

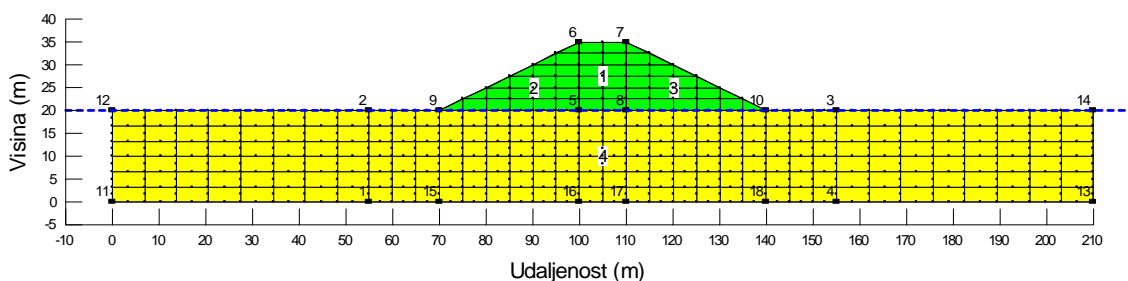
IZGRADNJA NASIPA

Tijekom izgradnje nasipa dolazi do deformacija temeljnoga tla i samog nasipa. Ovdje ćemo se baviti prvenstveno ovim deformacijama, a nećemo ulaziti u neke druge aspekte izgradnje nasipa. Budući da se nasipom opterećuje ograničena površina temeljnoga tla, ovaj problem ne možemo tretirati kao jednodimenzionalan. Ako je nasip veće duljine, možemo zanemariti njegovu dimenziju u tom smjeru i promatrati njegov presjek kao dvodimenzionalni problem. Tako ćemo modelirati izgradnju nasipa programima *GeoStudio*, *SIGMA/W* i *SEEP/W* i ilustrirati određene aspekte izgradnje nasipa i odgovarajućih deformacija tla. Ako je temeljno tlo potpuno saturirano, trebat će manje ili više vremena da se u njemu ostvare deformacije, ovisno o veličini njegovog koeficijenta propusnosti. Ovdje ćemo analizirati slučaj izgradnje nasipa na vrlo propusnom tlu, gdje se deformacije gotovo trenutačno ostvare, slučaj brze izgradnje nasipa na slabo propusnom tlu i potom proces konsolidacije temeljnoga tla te slučaj postepene izgradnje nasipa na slabo propusnom tlu i istovremene konsolidacije temeljnoga tla. Analizirat ćemo, dakle, dvodimenzionalnu konsolidaciju tla.

I. Izgradnja nasipa na vrlo propusnom potpuno saturiranom tlu

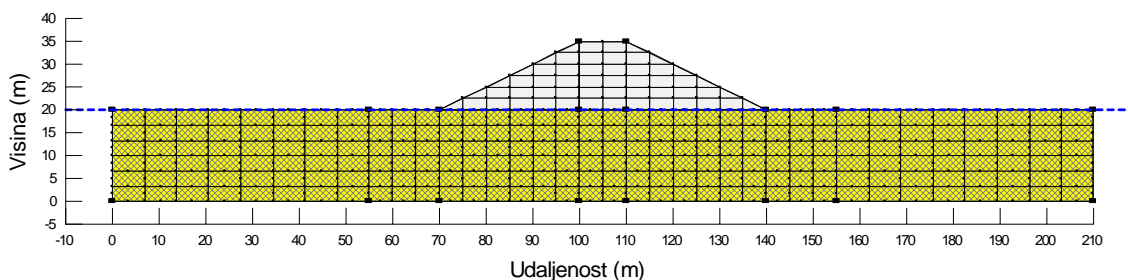
Promatramo homogeno, potpuno saturirano temeljno tlo debljine 20 m (ovo je samo radi ilustracije). Ispod ovoga sloja je nepropusna stijena. Voda je na površini terena. Na površini tla gradi se nasip visine 15 m, širine krune 10 m, a nagibi kosina nasipa su 1:2. Nasip se gradi u 6 slojeva po 2,5 m visine. Za temeljno tlo i za tlo nasipa zadat ćemo linearno-elastičan konstitucijski odnos. Za temeljno je tlo Youngov modul elastičnosti 8 MPa, a Poissonov je koeficijent 0,25. Za tlo nasipa Youngov je modul elastičnosti 10 MPa, a Poissonov koeficijent 0,35. Zapreminska težina temeljnoga tla je 19 kN/m^3 , a tla nasipa 20 kN/m^3 .

Mreža konačnih elemenata za ovaj zadatak prikazana je na slici I-1. Sastoji se od 4 regije. Lijeva i desna granica modela od nožica su nasipa udaljene za širinu osnovice nasipa (70 m). U temeljnom su tlu zadani sekundarni čvorovi, jer će se u njemu računati početno stanje naprezanja, a u nasipu nisu. Iako nasip još nije izgrađen, treba ga odmah uključiti u mrežu konačnih elemenata, radi proračuna koji će uslijediti nakon proračuna početnog stanja naprezanja.



Slika I-1. Mreža konačnih elemenata za izgradnju nasipa

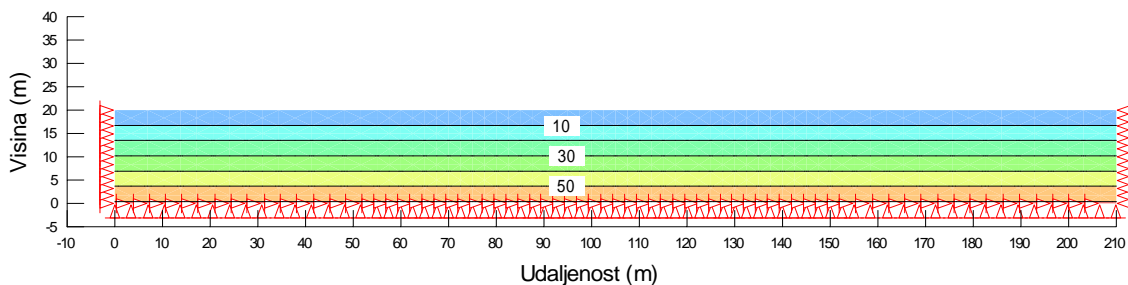
Za proračun početnog stanja naprezanja u temeljnom tlu, iz mreže konačnih elemenata sa slike I-1 treba isključiti materijal nasipa, koji još nije izgrađen. Materijal nasipa se isključi tako da se pod *KeyIn – Material Properties* za model tla nasipa zada (*none*). Za temeljno tlo treba još zadati zapreminsku težinu i koeficijent bočnog naprezanja tla u mirovanju, koji se dobije iz odgovarajućeg ν' i iznosi 0,333. Model temeljnoga tla za proračun početnog stanja naprezanja prikazan je na slici I-2. Provodi se analiza *In situ 1*.



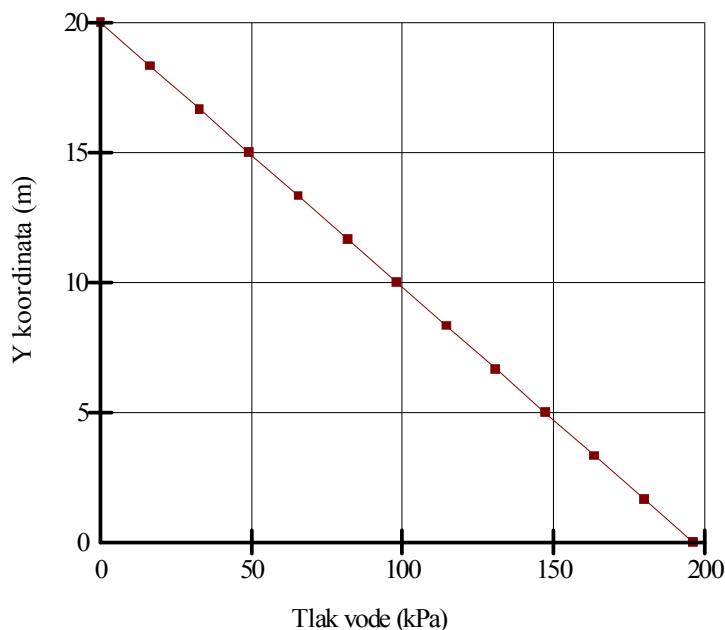
Slika I-2. Model tla za proračun početnog stanja naprezanja

Raspodjela horizontalnih efektivnih naprezanja prikazana je na slici I-3, a hidrostatski tlak vode po visini temeljnoga tla na slici I-4. Na donjem je rubu modela tlak vode 196,2 kPa (zapreminska težina vode je 9,81 kN/m³).

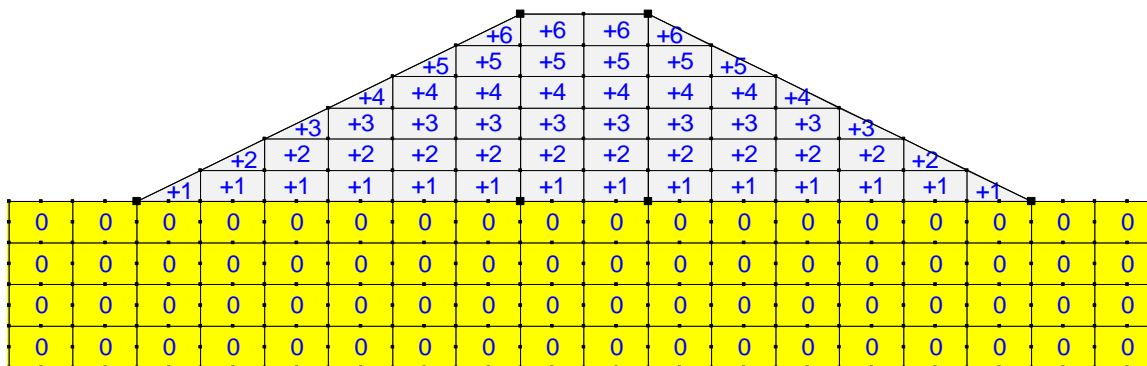
Ukupna naprezanja i tlak vode u tlu iz početnog stanja naprezanja bit će početni uvjeti za sljedeći proračun, u kojem će se simulirati izgradnja nasipa u 6 slojeva. Za materijal nasipa sada treba zadati odgovarajuće parametre za linearno-elastičan konstitucijski odnos. Za 6 faza izgradnje nasipa zadaje se 6 koraka proračuna (*# of Time Steps*). Zatim se svaki od 6 redova elemenata nasipa (slojeva nasipa) označi odgovarajućim brojem faze nasipavanja tla. Ovo se napravi pod *Draw – Fill/Excavation Elements* ili uporabom odgovarajuće ikone (*Draw Fill/Excavation Elements*). Zatim se odabere *Fill* i za *Time Step* broj prvog sloja koji se nasipava. Označe se svi elementi prvog reda nasipa, pri čemu oni dobiju oznaku +1. Ovaj se postupak ponovi za svaki red elemenata nasipa (slika I-5). Budući da je temeljno tlo vrlo propusno, deformacije će se u tlu odvijati paralelno s izgradnjom nasipa.



Slika I-3. Izolinije horizontalnih efektivnih naprezanja (kPa)

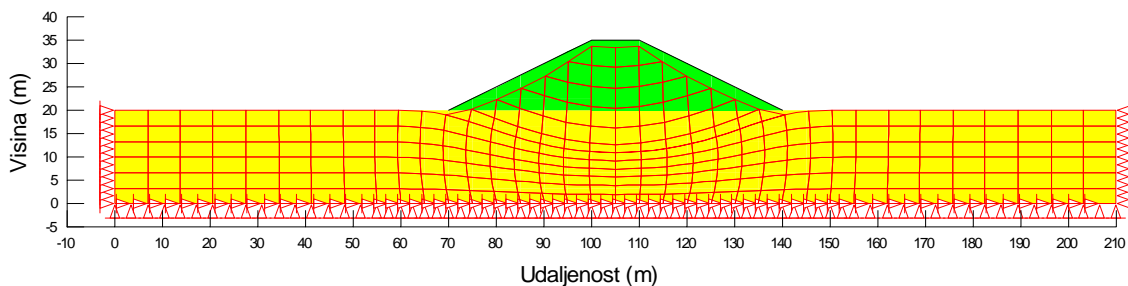


Slika I-4. Tlak vode po visini temeljnoga tla

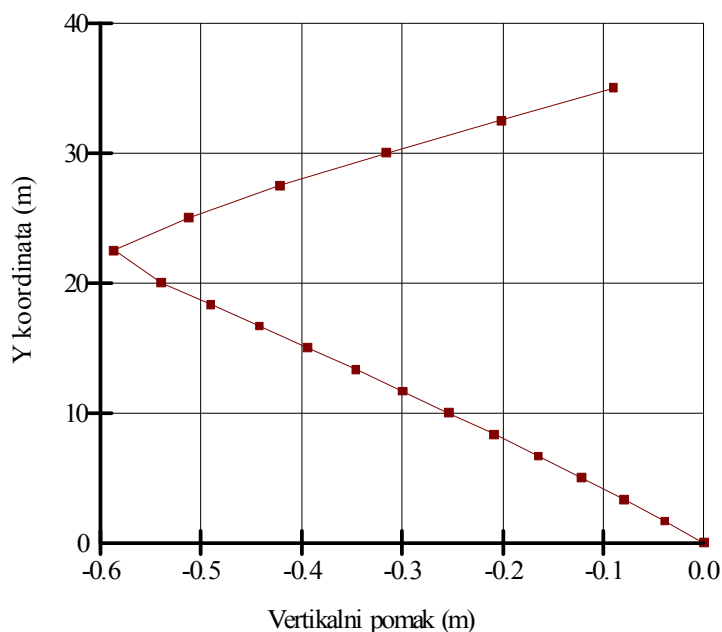


Slika I-5. Faze nasipavanja tla za nasip (dio mreže konačnih elemenata)

Deformirana mreža konačnih elemenata nakon izgradnje nasipa prikazana je na slici I-6. Vidi se da je do deformacija došlo u temeljnom tlu i u tijelu nasipa. Na slici I-7 prikazani su vertikalni pomaci po visini nasipa i temeljnog tla na vertikali koja je na sredini krune nasipa. Slijeganje površine temeljnog tla iznosi 54 cm, a krune nasipa 9 cm. Najveće je slijeganje površine prvog nasipanog sloja, koje iznosi 59 cm.

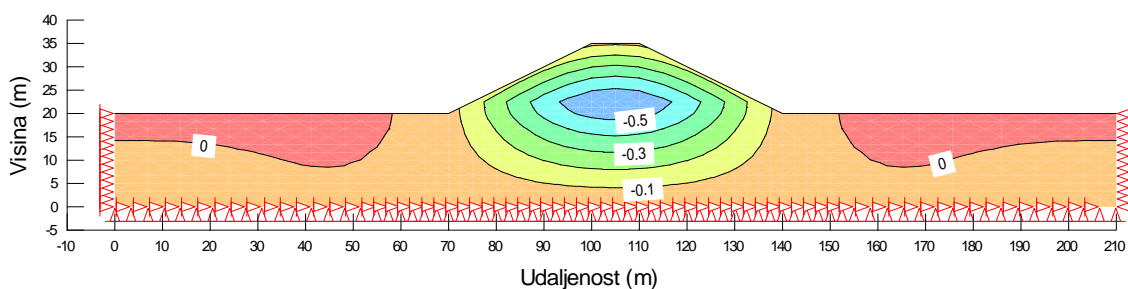


Slika I-6. Deformirana mreža konačnih elemenata nakon izgradnje nasipa

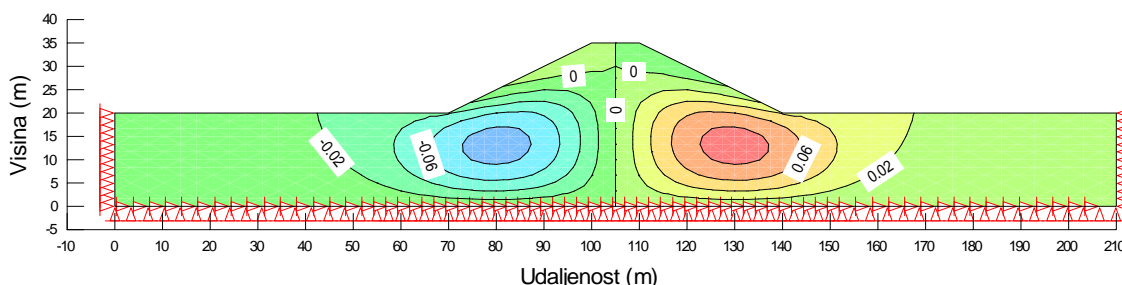


Slika I-7. Vertikalni pomaci duž vertikale na sredini krune nasipa

Na slici I-8 prikazana je raspodjela vertikalnih pomaka u nasipu i temeljnom tlu, a na slici I-9 raspodjela horizontalnih pomaka. Vertikalni i horizontalni su pomaci simetrični u odnosu na vertikalu na sredini krune nasipa, a horizontalni se pomaci kreću od -9 cm do 9 cm.



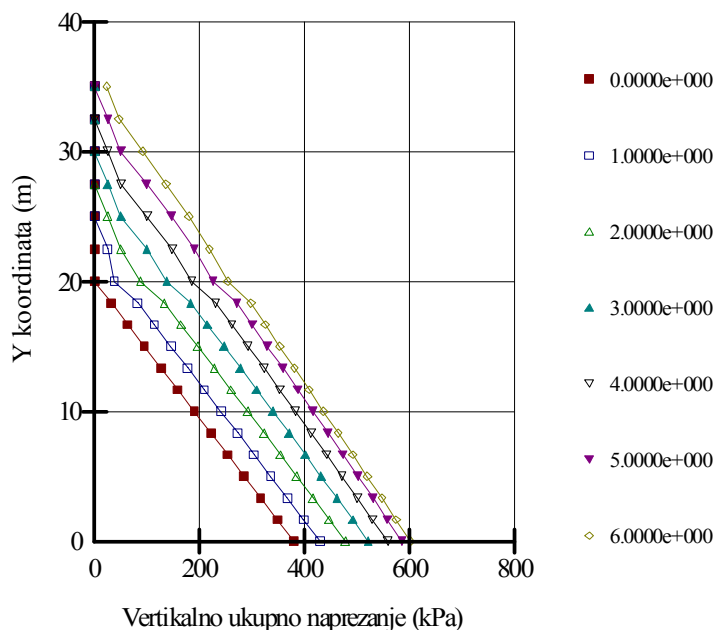
Slika I-8. Izolinije vertikalnih pomaka (m)



Slika I-9. Izolinije horizontalnih pomaka (m)

Iako se to na deformiranoj mreži konačnih elemenata ne vidi, radi skaliranja deformacija, na slici I-8 se vidi da je došlo do izdizanja temeljnoga tla bočno od nasipa. Ujedno se vidi i utjecaj vertikalnih rubova modela, za koje bi bilo bolje da su još više odmaknuti od nasipa, u područje gdje više nema deformacija (utjecaja rubnih uvjeta). Na slikama I-8 i I-9 očituje se dvodimenzionalnost promatranog problema.

Na slici I-10 prikazan je porast vertikalnih ukupnih naprezanja (na istoj vertikali kao i vertikalni pomaci na slici I-7) s fazama izgradnje nasipa. U prvoj donjoj točki ovog dijagrama (donji rub temeljnoga tla) vertikalno se ukupno naprezanje povećalo za 222 kPa nakon izgradnje cijeloga nasipa. Kada bi problem bio jednodimenzionalan, u toj bi se točki vertikalno ukupno naprezanje promijenilo za $20 \times 15 = 300$ kPa.

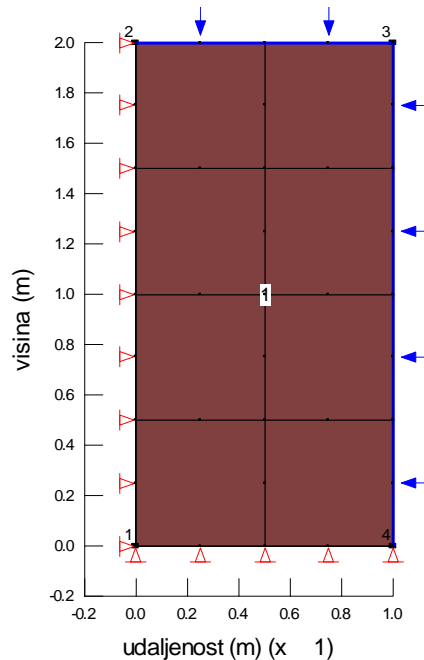


Slika I-10. Vertikalna ukupna naprezanja po fazama izgradnje nasipa duž vertikale na sredini krune nasipa

II. Brza izgradnja nasipa na slabo propusnom potpuno saturiranom tlu

Ako se nasip brzo gradi na slabo propusnom saturiranom tlu, temeljno će tlo tijekom izgradnje nasipa biti u nedreniranim uvjetima. Pri tom će se generirati višak tlaka vode, koji će disipirati u procesu konsolidacije tla. Ovdje ćemo prvo simulirati izgradnju nasipa u nedreniranim uvjetima, a zatim ćemo simulirati dvodimenzionalnu konsolidaciju temeljnoga tla.

Na početku ćemo jednostavnim primjerima ilustrirati kako se u programu SIGMA/W zadaju nedrenirani uvjeti. Promatramo osno simetrični model tla visine 2 m i širine 2 m, koji ćemo izotropno opteretiti sa 100 kPa u nedreniranim uvjetima, što bi odgovaralo uvjetima u nedreniranom troosnom pokusu, gdje uzorak tla opterećujemo čelijskim tlakom vode. Model tla za ovaj je primjer prikazan na slici II-1. Lijevi je rub modela ujedno os simetrije, pa je model širok 1 m. Osa se simetrija modela zadaje pod *KeyIn – Analysis Settings – Control*, gdje se označi *Axisymmetric*. Lijevom su rubu modela dopušteni pomaci samo u vertikalnom smjeru, a donjem rubu modela samo u horizontalnom smjeru.



Slika II-1. Izotropno opterećen osno simetričan model tla

Za nedreniranu analizu u programu SIGMA/W treba zadati Skemptonove parametre A i B . Parametar $B = 1$ ako je tlo potpuno saturirano, a ako je tlo djelomično saturirano, onda je $B < 1$. Parametar A poprima vrijednosti od oko $-0,5$ za jako prekonsolidirano tlo do oko $0,5$ za normalno konsolidirano tlo. Pomoću ovih se parametara određuje porast tlaka vode u tlu nakon inkrementa većeg glavnog naprežanja $\Delta\sigma_1$ i inkrementa manjeg glavnog naprežanja $\Delta\sigma_3$, pri čemu je $\Delta\sigma_2 = \Delta\sigma_3$, tako da je

$$\Delta u = B [\Delta\sigma_3 + A (\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)]$$

Za izotropno je opterećenje $\Delta\sigma_1 = \Delta\sigma_3$. Ako pretpostavimo da je tlo potpuno saturirano, pa je $B = 1$, za izotropno opterećenje 100 kPa, dobit ćemo jednaki porast tlaka vode u tlu.

Vrijednosti parametara A i B zadaju se pod *KeyIn – Stress Functions – A-Coefficient*, odnosno *B-Coefficient*. Parametar A zadaje se kao funkcija devijatora naprezanja ($\sigma_1 - \sigma_3$), a parametar B kao funkcija tlaka vode u tlu (*PWP*). Ovdje ćemo zadati linearno-elastičan konstitucijski odnos za tlo, za koji je $A = 1/3$.

Pod *KeyIn – Material properties*, za temeljno tlo treba zadati linearno-elastičan konstitucijski odnos, a za vrstu parametara (*Parameter Type*) treba zadati *Total*, jer će biti zadani E_u i ν_u . Pod *Pore Water Pressure Coefficient Functions* treba odabrati brojeve 1 za zadane funkcije koeficijenata B (*B-Fn #*) i A (*A-Fn #*).

Veza između E' i E_u uspostavlja se iz jednakosti modula posmika u dreniranim i nedreniranim uvjetima. Modul posmika za linearno-elastično tlo je

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

Kako je $G' = G_u$, slijedi da je

$$E_u = E' \frac{1+\nu_u}{1+\nu'}$$

Poissonov koeficijent je u nedreniranim uvjetima (nema promjene volumena) jednak 0,5. Međutim, u programu SIGMA/W se pojavljuje numerička nestabilnost (singularitet) ako se zada ova vrijednost za ν_u . Najveća vrijednost koja se smije zadati je $\nu_u = 0,49$. Tako je za naš primjer, gdje je $E' = 3000$ kPa, a $\nu' = 0,33$

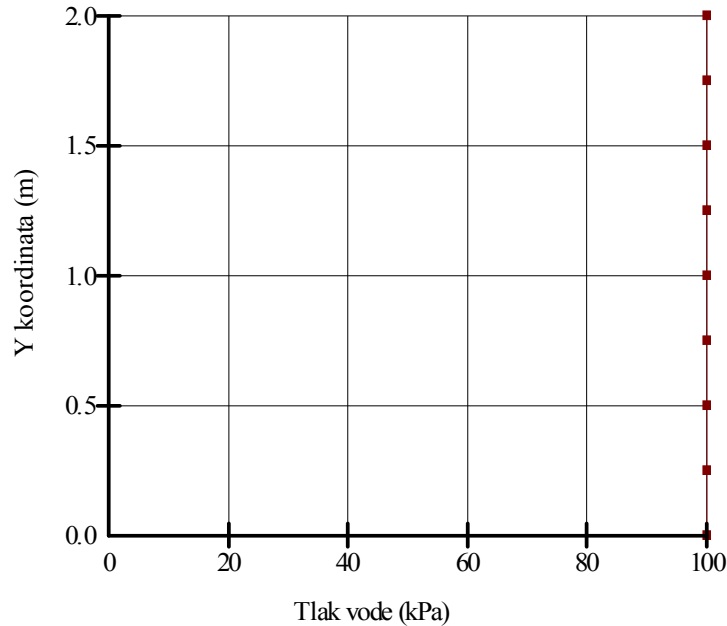
$$E_u = 3000 \frac{1,49}{1,33} = 3361 \text{ kPa}$$

Kao što se vidi na slici II-2, tlak vode u tlu porastao je upravo za 100 kPa. Vertikalno i horizontalno ukupno naprezanje su također 100 kPa, pa su vertikalno i horizontalno efektivno naprezanje nula.

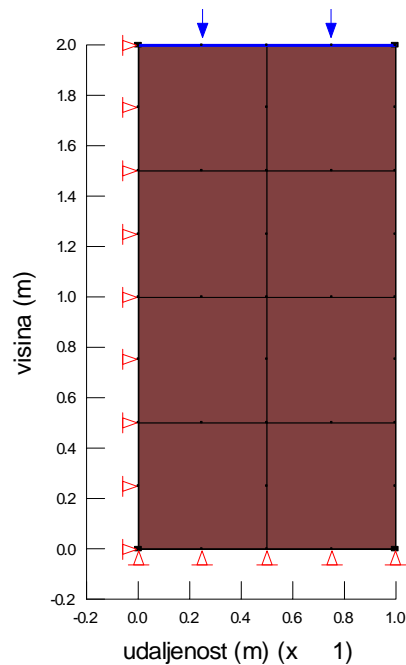
Ako na izotropno opterećenje 100 kPa, dodamo inkrement vertikalnog opterećenja $\Delta\sigma_1 = 200$ kPa (slika II-3), sve u nedreniranim uvjetima, sada uz $\Delta\sigma_3 = 0$, dobijemo

$$\Delta u = 1 \left[0 + \frac{1}{3}(200 - 0) \right] = 66,7 \text{ kPa}$$

Ovaj dio primjera odgovara nedreniranom smicanju (postoji razlika glavnih naprezanja) u troosnom pokusu. Oba dijela opterećenja (izotropno i smicanje) u nedreniranim uvjetima odgovaraju troosnom UU pokusu (nekonsolidiran, nedreniran).

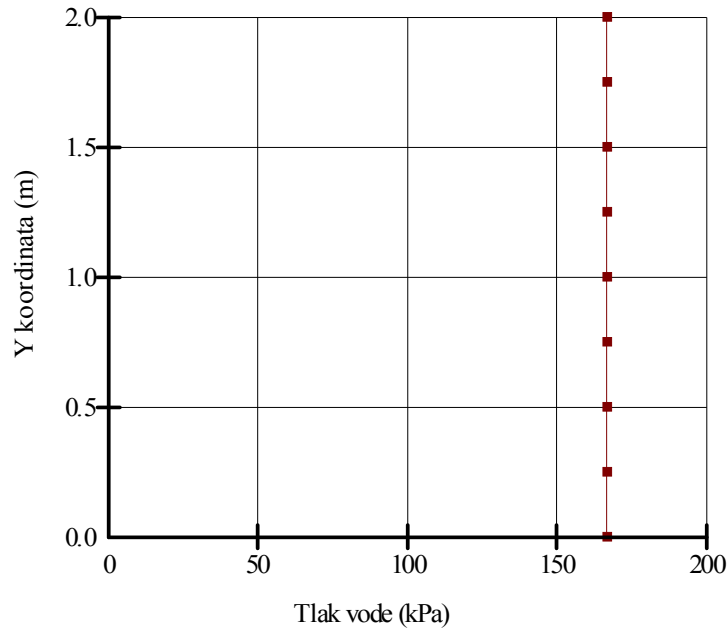


Slika II-2. Tlak vode $u = u_e = 100$ kPa po visini modela tla



Slika II-3. Vertikalno opterećen osno simetričan model tla (smicanje)

Kao što se vidi na slici II-4, tlak vode u tlu upravo je narastao za $\Delta u = 66,7$ kPa i sada iznosi 166,7 kPa. Vertikalno ukupno naprezanje iznosi 300 kPa, a horizontalno ukupno naprezanje 100 kPa. Tako je vertikalno efektivno naprezanje 133,3 kPa, a horizontalno efektivno naprezanje -66,7 kPa. Kao što vidimo, pri trodimenzionalnom smicanju u nedreniranim uvjetima dolazi do promjene efektivnih naprezanja i odgovarajućih deformacija, iako je volumen tla konstantan. Ove su deformacije rezultat distorzije uzorka (modela) tla.



Slika II-4. Tlak vode $u = u_e = 166,7$ kPa po visini modela tla

S druge strane, ako su spriječene bočne deformacije, kao u edometarskim uvjetima, više ne dobijemo očekivane rezultate. Naime, pri vertikalnom opterećenju $\Delta\sigma = \Delta\sigma_1 = 100$ kPa u nedreniranim uvjetima, u jednodimenzionalnom bi slučaju trebalo biti $\Delta u = 100$ kPa, $\Delta\sigma'_1 = \Delta\sigma'_3 = 0$, pa je $\Delta\sigma_3 = 100$ kPa. Međutim, program SIGMA/W će izračunati

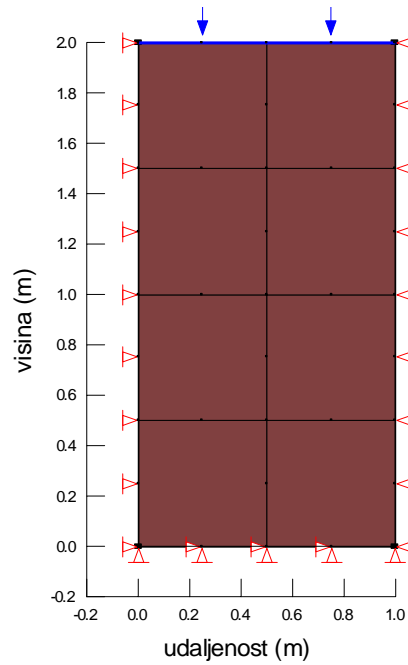
$$\Delta\sigma_3 = \frac{v_u}{1 - v_u} \Delta\sigma_1 = \frac{0,49}{1 - 0,49} 100 = 96,1 \text{ kPa}$$

i

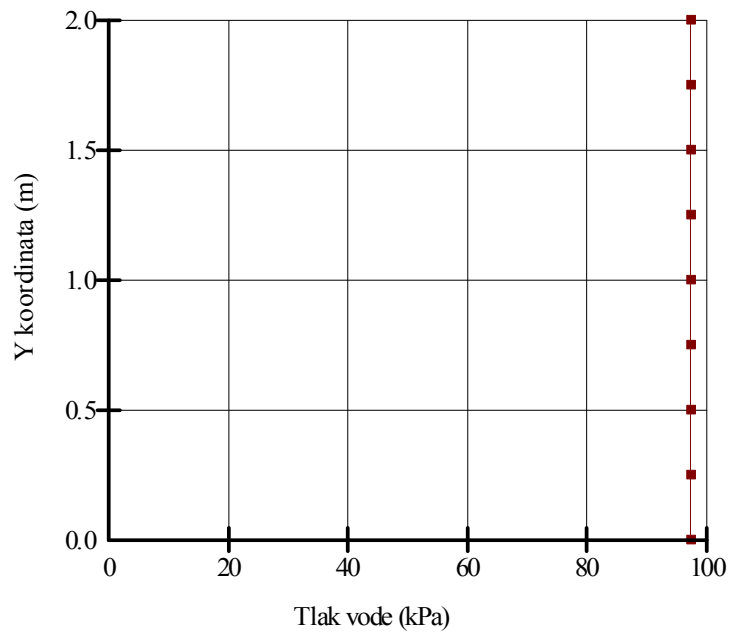
$$\Delta u = 1 \left[96,1 + \frac{1}{3}(100 - 96,1) \right] = 97,4 \text{ kPa}$$

pa će biti $\Delta\sigma'_1 = 2,6$ kPa, a $\Delta\sigma'_3 = -1,3$ kPa.

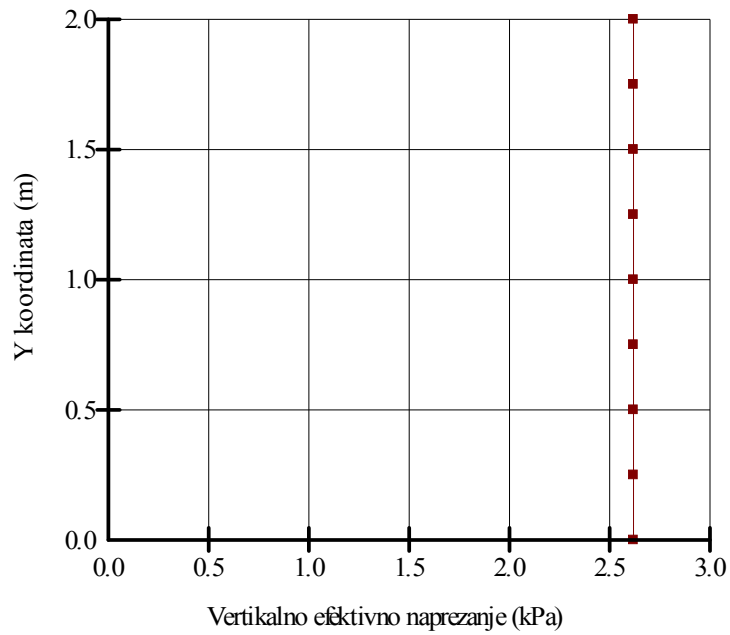
Model tla za ovaj primjer prikazan je na slici II-5, a rezultati na slikama II-6 do II-8.



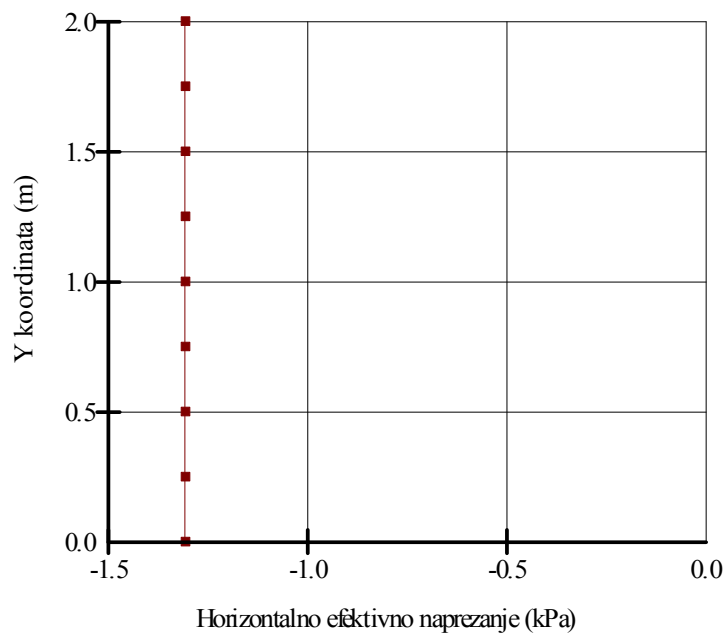
Slika II-5. Vertikalno opterećen dvodimenzionalan model tla (edomatarski uvjeti)



Slika II-6. Tlak vode $u = u_e = 97,4$ kPa po visini modela tla



Slika II-7. Vertikalno efektivno naprezanje $\sigma'_1 = \Delta\sigma'_1 = 2,6$ kPa po visini modela tla



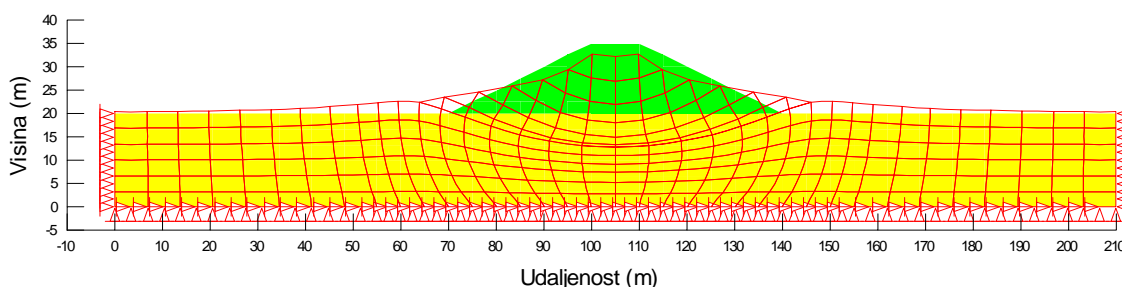
Slika II-8. Horizontalno efektivno naprezanje $\sigma'_3 = \Delta\sigma'_3 = -1,3$ kPa po visini modela tla

Sada ćemo primijeniti nedrenirane uvjete na izgradnju nasipa u 6 faza. Za temeljno tlo zadajemo

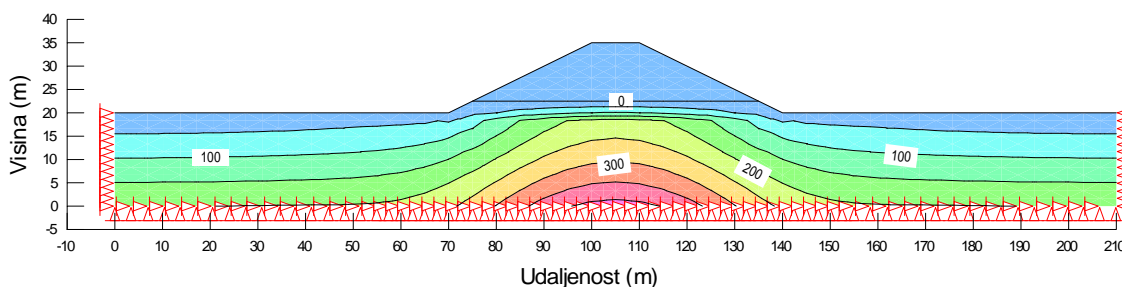
$$E_u = 8000 \frac{1,49}{1,25} = 9536 \text{ kPa}$$

i $\nu_u = 0,49$ te parametre $A = 1/3$ i $B = 1$. Model tla je isti kao na slici I-5.

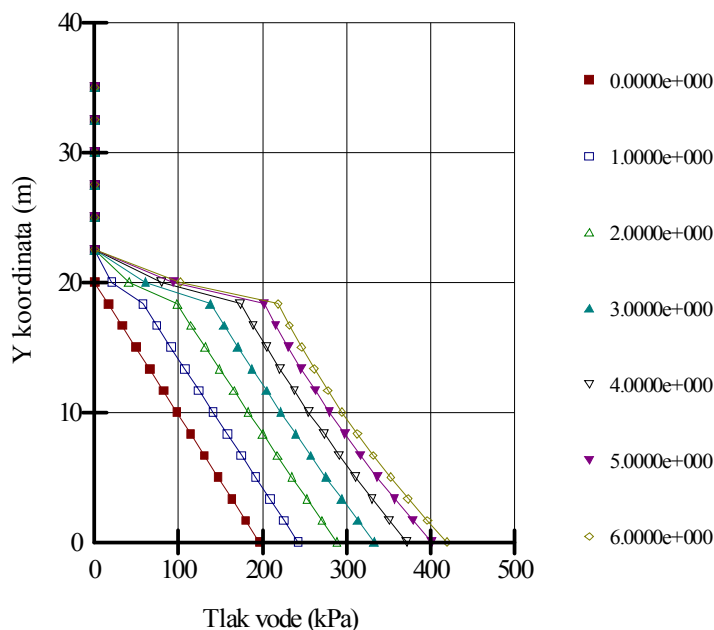
Sada je deformirana mreža konačnih elemenata (slika II-9) drukčija nego u slučaju drenirane analize (slika I-6). Došlo je do deformacija nasipa i distorzije temeljnoga tla. Raspodjela tlaka vode nakon izgradnje cijelog nasipa, uz višak tlaka vode generiran tijekom nedrenirane analize prikazana je na slici II-10. Povećanje tlaka vode po fazama izgradnje nasipa na vertikali po sredini krune nasipa prikazano je na slici II-11. Tlak vode na donjem rubu temeljnoga tla ispod sredine krune nasipa ukupno je narastao za 223,5 kPa, dok se vertikalno ukupno naprezanje ovdje povećalo za 230 kPa. Razlog većeg povećanja vertikalnog ukupnog naprezanja u ovom proračunu u odnosu na drenirani proračun, kada je bilo 222 kPa, je taj što je u dreniranoj analizi dolazilo do slijezanja temeljnoga tla tijekom izgradnje nasipa, pa su time ukupna vertikalna naprezanja manja.



Slika II-9. Deformirana mreža konačnih elemenata nakon nedrenirane analize za temeljno tlo



Slika II-10. Izolinije tlaka vode (kPa) u temeljnom tlu



Slika II-11. Tlak vode po fazama izgradnje nasipa duž vertikale na sredini krune nasipa

Nakon nedrenirane analize slijedi konsolidacija temeljnoga tla. Koeficijent propusnosti temeljnoga tla je $k = 5 \times 10^{-7}$ m/s, a tla nasipa $k = 3 \times 10^{-4}$ m/s. Za temeljno ćemo tlo zadati $n = 25\%$ (0,25), a za tlo nasipa $n = 40\%$ (0,4). Još treba izračunati odgovarajuće module promjene volumena.

Za temeljno je tlo

$$M_v = 8000 \frac{1 - 0,25}{(1 + 0,25)(1 - 2 \times 0,25)} = 9600 \text{ kPa}$$

$$\Rightarrow m_v = \frac{1}{9600} = 1,042 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{kN}$$

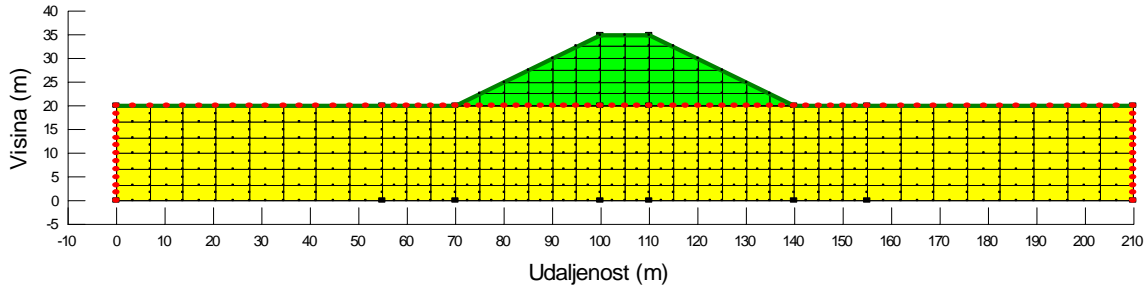
Za tlo nasipa je

$$M_v = 10000 \frac{1 - 0,35}{(1 + 0,35)(1 - 2 \times 0,35)} = 16049 \text{ kPa}$$

$$\Rightarrow m_v = \frac{1}{16049} = 6,231 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{kN}$$

U programu SIGMA/W provodimo sparenu konsolidaciju, a početne uvjete za pomake, ukupna naprezanja i tlak vode preuzimamo iz prethodnog proračuna. Tlu nasipa treba poništiti zapreminsku težinu, jer je nasip već izgrađen. Rubni uvjeti u programu SEEP/W

na kraju primarne konsolidacije predstavljaju hidrostatski tlak vode s vodom na površini temeljnoga tla, dakle na vrhu temeljnoga tla te na lijevom i desnom rubu modela treba zadati hidraulički potencijal $H = 20$ m (slika II-12).



Slika II-12. Model tla za program SEEP/W na kraju primarne konsolidacije

Za proračun prvog vremena za proces konsolidacije treba prvo odrediti koeficijent konsolidacije temeljnoga tla:

$$c_v = \frac{5 \times 10^{-7} \times 9600}{9,81} = 4,9 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

pa je

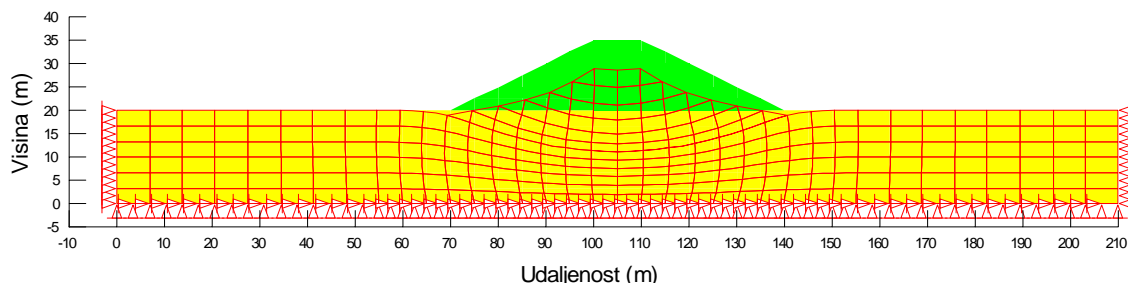
$$t_{\min} \geq \frac{(20/6)^2}{12 \times 4,9 \times 10^{-4}} = 1890 \text{ s}$$

Za prvo ćemo vrijeme proračuna konsolidacije zadati 2000 s. Približni kraj primarne konsolidacije računamo iz

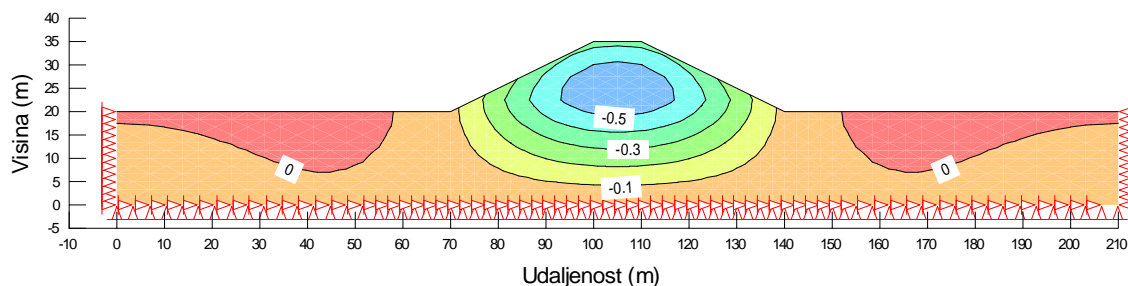
$$t_{100} = \frac{2 \times 20^2}{4,9 \times 10^{-4}} = 1.632.653 \text{ s}$$

Zadajemo 10 vremena proračuna s faktorom povećanja u odnosu na prvo vrijeme (*Expansion Factor*) 2.

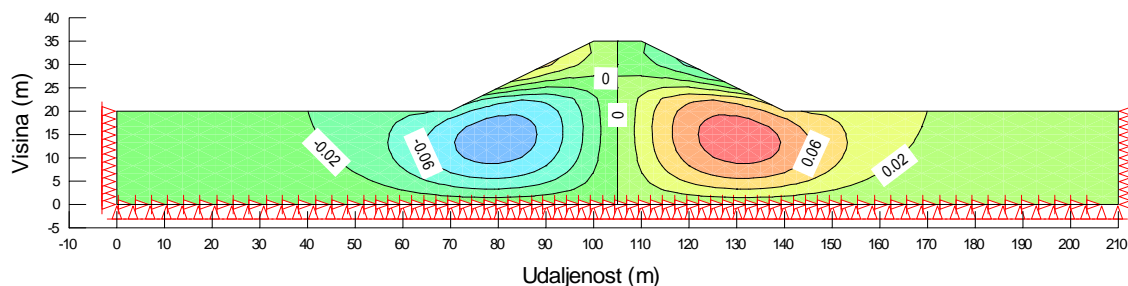
Deformirana mreža konačnih elemenata nakon primarne konsolidacije prikazana je na slici II-13. Sada se cijeli nasip slegao zajedno s temeljnim tlom. Raspodjele vertikalnih (slika II-14) i horizontalnih pomaka (slika II-15) slične su onima za dreniranu analizu u temeljnome tlu.



Slika II-13. Deformirana mreža konačnih elemenata na kraju primarne konsolidacije



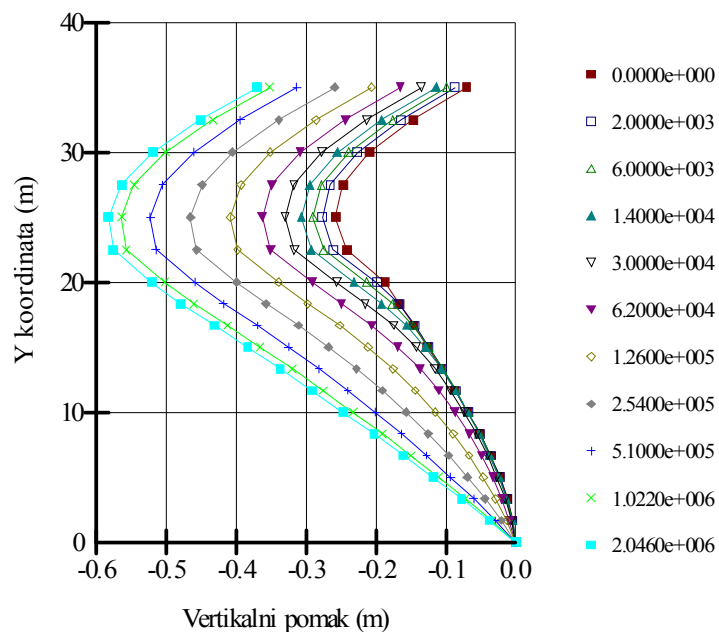
Slika II-14. Izolinije vertikalnih pomaka (m) na kraju primarne konsolidacije



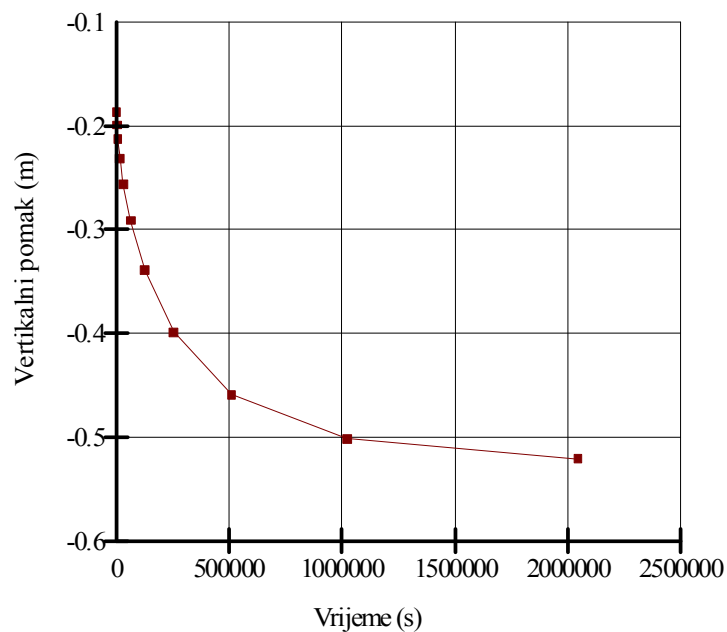
Slika II-15. Izolinije horizontalnih pomaka (m) na kraju primarne konsolidacije

Vertikalni pomaci u vremenu po visini nasipa i temeljnoga tla duž vertikale na sredini krune nasipa prikazani su na slici II-16. Za vrijeme $t = 0$ vide se početni vertikalni pomaci ostvareni tijekom nedrenirane analize za temeljno tlo na kojem je izgrađen cijeli nasip. Vertikalni pomak na kraju primarne konsolidacije, za vrijeme od 23,7 dana nakon izgradnje nasipa, na vrhu temeljnoga tla iznosi 52 cm, što je vrlo blizu vrijednosti 54 cm iz drenirane analize. Ovo je očekivani rezultat, jer je u oba slučaja jednako opterećenje nanoseno na temeljno tlo. Vertikalni pomak sredine krune nasipa iznosi 37 cm, dok je u dreniranoj analizi bio svega 9 cm, jer je sada cijeli nasip izgrađen i sliježe se zajedno s temeljnim tlom. Opet je najveći vertikalni pomak na površini prvog sloja nasipa, koji iznosi 58 cm (u dreniranoj je analizi bio 59 cm), jer je bio najveći i na kraju izgradnje nasipa (vrijeme $t = 0$ u ovom proračunu).

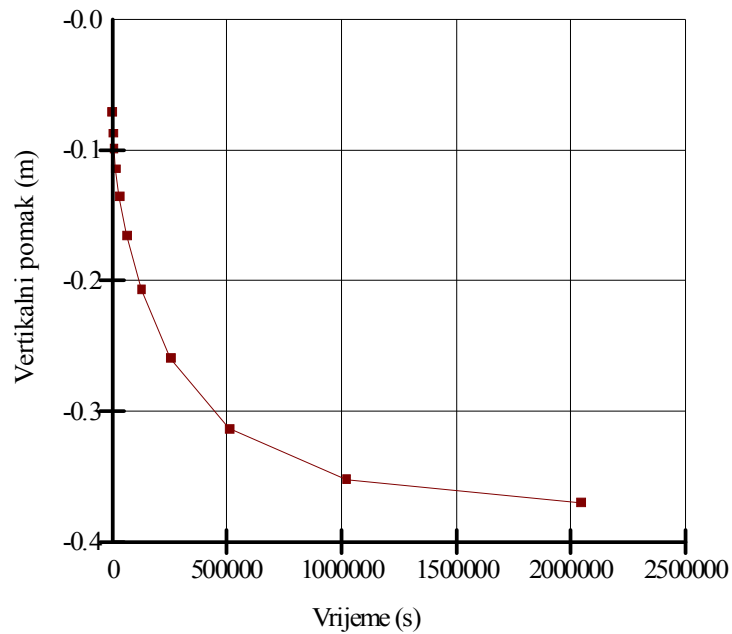
Na slikama II-17 i II-18 još su prikazani vertikalni pomaci u vremenu točke na vrhu temeljnoga tla na sredini krune nasipa, odnosno u točki na sredini krune nasipa.



Slika II-16. Vertikalni pomaci u vremenu po visini nasipa i temeljnoga tla duž vertikale na sredini krune nasipa

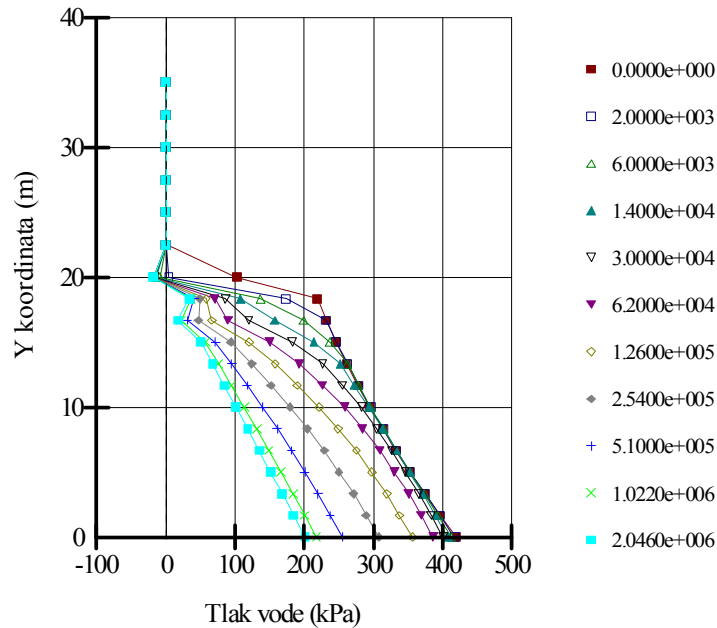


Slika II-17. Vertikalni pomak u vremenu točke na površini temeljnoga tla na sredini krune nasipa



Slika II-18. Vertikalni pomak u vremenu točke na sredini krune nasipa

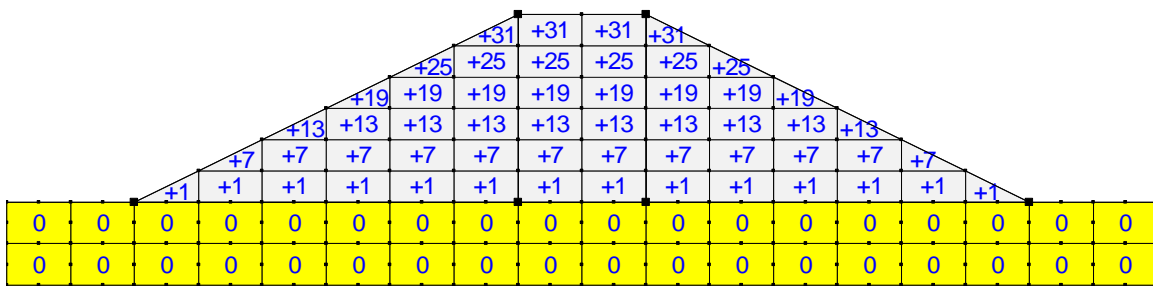
Na slici II-19 prikazane su izokrone. Na kraju primarne konsolidacije u temeljnom je tlu opet hidrostatski tlak vode. Kako je ispod temeljnoga tla nepropusna stijena, donja je granica modela nepropusna, što se vidi i po obliku izokrona.



Slika II-19. Izokrone tijekom primarne konsolidacije

III. Postupna izgradnja nasipa na slabo propusnom potpuno saturiranom tlu

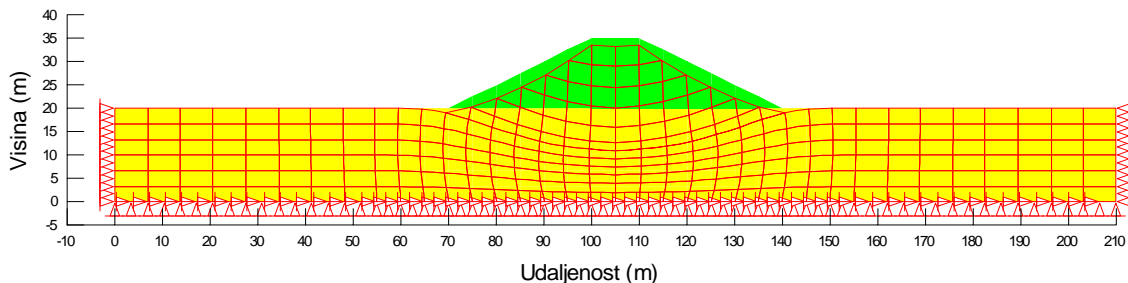
U ovom ćemo primjeru ilustrirati postupnu izgradnju nasipa uz istovremenu konsolidaciju temeljnoga tla. Sada se novi sloj nasipa nasipava 6 dana nakon prethodnoga sloja. Ovdje faze izgradnje nasipa u programu SIGMA/W treba označiti realnim vremenom, zbog istovremene konsolidacije temeljnoga tla. Radi jednostavnosti ćemo sve jedinice vremena od sekundi pretvoriti u dane. Vrijeme se zadaje od jednog dana, s inkrementima od jednog dana, dakle redni brojevi od 1 do 35, zatim 40 dana, 45 dana i 50 dana. Ova zadnja tri broja treba posebno unijeti u tablicu, nakon što se zadaju brojevi od 1 do 35. Svaki se red elemenata modela nasipa označi odgovarajućim danom izgradnje, tako da sada model nasipa izgleda kao što je prikazano na slici III-1. Za nasip treba zadati njegovu zapreminsku težinu.



Slika III-1. Model nasipa za njegovu postupnu izgradnju
(dio mreže konačnih elemenata)

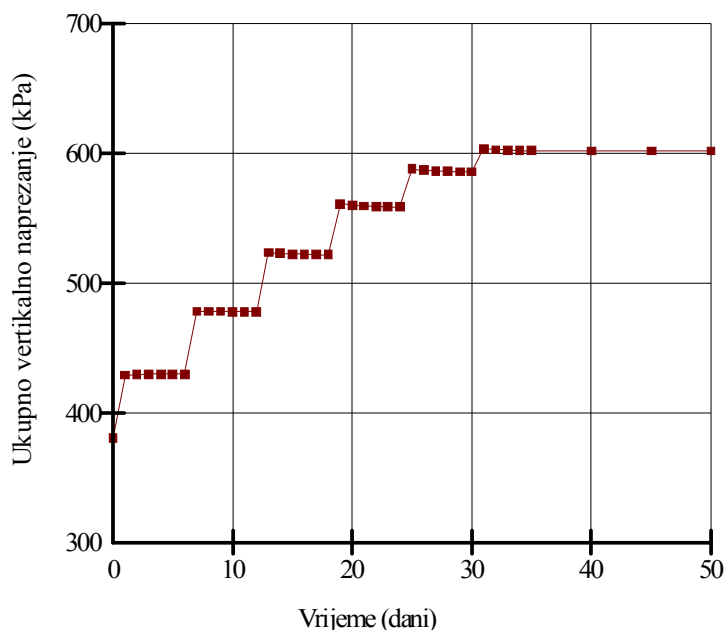
Ovdje se početni uvjeti za ukupna naprezanja i tlak vode preuzimaju iz proračuna početnog stanja naprezanja u temeljnome tlu. Provodi se analiza sparene konsolidacije s istim rubnim uvjetima u programu SEEP/W za hidrostatski tlak vode na kraju primarne konsolidacije kao u prethodnom primjeru. Treba promijeniti vrijednosti koeficijenata propusnosti tako da budu u jedinicama m/dani. Tako je sada koeficijent propusnosti temeljnoga tla $k = 4,32$ m/dani, a tla nasipa $k = 25,92$ m/dani.

Deformirana mreža konačnih elemenata na kraju primarne konsolidacije prikazana je na slici III-2. Sada su deformacije nasipa „negdje između“ onih za dreniranu izgradnju nasipa i konsolidaciju temeljnoga tla nakon izgradnje cijelog nasipa.



Slika III-2. Deformirana mreža konačnih elemenata na kraju primarne konsolidacije

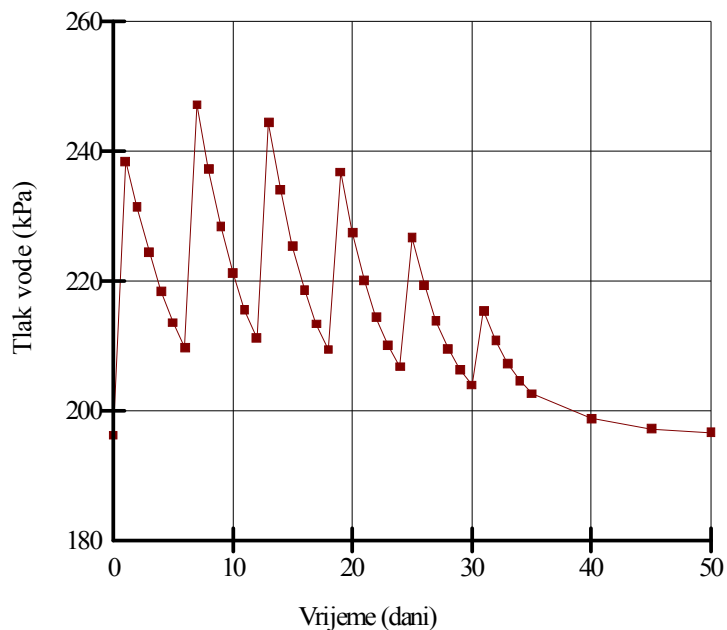
Na slici III-3 prikazano je kako se ukupno vertikalno naprezanje mijenja u vremenu s izgradnjom nasipa, u točki na donjem rubu modela ispod središta krune nasipa. Promjena ukupnog vertikalnog naprezanja u toj je točki 222 kPa, isto kao u dreniranoj analizi brze izgradnje nasipa.



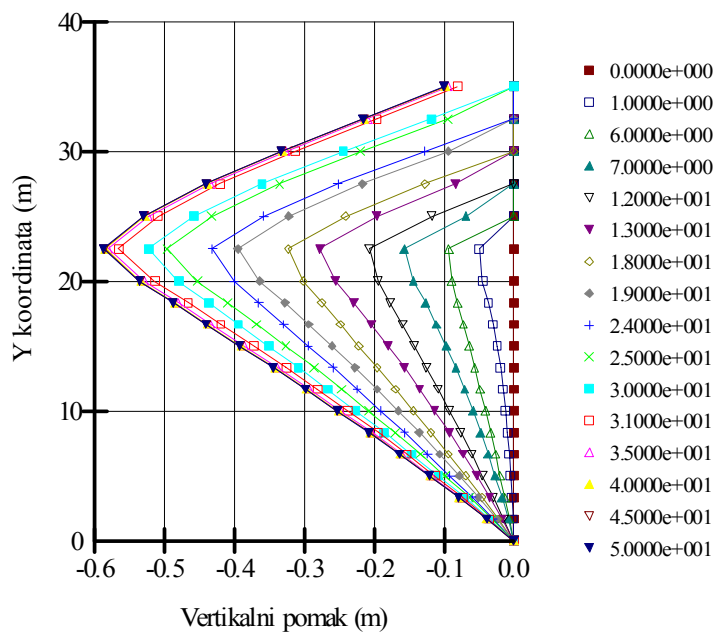
Slika III-3. Ukupno vertikalno naprezanje u vremenu u točki na donjem rubu temeljnoga tla ispod sredine krune nasipa

Zanimljivo je vidjeti kako se u toj istoj točki mijenja tlak vode u vremenu (slika III-4). Tlak vode naraste pri opterećenju temeljnoga tla slojem nasipa, onda kroz sljedećih 5 dana disipira uslijed konsolidacije temeljnoga tla, da bi pri nasipavanju sljedećeg sloja nasipa opet narastao. Treba naglasiti, da osim što se ovdje radi o dvodimenzionalnoj konsolidaciji tla, Terzaghievo rješenje jednodimenzionalne konsolidacije ne bi bilo primjenljivo za opterećenje koje se mijenja u vremenu. Na osnovu Terzaghieve diferencijalne jednadžbe jednodimenzionalne konsolidacije, moguće je uključiti u vremenu promjenljivo opterećenje, ako se ova jednadžba rješava metodom konačnih razlika.

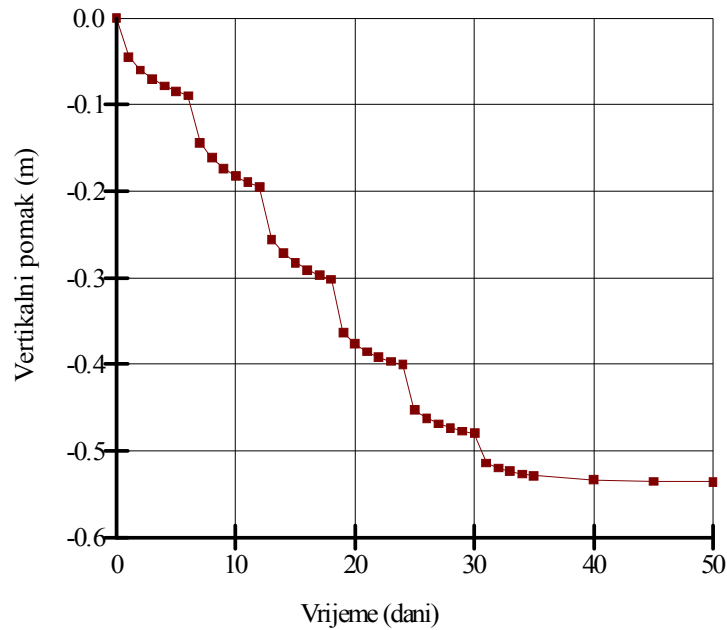
Na slici III-5 prikazani su vertikalni pomaci za odabrana vremena (dan prije i na dan nasipavanja sloja nasipa) po visini nasipa i temeljnoga tla duž vertikale po sredini krune nasipa. Iz ove se slike vidi kako se povećava slijeganje temeljnoga tla tijekom njegove konsolidacije (uz odgovarajuće slijeganje izgrađenog dijela nasipa) i kako se slijeganje naglo povećava nakon nasipavanja novog sloja nasipa, što se vidi i na slici III-6, gdje je prikazan vertikalni pomak u vremenu točke na površini temeljnoga tla ispod sredine krune nasipa. Vertikalni pomak ove točke na kraju primarne konsolidacije iznosi 54 cm, a sredine krune nasipa 10 cm.



Slika III-4. Tlak vode u vremenu u točki na donjem rubu temeljnoga tla ispod sredine krune nasipa

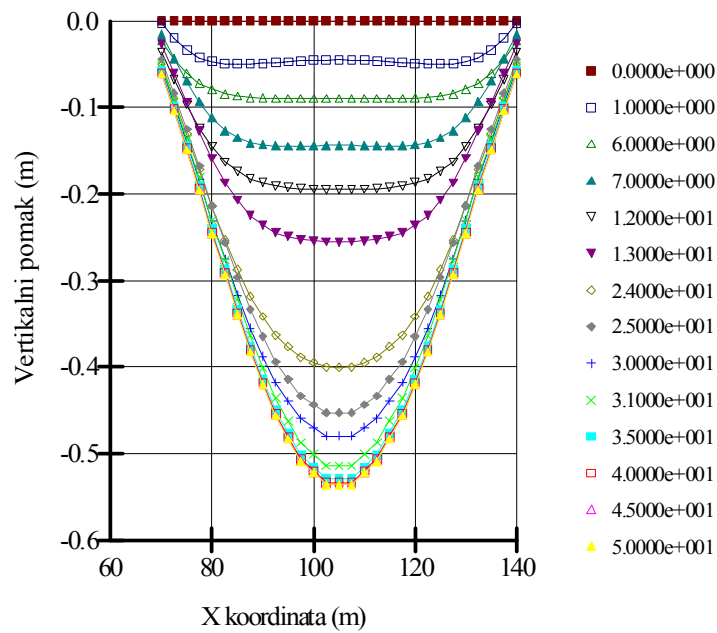


Slika III-5. Vertikalni pomaci u vremenu po visini nasipa i temeljnoga tla duž vertikale na sredini krune nasipa



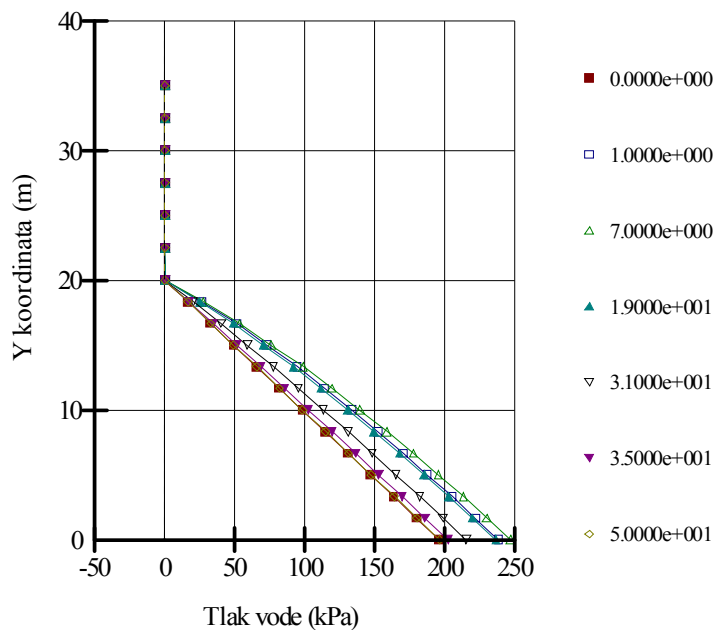
Slika III-6. Vertikalni pomak u vremenu točke na površini temeljnoga tla ispod sredine krune nasipa

Na slici III-7 prikazani su vertikalni pomaci u vremenu površine temeljnoga tla ispod cijelog nasipa. Ovi su pomaci simetrični u odnosu na vertikalnu po sredini krune nasipa i, naravno, najveći su upravo u točki na ovoj vertikali.



Slika III-7. Vertikalni pomaci u vremenu površine temeljnoga tla ispod cijelog nasipa

Na slici III-8 prikazane su izokrone za odabrana vremena. Vidi se da tlak vode u temeljnom tlu 7. dan (nasipavanje drugog sloja nasipa) premašuje tlak vode nakon nasipavanja prvog sloja (1. dan), iako je u međuvremenu dio tlaka vode disipirao. Na dan kada se nasipavao četvrti sloj tla (19. dan), tlak vode gotovo je isti kao prvi dan. Primarna je konsolidacija završila kroz vrijeme proračuna, jer je, na kraju, ponovo uspostavljen hidrostatski tlak vode u temeljnom tlu.



Slika III-8. Izokrone za odabrana vremena