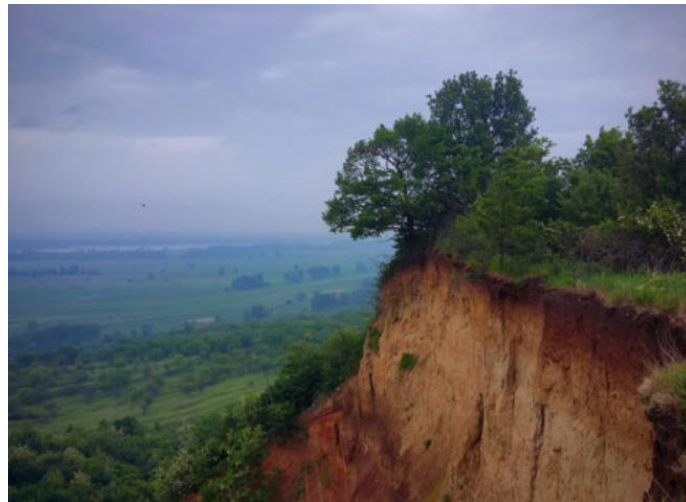
### Kolapsibilna tla

Kolapsibilna tla su djelomično zasićena tla koja u suhom stanju imaju dobru čvrstoću i stabilnost, dok pod utjecajem vlage dolazi do njihovog slijeganja ili urušavanja. Zapremninska težina manja im je od  $16 \text{ kN/m}^3$ . Labave su strukture te nastaju mehanizmom taloženja pod utjecajem vode (aluvijalno tlo) ili gravitacije (koluvijalno tlo). [8]



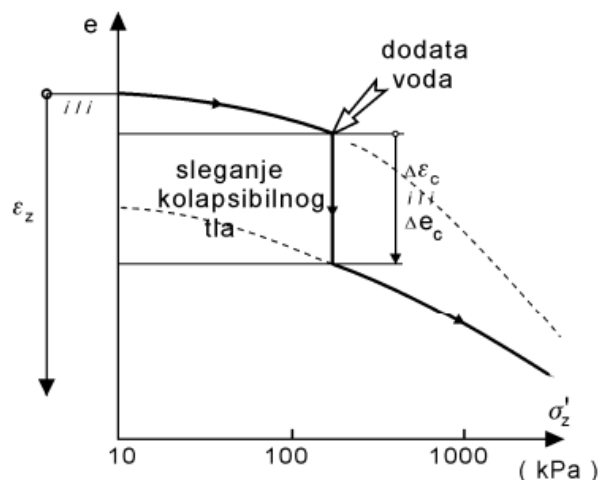
Slike 30 i 31 Tlo prije i nakon vlaženja

Primjeri ovakve vrste tla su prapor ili les te opekarska glina. Les kao najrasprostranjeniji je vrlo sitna eolska naslaga praha blijedožućkaste ili žućkaste boje sa promjenjivim sadržajem pješčanih i glinenih frakcija čija su zrnca slabo vezana glinenim ili karbonatnim vezivom. Pokriva oko 10 % površine Zemlje. U Europi se nalazi na područjima Njemačke, Poljske, zemalja Beneluksa te u Panonskoj nizini, u SAD-u ga ima uz riječne doline Missisipija i Missourija, a u Hrvatskoj u Podunavlju, na Bilogori, u zaobalju Zadra, te na otocima Korčuli; Mljetu, Susku, Unijama i Srakanama. [9]



**Slika 32** Prapor ili les

Kada se prepozna mogućnost prisutnosti kolapsibilnih tala provode se ispitivanja neporemećenih uzoraka tla u edometru. To je uređaj koji služi za ispitivanje stišljivosti tla pod određenim opterećenjem u uvjetima spriječenih horizontalnih deformacija. Sa relativno malom prirodnom vlažnošću uzorak lesa pokazuje malu do umjerenu stišljivost u području normalnih napreznja 100 do 200 kPa. Kada se pri takvom stanju napreznja doda voda u edometar dolazi do relativno velikog slijeganja uzorka zbog omekšavanja glinenog veziva između zrna i njihovog relativnog pomicanja ka stabilnijoj, zbijenijoj konfiguraciji. Ako su deformacije veće od 1 % smatra se da les ima nestabilnu strukturu i da zbog toga pri vlaženju dolazi do strukturnog kolapsa skeleta tla uz smanjenje zapremninske težine. [8]



**Slika 33** Strukturni kolaps tla pri vlaženju u edometru

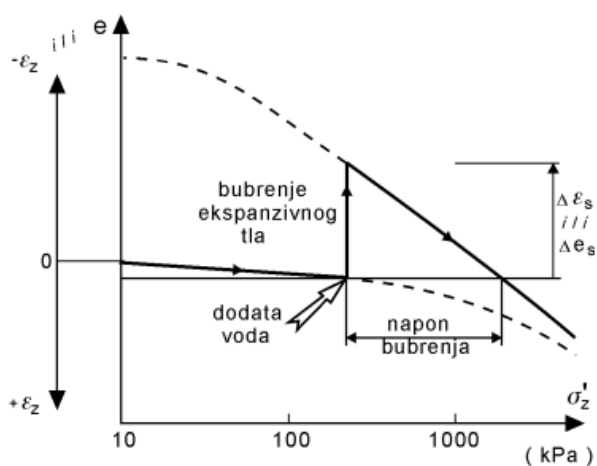
Slijeganje tla uslijed strukturnog kolapsa može imati vrlo štetne posljedice po građevinske objekte. Uzroci slijeganja su ovlaživanje tla ispod građevine zbog incidentnog procurivanja vodovodnih ili kanalizacijskih cijevi, neadekvatno izveden sistem za evakuaciju vode s krovnih površina tako da voda prodire u područje temelja, kondenzacija vode na cijevima instalacija u podrumskim prostorijama uz nedovoljnu izolaciju poda te kondenzacija i akumulacija vlage ispod građevine što dovodi do polaganog i postupnog povećanja slijeganja. Kada se bavimo kolapsibilnim tлом koje će biti izloženo vlaženju na dubinama manjim od 2 m uobičajene zaštitne mjere su prethodno vlaženje tla, zbijanje tla teškim valjcima te snažnim nabijanjem, tretiranje tla otopinama natrijevog silikata ili kalcijevog klorida koje mijenjaju svojstva tla čineći ga netopivim u vodi. U slučaju većih opterećenja te pri većim dubinama tla uobičajeno je objekt temeljiti na pilotima. Općenito, posebnu pažnju kod kolapsibilnih tala treba posvetiti pravilnom izvođenju sustava za odvodnju atmosferskih voda s krovnih i drugih površina te kanalizacijskih i vodovodnih instalacija u području objekta. [10]

## Ekspanzivna tla

Ekspanzivna tla su tla koja se šire odnosno bujaju pri vlaženju, a sušenjem se skupljaju što uzrokuje nastanak dubokih pukotina vidljivih na površini koje im daju prepoznatljiv izgled. Glavni predstavnici su djelomično zasićene tvrde visokoplastične gline u čijem se sastavu nalazi montmorilonit koji je glavni uzročnik takvog širenja. Stavljanjem običnog uzorka ekspanzivnog tvrdog tla pri relativno niskom stanju naprezanja u edometar te dodavanjem vode doći će do bubrenja i povećanja zapremninske težine u uzorku. [10]

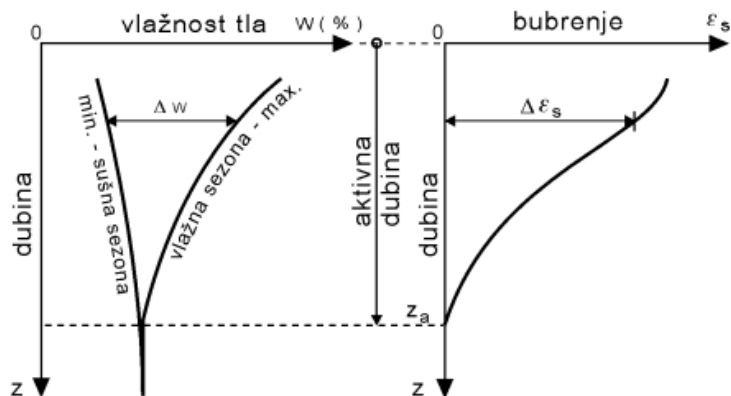


Slika 34 Primjer ekspanzivnog tla



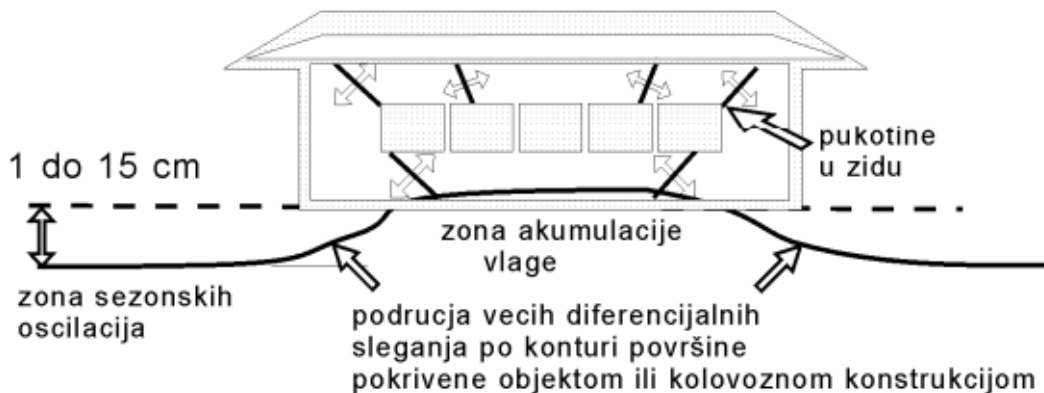
Slika 35 Bubrenje ekspanzivnog tla u edometru

Štete na objektima najraširenije su u područjima s velikim oscilacijama godišnjih doba gdje u jednom dijelu godine prevladavaju visoke temperature i sušna razdoblja dok drugi dio godine obiluje padalinama, povećava se vlažnost zraka, a temperature padaju. Takve promjene rezultiraju cikličkim sušenjem i vlaženjem površinskog sloja terena (aktivne zone) čije dubine mogu sezati i do 15 metara ispod razine tla pri čemu se površina terena može dizati i spuštati čak do 30 cm. [10]



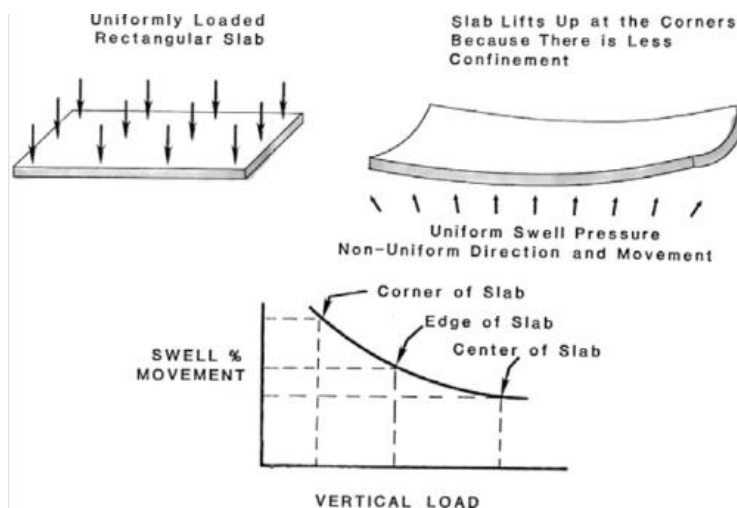
Slika 36 Oscilacije vlažnosti i vertikalne deformacije po aktivnoj dubini

Ako se građevina izgradi tijekom sušnog razdoblja, njezin temelj onemogućava izmjenu vlage s okolinom. S vremenom voda iz okoline migrira prema objektu što dovodi do porasta vlage i bubrenja tla koje uzrokuje podizanje dijelova objekta i značajnija oštećenja. Središnji dio površine koju objekt pokriva izložen je najvećem uzdizanju dok rubni dijelovi osciliraju zbog veće izloženosti promjenama temperature i vlažnosti. [10]



Slika 37 Pomicanja i oštećenja objekta na ekspanzivnom tlu

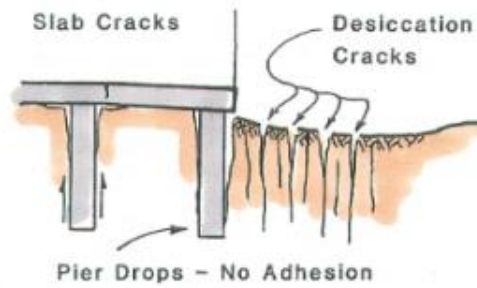
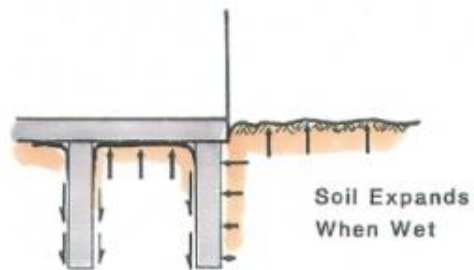
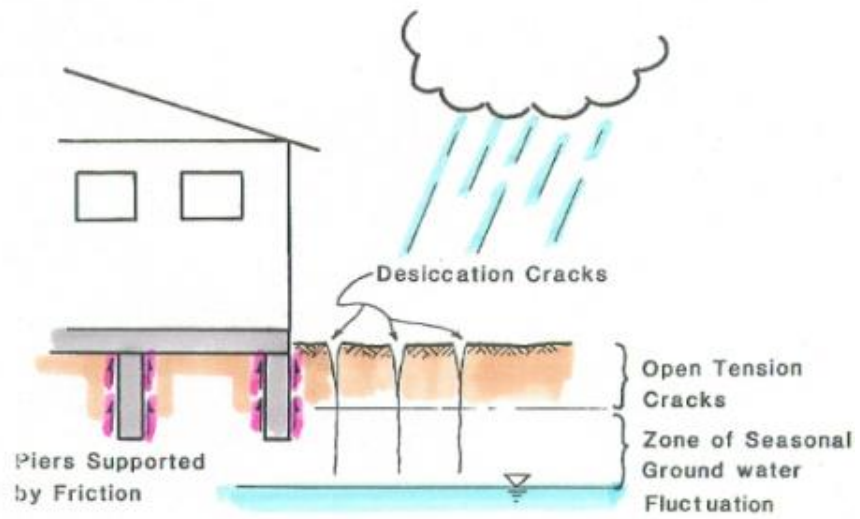
Razlika u opterećenju konstrukcije na pojedinim dijelovima temelja također ima utjecaj na nejednoliko uzdizanje tla. Primjerice kod jednoliko opterećene pravokutne ploče temelja njezini kutovi vršit će tek četvrtinu pritiska na tlo u odnosu na pritisak središnjeg dijela ploče što rezultira pojačanim uzdizanjem kutova u odnosu na središnji dio. [9]



**Slika 38** Ponašanje pravokutnog temelja u ekspanzivnom tlu pod jednolikim opterećenjem

Temelji od bušenih pilota mogu biti povoljno rješenje za ovakva tla ako se izvedu na način da prodiru znatno ispod zona sezonskih fluktuacija vlage uz pretpostavku da će gornji dijelovi pilota izgubiti kontakt s okolnim tlom za vrijeme sušnih razdoblja. Ako se izvede temeljna ploča u kombinaciji s pilotima nedovoljne dubine, piloti u kutovima ploče izdizat će se za vrijeme bubrenja. U razdoblju suše razina podzemne vode se smanjuje što povećava efektivna naprezanja u tlu. Tlo se suši i skuplja čime gornji dijelovi pilota ostaju iznad razine tla. Isto tako dolazi do pojave i širenja pukotina koje uzrokuju smanjenje trenja između pilota i tla. Ako efektivna naprezanja dosegnu maksimalnu vrijednost ili opterećenje konstrukcije premaši preostalo trenje između pilota i tla dolazi do propadanja pilota i sloma konstrukcije.

Građevine najizloženije oštećenjima uslijed bubrenja su lagane građevine, prizemni objekti, prometnice te obloge kanala za navodnjavanje. [9]



**Slika 39** Oštećenje građevine oslonjene na plitkim pilotima

#### 4. PLITKO I DUBOKO TEMELJENJE

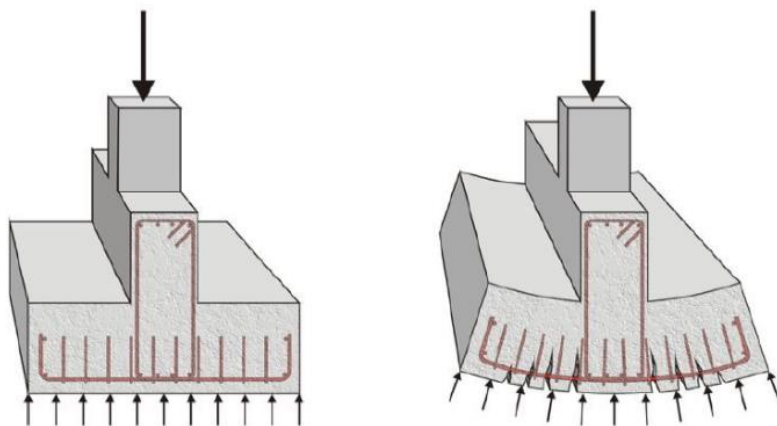
##### Plitko temeljenje

Plitko temeljenje je temeljenje koje prodire dubinu koja je dovoljna da bi se ispunili uvjeti nosivosti i stabilnosti. Prema Eurokodu plitki temelj je svaki temelj čija je širina veća od dubine temeljenja. Mogu biti različitih oblika kao što su temeljna stopa, traka, roštilj ili ploča. Prema tome, dijelimo ih na temelje samce, temeljne trake, roštilje i temeljne ploče. Koriste se kada temeljno tlo to dopušta jer su ekonomičniji izbor od produbljenog i dubokog temeljenja. [11]

##### Temelji samci

Temelji samci prenose opterećenje točkasto u tlo i koriste se za temelje stupova konstrukcije. Biraju se za tla dobre kvalitete ili manje teške građevine. Najčešće su oblika kvadra i grade se od armiranog i nearmiranog betona dok su se u prošlosti izrađivali od kamena i opeke.

Najjednostavniji su i najjeftiniji način temeljenja. Prema krutosti dijele se na krute i fleksibilne temelje. Odnos između krutosti tla i temelja određuje način deformacije i distribuciju naprezanja na mjestu kontakta temelja i tla. Kriterij za klasifikaciju krutosti temelja samca ovisi o modulu reakcije tla ispod temelja te se za  $K > 0,4$  koriste kruti temelji dok su za  $K < 0,4$  u uporabi fleksibilni temelji. S obzirom na važnost brzine izvođenja radova često su u upotrebi predgotovljeni temelji samci koji se postavljaju na pripremljenu podlogu. Predgotovljena temeljna čašica sa stupom se spaja zapunjavanjem mikrobetonom. [12] [13]



Slika 40 Kruti i fleksibilni temelj samac





**Slika 41** Predgotovljena temeljna čaka

### Temeljne trake

Temeljne trake su dugački plitki temelji koji prenose opterećenja zidova i postavljaju se poprečno ili uzdužno u smjeru pružanja zida. Koriste se kada je naprezanje na temeljno tlo ispod temelja samca veliko. Također se izrađuju od armiranog i nearmiranog betona te spadaju u krute temelje. [13]

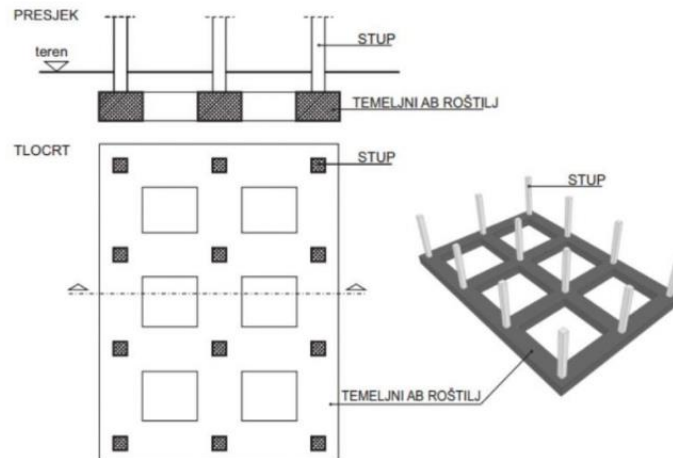


**Slika 42** Postavljanje temeljnih traka

### Temeljni roštilji

Temeljni roštilji su složeni građevinski elementi načinjeni od međusobno povezanih temeljnih traka. Ovaj se tip plitkog temeljenja najčešće koristi kada su stupovi postavljeni u dva pravca približno kvadratnog rastera. Tada se temeljne grede izvode u dva okomita smjera formirajući mrežu temeljnih traka koju nazivamo temeljni roštilj. Ovim se načinom osigurava velika

kontaktna površina temelja i tla te se postiže dobra povezanost konstrukcije u oba smjera. Preuzimaju opterećenje od stupova, a zbog načina na koji su oblikovani progib traka nije ograničen prisustvom zidova pa se svrstavaju u kategoriju fleksibilnih temeljnih konstrukcija. U pravilu se izvode kao armiranobetonske strukture. [12] [13]



Slika 43 Temeljni roštilj

### Temeljne ploče

Temeljne ploče imaju izuzetno važnu funkciju u prijenosu opterećenja zgrada na tlo. Osnovna namjena im je preraspodijeliti opterećenje sa zidova i stupova građevine na veću površinu smanjujući na taj način pritisak na samo tlo. Njihova je uporaba posebice značajna u slučaju slabo nosivog i nestabilnog tla te kada je razina podzemne vode visoka. Temeljne ploče spadaju u grupu fleksibilnih temelja i zbog toga se koriste za tla sa neravnomjernim slijeganjima. Dakle u mogućnosti su prilagoditi se različitim promjenama i slijeganjima tla bez oštećenja gornje konstrukcije. Prednost im je u većoj površini kontakta s tlom što omogućuje bolju preraspodjelu tereta, no to rezultira većim troškovima zbog potrebne veće količine materijala za izradu. Obično se izvode plošno od armiranog betona. Izvode se u kombinaciji s pilotima kod konstrukcija s velikim opterećenjem, primjerice neboderi, te kod tala slabe nosivosti. [13]



**Slika 44** Temeljna ploča

### Duboko temeljenje

Duboki temelji upotrebljavaju se umjesto plitkih temelja u slučajevima kada temeljno tlo nema dovoljnu nosivost, ako je temeljno tlo jako stišljivo ili podložno prekomjernom skupljanju i bubrenju. Probleme rješavaju tako što prenose opterećenje na nosive slojeve u dubini te omogućuju raspodjelu naprezanja po cijeloj visini temelja od površine tla do dna temelja. Primjenjuje se kod složenijih građevinskih zahvata, temeljenja teških građevina kao što su neboderi, mostovi i trgovački centri te u tlima koja su na manjim dubinama nestabilna i nepogodna za temeljenje. Također se koristi kod temeljenja u dubokoj vodi u kombinaciji sa složenijim geotehničkim zahvatima. Prema vrsti duboki temelji dijele se na raščlanjene i masivne. [14]

### Raščlanjeni duboki temelji

Piloti su temeljni elementi u obliku dugačkih vitkih cilindara koji spadaju u skupinu raščlanjenih dubokih temelja te su najčešće korišteni u praksi. Upotrebu pilota zahtijeva tlo s nizom specifičnih uvjeta koji uključuju površinske slojeve slabog tla, visoke razine podzemnih voda, mogućnost erozije tala koja se nalaze u blizini rijeka ili mora, postojanje kanala ili dubokog drenažnog sustava u blizini konstrukcije te nemogućnost iskopa tla do željene dubine zbog loših uvjeta tla. Izrađeni su od čvrstog materijala kao što su beton, drvo i čelik pri čemu svaki tip ima svoje prednosti i nedostatke. Čelik može podnijeti veća opterećenja i dosegnuti veće dubine, ali je često skuplji i podložan koroziji. Drveni piloti su ekonomičniji i jednostavni za instalaciju, no

nisu uvijek u mogućnosti prodrijeti u čvrsto tlo. Koriste se za temeljenje konstrukcija s teškim koncentriranim opterećenjem kao što su visoke zgrade, mostovi i vodotornjevi. Izrađuju se sabijanjem predgotovljenih elemenata u tlo ili bušenjem bušotine te izvođenjem na licu mjesta. Izvode se prema modelu prijenosa opterećenja jedan pilot - jedan stup ili kao grupa pilota u kombinaciji s naglavnom pločom čiji se utjecaj na slijeganja i nosivost pilota u proračunima zanemaruje. Podjela pilota vrši se prema njihovoj funkciji i namjeni na pločaste, nosive i pilote za sabijanje tla. [14]

Pločasti piloti pružaju bočnu potporu umjesto vertikalne te štite od vanjskih utjecaja poput vode i labavog tla. Obično se koriste za izgradnju koferdama, oblaganje jaraka, zaštitu obala i slično. Osim za izgradnju potpornih zidova svrha im je zaštititi obale rijeka od erozije, spriječiti urušavanje temeljnih jama i izolirati temelje od susjednog tla. [15] [16]

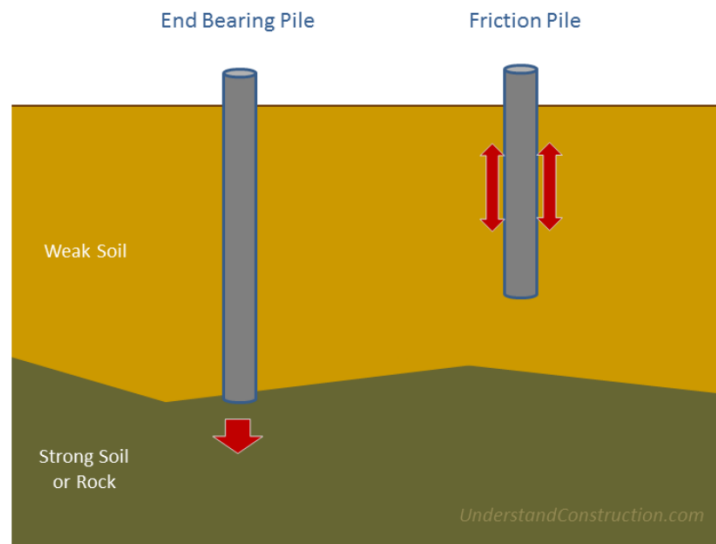


**Slika 45** Pločasti piloti

Nosivi piloti zaduženi su za prijenos vertikalnih sila s konstrukcije na dublje nosive slojeve u tlu. Ovisno o mehanizmu prijenosa opterećenja dijele se na pilote koji nose otpornošću na bazi i pilote koji nose trenjem po plaštu. Kod pilota koji nose otpornošću na bazi donji kraj pilota naslanja se na čvrsti sloj tla ili stijene. Tereti prolaze kroz pilot zaobilazeći slabije slojeve tla, sigurno prenoseći sile dok ne dođu do stabilnijeg sloja. Piloti koji nose trenjem po plaštu veći dio svoje nosivosti stječu putem posmičnih naprezanja duž omotača pilota. Najčešća primjena im je u slučajevima u kojima su čvrsti slojevi tla previše duboki da bi se doprlo do njih pa je trenje tla i

pilota ustvari ono što osigurava stabilnost temelja. [15] [16]

Zbijajući piloti koriste se za zbijanje tala slabe granulacije čime se povećava njihova nosivost. Ne služe direktno za prijenos opterećenja stoga mogu biti izrađeni od slabijeg materijala kao što su šljunak pa čak i pijesak. [15] [16]

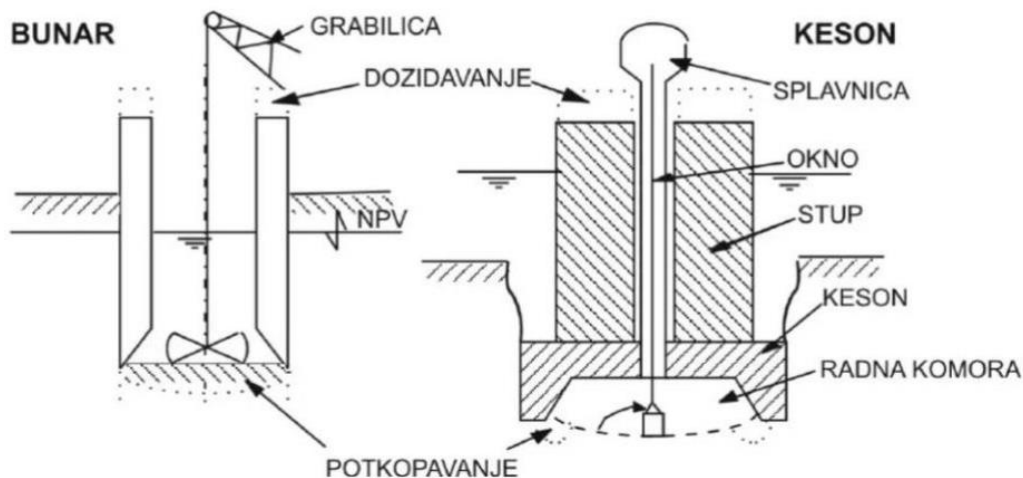


**Slika 46** Razlika pilota koji nose otpornošću na bazi i trenjem po plaštu

### Masivni duboki temelji

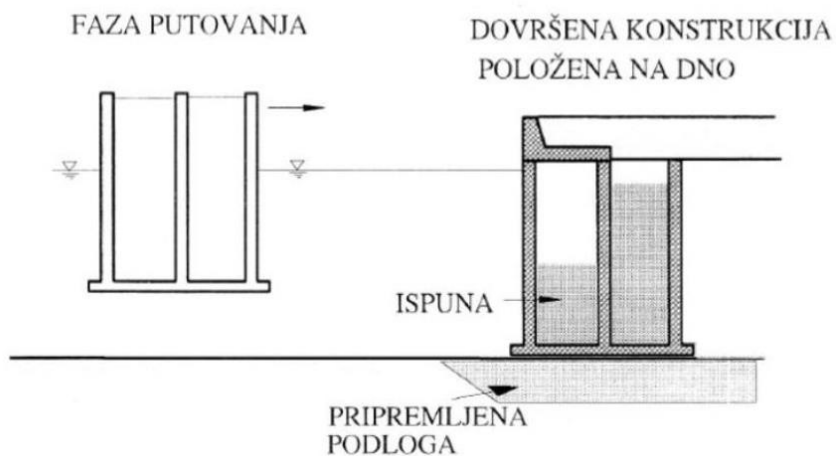
Masivni duboki temelji su temelji izuzetno velikih dimenzija te mogu biti oblika bunara, kesona ili sanduka. Glavna karakteristika ovih temelja je zapunjavanje teretom odnosno materijalima kao što su beton, šljunak ili pijesak. Punjenje se može izvršiti u potpunosti ili djelomično, a ponekad se umjesto punjenja unutra postavlja oprema. Upotreba im je obično u dubokim vodama ili ispod nivoa podzemne vode. Najčešće se koriste za temeljenje mostova, svjetionika, naftnih platformi te objekata u lukama i pristaništima. Bunari mogu poslužiti i kao zaštita građevinske jame pri temeljenju. Bunari i kesoni imaju otvoreno dno i izvode se potkopavanjem unutar sanduka. Ovom metodom se postepeno s unutrašnje strane uklanja tlo ispod temelja dok se ne postigne stabilnost i tlo popusti čime konstrukcija tone na željenu dubinu. Donji dio armirano betonske konstrukcije oblikovan je kao nož kako bi se olakšalo spuštanje. Razlika između kesona i bunara je ta što keson ima zatvoren gornji dio i sadrži radnu komoru gdje se odvija iskopavanje pod tlakom kako bi se spriječilo ili smanjilo prodiranje vode u unutrašnjost kesona. Tlak zraka u

kesonu održava se većim od tlaka vode na njegovu dnu čime se sprječava prodor vode. [17]



Slika 47 Bunar i keson

Za razliku od bunara i kesona sanduci imaju dno, a s gornje strane su otvoreni. Većinom se koriste za temeljenje u dubokoj vodi. Najprije se izrađuju na suhom, potom se uranjaju u vodu i prevoze brodom na mjesto ugradnje. Kad stignu na lokaciju, kontrolirano se pune vodom i polako spuštaju na prethodno pripremljenu podlogu koju pripremaju ronionci. [17]



Slika 48 Sanduk

## 5. TEHNIČKA RJEŠENJA ZA TEMELJENJE ZGRADA NA SLABONOSIVOM TLU

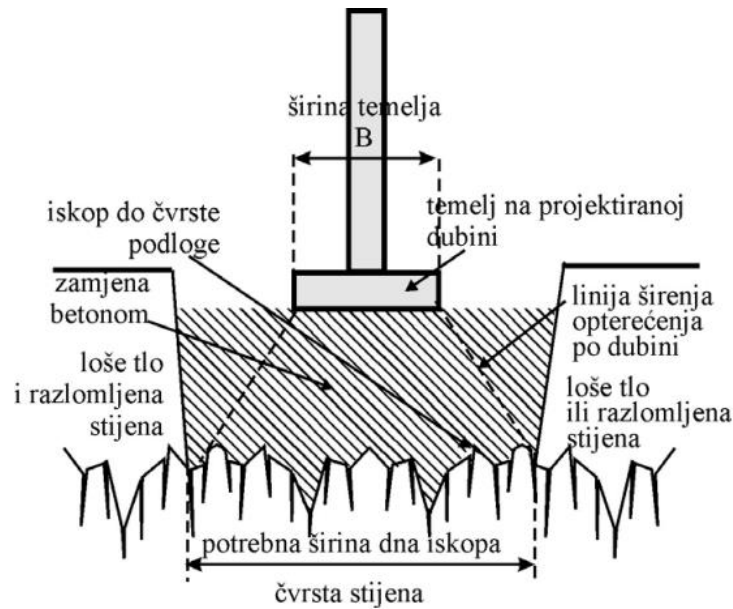
Slabo nosivo tlo zbog svojih karakteristika zahtijeva odabir posebnih tehničkih rješenja za temeljenje zgrada. Generalno, u uporabi su različiti modeli pilota i njihovih grupacija. S obzirom na sve veće troškove zemljišta i ograničenu dostupnost prikladnih gradilišta, inženjeri su razvili niz različitih metoda poboljšanja temeljnog tla. Te metode predstavljaju ekonomičnije i dugoročnije rješenje u odnosu na same pilote. Među najčešće korištenim metodama poboljšanja mekih tala su zamjena materijala, šljunčani stupovi te kombinacija temeljne ploče i pilota. U upotrebi su također i različiti dodaci koji se miješaju s tlom kako bi poboljšali njegova svojstva. Ove su se tehnike pokazale kao vrlo učinkovite te su rezultirale brojnim uspjesima.

### Zamjena materijala

Zamjena materijala među najstarijim je metodama poboljšanja temeljnog tla. Postupci zamjene ovise o razini podzemne vode u temeljnom tlu odnosno nalazi li se kota razine podzemne vode duboko ispod temeljne plohe, neposredno ispod temeljne plohe ili na površini terena. U slučaju nivoa vode duboko ispod kote temeljenja primjenjuje se produbljeno temeljenje pri kojem se temeljna ploha spušta u produbljeni iskop do čvrstog sloja tla s kojim se povezuje izravnavajućim slojem betona. Zamjena tla također se može provesti betonom koji u potpunosti zamjenjuje slabi sloj tla ispod temeljne plohe i povezuje ga sa čvrstom stijenom na određenoj dubini. [18]



Slika 49 Produbljeno temeljenje

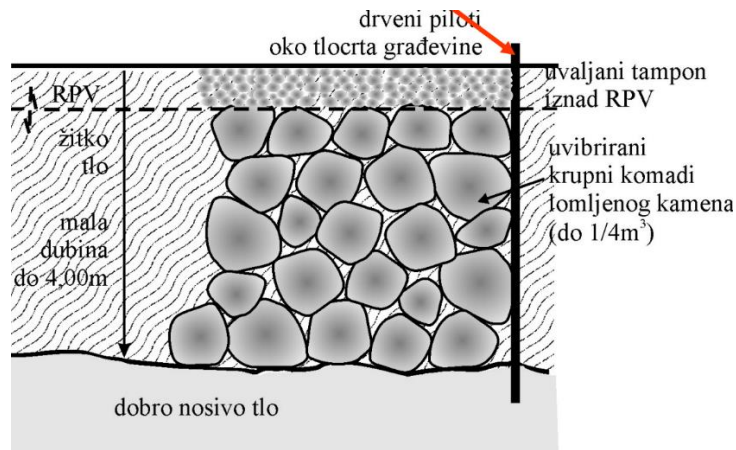


Slika 50 Zamjena tla betonom

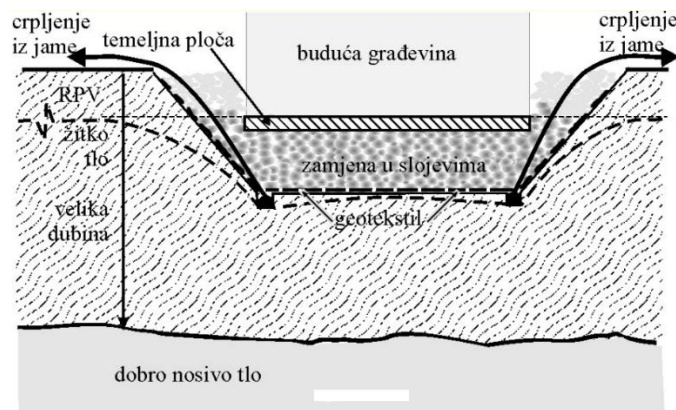
Nasipom tažene zbijenosti također se može zamijeniti loše tlo koje se nalazi iznad razine podzemne vode. Time se postiže veća zbijenost ugrađenih slojeva što povećava kut unutarnjeg trenja te omogućava bolju nosivost i smanjenje slijeganja. Za prilagodbu raspodjele dodatnih naprezanja po dubini potrebno je odabrati odgovarajuće širine temeljnih stopa ili traka. Dubina tla koje je potrebno zamijeniti ovisi o kakvoći tla stoga je u nekim slučajevima zamjena tla potrebna samo do određene dubine. [18]

Tlo sa visokom razinom podzemne vode nalazi se na područjima kao što su močvarni i muljeviti tereni te obale rijeka i jezera. U tlima sa nosivim slojem na dubini manjoj od 4 metra moguće je vibriranje krupnog lomljenog kamena u mulj na koji se iznad razine podzemne vode ugrađuje odgovarajući tamponski sloj. Kada se dobro nosivo tlo nalazi na većim dubinama koristi se metoda iskopa građevinske jame do određene dubine. Jama se od okolnog tla izolira geotekstilom te se zapunjava tlom projektirane zbijenosti iz kojeg je potrebno crpiti vodu 24 sata dnevno sve dok se ne postigne dovoljna težina građevine koja može nadoknaditi utjecaj uzgona. [18]





**Slika 51** Poboljšanje tla vibriranjem krupnog kamena u mulj

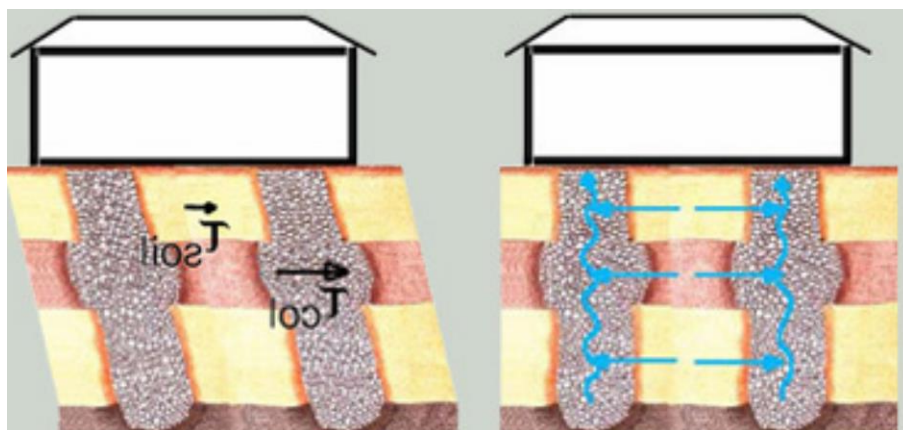


**Slika 52** Zamjena tla slojevima projektirane zbijenosti

## Šljunčani stupovi

Šljunčani stupovi dobro su poznata metoda poboljšanja temeljnog tla već dugi niz godina. To je tehnika poboljšanja tla koja uključuje formiranje stupova od komprimiranog agregata u vertikalnoj rupi za tla kojima je potrebno ojačanje. Izvodili su se nekom od tehnika za izvođenje pilota, ali s razvojem novih tehnologija došlo je do proširenja mogućnosti za njihovu izradu. Današnji postupci uključuju vibriranje što znatno poboljšava temeljno tlo zbog dodatnog zbijanja. Zbijenije tlo ima veću čvrstoću na smicanje što znatno povećava nosivost, smanjuje slijeganje, poboljšava drenažu i smanjuje rizik od likvefakcije. Učinak šljunčanih stupova je dvostruk što znači kada se izvode u slabo propusnim i jače stišljivim vrstama tla imaju učinak zbijanja odnosno poboljšanja tla u smislu ubrzanja slijeganja i povećanja propusnosti. U praksi

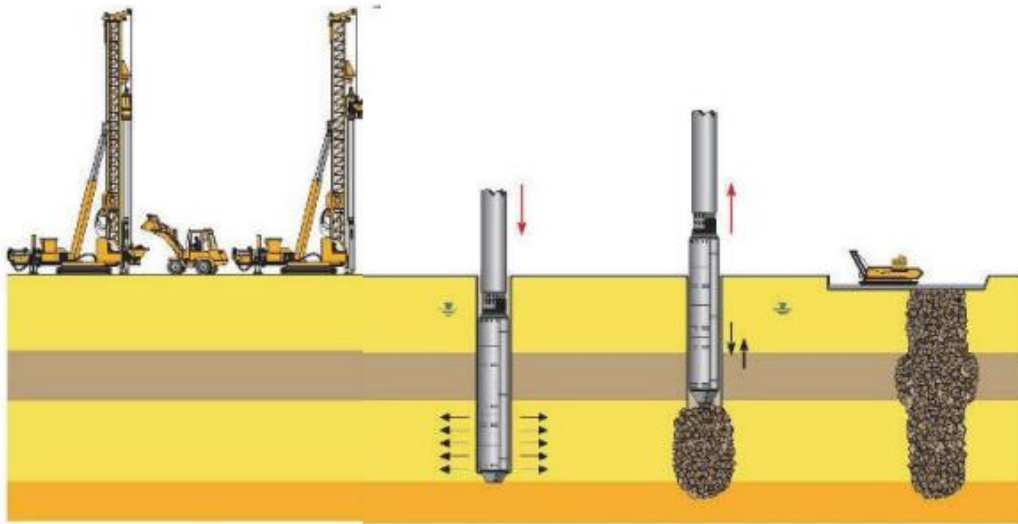
se redovito prije izvedbe stupova koriste nasipi za unošenje predopterećenja kako bi se ubrzao proces konsolidacije tla prije zbijanja. Kod propusnijih vrsta tla kao što su pijesci i šljunci primarno poboljšanje tla odnosi se na njegovo ojačanje. U slučaju potresa, šljunčani stupovi služe kao prevencija pojave likvefakcije. Razlog tomu je veća krutost stupnjaka u odnosu na okolno tlo. U njima dominiraju gravitacijske sile koje pružaju otpor potresnom ubrzanju. [18] [20]



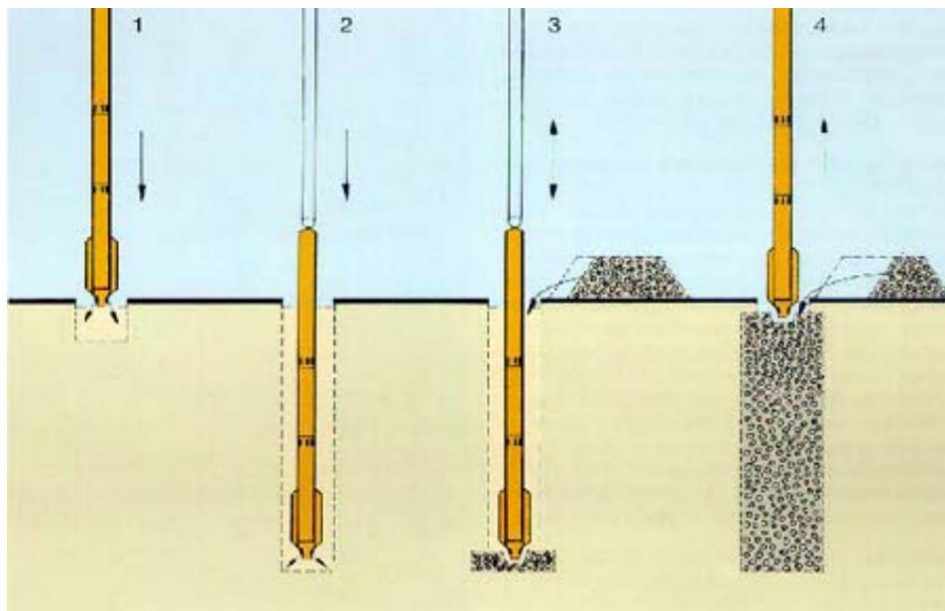
Slika 53 Šljunčani stupovi kao mjera poboljšanja temeljnog tla pri likvefakciji

Tehnologija izvedbe šljunčanih pilota provodi se tehnikom dubinskog vibrozbijanja osnovnog tla. Proces se obično izvodi spuštanjem vibrirajućeg uređaja na željenu dubinu te se kreće sa postupkom zbijanja tla od donjeg dijela prema površini terena. Dubinski vibrator oblika je cilindra promjera između 30 i 50 cm, duljine 3 do 4 metra, a mase oko 2 tone, ovisno o tipu uređaja. Vibrator u donjem dijelu, iznad šiljka ima ekscentričnu masu s električnim pogonom snage do 150 kW pomoću kojeg proizvodi rotacijski udar velike energije. Izvedba šljunčanih stupova također se može provesti i odozgo na način da se krene sa vibriranjem od površine terena čime se stvori otvor koji se potom ispunjava šljunkom i na kraju vibrira. [19]

Provedeno je mnogo eksperimentalnih istraživanja u svrhu korištenja šljunčanih stupova uz korištenje fizičkih i računalnih modela. Utvrđeno je kako se povećanjem promjera stupnjaka povećava njegova nosivost, dok se s druge strane povećanjem njihove duljine smanjuje slijeganje tla. Stupnjaci se nerijetko oblažu geotekstilom radi povećanja pritiska između okolnog tla i stupnjaka. [21]



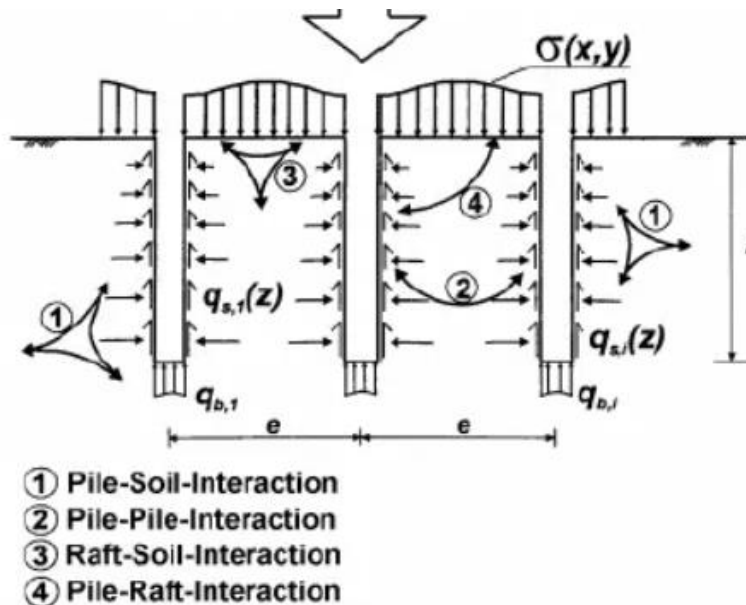
Slika 54 Šljunčani pilot izveden odozdo



Slika 55 Šljunčani pilot izveden odozgo

## Kombinacija temeljne ploče i pilota

Kombinirano temeljenje je tehnika koja se koristi za postizanje tehničke i financijske optimizacije u slučajevima kada lokalni geotehnički uvjeti tla nisu idealni za korištenje samo plitkog ili dubokog temeljenja. Ovaj pristup kombinira elemente plitkog i dubokog temeljenja kako bi se stvorila geotehnička konstrukcija koja iskorištava prednosti svakog pojedinog elementa. Kombinirano temeljenje sastoji se od temeljne ploče, pilota i temeljnog tla, a nosivost temelja određuje se međusobnom interakcijom svake od tih komponenti. Glavni ciljevi ove konstrukcije su povećati nosivost temelja, smanjiti potrebu za velikim brojem i dugim pilotima te minimizirati ukupna slijeganja, deformacije i utjecaje savijanja na samu temeljnu konstrukciju. Prednost kombiniranog temelja je ta da svaki dio ima svoju ulogu dok u interakciji osiguravaju potrebnu potporu konstrukciji. Međudjelovanja koja se pojavljuju su interakcija pilota i tla, pilota međusobno, interakcija ploče i tla te interakcija ploče i pilota kao što je prikazano na slici 56. [11] [22]



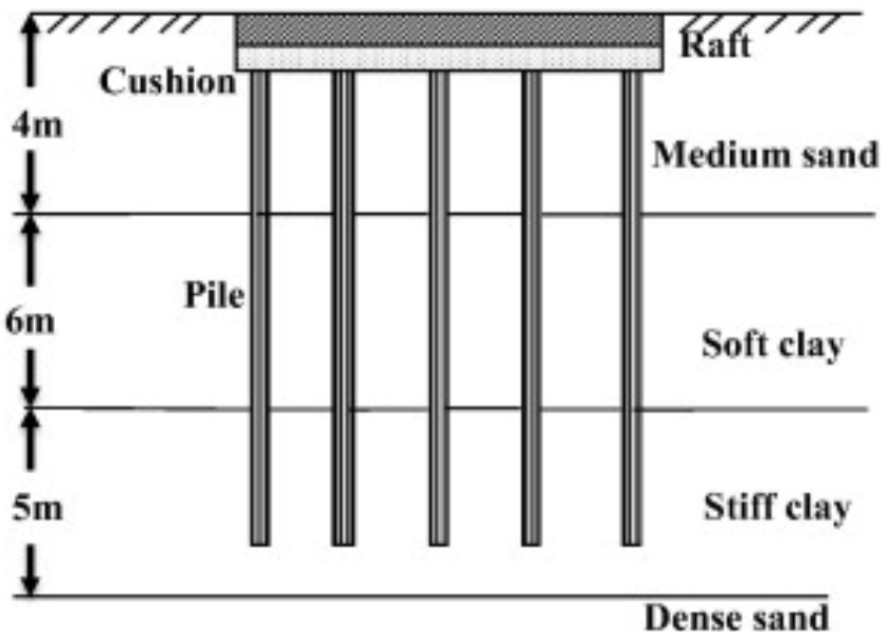
Slika 56 Međudjelovanja kod kombiniranog temeljenja

Temeljna ploča, osim mogućnosti smanjenja broja potrebnih pilota, osigurava stabilnost temelja pri krajnjem opterećenju odnosno u slučaju smanjenja učinkovitosti ili otkazivanja pojedinog pilota. Njome se također povećava efikasna površina samog temelja što mu povećava otpornost na horizontalna opterećenja. [21]

Piloti u ovom slučaju prenose opterećenje na dublje slojeve te se pomoću njih utječe na slijeganje okolnog tla regulacijom njihove duljine. Prilikom ispitivanja različitih profila tla ustanovljeno je kako je ovaj tip temelja najpovoljnije izvesti na krutim glinovitim i pješčanim tlima kojima najbolje mogu osigurati potrebnu nosivost i krutost. [11]

Pri projektiranju se također mora obratiti pozornost na omjer površina pilota i temeljne ploče koji bi se trebao kretati u rasponu od 0,4 do 0,6 kako bi se ostvarila učinkovitost kombiniranog temelja. Znanstvenici su dugogodišnjim istraživanjima utvrdili kako je konačno opterećenje pilota moguće je smanjiti smanjenjem omjera duljine i vanjskog promjera pilota odnosno povećanjem omjera unutarnjeg i vanjskog promjera pilota. [21]

Mana ovakvog modela temeljenja je što osim pojedinačnih elemenata, dakle temeljne ploče i svakog pilota za sebe, sama interakcija elemenata stvara dodatno opterećenje i pritisak, koje je potrebno predvidjeti u konačnim proračunima. Najčešća primjena kombinacije temeljne ploče i pilota je kod temeljenja visokih zgrada i drugih teških građevina te na područjima slabe nosivosti temeljnog tla. [11]



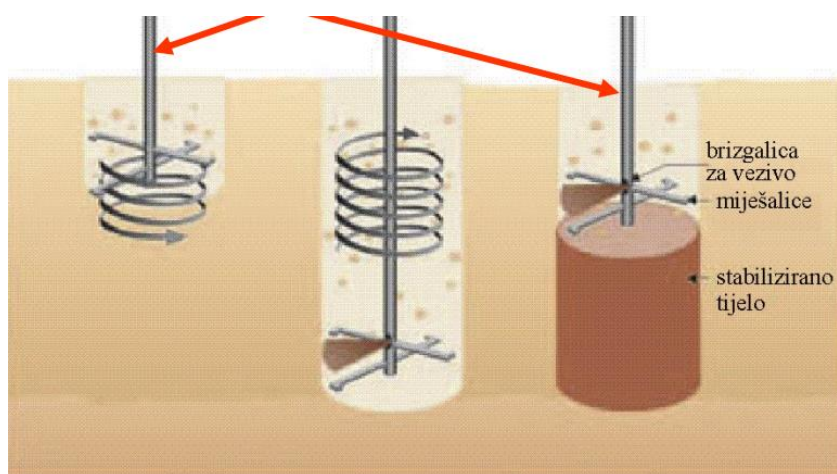
Slika 57 Kombinirano temeljenje temeljna ploča - piloti

## Stabilizacija tla dodacima

Stabilizacija tla dodacima odnosi se na miješanje prirodnog sloja tla s različitim dodacima i vodom. Ti dodaci mogu biti u zrnatom obliku koji se primjenjuje kod krupnozrnih tala ili se koriste veziva kao što su vapno i cement. Za stabilizaciju tla vapnom pogodna su prvenstveno glinovita prašnasta tla, dok se za slučaj nekoherentnog tla primjenjuje stabilizacija cementom pa takvo tlo nazivamo cementirano. U današnje vrijeme često se koriste i različiti sintetički materijali, ulja, bitumeni te industrijski ostaci kao što su pepeo, leteći pepeo, ugljena i cementna prašina. [18] [24]

Stabilizacija plitkih površinskih slojeva tla može se izvesti na dva načina. Prvi je rovanje površine tla uz dodavanje stabilizacijskog sredstva. Tlo se miješa sa dodatkom nakon čega slijedi zbijanje valjkom ili vibriranje ovisno o zahtjevima pojedine vrste tla. Druga mogućnost je spravljanje stabilizacijskog sloja van mjesta ugradnje nakon čega se u tlo ugrađuje zbijanjem ili vibriranjem. [18]

Za stabilizaciju dubokih slojeva tla nužna je upotreba odgovarajuće tehnologije koja omogućuje dodavanje veziva i njihovo miješanje s dubokim slojevima tla. Pribor se vrti čime razrahljuje tlo do određene dubine. Kroz središnju cijev pod pritiskom umeće se vezivo nakon čega se ubrzava rotacija pribora uz istovremeno podizanje što omogućuje miješanje tla i veznog sredstva. [18]



**Slika 58** Stabilizacija dubokih slojeva tla dodacima



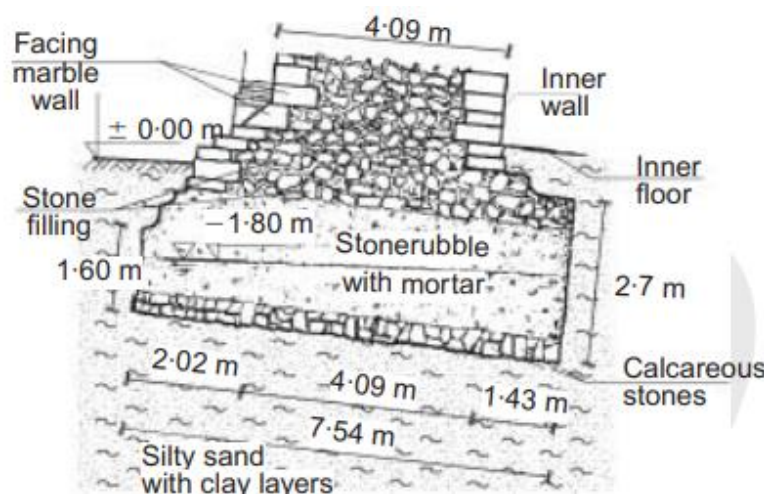
## 6. PRIMJERI TEMELJENJA ZGRADA NA SLABONOSIVOM TLU

### Kosi toranj u Pisi

Najpoznatiji primjer romaničke građevine izgrađen na slabonosivom tlu je kosi toranj u Pisi čiji su temelji izrađeni od vapnenca obloženog mramorom oslanjajući se na sloj cementiranog kamenog otpada s donjim slojem od kamena. Toranj je svjetsku popularnost stekao svojim kosim nagibom koji je nastao zbog nestabilnosti temelja. Nakošavati se počeo već za vrijeme građenja u 12. stoljeću, a zbog poniranja tla pod tornjem gradnja je obustavljena već nakon izgradnje trećeg kata. Nagib se nastavio povećavati i tijekom daljnje izgradnje u 14. stoljeću unatoč nastojanju tadašnjih inženjera da ga isprave.

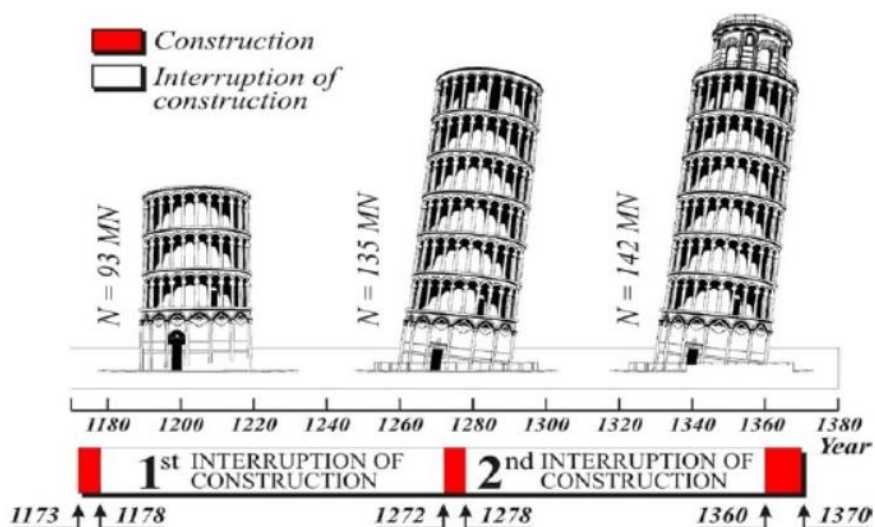
Projekt koji jamči današnju stabilnost tornja započet je 1990. godine. Provodilo ga je 13 stručnjaka pod vodstvom britanskog inženjera Johna Burlanda. Toranj je podvrgnut procesu zamjene tla sa sjeverne strane temelja uz uspravljanje čeličnim sajlama. Inženjeri su ustanovili kako je nagnjanje tornja bilo intenzivnije zimi jer je tada razina podzemne vode, zbog obilnijih padalina, bila veća na sjevernoj strani temelja. Zbog toga je ugrađen drenažni sustav koji odvodi višak vode iz temeljnog tla do bunara.

Toranj je nakon rekonstrukcije temelja za posjetitelje otvoren 2001. godine te se svake godine podvrgava provjeri nagiba. [25]



Slika 59 Temelj tornja u Pisi





Slika 60 Povećanje nagiba tornja u Pisi za vrijeme građenja

### Transcona Grain Elevator

Transcona Grain Elevator bila je konstrukcija od armiranog betona predviđena kao skladište za žito. Sastojala se od strojarnice i skladišnog prostora za žito u kojemu se nalazilo 5 redova po 13 spremnika, ukupnog volumena 36 000 kubičnih metara. Konstrukcija je temeljena na dvije armirano betonske ploče dimenzija 23,50 x 59,50 metara i debljine 60 cm između kojih se nalazio prostor za pražnjenje. Zajedno sa poprečnim i uzdužnim zidovima ovakva se temeljna konstrukcija smatra vrlo krutom.

Prije početka izvođenja radova nisu se provodila detaljna istraživanja zbog toga što su se uzimale karakteristike tla koje je bilo uobičajeno za to područje. Tlo se smatralo homogenim, a u obzir se uzela veća nosivost gornjih slojeva tvrde gline u odnosu na donje. Na 3,70 metara dubine izvedeno je "in situ" ispitivanje stišljivosti pločom koje je pokazalo kako temeljno tlo može podnijeti ravnomjerno opterećenje od 400 kPa što se pokazalo kao pogrešna pretpostavka jer je opterećenje zahvatilo i donji mekši sloj gline.

Kad je konstrukcija bila dovršena počelo je ravnomjerno punjenje spremnika žitom. Nakon što su spremnici bili napunjeni do 87,5 % kapaciteta primijećena su značajna slijeganja skladišne zgrade. Nakon samo sat vremena slijeganje se povećalo za 300 mm sa nagibom prema zapadu. U sljedećih 24 sata slijeganje se nastavilo pri čemu je došlo do sloma temeljnog tla, a cijela zgrada se nagnula 27 stupnjeva.



**Slika 61** Kolaps Transcona Grain Elevatora

Nakon kolapsa tvrtka "Foundation Company Limited" započela je s obnovom objekta na način da se postepeno potkopavala temeljna ploča uz izvođenje pilota dok je podizanjem vraćena u prvobitno stanje. Objekt je 1970. godine kupljen od strane "Parrish & Heimbecker company" te preimenovan u "Parrish & Heimbecker Grain Elevator" koji postoji te je u funkciji i dan danas. [26]

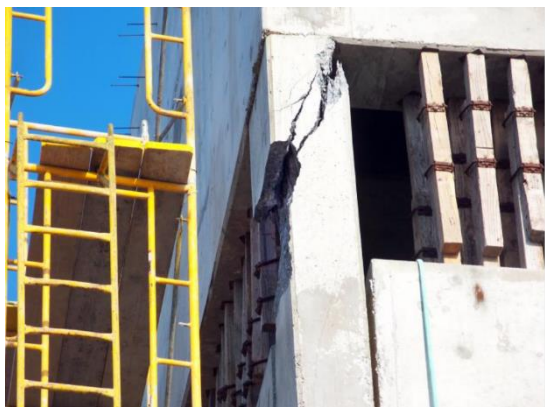


**Slika 62** Parrish & Heimbecker Grain Elevator"

## Ocean tower

Ocean tower na otoku South Padre u Texasu reprezentativan je primjer neuspjeha u izradi građevinskih temelja koji se pripisuje različitim faktorima uključujući geotehničke probleme, konstrukcijske nedostatke i probleme s izgradnjom. Bio je nedovršeni stambeni toranj sa 31 katom koji je srušen implozijom jer se smatralo da nije siguran za ostanak. Izgradnja je zaustavljena 2008. godine kada su se primijetile prve pukotine u nosivim stupovima zgrade dok su istraživanja potvrdila kako se jezgra nebodera spustila za čak 360 mm. Nakon što se ustanovilo kako bi popravak građevine bio prevelik trošak te da bi se problem pogoršao, u rujnu 2009. godine predviđeni su planovi za njegovo rušenje.

Najveći problem koji je doveo do kolapsa bilo je tlo s visokim stupnjem ekspanzivnosti što je dovelo do gubitka njegove stabilnosti. Za vrijeme izgradnje ekspanzivno tlo počelo je bubriti zbog promjena u udjelu vlage. To je rezultiralo diferencijalnim slijeganjem slijeganjem temelja s jedne strane zbog čega je zgrada počela tonuti uzrokujući ozbiljne strukturalne probleme. [27]



Slike 63, 64 i 65 Oštećenja nebodera Ocean tower

## 7. ZAKLJUČAK

Zajednička stavka navedenih primjera je loša procjena karakteristika i stanja tla koja je dovela do dosezanja graničnih stanja nosivosti i uporabljivosti građevina. Prije svih radova ključno je provesti odgovarajuća geotehnička istraživanja koja uključuju ispitivanje nosivosti, stišljivosti, udjela vlage u tlu te dubinu pojedinih slojeva koji imaju utjecaj na planiranu građevinu.

Istraživanja se mogu provoditi terenski ili uzimanjem pojedinih uzoraka tla i njihovim ispitivanjem u laboratoriju. Terenski istražni radovi obavljaju se pomoću bušotina i istražnih jama u kojima se izvode pokusi poput standardnog penetracijskog testa za procjenu kuta unutarnjeg trenja tla, krilne sonde za određivanje kohezije, mjerenje vodopropusnosti te mjerenje razine podzemne vode piezometrom. Laboratorijska ispitivanja odvijaju se u geotehničkom laboratoriju gdje se provode pokusi direktnog smicanja i ispitivanja čvrstoće tla, određuju se parametri poput suhe i uronjene zapremninske težine, Attebergovih granica, prirodne vlažnosti tla te granulometrijske krivulje.

Na temelju rezultata istraživanja provodi se analiza opterećenja pomoću koje se projektira nosivost temelja te odabire odgovarajuća tehnika temeljenja i poboljšanja tla. Slabije tlo u većini slučajeva zahtijeva kompleksnija tehnička rješenja koja uključuju primjenu većih količina materijala kao kod temeljnih ploča ili kombinacije temeljne ploče i pilota, kao i posebne mehanizacije što je slučaj kod mlaznog injektiranja. Zbog složenosti izgradnje vrlo je često produljenje vremena izvedbe objekta što rezultira povećanjem troškova u smislu opreme, radne snage te upravljanja projektom.

Nakon završetka s izgradnjom objekta važno je nastaviti kontinuirano pratiti ponašanje tla i temelja kako bi se osigurala dugoročna stabilnost građevine te prepoznali eventualni problemi.

U konačnici troškovi istražnih radova, projektiranja, resursa potrebnih za izvedbu te kontrole i praćenja ponašanja građevine i tla tijekom i nakon izgradnje, značajno poskupljuju projekte koji se izvode na lošem tlu u odnosu na one izvedene na stabilnijem tlu. Međutim, investiranje u temelje i dodatne mjere sigurnosti nužno je kako bi se osigurala trajnost i stabilnost građevine te izbjegli potencijalno opasni problemi u njezinom projektiranom vijeku trajanja.

## 8. IZVORI

[1] Pregled povijesti temelja,

[https://www.researchgate.net/publication/298921324\\_Review\\_of\\_historical\\_buildings'\\_foundations](https://www.researchgate.net/publication/298921324_Review_of_historical_buildings'_foundations)

[2] Mlazno injektiranje, <https://www.geotech.hr/jet-grouting/>

[3] Foundations on Weak and/or Compressible Soils,  
[Microsoft Word - weak\\_compressible\\_soils \(uiowa.edu\)](#)

[4] Značajke glinenog tla pri izgradnji temelja,

<https://ihome.techinfus.com/hr/fundament/osobennosti-glinistoj-pochvy-pri-vozvedenii-fundamenta/>

[5] Što je pješćani vulkan?, <https://hr.history-hub.com/sto-je-pjescani-vulkan>

[6] Forma pješćanog vulkana; primjer iz potresa Loma Prieta

[https://www.iris.edu/hq/inclass/animation/sand\\_boil\\_forms\\_example\\_from\\_1989\\_loma\\_prieta\\_earthquake](https://www.iris.edu/hq/inclass/animation/sand_boil_forms_example_from_1989_loma_prieta_earthquake)

[7] Likvefakcija tla,

<https://www.geotech.hr/likvefakcija-tla/>

[8] Prapor ili les, <https://blogs.egu.eu/divisions/cl/2020/11/25/loess/>

[9] Ekspanzivna tla,

[https://web.mst.edu/~rogersda/expansive\\_soils/DAMAGE%20TO%20FOUNDATIONS%20FROM%20EXPANSIVE%20SOILS.pdf](https://web.mst.edu/~rogersda/expansive_soils/DAMAGE%20TO%20FOUNDATIONS%20FROM%20EXPANSIVE%20SOILS.pdf)

[10] Konsolidacija tla,

[https://www.grf.bg.ac.rs/p/learning/predavanje\\_5\\_1679897530729.pdf](https://www.grf.bg.ac.rs/p/learning/predavanje_5_1679897530729.pdf)

[11] Kombinirano temeljenje temeljna ploča - piloti,

<https://repositorij.gfv.unizg.hr/en/islandora/object/gfv%3A530/datastream/PDF/view>

[12] Plitki temelji, [https://www.grad.unizg.hr/download/repository/G4\\_Plitki\\_temelji.pdf](https://www.grad.unizg.hr/download/repository/G4_Plitki_temelji.pdf)

[13] Temeljenje, <https://www.geotech.hr/plitko-temeljenje/>

[14] Duboko temeljenje, <https://www.scribd.com/doc/239282580/Duboko-Temeljenje-Tanja-Roje-bonacci>

[15] Vrste temelja u konstrukcijskim projektima, [Types of Foundations in Construction | BigRentz](#)

[16] Što su temelji na pilotima, vrste temelja na pilotima, <https://civiltoday.com/geotechnical->

[engineering/foundation-engineering/deep-foundation/176-pile-foundation-definition-types#sheet](https://www.engineering/foundation-engineering/deep-foundation/176-pile-foundation-definition-types#sheet)

[17] Duboko temeljenje,

<https://www.gradnja.me/clanak/278/Duboko-temeljenje>

[18] Poboljšanje svojstava temeljnog tla,

<https://gradst.unist.hr/Portals/9/docs/katedre/Geotehnika/PDSG%20Posebna%20poglavlja/Poboljsanje%20svojstava%20tla.pdf>

[19] Primjeri uporabe šljunčanih pilota za ubrzanje konsolidacije i ojačanje tla

<https://hrcak.srce.hr/file/254529>

[20] Šljunčani stupovi, <https://www.kellerasean.com/expertise/techniques/vibro-stone-columns>

[21] Poboljšanje kapaciteta temeljenja u slabim tlima,

(PDF) Improving bearing capacity of weak soils: A review (researchgate.net)

[22] Kombinirano temeljenje temeljnim pločama i pilotima, <https://hrcak.srce.hr/file/294018>

[23] Stabilizacija tla cementom

[https://intrans.iastate.edu/app/uploads/sites/7/2018/12/2018\\_BCC\\_Ferrier\\_Soil-Cement\\_Stabilization.pdf](https://intrans.iastate.edu/app/uploads/sites/7/2018/12/2018_BCC_Ferrier_Soil-Cement_Stabilization.pdf)

[24] Metode poboljšanja tla,

[https://www.grad.unizg.hr/download/repository/5\\_Stabilizacija\\_vapnom\\_2012.pdf](https://www.grad.unizg.hr/download/repository/5_Stabilizacija_vapnom_2012.pdf)

[25] Stabiliziranje tornja u Pisi,

<https://www.geotech.hr/kako-se-stabiliziralo-naginjanje-tornja-u-pisi/>

[26] Transcona grain elevator,

<https://www.geotech.hr/slucuj-sloma-temeljnog-tla-transcona-grain-elevator/>

[27] Ocean tower,

<https://www.ramjackokc.com/articles/3-foundation-failure-examples-you-should-be-aware-of>

<https://www.structuredfoundation.com/blog/extreme-example-of-foundation-failure/>

## 9. POPIS SLIKA

**Slike 1, 2 i 3,** Temelji poljskih crkava u Glogovu, Mogilnou i Trzemesznom,

[https://www.researchgate.net/publication/298921324\\_Review\\_of\\_historical\\_buildings'\\_foundations](https://www.researchgate.net/publication/298921324_Review_of_historical_buildings'_foundations)

**Slike 4 i 5** Primjeri gotičkih temelja Bazilike Blažene Djevice Marije u Krakowu i Utvrde u Malborku,

[https://www.researchgate.net/publication/298921324\\_Review\\_of\\_historical\\_buildings'\\_foundations](https://www.researchgate.net/publication/298921324_Review_of_historical_buildings'_foundations)

**Slike 6 i 7** Lučni temelji dvorca u Wroclawu i crkve sv. Bartola u Gdanjsku,

[https://www.researchgate.net/publication/298921324\\_Review\\_of\\_historical\\_buildings'\\_foundations](https://www.researchgate.net/publication/298921324_Review_of_historical_buildings'_foundations)

**Slike 8, 9 i 10** Povijesni primjeri plitkih temelja,

[https://www.researchgate.net/publication/298921324\\_Review\\_of\\_historical\\_buildings'\\_foundations](https://www.researchgate.net/publication/298921324_Review_of_historical_buildings'_foundations)

**Slike 11 i 12** Povijesni primjeri dubokih temelja,

[https://www.researchgate.net/publication/298921324\\_Review\\_of\\_historical\\_buildings'\\_foundations](https://www.researchgate.net/publication/298921324_Review_of_historical_buildings'_foundations)

**Slika 13** Gotički temelj dvorca Malbork ,

[https://www.researchgate.net/publication/298921324\\_Review\\_of\\_historical\\_buildings'\\_foundations](https://www.researchgate.net/publication/298921324_Review_of_historical_buildings'_foundations)

**Slika 14** Temelj cistercijanske opatije Lure u Francuskoj,

[https://www.researchgate.net/publication/298921324\\_Review\\_of\\_historical\\_buildings'\\_foundations](https://www.researchgate.net/publication/298921324_Review_of_historical_buildings'_foundations)

**Slika 15** Temelj zgrade Reichstaga u Berlinu,

[https://www.researchgate.net/publication/298921324\\_Review\\_of\\_historical\\_buildings'\\_foundations](https://www.researchgate.net/publication/298921324_Review_of_historical_buildings'_foundations)

**Slika 16** Zamjena temelja stupa crkve sv. Ivana u Gdanjsku,

[https://www.researchgate.net/publication/298921324\\_Review\\_of\\_historical\\_buildings'\\_foundations](https://www.researchgate.net/publication/298921324_Review_of_historical_buildings'_foundations)

**Slika 17** Potpora pomoću pilota dvorca Malbork,



[https://www.researchgate.net/publication/298921324\\_Review\\_of\\_historical\\_buildings'\\_foundations](https://www.researchgate.net/publication/298921324_Review_of_historical_buildings'_foundations)

**Slika 18** Detalji potpore pomoću pilota dvorca Malbork,

[https://www.researchgate.net/publication/298921324\\_Review\\_of\\_historical\\_buildings'\\_foundations](https://www.researchgate.net/publication/298921324_Review_of_historical_buildings'_foundations)

**Slika 19** Potpora mlaznim pilotima temelja kapelice dvorca u Raciborzu,

[https://www.researchgate.net/publication/298921324\\_Review\\_of\\_historical\\_buildings'\\_foundations](https://www.researchgate.net/publication/298921324_Review_of_historical_buildings'_foundations)

**Slike 20 i 21** Potpora pilotima za žitnicu u Bydgoszczu i hotel u Varšavi,

[https://www.researchgate.net/publication/298921324\\_Review\\_of\\_historical\\_buildings'\\_foundations](https://www.researchgate.net/publication/298921324_Review_of_historical_buildings'_foundations)

**Slika 22** Sportski kompleks Meadowlands,

[https://en.wikipedia.org/wiki/Meadowlands\\_Sports\\_Complex](https://en.wikipedia.org/wiki/Meadowlands_Sports_Complex)

**Slika 23** Oštećenja građevine uslijed uzdizanja glinenog tla,

<https://ihome.techinfus.com/hr/fundament/osobnosti-glinistoj-pochvy-pri-vozvedenii-fundamenta/>

**Slike 24 i 25** Posljedice potresa Loma prieta 1989. godine, <https://www.nbcnews.com/nightly-news/looking-back-89-loma-prieta-quake-planning-next-one-n228616>

**Slike 26, 27, 28 i 29** Nastanak pješčanih vulkana,

[https://www.iris.edu/hq/inclass/animation/sand\\_boil\\_forms\\_example\\_from\\_1989\\_loma\\_prieta\\_earthquake](https://www.iris.edu/hq/inclass/animation/sand_boil_forms_example_from_1989_loma_prieta_earthquake)

**Slike 30 i 31** Tlo prije i nakon vlaženja,

[https://user.engineering.uiowa.edu/~swan/courses/53139/notes/weak\\_compressible\\_soils.pdf](https://user.engineering.uiowa.edu/~swan/courses/53139/notes/weak_compressible_soils.pdf)

**Slika 32** Prapor ili les, <https://blogs.egu.eu/divisions/cl/2020/11/25/loess/>

**Slika 33** Strukturni kolaps tla pri vlaženju u edometru,

[https://www.grf.bg.ac.rs/p/learning/predavanje\\_5\\_1679897530729.pdf](https://www.grf.bg.ac.rs/p/learning/predavanje_5_1679897530729.pdf)

**Slika 34** Primjer ekspanzivnog tla,

**Slika 35** Bubrenje ekspanzivnog tla u edometru,

[https://www.grf.bg.ac.rs/p/learning/predavanje\\_5\\_1679897530729.pdf](https://www.grf.bg.ac.rs/p/learning/predavanje_5_1679897530729.pdf)

**Slika 36** Oscilacije vlažnosti i vertikalne deformacije po aktivnoj dubini,

[https://www.grf.bg.ac.rs/p/learning/predavanje\\_5\\_1679897530729.pdf](https://www.grf.bg.ac.rs/p/learning/predavanje_5_1679897530729.pdf)

**Slika 37** Pomicanja i oštećenja objekta na ekspanzivnom tlu,

[https://www.grf.bg.ac.rs/p/learning/predavanje\\_5\\_1679897530729.pdf](https://www.grf.bg.ac.rs/p/learning/predavanje_5_1679897530729.pdf)

**Slika 38** Ponašanje pravokutnog temelja u ekspanzivnom tlu pod jednolikim opterećenjem,

[https://web.mst.edu/~rogersda/expansive\\_soils/DAMAGE%20TO%20FOUNDATIONS%20FR%20OM%20EXPANSIVE%20SOILS.pdf](https://web.mst.edu/~rogersda/expansive_soils/DAMAGE%20TO%20FOUNDATIONS%20FR%20OM%20EXPANSIVE%20SOILS.pdf)

**Slika 39** Oštećenje građevine oslonjene na plitkim pilotima,

[https://web.mst.edu/~rogersda/expansive\\_soils/DAMAGE%20TO%20FOUNDATIONS%20FR%20OM%20EXPANSIVE%20SOILS.pdf](https://web.mst.edu/~rogersda/expansive_soils/DAMAGE%20TO%20FOUNDATIONS%20FR%20OM%20EXPANSIVE%20SOILS.pdf)

**Slika 40** Kruti i fleksibilni temelj samac, <https://www.geotech.hr/plitko-temeljenje/>

**Slika 41** Predgotovljena temeljna čašica, <https://www.geotech.hr/plitko-temeljenje/>

**Slika 41** Predgotovljena temeljna čašica, <https://www.geotech.hr/plitko-temeljenje/>

**Slika 42** Postavljanje temeljnih traka, <https://www.geotech.hr/plitko-temeljenje/>

**Slika 43** Temeljni roštilj, <https://www.geotech.hr/plitko-temeljenje/>

**Slika 44** Temeljna ploča, [https://www.emajstor.hr/clanak/2/Temeljna\\_ploca\\_prednosti\\_i\\_detalji](https://www.emajstor.hr/clanak/2/Temeljna_ploca_prednosti_i_detalji)

**Slika 45** Pločasti piloti, <https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/File:Sheetpiles.jpg>

**Slika 46** Razlika pilota koji nose otpornošću na bazi i trenjem po plaštu,

<https://www.understandconstruction.com/pile-foundations.html>

**Slika 47** Bunar i keson, <https://www.gradnja.me/clanak/278/Duboko-temeljenje>

**Slika 48** Sanduk, <https://www.gradnja.me/clanak/278/Duboko-temeljenje>

**Slika 49** Produbljeno temeljenje,

<https://gradst.unist.hr/Portals/9/docs/katedre/Geotehnika/PDSG%20Posebna%20poglavlja/Poboljsanje%20svojstava%20tla.pdf>

**Slika 50** Zamjena tla betonom,

<https://gradst.unist.hr/Portals/9/docs/katedre/Geotehnika/PDSG%20Posebna%20poglavlja/Poboljsanje%20svojstava%20tla.pdf>

**Slika 51** Poboljšanje tla vibriranjem krupnog kamena u mulj,

<https://gradst.unist.hr/Portals/9/docs/katedre/Geotehnika/PDSG%20Posebna%20poglavlja/Poboljsanje%20svojstava%20tla.pdf>

**Slika 52** Zamjena tla slojevima projektirane zbijenost,

<https://gradst.unist.hr/Portals/9/docs/katedre/Geotehnika/PDSG%20Posebna%20poglavlja/Poboljsanje%20svojtava%20tla.pdf>

**Slika 53** Šljunčani stupovi kao mjera poboljšanja temeljnog tla pri likvefakciji

<https://gradst.unist.hr/Portals/9/docs/katedre/Geotehnika/PDSG%20Posebna%20poglavlja/Poboljsanje%20svojtava%20tla.pdf>

**Slika 54** Šljunčani pilot izveden odozdo, <https://hrcak.srce.hr/file/254529>

**Slika 55** Šljunčani pilot izveden odozgo,

<https://gradst.unist.hr/Portals/9/docs/katedre/Geotehnika/PDSG%20Posebna%20poglavlja/Poboljsanje%20svojtava%20tla.pdf>

**Slika 56** Međudjelovanja kod kombiniranog temeljenja, <https://www.structuralguide.com/pile-raft-foundations/>

**Slika 57** Kombinirano temeljenje temeljna ploča – piloti,

[https://www.ripublication.com/ijcer16/ijcerv7n1\\_07.pdf](https://www.ripublication.com/ijcer16/ijcerv7n1_07.pdf)

**Slika 58** Stabilizacija dubokih slojeva tla dodacima,

<https://gradst.unist.hr/Portals/9/docs/katedre/Geotehnika/PDSG%20Posebna%20poglavlja/Poboljsanje%20svojtava%20tla.pdf>

**Slika 59** Temelj tornja u Pisi,

[https://www.researchgate.net/publication/298921324\\_Review\\_of\\_historical\\_buildings'\\_foundations](https://www.researchgate.net/publication/298921324_Review_of_historical_buildings'_foundations)

**Slika 60** Povećanje nagiba tornja u Pisi za vrijeme građenja,

<https://www.geotech.hr/en/why-the-tower-of-pisa-commence-to-lean/>

**Slika 61** Kolaps Transcona Grain Elevatora,

<https://www.geotech.hr/slucaj-sloma-temeljnog-tla-transcona-grain-elevator/>

**Slika 62** Parrish & Heimbecker Grain Elevator,

<https://www.geotech.hr/slucaj-sloma-temeljnog-tla-transcona-grain-elevator/>

**Slika 63, 64 i 65** Oštećenja nebodera Ocean tower,

<https://www.walterpmoore.com/projects/ocean-tower-failure-analysis>