



KOMBINIRANO TEMELJENJE TEMELJNIM PLOČAMA I PILOTIMA

Thomas Hofer

MWV Bauingenieure AG, CH-5400 Baden, dipl. Bauingenieur TH

Ljupko Perić

MWV Bauingenieure AG, CH-5400 Baden, mr. sc. dipl. ing. građ.

Sažetak:

U nepovoljnim geotehničkim uvjetima objekti se ne mogu uspješno temeljiti metodama iz uobičajene inženjerske prakse. U uvjetima neheterogenog tla najveći problem predstavlja procjena veličine ukupnih deformacija i nejednakog slijeganja. Primjenom tzv. naprednih konstitucijskih modela tla moguće je analitički pouzdano procijeniti međusobnu interakciju temeljnog tla i inženjerske strukture. Napredni geotehnički modeli poput *Hardening soil* modela zahtijevaju poznavanje niza parametara kojima se opisuje ovisnost modula stišljivosti tla o stanju napona, povijesti nanošenja opterećenja i stanju konsolidacije. Rezultat analize je pouzdano određivanje modula reakcije tla ispod temelja u svrhu nastavka proračuna u nekom od programa za statičku analizu konstrukcija. Učinkovita metoda temeljenja u nepovoljnim geotehničkim uvjetima je kombinirano temeljenje temeljnom pločom i pilotima.

Ključne riječi: temeljenje, kombinirano temeljenje temeljnom pločom i pilotima, HSM-hardening soil model, kapacitet nosivosti pilota, slijeganje pilota, koeficijent sudjelovanja pilota α_{KPP} .

THE COMBINED PILE-PLATE FOUNDATION

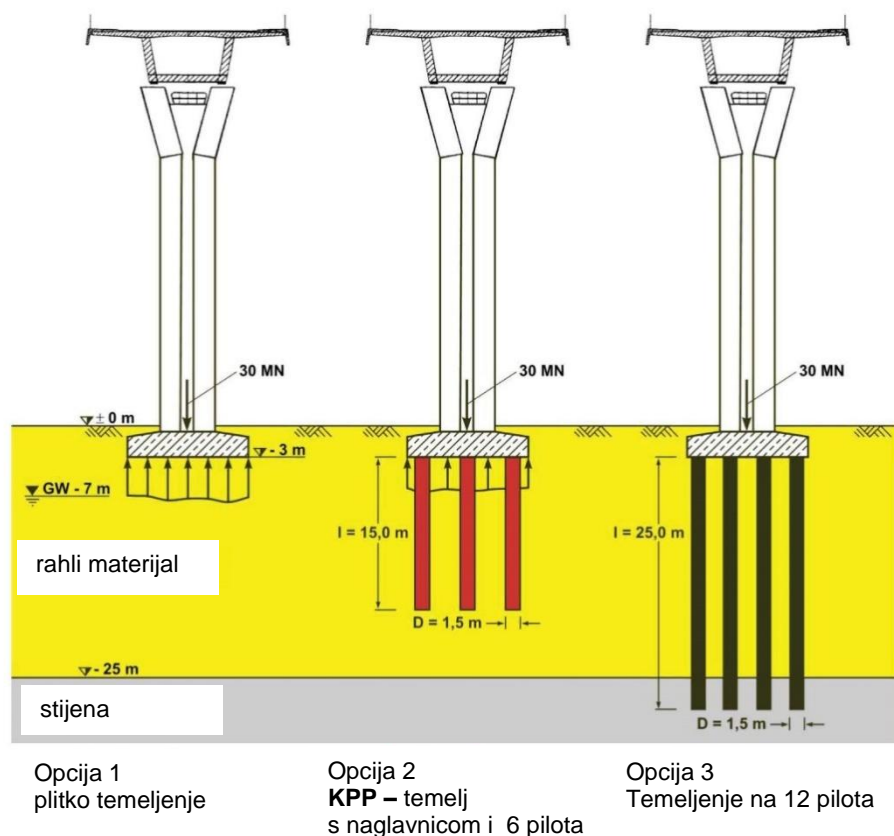
Abstract:

The combined pile-plate foundation is a geotechnical composite construction consisting of the mutually acting elements piles, foundation slab and soil. If the local subsoil conditions do not permit the use of conventional foundation methods, the CPP foundation is a cost-effective option. In this paper, it was shown how the bearing capacity – displacement relationship of the layered subsoil can be estimated in order to define characteristics of non-elastic spring k_s both for the foundation plate [kN/m^3] and for the piles [kN/m^2]. In addition, the effectiveness of the piles can be expressed by the coefficient α_{CPP} within the geotechnical composite construction under consideration.

Key words: combined pile-plate foundation, Hardening Soil Model, bearing capacity, pile displacement, pile effectiveness α_{CPP} .

1 Uvod

U ovom radu opisan je pristup temeljenju u situacijama kada zbog lokalnih geotehničkih uvjeta ni plitko ni duboko temeljenje nije moguće ili ne rezultira zadovoljavajućim tehničkim rješenjima. Kao alternativno rješenje pojavljuje se mogućnost kombinacije plitkog i dubokog temeljenja u svrhu tehničkog i financijskog optimiranja (Slika 1). Primjenom naprednih konstitucijskih modela tla koji uzimaju u obzir nelinearna svojstva tla u funkciji dubine, konsolidacijskih uvjeta i intenziteta nanesenog opterećenja, moguće je razviti modele koji na pouzdan način opisuju interakciju temeljnog tla i inženjerske strukture. U prvom dijelu ovog rada dat je pregled najvažnijih teorijskih osnova. U drugom dijelu prikazana je praktična primjena metode kombiniranog temeljenja pilotima i temeljnim pločama na primjeru srednje visoke 25-katne zgrade Letzibach u Zuerich-u. Veći dio korištene literature je na njemačkom i engleskom jeziku, stoga su samo oni pojmovi koje smo smatrali centralno važnima za razumijevanje teksta prevedeni na hrvatski jezik. Nadamo se da to neće otežati razumijevanje sadržaja.



Slika 1: Princip kombiniranog temeljenja pločom i pilotima

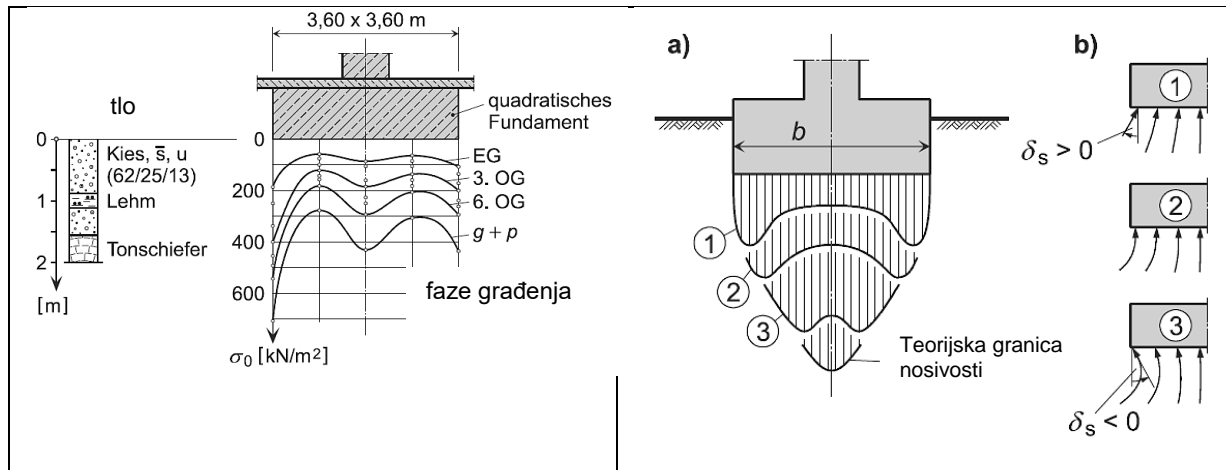
2 Modeliranje tla u inženjerskoj praksi

2.1 Općenito

Već na intuitivnoj razini, bez posebnih inženjerskih znanja, moguće je uočiti razliku između plitkog temeljenja na temeljima samcima, temeljnim trakama ili temeljnim pločama i dubokog temeljenja na pilotima. Također, na elementarnoj logičkoj razini jasno je da je uvjet za plitko temeljenje postojanje nosivog tla neposredno na horizontu temeljenja objekta. U slučaju prisutnosti nosivih slojeva tla tek na većim dubinama, prijenos opterećenja do potrebne dubine se ostvaruje pomoću pilota.

2.2 Modeli tla s pripadajućom preraspodjelom napona

Kao važan dio budućeg objekta, temelj preuzima funkciju prijenosa opterećenja s objekta na tlo i preraspodjele napona na kontaktnoj plohi s tlom. Prijenos opterećenja reduciran je na razmjerno malu površinu s obzirom na to da tlo, u usporedbi s drugim građevinskim materijalima, može preuzeti relativno mala naprezanja [1]. Za dimenzioniranje temelja u inženjerskoj praksi s dovoljnom točnošću pretpostavlja se ravnomjerna raspodjela napona na razini temeljne plohe. Stvarna raspodjela naprezanja nešto je drukčija, osobito na rubovima krutih temelja. S porastom naprezanja, procesima plastifikacije čestica tla, naponi se sustavno preraspodjeljuju na ostale dijelove temeljne plohe [2]. *Slika 2* zorno prikazuje ovaj fenomen.



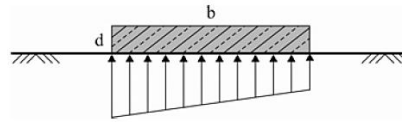
Slika 2: lijevo: Naponi na kontaktnoj plohi temelja samca i tla; desno: Razvoj napona na kontaktnoj plohi sve do sloma [2]

Ako se za prijenos opterećenja na tlo angažiraju veće površine govorimo o temeljnim pločama. One mogu biti konstantne debljine ili s lokalnim ojačanjima, primjerice ispod stupova na mjestu velikih koncentriranih sila. Da bi se temeljna ploča proračunala sa zadovoljavajućom točnošću potrebno je poznavati stvarnu preraspodjelu napona na kontaktnoj plohi s tlom, što je moguće samo ako se razviju dovoljno točni, o velikom broju parametara ovisni, geomehanički modeli tla na kojemu se objekt namjerava temeljiti. U praksi se najčešće koriste sljedeći modeli tla:

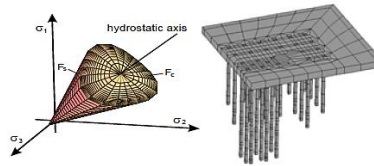
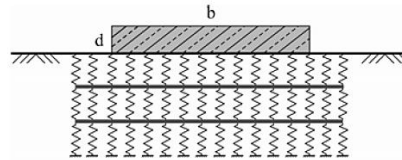
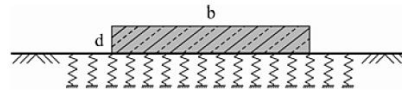
- Model tla neizmjerne krutosti s ravnomjernom preraspodjelom napona na kontaktnoj plohi
- Model koji opisuje tlo kao seriju međusobno nepovezanih opruga jednakih elastičnih svojstava
- Model tla koji uzima u obzir različitu krutost slojeva tla u poluprostoru ispod temelja
- Napredni modeli tla u okviru numeričke analize koji uzimaju u obzir konsolidacijsko stanje, sadržaj vode, razinu i povijest nanošenja opterećenja/rasterećenja na tlo i sl.



Ravnomjerna preraspodjela
napona pod krutim temeljem



Model tla opisan serijom
elastičnih (Winklerovih) opruga



Slika 3: Shematski pregled najčešćih geomehaničkih modela tla [3]

2.2.1 Ravnomjerna preraspodjela napona na kontaktnoj plohi

Model ravnomjerne preraspodjele napona je najčešće korišten model u inženjerskoj praksi. Linearna preraspodjela napona polazi od pretpostavke nepromjenjivosti geometrije poprečnog presjeka odnosno njegove beskonačne krutosti, stoga je primjena tehničke teorije savijanja moguća bez ikakvih ograničenja. U potpunosti se zanemaruju utjecaji promjene oblika temelja i tla te njihova međusobna interakcija. Radi se o krajnje pojednostavljenom modelu koji za većinu inženjerskih problema daje dovoljno točna praktična rješenja koja su na strani sigurnosti. Međutim, u slučaju fleksibilnih, odnosno u smislu savijanja mekih ploča, ova metoda daje konzervativna i neekonomična rješenja. Razlog tomu leži u činjenici da se kod razmjerno manje krutih ploča naponi u tlu koncentriraju na mjestu unosa sile u tlo, dakle na mjestima ispod stupova i zidova, a smanjuju u polju, čime se višestruko smanjuju utjecaji savijanja temeljne ploče.

Napomena:

Naponi u tlu mogu se smatrati nekom vrstom „obrnuto opterećenja“. Ako se prisjetimo modeliranja tla elastičnim oprugama, što je u inženjerskoj praksi najčešći slučaj, složiti ćemo se da se tlo i u slučaju temeljnih ploča najčešće modelira oprugama istih elastičnih svojstava neovisno o tome nalazi li se u polju ili ispod zidova, odnosno stupova. Preporuka je da se na mjestu unosa opterećenja u tlo moduli reakcije tla povećaju 1,5 – 2 puta u odnosu na one zone koje ne sudjeluju direktno u prijenosu sila u tlo.

Zašto ovako grubi nedostaci u modeliranju tla ne dovode do većih problema u inženjerskoj praksi ilustrirat ćemo na sljedeći način:

Iz otpornosti materijala znamo da se veza momenata savijanja i pomaka može opisati na sljedeći način.

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d^2 v}{dx^2} = \frac{M(x)}{EI}, \frac{d^3 v}{dx^3} = \frac{1}{EJ} \cdot \frac{dM(x)}{dx} = \frac{T(x)}{EI}, \frac{d^4 v}{dx^4} = \frac{1}{EI} \cdot \frac{dT(x)}{dx} = q(x)$$

Kako su naponi u tlu u biti četvrta derivacija pomaka, to je i utjecaj pogreške u procjeni reakcije tla četvrti korijen te pogreške. Pretpostavimo da računamo s modulom reakcije tla od $1 \cdot 10^6 \left(\frac{kN}{m^3}\right)$ umjesto s $1 \cdot 10^4 \left(\frac{kN}{m^3}\right)$, pogreška se u pomacima neće manifestirati 100 puta nego „samo“ $\sqrt[4]{100} = 3,16$ puta. Osim toga direktni utjecaj na rezne sile imati će samo relativni pomaci odnosno relativna slijeganja.



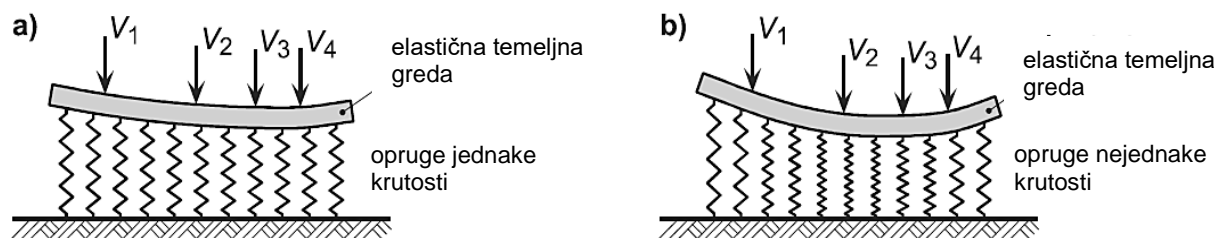
Apsolutna vrijednost slijeganja sadržava značajan udjel translacijskih pomaka koji po definiciji ne uzrokuju rezne sile.

2.2.2 Model elastičnih opruga

Tlo se često modelira oprugama jednakih elastičnih svojstava. Opruge podrazumijevaju proporcionalnost pomaka i sile. Iz uvjeta $K \cdot \Delta = F$ lako se dolazi do krutosti opruge jer se sila koja izaziva pomak u pravilu zna, a pomak slijeganja se računa s onom točnošću koju dopuštaju parametri iz geotehničkih podloga. U krajnjem slučaju, ako inženjer ne raspolaže geotehničkim podacima, slijeganje se pretpostavi ili procijeni na temelju iskustva. Ovako postavljen mehanički sustav može se promatrati kao niz međusobno nepovezanih elastičnih opruga. U slučaju da su naponi na temeljnoj spojnici poznati, modul reakcije tla koji fizikalno predstavlja krutost elastične opruge određuje se na sljedeći način (vidi sliku 4a):

$$\sigma_o = k_s \cdot y \quad \text{uz } k_s \text{ u [kN/m}^3\text{]}$$

U općem slučaju opruge utječu jedna na drugu i povrh toga nemaju ista elastična svojstva. Ova činjenica može se uzeti u obzir modeliranjem s oprugama različite krutosti, međutim u tom slučaju prikladniji je proračun s modelom uslojenog tla [4].



Slika 4: Modeli tla opisani elastičnim oprugama (isti moduli reakcije tla) [1]

Tablica 1: Empirijske vrijednosti modula reakcije tla prema Wölfer-u [4]

Vrsta tla	k_s [MN/m ³]
rahli treset i organska tla (slična humusu)	5 - 10
teški, zbijeni treset i organska tla	10 - 15
fini, rahli pijesak (primjerice u koritu rijeka)	10 - 15
nasipi od humusa, pijeska i šljunka	10 - 20
glineno tlo zasićeno vodom	20 - 30
vlažno glineno tlo	40 - 50
suho glineno tlo	60 - 80
suho i tvrdo glineno tlo (čvrste gline)	100
konsolidirani humus sa sitnim pijeskom i malim udjelom stijena	80 - 100
konsolidirani humus sa sitnim pijeskom i značajnim udjelom stijena	100 - 120
fini šljunak sa velikim udjelom pijeska	80 - 100
šljunak srednje veličine pomiješan s finim pijeskom	100 - 120
šljunak srednje veličine pomiješan s krupnim pijeskom	120 - 150
grubi šljunak pomiješan s grubim pijeskom	150 - 200
grubi šljunak s malim udjelom pijeska	150 - 200
jako konsolidirani grubi šljunak s malim udjelom pijeska	200 - 250

Modeliranje tla elastičnim oprugama u pravilu se primjenjuje u metodi konačnih elementa, koja se kao numerička metoda temeljena na pomacima koristi u većini komercijalnih programa za statičku analizu konstrukcija.

2.2.3 Model uslojenog tla s različitim modulima stišljivosti

Model uslojenog tla baziran je na linearno elastičnom modelu izotropnog poluprostora kojim se uzima u obzir utjecaj napona susjednih ploha na stanje napona i slijeganja u promatranoj točki. Centralni parametri modela uslojenog tla su Young-ov modul elastičnosti određen u edometru E_{oed} i Poisson-ov koeficijent ν . U geomehanici se E_{oed} često pogrešno poistovjećuje s modulom krutosti E_s iako samo za $\nu = 0$ vrijedi $E_{oed} = E_s$. U Švicarskoj ovaj modul zovemo modulom stišljivosti M_E neovisno o načinu na koji je određen. Ono što je zajedničko modulima elastičnosti tla je to da su nelinearni i da ovise o trenutnom stanju napona, ali i o povijesti nanošenja opterećenja te o predznaku naprezanja (opterećenje, rasterećenje, prvo ili ponovljeno opterećenje i sl.). Zbog porasta opterećenja s dubinom u ovisnosti o težini stupca tla, tlo ima drugačija svojstva u svakoj točki. Uz to, svojstva tla ovise i o stupnju konsolidacije i o težini objekta. Ovisno o uslojenosti, svojstva tla variraju s dubinom. Implementacija ovog modela je česta u programima koji modeliraju tlo kao poluprostor ispod temeljne plohe.

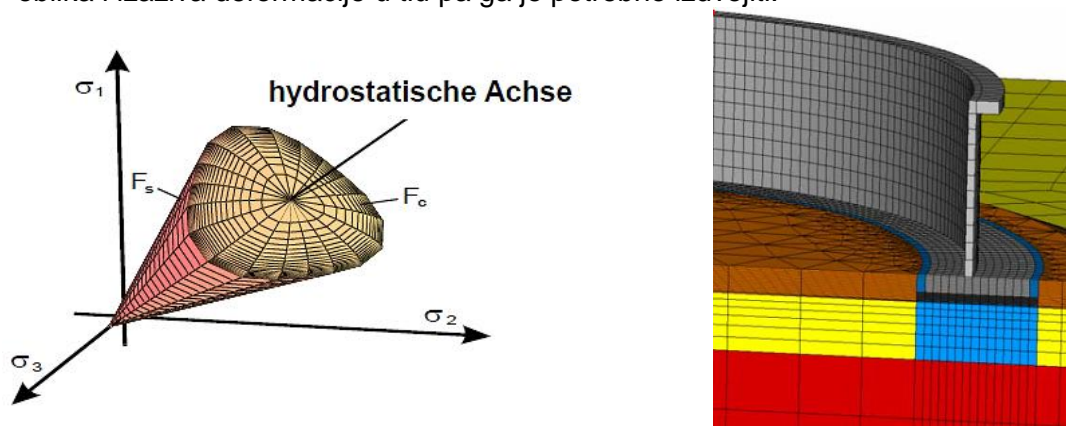
2.2.4 Napredni konstitucijski modeli tla u okviru numeričke analize

Ranije opisani modeli tla su temeljeni na nizu pojednostavljenja. Svi polaze od pretpostavke da je tlo homogeno i općenito linearno elastično ili elastično unutar pojedinačnih slojeva poluprostora.

Modeli tla, koji uzimaju u obzir veći broj parametara, su po svojoj prirodi kompleksni i nalaze se samo u programima ciljano razvijenima za rješavanje geotehničkih zadataka. Jedan takav program je PLAXIS, razvijen na sveučilištu Delft u Nizozemskoj.

Program razlikuje desetak modela tla od kojih je primjerice najjednostavniji *Mohr-Coulomb-ov* model linearno elastičnog - idealno plastičnog tla. Nešto kompliciraniji su modeli tla poznati pod nazivima *Hardening Soil Model*, *Hardening Soil Model with small-strain stiffness* sve do najzahtjevnijih modela koji uzimaju u obzir ponašanje tla u ovisnosti o vremenu (npr. *Time Dependent Soft Soil Creep Model*). Ovdje nećemo gubiti vrijeme na opis pojedinačnih modela tla. Dovoljno je reći da se opis svih materijala nalazi na webu. Samo po sebi je logično da kompliciraniji modeli tla zahtijevaju veći broj parametara kojima se opisuju. Jedan dio parametara moguće je dobiti laboratorijski (za koherentna i sitnozrna tla), dok je jedan dio parametara, poglavito za krupnozrna ili nekoherentna tla, potrebno dobiti kao rezultat ispitivanja *in situ* putem standardnih penetracijskih pokusa, pokusa direktnog smicanja i sl. U nedostatku geomehaničkih podloga neki se parametri pretpostavljaju na temelju iskustva.

Napredni geomehanički modeli definiraju materijal u prostoru glavnih napona na način da se tenzor glavnih napona prikaže kao zbroj sfernog i devijatorskog tenzora napona. Sferni tenzor se jednostavno predstavlja tzv. hidrostatskim naponima, prostornom osi na kojoj su sva tri glavna napona jednaka, dok je devijatorski dio onaj dio napona koji radi na promjeni oblika i izaziva deformacije u tlu pa ga je potrebno izdvojiti.



Slika 5: lijevo: Nelinearni, o naponima ovisni radni dijagram materijala, desno: Primjer prikaza strukture i modela tla u jednom od FEM-programa [3]

Na *slici 5* predstavljena je figura koja opisuje opće naponsko stanje u prostoru glavnih napona izraženih preko hidrostatske osi i devijatorskog dijela napona. Sve točke unutar stošca se nalaze u elastičnom području, dok su sve točke na ploštini stošca u stanju tečenja. Za njih vrijedi kriterij da je neasocirani plastični potencijal iscrpljen i jednak nuli. Prostor je ograničen „kapom“ (asocirani plastični potencijal) koja u mehaničkom smislu predstavlja ono stanje napona na kojem dolazi do destrukcije strukture tla zbijanjem, odnosno mrvljenjem. Nijedno stanje napona ne može ležati izvan predstavljenog prostornog stošca, a nagib linije koja opisuje plastično ponašanje materijala ovisan je o stupnju „ojačanja“ (hardening) prilikom nanošenja dodatnog opterećenja na materijal koji se već nalazi u fazi tečenja.

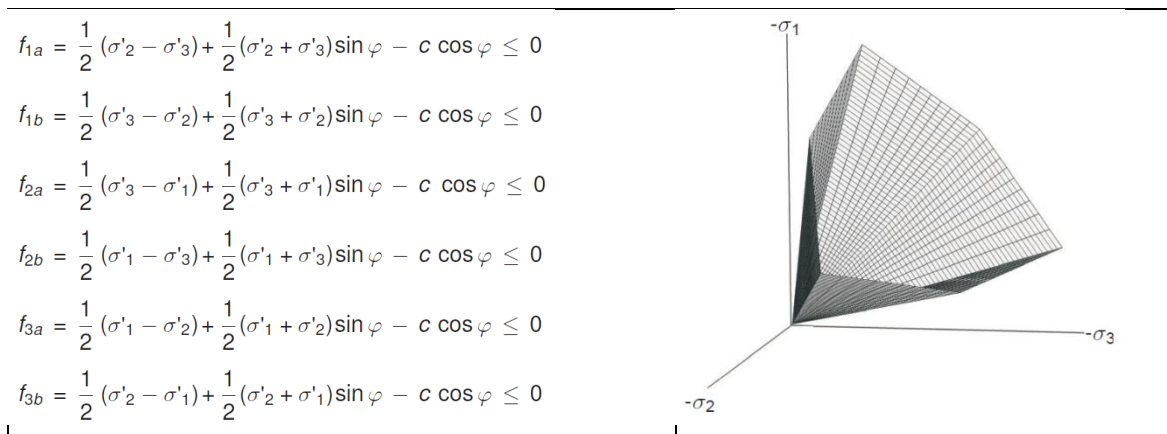
2.3 Modeli tla korišteni za dimenzioniranje KPP-temelja zgrade Letzibach u Zuerichu

U nastavku su detaljnije opisani modeli tla korišteni za dimenzioniranje temelja visoke zgrade Letzibach u Zuerichu.

2.3.1 Mohr-Coulomb (linearno elastični – idealno plastični material)

Mohr-Coulomb-ov model je jednostavan linearno elastični - idealno plastični model tla ali i svih ostalih materijala u građevinarstvu, primjerice betona. Najčešće se koristi za prvu procjenu ponašanja tla pod projektiranim opterećenjem. Model daje prilično dobre rezultate kad se traži vrijednost sila u geotehničkim sidrima, štapnim sidrima, silama na razupore i sl. S obzirom na ograničenosti modela, nije prikladan za analizu deformacija i pomaka. Linearno elastični dio definicije materijala baziran je na Hook-ovom zakonu, dok je idealno plastični dio temeljen na Mohr Coulomb-ovom uvjetu loma. Za opis stanja napona (elastični ili plastični) uvedena je plastična funkcija f , koja definira zavisnost napona i deformacija. Materijal teče kad je funkcija plastičnosti $f = 0$. Fizikalno se ovaj uvjet može razumjeti na sljedeći način: ako je stanje napona u elastičnom području, onda se čestica tla može dodatno opteretiti sve do stanja tečenja. Dakle, postoji potencijal za povećanje napona. Kada je taj potencijal iscrpljen, nalazimo se na plohi koja opisuje tečenje i plastični potencijal dalje ne može rasti pa je jednak 0. Ovaj uvjet je predstavljen u prostoru glavnih napona kao ovojnica sastavljena od 6 ploha (heksagonalni stožac), kao rezultat 6 jednadžbi koje definiraju 6 ploha plastičnog potencijala [9]. Zainteresirani čitatelji mogu pročitati više o ovoj temi u literaturi (primjerice Smith & Griffiths, 1982) ili u uputstvima programskog paketa Plaxis.

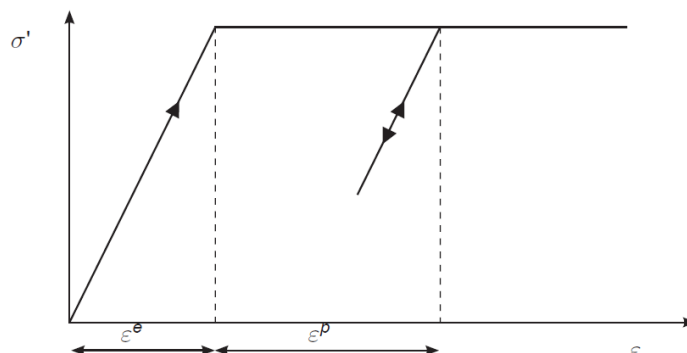
Izrazi za funkciju plastičnosti se predstavljaju u općem obliku, nezavisno o vrsti materijala Pragerovim odnosno Drukerovim izrazima. Na *slici 6* su opći Drucker-ovi parametri “prevedeni” na materijal tlo, koji je karakteriziran dobro poznatim parametrima kao što su kut unutarnjeg trenja φ i kohezija c .



Slika 6: Jednadžbe koje definiraju uvjete tečenja; površine plastičnih zona po Mohr-Coulomb-ovom zakonu u prostoru glavnih napona (ovdje je kohezija $c=0$) [9]



Za sve napone unutar ovojnice vrijedi da se nalaze na linearno elastičnom dijelu grafa i da se nakon rasterećenja pomaci vraćaju u početno stanje bez zaostalih plastičnih deformacija (reverzibilan proces). Ako je materijal u fazi tečenja, udio plastičnih deformacija ostaje trajan i poslije rasterećenja.

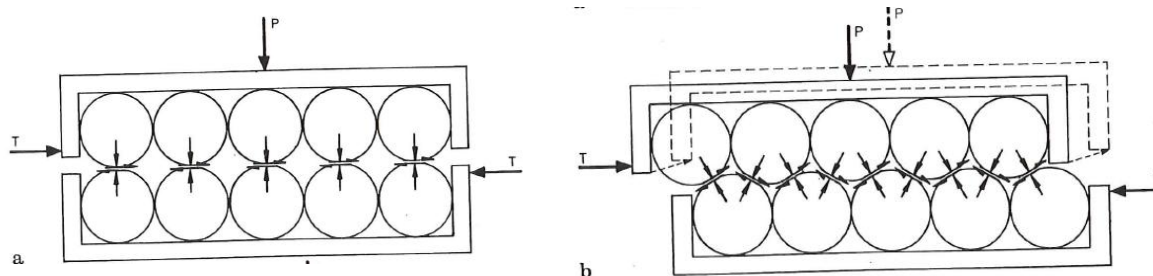


Slika 7: Idealno elastični – idealno plastični model materijala (bez ojačanja; hardening=0)

Velika prednost Mohr-Coulomb-ovoga modela je mali broj parametara potrebnih za njegovu definiciju. To su:

- E : Young-ov modul elastičnosti
- ν : Poisson-ov broj
- c : Kohezija
- φ : Kut unutarnjeg trenja i
- ψ : Dilatancija

Dilatancija je parameter kojim se opisuje povećanje posmične čvrstoće karakteristične za konsolidirana i krupnozrna tla. Vrijednost ovoga parametra je često $\psi = 0^\circ$, a za kvarcni pijesak vrijednost ovoga parametra je $\psi = \varphi - 30$. Slika 8 zorno prikazuje povećanje prirodnog kuta unutarnjeg trenja φ zbog dodatne interakcije zbijenih čestica krupnozrnog tla.



Slika 8: Test posmika na a) normalno konsolidiranom i b) na prekonsolidiranom uzorku krupnozrnog tla, s učincima dilatancije

Ponašanje materijala izrazito je osjetljivo na varijacije vrijednosti parametara koji definiraju posmičnu čvrstoću. Zato je važno pouzdano ocijeniti vrijednosti kuta dilatancije, a što se jednostavno postiže analizom triaksijalnog laboratorijskog testa.

2.3.2 HS- Hardening Soil Model (model izotropnog ojačanja)

Za definiciju HS modela korišten je isti set parametara kao i za definiciju HSS - *Hardening Soil Small* i SS - *Soft Soil Model*a, kojima je pored nelinearnog ponašanja tla moguće opisati i procese puzanja odnosno razvoja slijeganja u vremenu.



Za razliku od Mohr- Coulomb-ova modela tla, funkcija plastičnosti koja opisuje HS model nije fiksno pozicionirana u prostoru glavnih napona, nego se „rasteže“ sukladno stanju plastičnih inkrementalnih deformacija [9].

Ojačanje materijala u plastičnom području s pripadajućim nereverzibilnim inkrementalnim deformacijama sastoji se od ojačanja u uvjetima hidrostatskog tlaka i ojačanja pod uvjetima primarno devijatorskih napona čistog posmika.

Pored već spomenutih parametara kojima se definira ponašanje Mohr-Coulomb-ova materijala, za definiranje HS materijala potrebni su dodatni geomehanički parametri:

- Krutost zavisna o naponskom stanju parametar: m
- Sekantna krutost iz triaksijalnog pokusa u uvjetima referentnog tlaka p^{ref} parametar: E_{50}^{ref}
- Referentno stanje tlaka = 100 kPa parametar: p^{ref}
- Edometarska tangentna krutost u uvjetima referentnog tlaka p^{ref} parameter: E_{oed}^{ref}
- Krutost tla u uvjetima opterećenja / rasterećenja parametar: E_{ur}^{ref}
- Poissonov koeficijent u uvjetima opterećenja / rasterećenja parametar: ν_{ur}

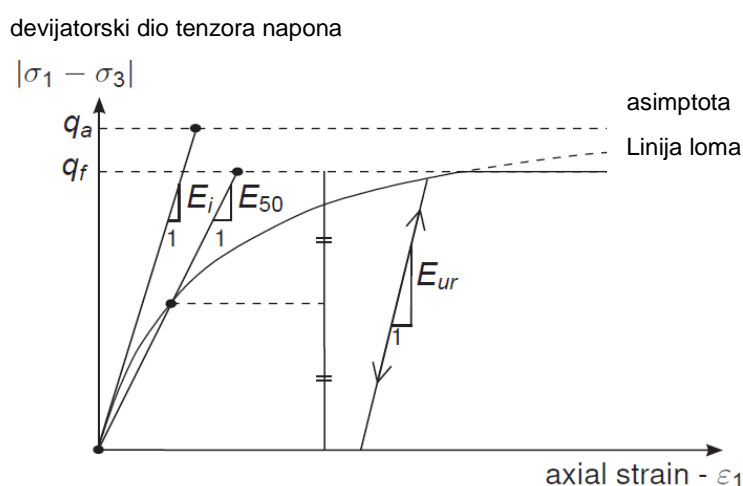
Vrijednost parametra ν je za MC- materijal na razini od $\nu \sim 0,3$, dok se za HS model kreće između $\nu = 0,15 - 0,2$ a maksimalna vrijednost ne bi trebala prelaziti $\nu_{max} = 0,25$

Temeljna ideja HS- modela je hiperbolna zavisnost vertikalnih inkrementalnih deformacija ε_1 devijatorskih napona i razlike glavnih napona u triaksijalnom pokusu $q = |\sigma_1 - \sigma_3|$ [9].

Drenirani (spori) triaksijalni pokus često pokazuje krivulje tečenja koje se mogu opisati sljedećom jednačinom:

$$-\varepsilon_1 = \frac{1}{E_i} \frac{q}{1 - q/q_a}$$

Napomena: u mehanici tla glavni naponi σ_2 i σ_3 su jednaki, stoga se često u literaturi obilježavaju s σ_r , čime se sugerira njihov radijalni smjer.

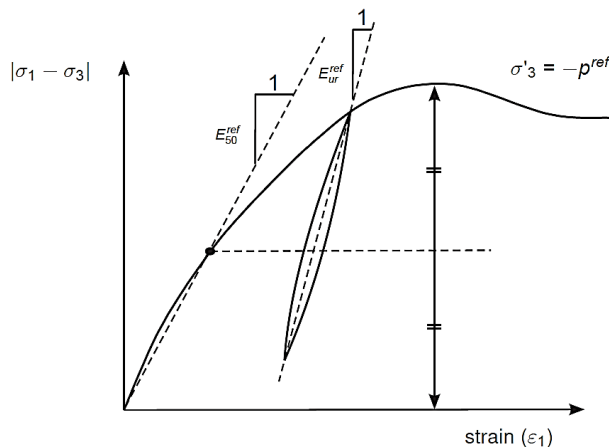


Slika 9: Hiperbolna zavisnost napona i inkrementalnih vertikalnih (glavnih) deformacija ε_1 dobivena triaksijalnim pokusom [9]

Dodatno svojstvo HS modela tla je u tome da je krutost tla u svakoj točki poluprostora zavisna o naponima u promatranoj točki.



Dok se kod Mohr-Coulomb-ova modela tla definira jedan parametar „modula elastičnosti“, u HS modelu tla potrebno je definirati sekantni „modul elastičnosti“. Ovaj modul uzima u obzir početno stanje napona na razini 50% maksimalne vrijednosti devijatorskih napona E_{50}^{ref} pri referentnom tlaku p^{ref} ($default = 100 \frac{kN}{m^2}$), ali i modul elastičnosti koji uzima u obzir rasterećenje i opterećenje uzorka tla E_{ur}^{ref} [9]



Slika 10: Definicija E_{50}^{ref} i E_{ur}^{ref} rezultata triaksijalnoga pokusa dreniranoga uzorka tla

U rješavanju različitih geotehničkih problema ne pojavljuje se uvijek potreba za primjenom naprednih modela tla. U *tablici 2* prikazan je prijedlog upotrebe pojedinačnih modela tla u zavisnosti o vrsti analiziranog problema.

Tablica 2: Upotreba modela tla sukladno problemu koji se rješava

Problem koji se analizira	Prikladan model tla	Primjedba
Zaštita građevne jame	(HS), HSS, SS	Općenito je najbolji model HSS, a SS samo za slučajeve izrazito „mekanog“ tla
Stabilnost pokosa, slom tla	MC, HS, HSS, SS	Izbor modela nebitan jer svi imaju isti kriterij sloma
Stabilnost kosina potporni zidovi sa i bez geotekstila	HS, HSS, SS	Općenito je najbolji model HSS, a SS samo za slučajeve izrazito „mekanog“ tla
Slijeganje i konsolidacija	(HS), HSS, SS	Općenito je najbolji model HSS, a SS samo za slučajeve izrazito „mekanog“ tla
Temelji	HS, HSS, SS	Općenito je najbolji model HSS, a SS samo za slučajeve izrazito „mekanog“ tla



Tablica 3: Međusobna zavisnost geomehničkih parametara tla koji opisuju Hardening Soil modele

Dilatancija	$\psi = \begin{cases} 0 & \varphi < 30^\circ \\ \varphi - 30^\circ; & \varphi \geq 30^\circ \end{cases}$	
Referentna krutost iz standardnog triaksijalnog pokusa	$E_{50}^{ref} \approx 1 - 1.25 \cdot E_{oed}^{ref}$	
Referentna krutost pri opterećenju odnosno rasterećenju uzorka	$E_{ur}^{ref} \approx 3.0 \cdot E_{oed}^{ref}$ $E_{ur}^{ref} \approx (5 - 8) \cdot E_{oed}^{ref}$	za nekoherentna tla za koherentna tla
EkspONENT kojim se kontrolira ovisnost krutosti o naponu	$m \approx 0.5 - 0.6$	za nekoherentna tla
Poisson-ov koeficijent	$m \approx 0.7 - 1.0$ $\nu = 0.2$	za koherentna tla
Referentni atmosferski tlak	$p^{ref} = 100 \text{ kN/m}^2$	
Koeficijent tlaka mirovanja normalno konsolidiranoga tla	$K_0^{nc} = 1 - \sin \varphi$	

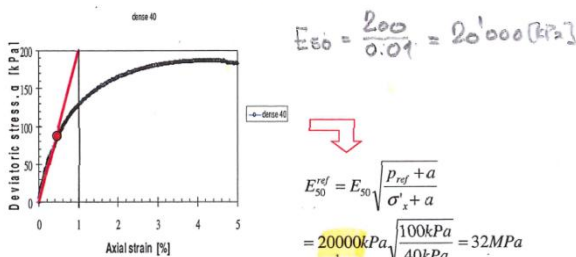
Parameter	Loose	Medium	Dense	Unit
E_{50}^{ref} (for $p_{ref} = 100 \text{ kPa}$)	20000	30000	40000	kN/m ²
E_{ur}^{ref} (for $p_{ref} = 100 \text{ kPa}$)	60000	90000	120000	kN/m ²
E_{oed}^{ref} (for $p_{ref} = 100 \text{ kPa}$)	20000	30000	40000	kN/m ²
Cohesion c	0.0	0.0	0.0	kN/m ²
Friction angle φ	30	35	40	°
Dilatancy angle ψ	0	5	10	°
Poisson's ratio ν_{ur}	0.2	0.2	0.2	-
Power m	0.5	0.5	0.5	-
K_0^{nc} (using Cap)	0.5	0.43	0.36	-
Tensile strength	0.0	0.0	0.0	kN/m ²
Failure ratio	0.9	0.9	0.9	-

Slika 11: vrijednosti parametara za pijesak različitih stupnjeva zbijenosti

Orijentacijske vrijednosti geomehničkih parametara preuzete iz uputstva programa Plaxis su prikazane na slici 11 za pijesak različitih stupnjeva zbijenosti. Kako bi studenti i inženjeri imali čim veću praktičnu korist od ovog članka, u nastavku je u nekoliko primjera prikazan način određivanja pojedinačnih parametara na temelju geotehničkih podloga, odnosno laboratorijskih testova (vidi slike 12-15).

ESTIMATING INPUT PARAMETERS, HS MODEL

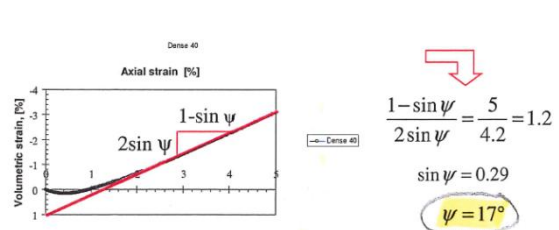
Triaxial test results, Shaoli (2004)
Dense Hoksund sand at 40 kPa, $n = 35.9\%$ (initial) – 39.6% (end of test)



Slika 12: Određivanje modula elastičnosti E_{50}^{ref}

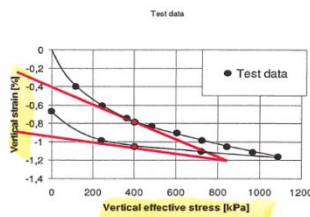
ESTIMATING INPUT PARAMETERS, HS MODEL

Triaxial test results, Shaoli (2004)
Dense Hoksund sand at 40 kPa, $n = 35.9\%$ (initial) – 39.6% (end of test)



Slika 13: Određivanje kuta dilatancije ψ

ESTIMATING INPUT PARAMETERS, HS MODEL
Oedometer test dense Hoksund sand, $n = 39\%$, (Moen, 1975)



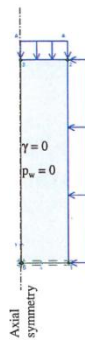
Loading:

$$E_{\text{od}} = E_{\text{od}}^{\text{ref}} \sqrt{\frac{\sigma_1' + a}{p_a' + a}}$$

$$E_{\text{od}}^{\text{ref}} = E_{\text{od}} \sqrt{\frac{p_a' + a}{\sigma_1' + a}} = \frac{850 \text{ kPa}}{0.008} \sqrt{\frac{100 \text{ kPa}}{400 \text{ kPa}}} = 53 \text{ MPa}$$

Unloading: $E_{\text{ur}} = E_{\text{ur}}^{\text{ref}} \sqrt{\frac{\sigma_1' + a}{p_a' + a}}$ $E_{\text{ur}}^{\text{ref}} = E_{\text{ur}} \sqrt{\frac{p_a' + a}{\sigma_1' + a}} = \frac{850 \text{ kPa}}{0.0028} \sqrt{\frac{100}{200}} = 215 \text{ MPa}$

Slika 14: Određivanje edometarskog modula elastičnosti



HS Material parameters for dense Hoksund sand from fitting PLAXIS results to experimental data:

$$E_{50}^{\text{ref}} = 35 \text{ MPa (estimated 32 MPa)}$$

$$E_{\text{od}}^{\text{ref}} = 45 \text{ MPa (estimated 53 MPa)}$$

$$E_{\text{ur}}^{\text{ref}} = 180 \text{ MPa (estimated 215 MPa)}$$

$$m = 0.6$$

$$c = 1 \text{ kPa}$$

$$\varphi = 43^\circ$$

$$\psi = 18^\circ$$

$$K_0^{\text{NC}} = 0.4$$

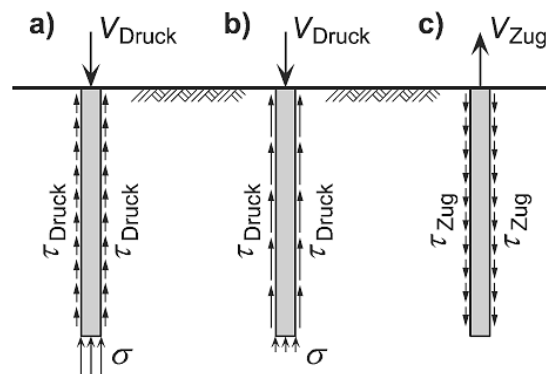
$$\nu_{\text{ur}} = 0.2$$

Triaxial tests by Shaoli (2004)

Slika 15: Konačne usvojene vrijednosti parametara

3 Duboko temeljenje na pilotima

U pravilu inženjerske objekte temeljimo na razini najniže plohe koja sadržava konstruktivne elemente. U visokogradnji su to u pravilu podrumске ili garažne površine. Ako temeljenje zbog loših geotekničkih uvjeta nije moguće na tim razinama, gravitacijska opterećenja moramo prenijeti na slojeve tla s većim kapacitetom nosivosti. Pri tome koristimo pilote koji opterećenje prenose putem trenja po plaštu, otpora na vrhu baze pilota ili kombinirano.



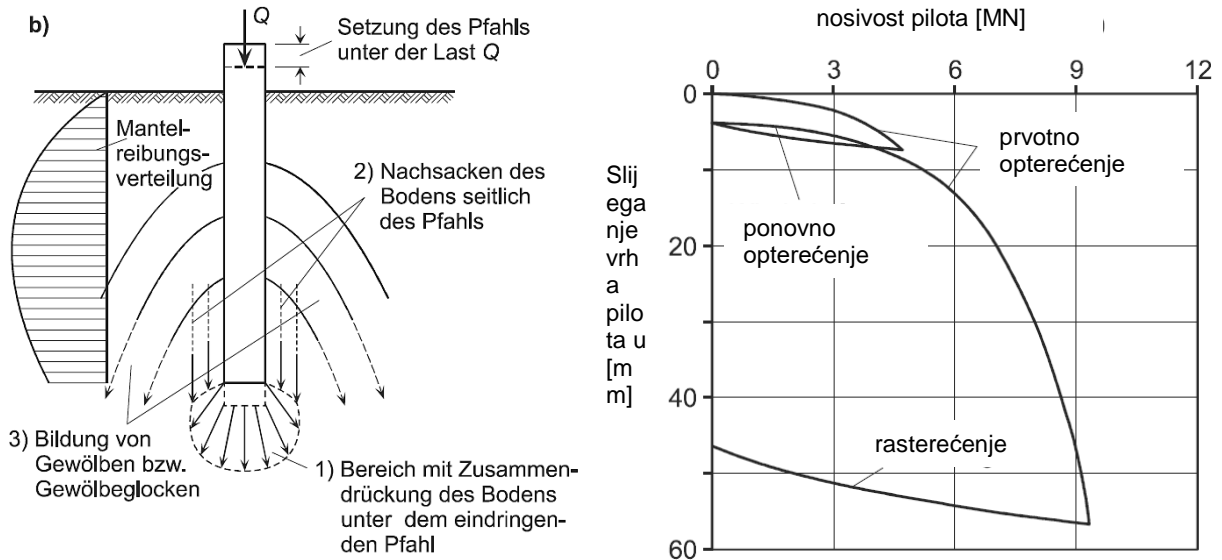
Slika 16: Pilot koji prenosi opterećenje: a) na vrhu (bazi) pilota, b) kombinirano na bazi i trenjem po ovojnici pilota i c) samo trenjem, pilot koji radi na tlak/vlak [1]

3.1.1 Ponašanje pilota

Pri proračunu pilota dokaz se provodi za unutarnju i vanjsku nosivost pilota. Unutarnja nosivost je nosivost primjenjenog materijala, drva, čelika ili betona i u pravilu ne predstavlja mjerodavan kriterij nosivosti. Dokaz unutarnje nosivosti moguće je provesti na temelju važećih građevinskih propisa.

Vanjska nosivost se odnosi na nosivost tla u kojemu se pilot izvodi. Pri tome ne smije doći niti do neželjeno velikih pomaka (slijeganja) niti do sloma tla u području kritičnih zona unošenja sila u tlo. Za dokaze vanjske nosivosti pilota nema jedinstvenih, općeprihvaćenih pravila. Najčešće se koristi opća formula nosivosti tla. U njemačkom govornom području postoje preporuke stručnih povjerenstava i radnih skupina, koje izrađuju preporuke vezano za načine procjene nosivosti pilota. Kod proračuna vanjske nosivosti pilota bilo bi poželjno kalibrirati proračune prema rezultatima ispitivanja tla ili probnim opterećenjima pilota.

Slika 17 prikazuje mehanizme odziva tla pri prijenosu opterećenja s pilota na tlo.



Slika 17: lijevo: "Lučno" djelovanje u okolini pilota, trenje po ploštini i gnječenje tla ispod vrha pilota [1], desno: Graf ovisnosti nosivosti i pomaka za vrijeme probnog opterećenja pilota [5]

3.1.2 Grupa pilota

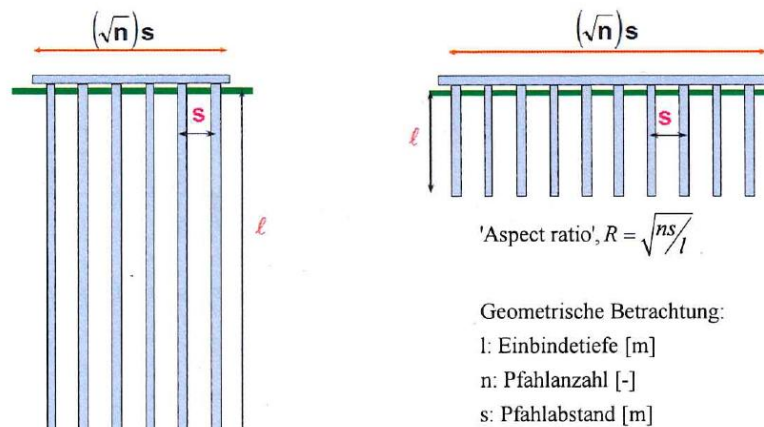
Ako za prijenos opterećenja na tlo trebamo više od jednog pilota na relativno malom razmaku, onda je potrebno uzeti u obzir međusobnu interakciju pilota na njihovu nosivost i ukupnu deformaciju. Međusobni utjecaj pilota zavisi između ostaloga o razmaku, promjeru, duljini te omjeru nosivosti na vrhu prema nosivosti po ploštini pilota. Prema [2] već kod razmaka reda veličine $(6 - 8) \varnothing$ međusobni utjecaj pilota morao bi se uzeti u obzir.

Grupe pilota ponašaju se drugačije od pojedinačnog pilota, naročito u pogledu ukupnih deformacija. U stanju loma nisu primjećena veća odstupanja u kapacitetu nosivosti pojedinačnih pilota i pilota u grupi [1]. Za granično stanje nosivosti vodi se dokaz nosivosti pojedinačnih pilota i čitave grupe kao jedinstvenoga bloka u čije je sudjelovanje uključeno i tlo „zarobljeno“ između pilota. Postupak proračuna je detaljno opisan u [5].

Deformacija grupe pilota ovise o omjeru R (vidi sliku 18) koji se određuje:

$$R = \sqrt{\frac{n \cdot s}{l}}$$

Pri čemu je: l = dubina pilota u tlu; n = broj pilota u grupi i s = razmak pilota



Slika 18: Geometrijski omjer R (Aspect Ratio) grupe pilota

Ako je $R > 4$, odnosno ako su piloti na velikom razmaku s obzirom na njihovu debljinu, grupa pilota ponaša se kao ekvivalentna ploča. Model odgovara „mekanoj“ ploči koja nosi na savijanje i nalazi se na dubini vrhova pilota l . U tlu vladaju ujednačeni naponi, ali su moguća velika diferencijalna slijeganja. Međusobni utjecaj pilota je relativno mali [6].

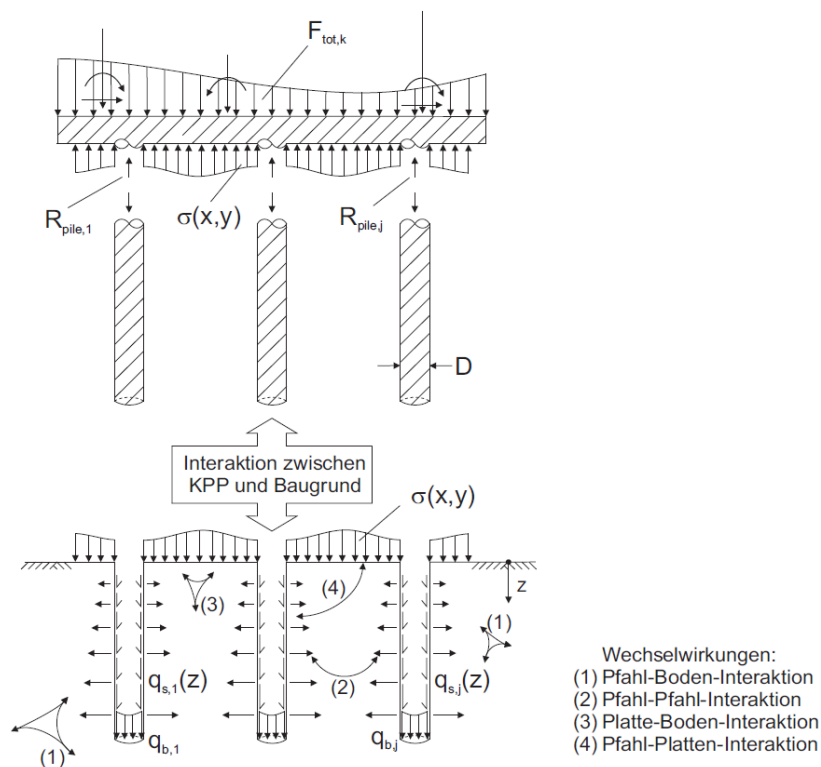
Ako je $R < 2$, odnosno ako su piloti na relativno malom razmaku s obzirom na njihovu debljinu, njihovo ponašanje odgovara jednom ekvivalentnom pilotu. Model odgovara ekvivalentnoj debeloj, dakle krutoj ploči na dubini vrhova pilota l . Unutarnji piloti utječu malo na vanjske pilote i pri istim pomacima prenose veća opterećenja [6].

3.2 Kombinirano temeljenje pilotima i temeljnom pločom

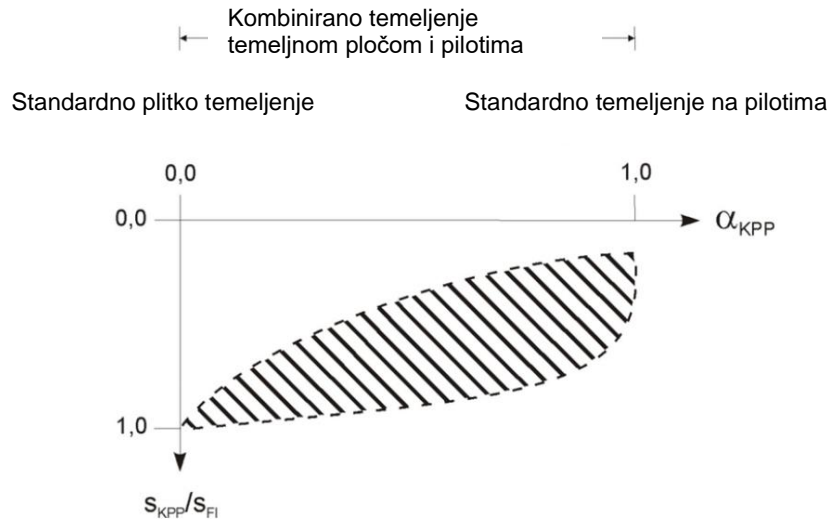
Kombinirani temelj sastavljen od pilota, temeljnoga tla i temeljne ploče je kompozitna geotehnička konstrukcija čija je nosivost definirana međusobnom interakcijom svih pojedinačnih sastavnica.

Cilj kreiranja kompozita je redukcija ukupnih deformacija i diferencijalnih slijeganja, a time i smanjenje utjecaja savijanja na temeljnu konstrukciju. Kreiranjem KPP-temelja postiže se smanjenje duljine i broja pilota, a istodobno se povećava kapacitet nosivosti temelja.

Učinkovitost KPP-konstrukcije izražava se koeficijentom α_{KPP} . Ovaj koeficijent odražava učešće pilota u ukupnom kapacitetu nosivosti temeljnoga kompozita. Koeficijent α_{KPP} ovisi o razini opterećenja i slijeganja i leži u granicama između 0 i 1, pri čemu 0 označava slučaj plitkog, a 1 slučaj dubokog temeljenja na pilotima [7].



Slika 19: Shema djelovanja KPP-temelja [7]



Slika 20: Moguće smanjenje slijeganja primjenom KPP-temeljenja u ovisnosti o vrijednosti koeficijenta α_{KPP}

4 Upute za dimenzioniranje KPP- temelja

Kombinirano temeljenje podnom pločom i pilotima je inovativni koncept temeljenja kojim se omogućuje smanjenje diferencijalnih slijeganja i ukupnih deformacija s istovremenim povećanjem nosivosti temeljne konstrukcije. Pri dimenzioniranju je potrebno uzeti u obzir međusobnu interakciju ploče, pilota i tla [6].

4.1 Granično stanje nosivosti (ULS - ultimate limit state)

KPP metoda temeljenja je relativno nova i nije u svim pojedinostima uređena normama. U njemačkom govornom području postoje upute u kojima se inženjerima daju smjernice za primjenu ovog koncepta u praksi [3]. Kod dokaza na granično stanje nosivosti treba dokazati vanjsku i unutarnju nosivost temeljne konstrukcije. Dokaz unutarnje nosivosti odnosi se na dokaz pilota na normalnu silu i savijanje, te podne ploče na savijanje, posmik i proboj.

Za dokaz vanjske nosivosti nije potreban dokaz pojedinačnih elementa, već dokaz nosivosti čitavoga sistema temeljenja [10].

Karakteristična vrijednost ukupnog kapaciteta nosivosti sastoji se od kapaciteta nosivosti podne ploče i pilota te se može izraziti na sljedeći način:

$$R_{c,tot}(s) = \sum_{j=1}^m R_{pile,i}(s) + R_{raft}(s)$$

$R_{c,tot}$	karakteristična nosivost čitavog KPP – temelja
$R_{pile,i}$	karakteristična nosivost i-toga pilota
R_{raft}	karakteristična nosivost temeljne ploče
s	slijeganje temeljne konstrukcije [7]

Dokaz vanjske nosivosti smatra se ispunjenim ako KPP-sustav temeljenja zadovoljava sljedeći uvjet:

$$E_d \leq \frac{R_{c,tot}}{\gamma_{R,v}} = R_{c,tot,d}$$

E_d	računska vrijednost sume svih utjecaja (na d-razini)
$\gamma_{R,v}$	parcijalni koeficijent sigurnosti za temelje (u pravilu definiran propisima)
$R_{c,tot,d}$	računska vrijednost ukupnog kapaciteta nosivosti KPP-temelja (na d-razini)

Određivanje utjecaja na KPP-temelj potrebno je u pravilu provesti s provjerenim i potvrđenim modelom. Iz toga slijedi da se proračun primjenom MKE ne može zaobići.

4.2 Granično stanje uporabljivosti (SLS- service limit state)

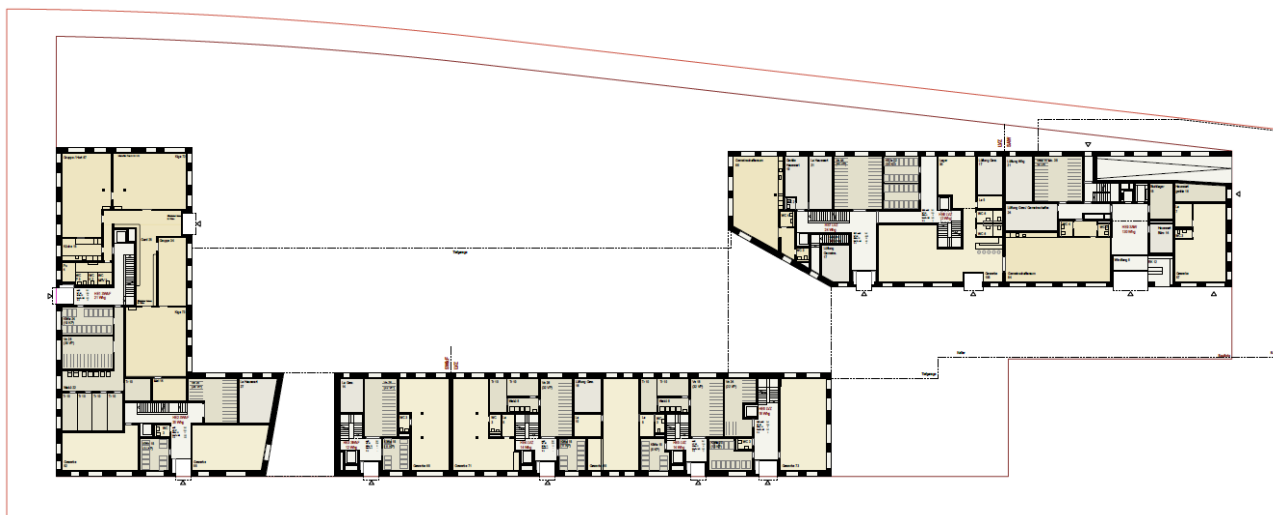
Dokaz uporabljivosti KPP-temelja naslanja se na dokaze temeljnih konstrukcija općenito na način kako je to propisano u Eurocode-u 7. To znači da proračunate vrijednosti napona i slijeganja ne smiju prekoračiti normom propisane vrijednosti dopuštenih totalnih ili diferencijalnih slijeganja.

5 Primjer: Temeljenje visoke zgrade Letzibach D u Zuerich-u



Slika 21: Vizualizacija objekta u fazi natječaja

Na području Letzibach D u Zuerich-Altstettenu grad Zuerich planira izvesti objekt s cca. 250 stanova, intergriranim dječijim vrtićem i poslovnim prostorima u prizemlju objekta. Osmokatni objekt je ukupne duljine od oko 150 m, a završava 25-katnim tornjem ukupne visine 70 m.



Slika 22: Prizemlje objekta Letzibach D, stanje projekta prosinac 2017.



Slika 23: Pogled na pročelje objekta

Slike 22 i 23 prikazuju rezultat natječaja provedenog 2016. godine. Lokalni geološki uvjeti su heterogeni. Radi se o mješavini slabo zbijenih aluvijalnih naplavina sa srednje zbijenim pijeskom. Za osmokatnicu je predviđena metoda plitkog temeljenja, ali će prije izvođenja objekta, primjenom zbijanja uvibriravanjem pješčanih pilota (Rüttelstopfverdichtungsverfahren) tlo biti poboljšanih svojstava i pripremljeno za prihvatanje tereta osmokatnog objekta.

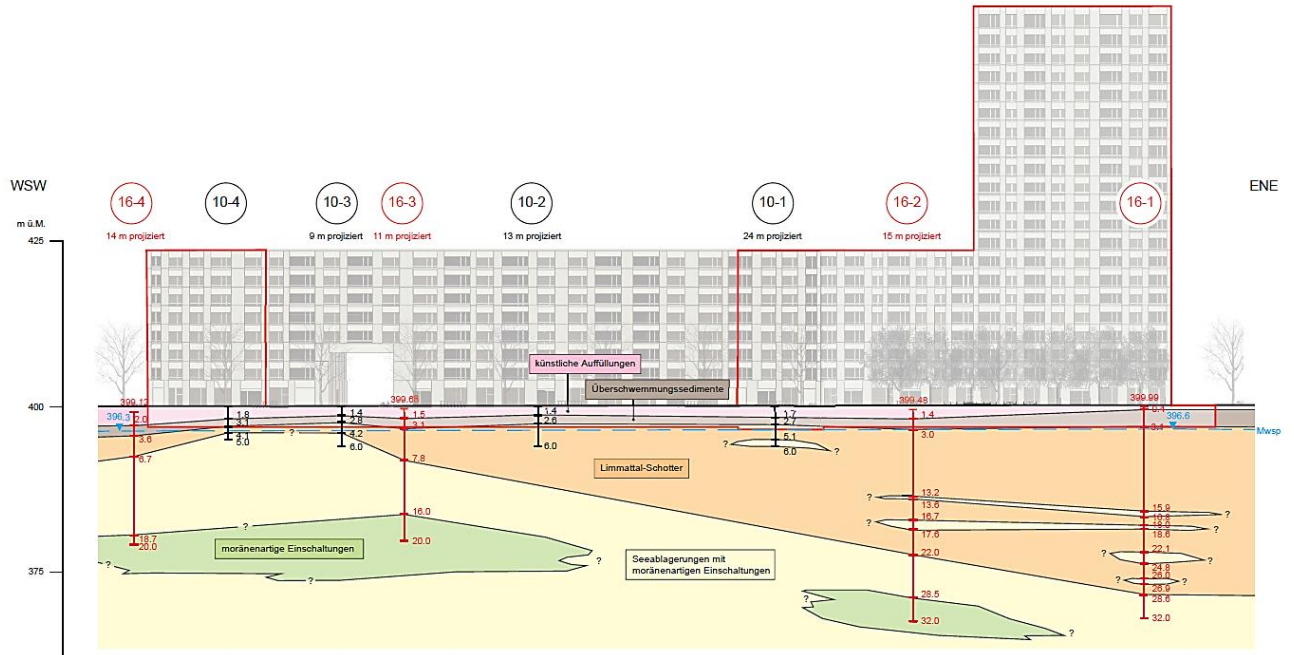
Temeljenje visoke zgrade je predviđeno KPP-metodom. Procijenjena debljina temeljne ploče je 80 cm. Piloti će biti raspoređeni direktno ispod onih dijelova nosivog sklopa koji prenose najveća vertikalna opterećenja (zidovi i stupovi), čime se značajno smanjuje utjecaj savijanja na podnu ploču.

5.1 Geologija

Iz geotehničkog izvješća (Dr. Heinrich Jäckli AG od 30. studenog 2016.) slijedi da se temeljno tlo sastoji od sljedećih slojeva:

- Umjetni nasip s gradivom od glineno - sitnozrnih pijesaka obogaćenih šljunkom, debljine 0,3 – 2,2 m.

- Naplavni sedimenti sastavljeni od finog pijeska s malim sadržajem gline, debljine 1.0 – 2.7 m. Nosivost ovoga sloja je mala, a osjetljivost na slijevanja velika.
- Šljunak iz doline Limmat-a prikazan narančastom bojom. Debljina sloja 1 - 25,5 m. (Slika 24)
- Aluvijalni sloj s velikim udjelom tla nastalog erozijom i djelovanjem ledenjaka. Tlo sadrži veliki udio nevezanih sitnozrnih pijesaka. Donja granica ovih slojeva je nepoznata (Slika 24 – žuta boja)



Slika 24: Uzdužni presjek objekta iz geotehničkoga elaborata [12].

Specifičnost u pogledu uslojenosti tla ispod temelja objekta je u tome da dobro nosivi slojevi tla (Limmattal-Schotter) leže na debelim, slabo nosivim i deformabilnim slojevima tla (Seeablagerungen). Osim toga, debljina dobro nosivoga tla varira između 4,2 m i 28,6 m. U području visoke zgrade debljina dobro nosivoga sloja varira između 22 i 28,6 m.

5.2 Modeliranje u Plaxis-u

Čitav postupak određivanja dimenzija temelja proveden je u dva koraka. U prvom koraku je uz pomoć uputa njemačkog društva za geotehniku (EA-Pfaehle) na temelju geotehničkog elaborata određena dimenzija pilota. Prema uputama EA-Pfaehle se na osnovu broja udaraca iz standardnog penetracijskog testa (N30) može odrediti korelacija nosivosti i pomaka.

Ovako konstruirane krivulje se kasnije koriste za potvrdu i usporedbu s rezultatima dobivenim u okviru numeričke analize, provedene u drugom koraku.

U svrhu usporedbe istih modela, u Plaxis-u je najprije modeliran jedan pilot za kružno-simetrično stanje napona bez utjecaja temeljne ploče. Samo modeliranje pojedinačnog pilota u Plaxis-u provedeno je za iz prethodne analize preuzetu vrijednost vertikalnog pomaka. Parametri korišteni za definiciju pojedinih slojeva tla su dani u nastavku.



Bodenbeschreibung	Raumlast	Kohäsion	Reibungs- winkel	Zusammendrückungsmodul	
				Erstbelastung	Wiederbelast.
				M_E	M_E'
	γ	c'	φ'	$[MN/m^2]$	$[MN/m^2]$
	$[kN/m^3]$	$[kN/m^2]$	$[^\circ]$		
künstliche Auffüllungen – siltiger Sand und Kies	20	0	(28) 30	–	–
Überschwemmungssedimente – siltiger Sand, z.T. mit Kies – toniger Silt mit Sand	19,5 19	0 (2) 4	(24) 26 (20) 22	– –	– –
Limmattal-Schotter (z.T. mit sandigen Zwischenlagen) – siltiger Kies mit Sand – siltiger Sand mit Kies	21 20,5	0 0	(35) 37 (30) 32	(40) 60 (20) 30	180 90
Seeablagerungen mit moränenartigen Einschaltungen – siltiger Feinsand/Sand – (tonig-) siltiger Kies mit Sand, (moränenartig)	20 20,5	0 0	(28) 30 30 (33)	(20) 30 (30) 50	90 150

Slika 25: Geotehnički parametri slojeva temeljnog tla na karakterističnom nivou [12]

Property	Unit	Value	Property	Unit	Value
Material set			Stiffness		
Identification		Auffüllung	E'	kN/m^2	20.00E3
Material model		Mohr-Coulomb	ν' (nu)		0.2000
Drainage type		Drained	Alternatives		
Colour		RGB 161, 226, 232	G	kN/m^2	8333
Comments			E_{oed}	kN/m^2	22.22E3
General properties			Strength		
γ_{unsat}	kN/m^3	20.00	c'_{ref}	kN/m^2	0.000
γ_{sat}	kN/m^3	22.00	φ' (phi)	$^\circ$	30.00
			ψ (psi)	$^\circ$	0.000

Slika 26: Geomehanički parametri kojima se definira sloj umjetnog nasipa (Künstliche Auffüllung)

Property	Unit	Value	Property	Unit	Value
Material set			Stiffness		
Identification		Limmat - Schotter	E_{50}^{ref}	kN/m^2	60.00E3
Material model		HS small	E_{oed}^{ref}	kN/m^2	60.00E3
Drainage type		Drained	E_{ur}^{ref}	kN/m^2	180.0E3
Colour		RGB 134, 234, 162	power (m)		0.5000
Comments			Alternatives		
General properties			Use alternatives		<input type="checkbox"/>
γ_{unsat}	kN/m^3	21.00	C_c		5.750E-3
γ_{sat}	kN/m^3	23.00	C_s		1.725E-3
			e_{init}		0.5000
			Strength		
			c'_{ref}	kN/m^2	0.000
			φ' (phi)	$^\circ$	36.00
			ψ (psi)	$^\circ$	6.000

Slika 27: Geomehanički parametri kojima se definira sloj šljunka (Limmattal-Schotter)

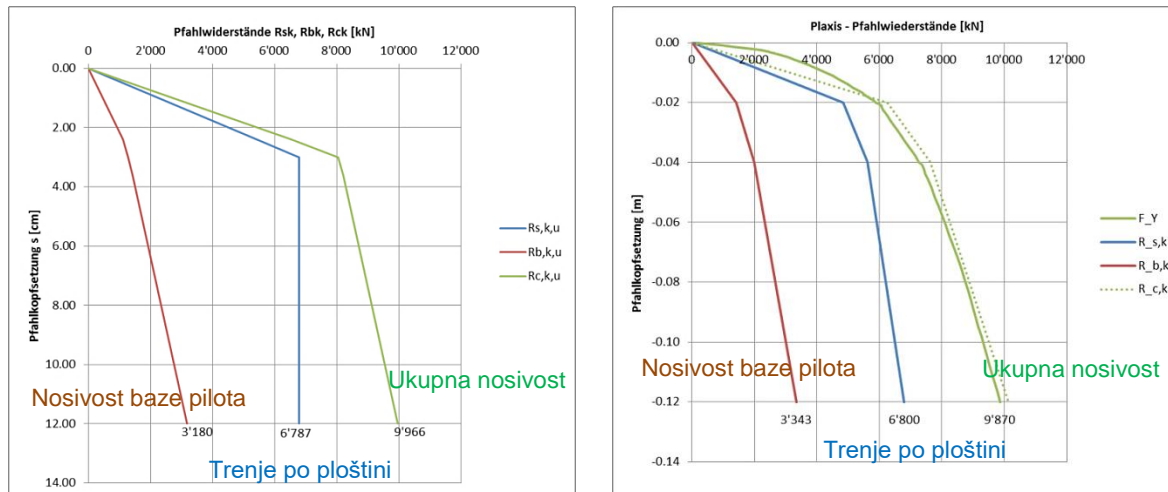


Property	Unit	Value	Property	Unit	Value
Material set			Stiffness		
Identification		Seeablagerung	E_{50}^{ref}	kN/m ²	30.00E3
Material model		Hardening soil	E_{oed}^{ref}	kN/m ²	30.00E3
Drainage type		Drained	E_{ur}^{ref}	kN/m ²	90.00E3
Colour		RGB 236, 232, 156	power (m)		1.000
Comments			Alternatives		
General properties			Use alternatives	<input type="checkbox"/>	
Y_{unsat}	kN/m ³	20.00	C_c		0.01150
Y_{sat}	kN/m ³	22.00	C_s		3.450E-3
			e_{init}		0.5000
			Strength		
			c'_{ref}	kN/m ²	0.000
			ϕ' (phi)	°	30.00
			ψ (psi)	°	0.000

Slika 28: Geomehanički parametri kojima se definira aluvijalni sloj tla (Seeablagerungen)

Rezultati nosivosti pilota sastavljeni od udjela trenja po ploštini i otpora baze pilota iz numeričke analize predstavljeni su grafički i uspoređeni s gore spomenutim empirijskim prijedlogom stručne skupine EA-Pfaehle.

Kao referentni pilot korišten je pilot duljine 16 m s promjerom $D = 1.20$ m. Baza pilota se nalazi u samoj zoni prijelaza u deformabilne, slabo nosive slojeve tla. To je i razlog zašto je nosivost na bazi pilota manja od nosivosti trenjem na plaštu pilota.

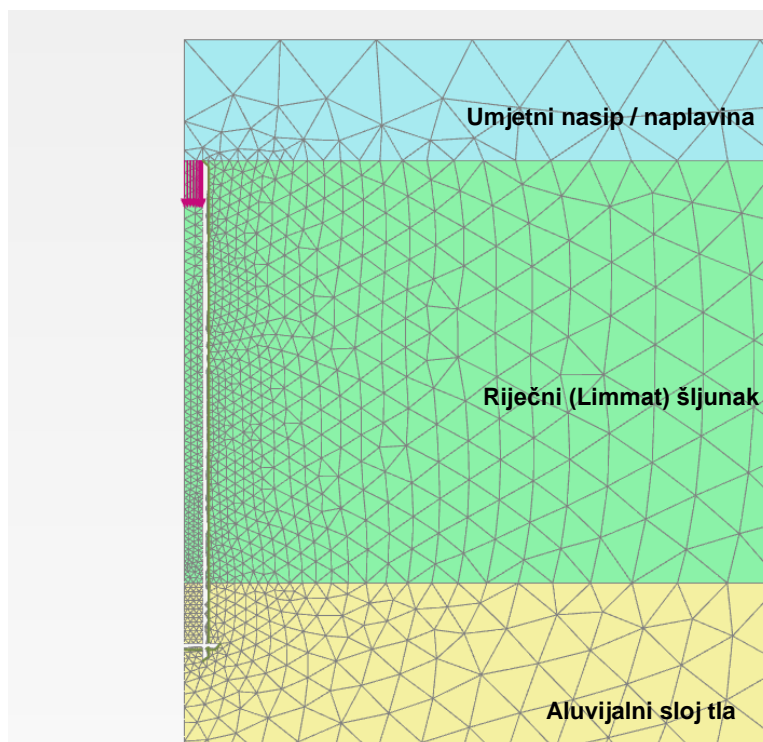


Slika 29: Graf ovisnosti nosivosti i slijeganja, lijevo: Prema EA-Pfaehle, desno: Rezultat numeričke analize u Plaxis-u

Na grafu (Slika 29) su prikazane krivulje koje predstavljaju udjele nosivosti trenjem po ploštini i nosivosti na bazi. Veća odstupanja za nosivost trenjem po ploštini su vidljiva samo u području manjih pomaka. Osobito je dobro podudaranje rezultata za vrijednost slijeganja $D/10 = 12$ cm. Vrijednost otpora na bazi pilota je podudarna u oba modela.

Pri doseganju nosivosti na trenje nagib krivulje se naglo mijenja i dolazi do prijelaza iz elastičnog u plastično stanje.

Geometrija numeričkog modela u Plaxis-u prikazana je na slici 30.



Slika 30: Geometrija modela sa mrežom konačnih elemenata u Plaxis-u

Ovako analiziran model pojedinačnog pilota se koristio kod modeliranja KPP- temelja. U kružno- simetrični model pilota dodan je model armiranobetonske ploče (naglavnice) u svrhu procijene nosivosti kompozita sastavljenog od temeljne ploče, pilota i tla.

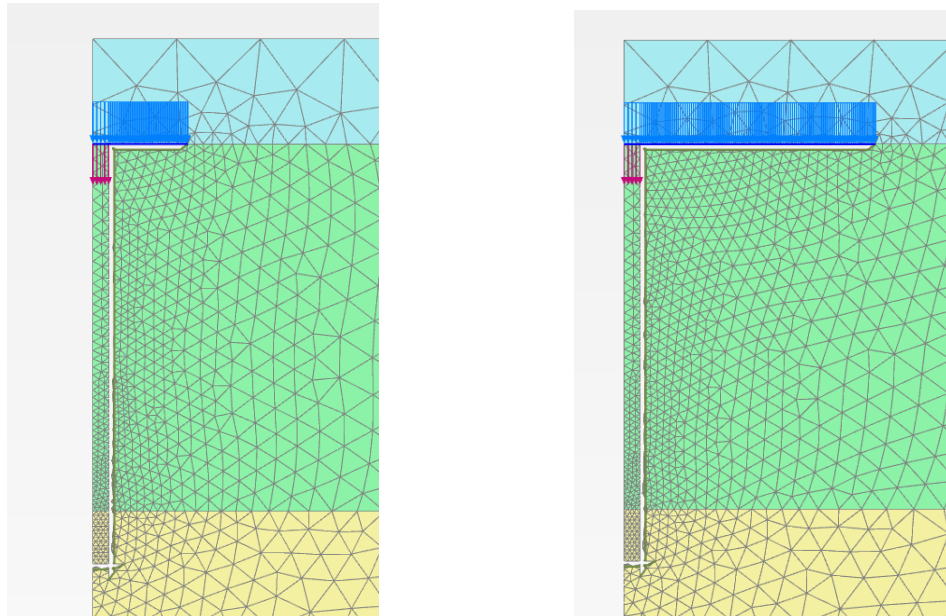
Analiziran je utjecaj dva promjera temeljne ploče (naglavnice). Najprije je analizirana sudjelujuća širina temeljne ploče s promjerom $3 \times d_{\text{pilota}} = 3,60 \text{ m}$, a u drugom koraku je analiziran slučaj ploče promjera $8 \times d_{\text{pilota}} = 9,60 \text{ m}$. Pri tom je debljina temeljne ploče 80 cm.

Oba su modela (Slika 31) analizirana na način da im je zadan isti vertikalni pomak. U model je uvedeno i opterećenje zgradom koje na razni kontaktne plohe iznosi 550 kN/m^2 .

Slika 32 prikazuje dijagram ovisnosti kapaciteta nosivosti o pomaku za oba modela.

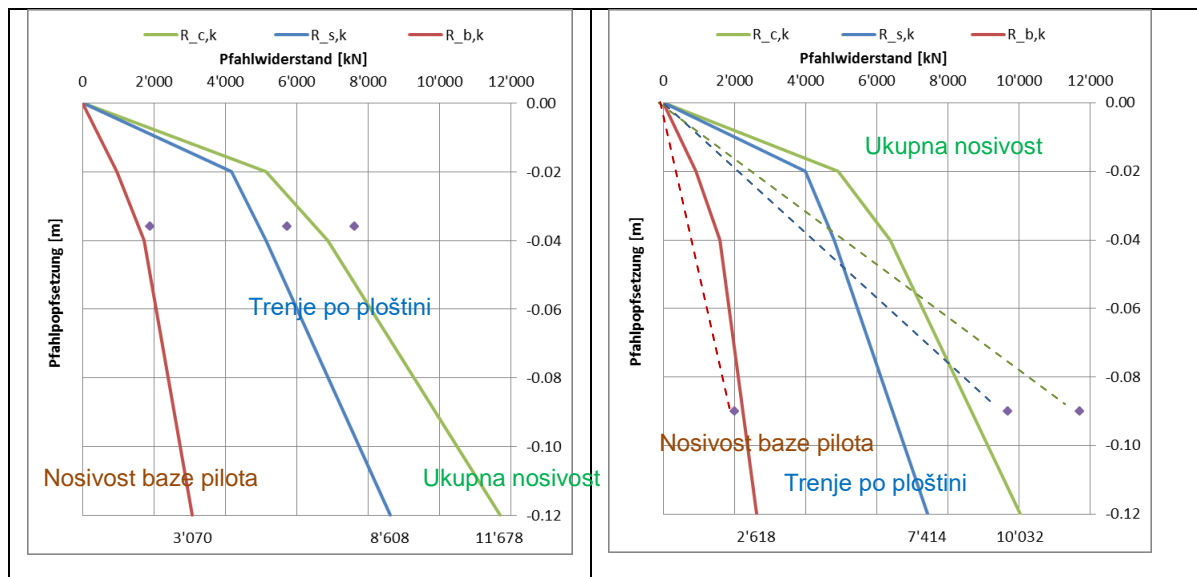
U usporedbi s modelom pojedinačnog pilota primjetno je da kompozit u kojemu sudjeluje i podna ploča za manja slijeganja ima manju krutost. Granica nosivosti trenjem po ploštini pilota nije jasno izražena, stoga se s povećanjem pomaka glave pilota kontinuirano povećava i nosivost KPP-temelja. Za vrijednosti pomaka od $d_{\text{pilota}} / 10 = 0,12 \text{ m}$ nosivost KPP-temelja značajno je veća od nosivosti pojedinačnog temelja.

Ponašanje KPP-temelja sa sudjelujućom širinom podne ploče $8 \times d_{\text{pilota}}$ nešto je mekše. Točke u grafu ovisnosti nosivosti o pomaku pokazuju nosivost za slučaj ravnomjernog opterećenja na temeljnu plohu. Kako je na slici 33 zorno prikazano, oblik i veličina deformacija ovise o vrsti opterećenja koje djeluje na KPP-temelj. Model sa sudjelujućom širinom temeljne ploče od $8 \times d_{\text{pilota}}$ sličan je ponašanju meke ploče koja radi na savijanje, dok je model KPP-temelja sa sudjelujućom širinom $3 \times d_{\text{pilota}}$ sličan ponašanju krute ploče.



Slika 31: Geometrija modela pojedinačnog pilota i naglavnice promjera $3 \times d_{pilota}$ odnosno $8 \times d_{pilota}$

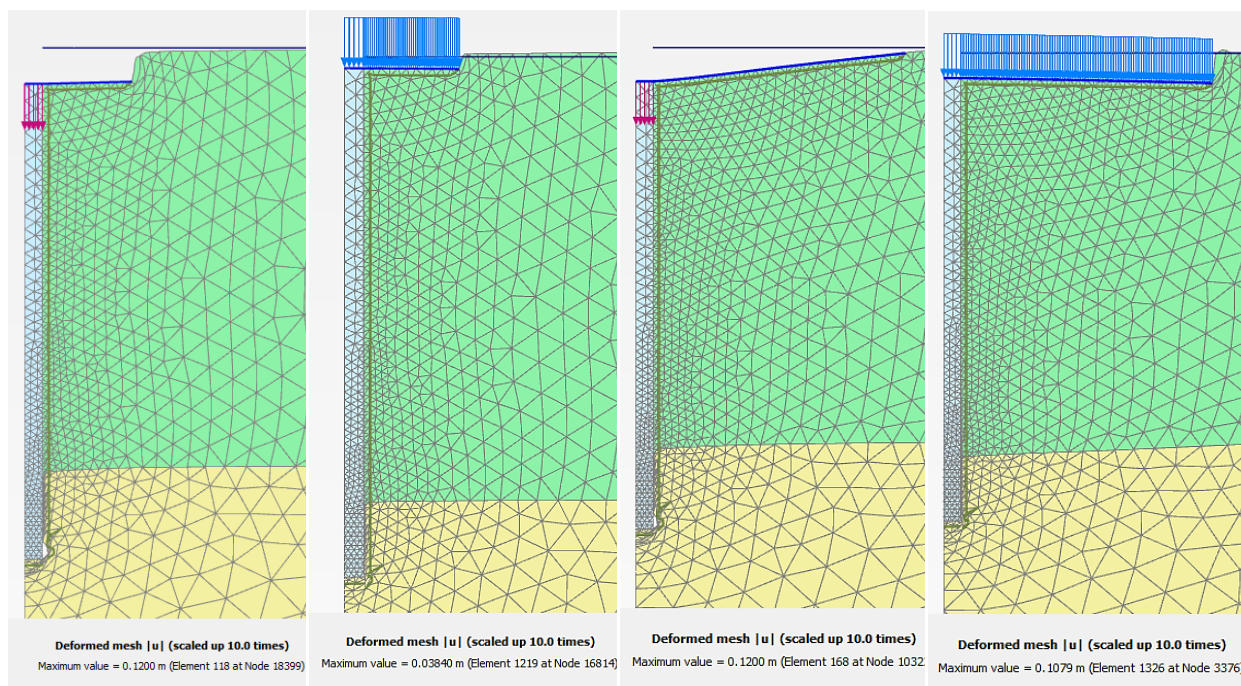
Dijagram napona na kontaktnoj plohi temeljne ploče i tla ovisi o vrsti opterećenja i dimenzijama sudjelujuće širine podne ploče. Za krute ploče ($3 \times d_{pilota}$) dijagram napona na spojnici je konstantan (pravokutan), dok je za mekane ploče ($8 \times d_{pilota}$) varijabilan (trokutast). Za slučaj zadanog vertikalnog pomaka najveći naponi na kontaktnoj plohi su u neposrednoj blizini pilota, a za slučaj ravnomjernog opterećenja na rubu krutog ($3 \times d_{pilota}$) temelja.



Slika 32 : Zavisnost nosivosti KPP–temelja i pomaka s pločom promjera $3 \times d = 3.6 \text{ m}$ (lijevo) i $8 \times d = 9.6 \text{ m}$ (desno). Točkama su prikazani pomaci temelja usljed djelovanja ravnomjerno podijeljenoga opterećenja od 550 kN/m^2 na temeljnu ploču

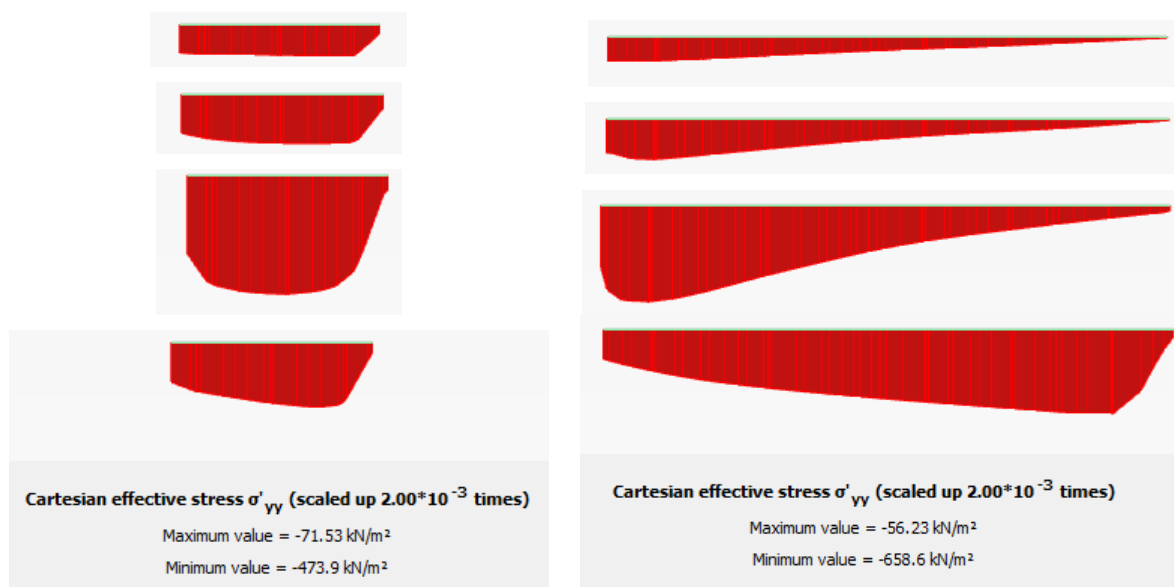
Napomena:

Za aktiviranje KPP-temelja nužni su pomaci. Nosivost pilota trenjem po ploštini iscrpljena je za slučaj pojedinačnog pilota (slika 29) za pomake reda veličine ca. $0,03 \times d \sim 40 \text{ mm}$ [3]. Za granične pomake od $0,03 \times d \sim 40 \text{ mm}$ iscrpljeno je 80% nosivosti pilota i aktivirana je u potpunosti nosivost temeljne ploče. Za KPP temelj s pločom koja radi na savijanje ($8 \times d_{pilota}$), očekivana vrijednost slijeganja u graničnom stanju nosivosti leži u području između 40 mm (slučaj pojedinačnoga pilota) i 90 mm (slučaj meke ploče). Stvarna vrijednost slijeganja ovisit će o detalju modeliranja ploče, broju i razmaku pilota isl.



Slika 33: Deformirana geometrija pojedinačnoga pilota sa zadanim pomacima na vrhu pilota i deformirana geometrija ispod KPP-temelja izazvana ravnomjernim opterećenjem temeljne ploče

Za svaku od 4 razine i vrste opterećenja je, za oba modela, određen pripadajući modul reakcije tla $k[kN/m^3]$ zasebno za ploču i za pilot, a za sve analizirane kombinacije određen je i koeficijent α_{KPP} . Za krute ($3 \times d_{Pilota}$) ploče proračunata vrijednost koeficijenta α_{KPP} leži u području 0,30 do 0,39, dok je kod fleksibilnih ploča ($8 \times d_{Pilota}$) vrijednost koeficijenta α_{KPP} u području 0,07 do 0,18.



Slika 34: Kvalitativni izgled preraspodjele napona na kontaktnoj plohi ispod temeljne krute i meke ploče

Na slici 34 prikazan je izgled dijagrama napona na kontaktnoj plohi podne ploče i tla. Prva tri dijagrama odozgo predstavljaju napone izazvane nametnutim pomacima glave pilota, četvrti



dijagram prikazuje preraspodjelu napona na temeljnoj plohi izazvanu ravnomjerno raspodijeljenim opterećenjem po ploči temelja.

Tablica 4: Pregled nosivosti pilota i sudjelujućih ploča

KPP- temelj sa sudjelujućom širinom temeljne ploče

$3x d_{\text{Pilota}}$

Pilot					Ploča				KPP	
s	R _{s,k}	R _{b,k}	R _{c,k}	k _{pfahl}	s	S _{p,k}	R _{p,k}	k _{platte}	Σ R _k	α _{KPP}
[m]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN/m]	[m]	[kN]	[kN]	[kN/m ³]	[kN]	[-]
-0.02	4'164	963	5'127	256'354	-0.02	207	8'174	10'325	13'302	38.5%
-0.04	5'146	1'723	6'869	171'735	-0.04	326	12'918	8'159	19'788	34.7%
-0.12	8'608	3'070	11'678	97'316	-0.12	706	27'948	5'884	39'626	29.5%
-0.04	5'724	1'884	7'608	211'342	-0.036	392	15'513	10'886	23'121	32.9%

KPP-temelj sa sudjelujućom širinom temeljne ploče

$8x d_{\text{Pilota}}$

Pilot					Ploča				KPP	
s	R _{s,k}	R _{b,k}	R _{c,k}	k _{pfahl}	s	S _{p,k}	R _{p,k}	k _{platte}	Σ R _k	α _{KPP}
[m]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN/m]	[m]	[kN]	[kN]	[kN/m ³]	[kN]	[-]
-0.02	4'000	920	4'920	246'018	-0.02	79	22'745	3'943	27'665	17.8%
-0.04	4'789	1'581	6'371	159'263	-0.04	118	34'005	2'948	40'375	15.8%
-0.12	7'414	2'618	10'032	83'603	-0.12	262	75'524	2'182	85'556	11.7%
-0.09	9'689	2'010	11'699	129'985	-0.1024	530	152'933	5'179	164'631	7.1%

Iz gore navedenog, možemo zaključiti kako i krutost i koeficijent α_{KPP} u velikoj mjeri ovise o odabranom statičkom sustavu i vrsti opterećenja. Pri tome se nosivost pilota mijenja u rasponu od svega 15 %.

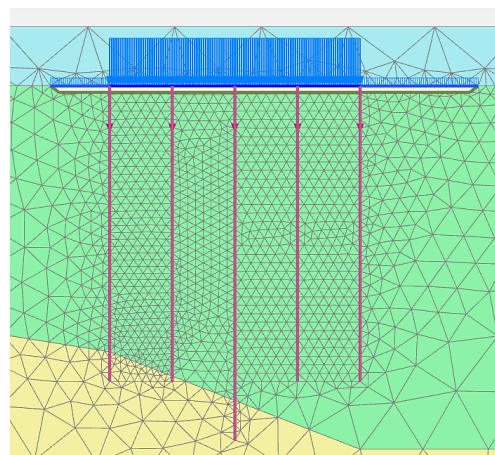
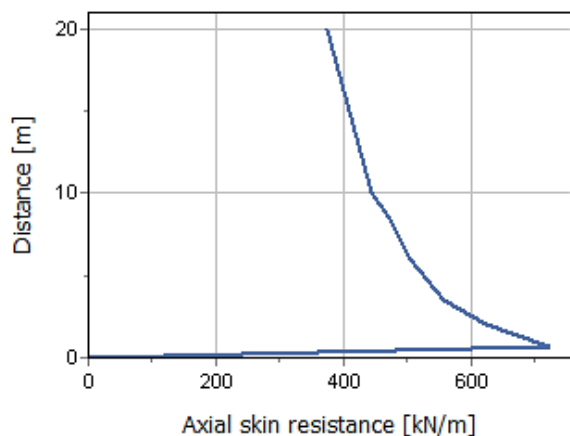
Plaxis je 2D program pa je za dobivanje konačne vrijednosti reakcije tla potrebno u obzir uzeti i razmak pilota okomito na promatranu ravan. U tu svrhu je u Plaxis-u korištena opcija *embedded pile row*, s kojom se simulira razmak pilota u tlocrtu. Za određivanje ekvivalentnih modula reakcije tla uzeti su parametri dobiveni za $8 \times d_{\text{Pilota}}$ KPP-temelj.

Parametri uneseni u program su prikazani na slici 35, a linearizirana ekvivalentna nosivost trenjem po plošini pilota prikazana je u ovisnosti o međusobnoj udaljenosti pilota u tlocrtu.

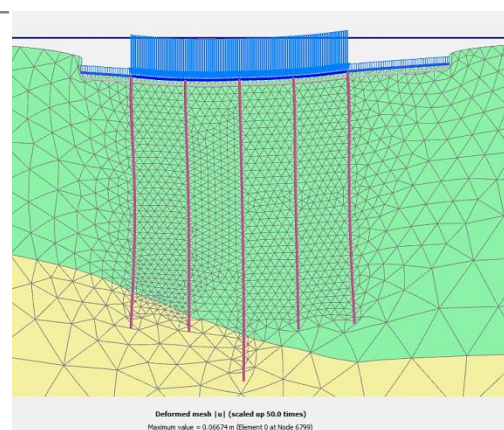
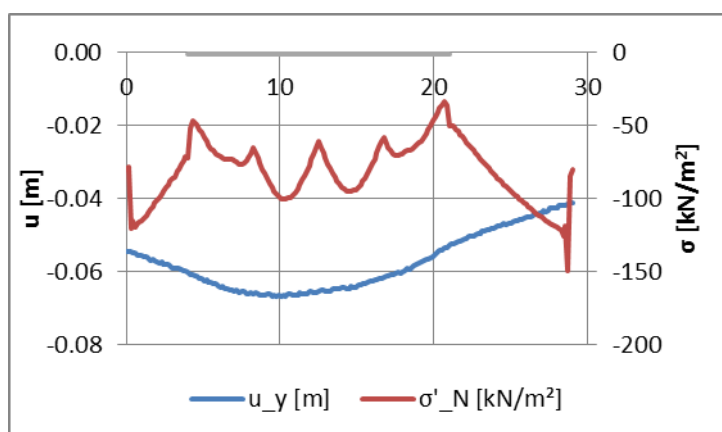
Property	Unit	Value
Material set		
Identification		Pfahl 1
Comments		
Colour		RGB 199, 82, 143
Material type		Elastic
Properties		
E	kN/m ²	32.00E6
ν	kN/m ³	25.00
Pile type		Predefined
Predefined pile type		Massive circular pile
Diameter	m	1.200
A	m ²	1.131
I	m ⁴	0.1018
L _{spacing}	m	4.250

Axial skin resistance		
Axial skin resistance		Multi-linear
Multi-linear axial resistance		Axial skin resistance table
Lateral skin resistance		
Lateral skin resistance		Unlimited
Base resistance		
F _{max}	kN	2650

Slika 35: Parametri unosa „reda pilota“ u Plaxisu za simuliranje razmaka pilota u tlocrtu



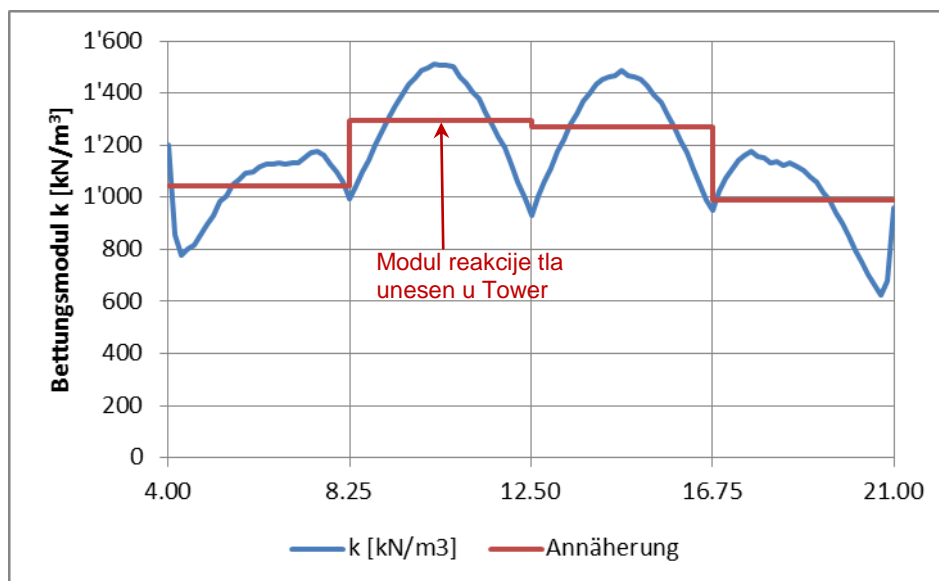
Slika 36 : Ekvivalentna nosivost trenjem po ploštini pilota (po m') i FE-model u Plaxis-u



Slika 37: lijevo: Dijagram slijeganja u_y , i stvarnih napona, desno: Deformirani model opterećen ravnomjernim opterećenjem

Na slici 37, lijevo su prikazane vrijednosti pomaka i napona na temeljnoj spojnici. KPP-temelj nalazi se u području između 4 i 21 m. U području izvan KPP-temelja vidljiva je tendencija brzog smanjenja slijeganja i povećanja napona na temeljnoj spojnici. Stvarni moduli reakcije tla dobiju se jednostavnim dijeljenjem napona i pomaka u odgovarajućim točkama $k = \frac{\sigma_s}{u}$.

Na slici 38 su prikazane konačne vrijednosti modula reakcije tla s kojima se modeliranje može dalje nastaviti u nekom od FE-programa kakav je primjerice Tower.



Slika 38: Moduli reakcije tla u području KPP- temelja

5.3 Modeliranje u FE- programu (Tower)

Vrijednosti napona i pomaka u ovisnosti o njihovoj poziciji na x-osi prikazani su u *tablici 5*.

Tablica 5: Tabela prikaz sila u pilotima, pomaka i odgovarajućih modula reakcije tla

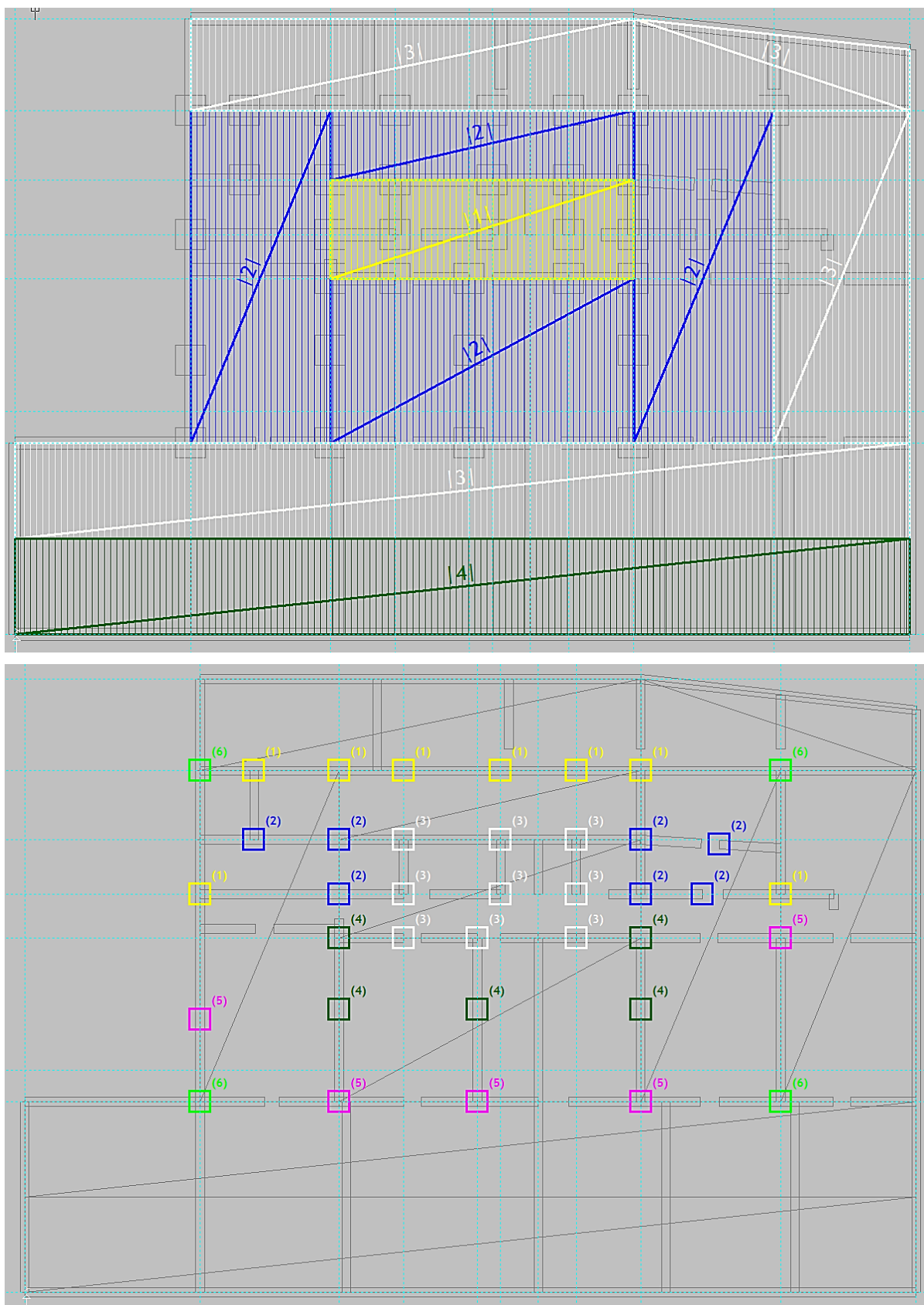
	x [m]	F _y [kN]	u _y [m]	k [kN/m ²]
P1	4.00	-6'150	-0.058	106'030
P2	8.25	-7'110	-0.066	107'731
P3	12.50	-9'388	-0.065	143'551
P4	16.75	-7'455	-0.059	126'347
P5	21.00	-6'668	-0.050	132'622

U nastavku procesa modeliranja promijenjena su tri površinska i šest točkastih modula reakcije tla. Dodatno, na mjestima vanjskih zidova izvan centralne zone tlocrta visoke zgrade, uvedeni su piloti čiji je modul reakcije procijenjen [5] s $k_{Eck} \approx 0.25 k_{\text{pojedinačnog pilota}} = 0.25 \times 177'200 = 44'300 \text{ kN/m}^2$. Vrijednost 177'200 odgovara sekantnoj krutosti pojedinačnog pilota za vrijednost slijeganja 4 cm, što odgovara očekivanom slijeganju na rubu temeljne ploče za $x = 30 \text{ m}$. Vrijednosti modula reakcije tla za površinske (ploča) i točkaste (piloti) module reakcije tla prikazani su na *slici 39*.

Flächenlager Sätze				
Satz	K,R1	K,R2	K,R3	
1	1.000e+3	1.000e+3	1.280e+3	
2	1.000e+3	1.000e+3	1.000e+3	
3	1.000e+3	1.000e+3	1.800e+3	
4	1.000e+3	1.000e+3	2.700e+3	

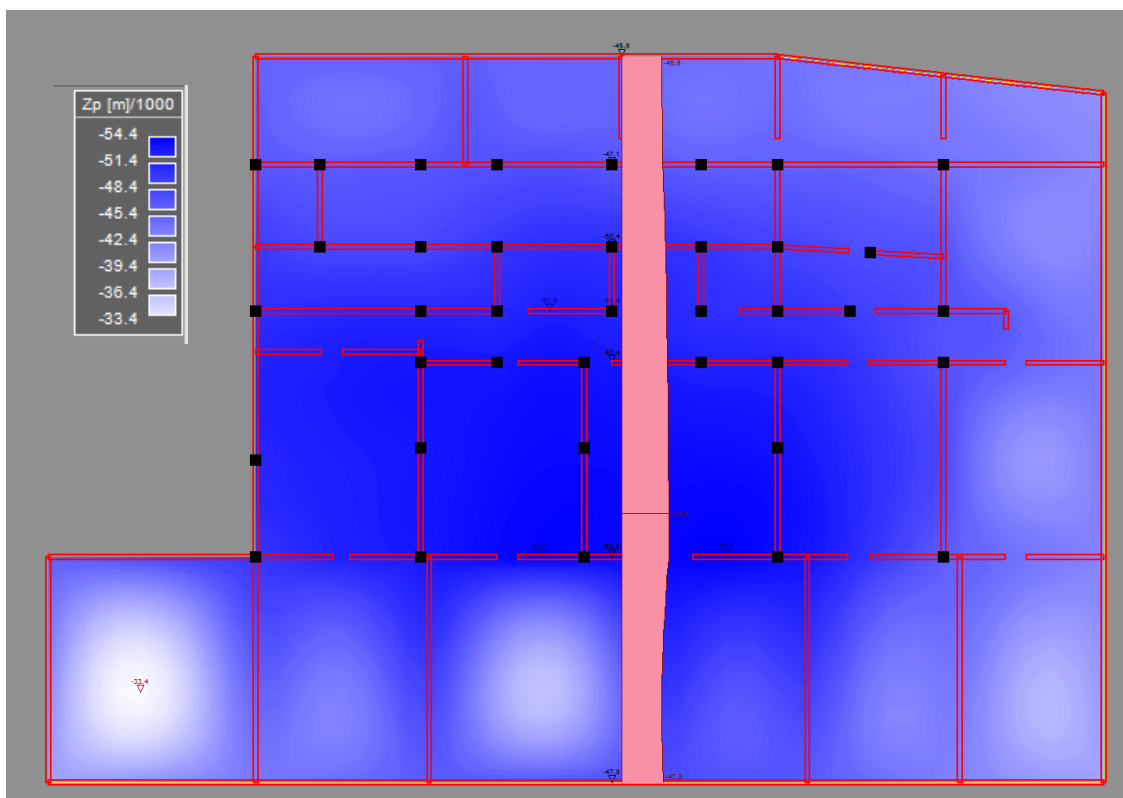
Punktlager Sätze				
	K,R1	K,R2	K,R3	K,M1
1			1.060e+5	
2			1.077e+5	
3			1.430e+5	
4			1.263e+5	
5			1.326e+5	
6			1.856e+5	

Slika 39: Moduli reakcije tla u prostornom modelu u Tower-u (tablično)



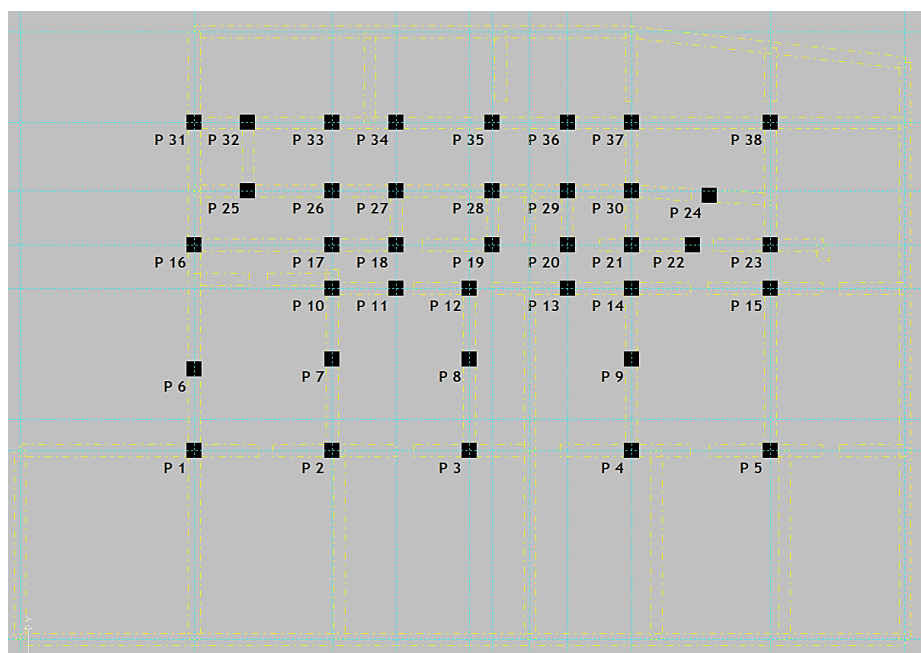
Slika 40: Moduli reakcije tla u prostornom modelu u Tower-u (grafički)

Prikaz rezultata proračuna nije tema ovog rada, pa ćemo se koncentrirati samo na usporedbu pomaka i vrijednosti sila u ležajevima, koji predstavljaju sile u pilotima. Iako se slijeganje dokazuje za granično stanje uporabljivosti, u svrhu usporedbe rezultata dobivenih u Tower-u i Plaxis-u na slici 41 su prikazane vrijednosti slijeganja na d-razini. U tablici 6 su prikazane vrijednosti sila u pilotima.



Slika 41: Deformacije na razini temeljne plohe

Slijeganja su ujednačena, s očekivanim vrijednostima. Diferencijalna slijeganja su reda veličine 8 mm. Napomenut ćemo još jednom da translacijski pomaci nemaju utjecaj na konstrukciju, a rezne sile su isključivo posljedica diferencijalnih slijeganja.



Slika 42: Numeriranje pilota

Na slici 42 je prikazan pložaj i broj pilota koji ga određuje, a u tablici 6 vrijednost sila u pilotima na d-razini.



Tablica 6: Reakcije točkastih ležajeva

Rezultati za točkaste ležajeve					
oznaka	R3 [kN]	oznaka	R3 [kN]	oznaka	R3 [kN]
P 1	9211	P 14	6484	P 27	7117
P 2	6926	P 15	6291	P 28	7209
P 3	7132	P 16	5345	P 29	7117
P 4	7058	P 17	5497	P 30	5252
P 5	8632	P 18	7308	P 31	8688
P 6	6773	P 19	7352	P 32	4940
P 7	6617	P 20	7229	P 33	4979
P 8	6753	P 21	5398	P 34	5039
P 9	6657	P 22	5300	P 35	4991
P 10	6626	P 23	5041	P 36	4911
P 11	7487	P 24	5151	P 37	4897
P 12	7534	P 25	5214	P 38	8272
P 13	7377	P 26	5209		

6 Zaključak

U radu je prikazan inovativni koncept kombiniranog temeljenja temeljnom pločom i pilotima te postupak procjene modula reakcije tla za konkretne geotehničke uvjete temeljenja. U praksi se procjeni modula reakcije tla pridaje mala pozornost, što u uvjetima heterogenog temeljnog tla male nosivosti i velike izloženosti slijeganju rezultira neekonomičnim konceptima temeljenja čije ponašanje u konačnici nije poznato. Ciljevi ovog članka su senzibiliziranje zainteresirane stručne javnosti za ovu problematiku i predstavljanje postupka procjene modula stišljivosti tla, neovisno o uvjetima u kojima se objekt temelji.

7 Literatura

- [1] Lecturer in soil mechanics G. Möller, *Geotechnik : Grundbau*. 2006.
- [2] U. Smoltczyk, *Grundbau-Taschenbuch/ Teil 3, Gründungen*. Ernst, 2001.
- [3] P. R. Katzenbach, D. S. Leppla, and D. H. Ramm, "Die Kombinierte Pfahl-Plattengründung (KPP) – eine innovative, kostenoptimierte Gründungstechnologie Gliederung Einführung Theoretische Grundlagen der KPP Sicherheitskonzept Beispiele aus der Ingenieurpraxis Zusammenfassung Gliederung Einführung Theorie," no. November, 2012.
- [4] A. Hettler, *Gründung von Hochbauten*. Ernst & Sohn Verlag, 2000.
- [5] Deutsche Gesellschaft für Geotechnik. Arbeitskreis Pfähle., *Empfehlungen des Arbeitskreises "Pfähle" : EA-Pfähle*. Ernst, 2007.
- [6] Sarah Springman, "Entwurf und Konstruktion in der Geotechnik, Pfähle," Zürich, 2013.
- [7] R. Katzenbach, "IX Tiefgründungen 1," pp. 1–39, 2013.
- [8] R. Katzenbach and C. Moormann, "Baugrund -Tragwerk-Interaktion," in *Konstruktiver Ingenieurbau und Hochbau*, Springer, 2013, p. 547.
- [9] Plaxis, "Material Models Manual," *Plaxis*, p. 202, 2016.
- [10] J. Hanisch, *Kombinierte Pfahl-Plattengründungen*. Ernst, 2002.
- [11] R. H. Stengele and W. Böhm, "Baugrundkennwerte für (Stoffmodelle von) FE-Modellierungen," 2017.
- [12] D. Locher and M. Kornmann, "Geologisch-geotechnischer Bericht, Wohnsiedlung Letzibach D , Hohlstrasse 452, Zürich-Altstetten," Zürich, 2016.
- [13] "Plaxis 2D."