

KONSOLIDACIJA

DIFUZIJSKA ENAČBA ZA PROSTORSKO KONSOLIDACIJO V KARTEZIJEVIH KOORDINATAH

- Darcyjev zakon:

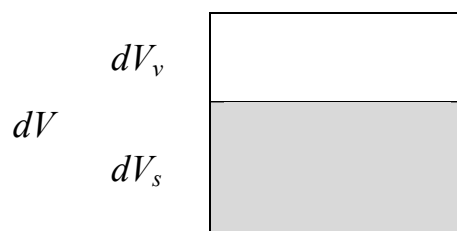
$$v_j = k_j i_j = \frac{k_j}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial x_j}$$

- Pretok kapljavine skozi masni delec prostornine dV :

$$q = \frac{dQ}{dt} = v_j A_j = \frac{\partial v_x}{\partial x} dx dy dz + \frac{\partial v_y}{\partial y} dy dx dz + \frac{\partial v_z}{\partial z} dz dx dy$$

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{1}{\gamma_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] dx dy dz$$

- Sestav masnega delca prostornine dV :



$$dV = dx dy dz$$

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{dV_v}{dV_s}$$

$$dV = dV_s + dV_v = (1 + e) dV_s$$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{de}{dt} dV_s = \frac{de}{dt} \frac{dV}{(1+e)} = \frac{de}{dt} \frac{dxdydz}{(1+e)}$$

- Kontinuitetni pogoji:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{dV}{dt}$$

$$\frac{1}{\gamma_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] dxdydz = \frac{de}{dt} \frac{dxdydz}{(1+e)}$$

$$\frac{de}{dt} = \frac{1+e}{\gamma_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right]$$

- Načelo efektivnih napetosti:

$$\sigma = \sigma' + u \Rightarrow \sigma' = \sigma - u$$

$$\sigma_{zz} = \sigma'_{zz} + u \Rightarrow \sigma'_{zz} = \sigma_{zz} - u$$

$$\frac{de}{dt} = \frac{\partial e}{\partial \sigma'_{zz}} \frac{\partial \sigma'_{zz}}{\partial t} = \frac{\partial e}{\partial \sigma'_{zz}} \left(\frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial t} - \frac{\partial u}{\partial t} \right)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = - \frac{1+e}{\gamma_w} \frac{\partial \sigma'_{zz}}{\partial e} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial t}$$

- Edometrski preizkus:

$$M_v \equiv E_{oed} = - \frac{\Delta \sigma'_{zz}}{\Delta e} (1+e) = - \frac{d\sigma'_{zz}}{de} (1+e)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{E_{oed}}{\gamma_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial t}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_{vx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + c_{vy} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + c_{vz} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial t}$$

$$c_{vj} = \frac{E_{oed} k_j}{\gamma_w}$$

DIFUZIJSKA ENAČBA ZA PROSTORSKO KONSOLIDACIJO V
CILINDRIČNIH KOORDINATAH

$$x = r \cos \phi$$

$$y = r \sin \phi$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_{vr} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} \right) + c_{vz} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial t}$$

DIFUZIJSKA ENAČBA ZA RAVNINSKO KONSOLIDACIJO

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_{vx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + c_{vz} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial t}$$

DIFUZIJSKA ENAČBA ZA LINEARNO KONSOLIDACIJO

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_{vz} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial t}$$

ANALITIČNO REŠEVANJE DIFUZIJSKE ENAČBE

1. Terzaghijeva rešitev za linearno (vertikalno) konsolidacijo

Terzaghi je obravnaval vertikalno konsolidacijo. Izhajal je iz obnašanja valjastega vzorca v edometru (v naravi: sloj omejene debeline, obremenjen z brezkraino obtežbo). Če je obremenitev hipna, se difuzijska enačba za vertikalno konsolidacijo poenostavi:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

Zaradi preglednejšega zapisa je v difuzijski enačbi vrednost presežnega poregna tlaka Δu , ki se v temeljnih tleh (zemljini) pojavi zaradi obremenitve tal z obtežbo q , pisana samo s črko u , brez znaka Δ .

To je parcialna diferencialna enačba drugega reda. Rešitev takšne enačbe mora zadoščati robnim pogojem (na vrhu in na dnu obravnavanega sloja zemljine) in začetnemu pogoju (kolikšni so porni tlaki ob ničnem času). V primeru, ko obravnavamo konsolidacijo enega sloja zemljine, sta možna samo dva robna pogoja:

1. prepusten rob – vrednost presežnega poregna tlaka je nič
2. neprepusten rob – vrednost presežnega poregna tlaka je največja

Vrednost presežnega poregna tlaka (dodatnega poregna tlaka) na začetku konsolidacije (ob ničnem času) je odvisna od hitrosti naraščanja obremenjevanja temeljnih tal in od mehanskih lastnosti zemljin. Pri hipni obremenitvi tal so presežni porni tlaki v temeljnih tleh ob začetku konsolidacije največji. Za zasičene zemljine je na teoretičnih osnovah in na osnovi rezultatov preiskav valjastih vzorcev zemljin v triosnih aparatih Skempton ugotovil naslednjo zakonitost:

$$\frac{\Delta u}{\Delta \sigma_1} = A - (1 - A) \frac{\Delta \sigma_3}{\Delta \sigma_1}$$

Δu pomeni vrednost presežnega poregna tlaka v vzorcu zemljine, ki nastane v vodi v prazninah zemljinskega vzorca potem, ko vzorec hipno obremenimo s takšno obtežbo, ki povzroči povečanje glavnih napetosti v vzorcu za $\Delta \sigma_1$ in $\Delta \sigma_3$. A je tako imenovan Skemptonov količnik.

Parameter A je odvisen od vrste zemljine. Če bi bila zemljina 100% zasičena, če bi bila zemljina izotropno elastičen material, bi iz pogoja, da je v začetku procesa konsolidacije volumenska deformacija zemljine nična, ugotovili da je parameter A enak vrednosti $1/3$.

Vrednost parametra A je zaradi tega, ker zemljine niso izotropen elastičen material največkrat različna od vrednosti $1/3$. Med procesom konsolidacije se spreminja tako prostornina vzorca, kakor tudi efektivno napetostno stanje v vzorcu, zato se spreminja tudi parameter A .

Če ne poznamo vrednosti parametra A , jo v inženirski praksi privzamemo. Po Skemptonu imajo različne gline naslednje vrednosti parametra A :

vrsta gline	A
zelo občutljive mehke gline	> 1
normalno konsolidirane gline	$0,5 - 1$
prekonsolidirane gline	$0,25 - 0,5$
močno prekonsolidirane peščene gline	$0 - 0,25$

Če so zemljine normalno konsolidirane in bolj deformabilne, je dovolj dober približek (ki je na varni strani), da upoštevamo v enačbi Skemptona parameter A v velikosti 1. To pomeni, da so presežni porni tlaki enaki:

$$\Delta u = \Delta \sigma_1$$

Pri reševanju difuzijske enačbe za vertikalno konsolidacijo zasičenih, normalno konsolidiranih zemljin, je Terzaghi upošteval naslednje robne in začetne pogoje:

- Robni pogoji:

$$z = 0 \Rightarrow u = 0$$

$$z = h \Rightarrow \frac{\partial u}{\partial z} = 0$$

- Začetni pogoji:

$$t = 0 \Rightarrow u = u_0 = \Delta \sigma_{zz} = const.$$

Iz difuzijske enačbe izračunamo vrednost presežnega poreznega tlaka v izbranem času v izbrani točki polprostora (sloja zemljine). Pri vertikalni konsolidaciji je presežni porezni tlak v matematičnem smislu funkcija časa t in koordinate z . Parcialni diferencialni enačbi (enačba 1) zadošča rešitev (vrednost presežnega poreznega tlaka) zapisana v obliki (enačba 2):

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (1)$$

$$u(z, t) = \Phi(z)\Psi(t) \quad (2)$$

$$\dot{\Psi} = \frac{d\Psi}{dt}, \quad \Phi'' = \frac{d^2\Phi}{dz^2}$$

$$\Phi \dot{\Psi} = c_v \Phi'' \Psi$$

$$\Phi \dot{\Psi} = c_v \Phi'' \Psi \Rightarrow \frac{\Phi''}{\Phi} = \frac{1}{c_v} \frac{\dot{\Psi}}{\Psi} = -\lambda$$

Namesto parcialne enačbe drugega reda (enačba 1), dobimo dve navadni diferencialni enačbi:

$$\Phi'' + \lambda\Phi = 0 \quad (3)$$

$$\dot{\Psi} + c_v \lambda \Psi = 0 \quad (4)$$

Prva diferencialna enačba (enačba 3) je sicer diferencialna enačba drugega reda, je pa funkcija Φ odvisna samo od spremenljivke z (globine). Druga diferencialna enačba (enačba 4) je linearna diferencialna enačba. Funkcija ψ je odvisna samo od spremenljivke t (časa).

Rešitev prve diferencialne enačbe:

$$\Phi'' + \lambda\Phi = 0$$

$$\Phi = A \cos(z\sqrt{\lambda}) + B \sin(z\sqrt{\lambda})$$

Konstanti A in B določimo iz robnih pogojev.

$$z = 0 \quad , \quad u = 0 \quad \Rightarrow \quad \Phi = 0$$

$$0 = A \cos(0\sqrt{\lambda}) + B \sin(0\sqrt{\lambda}) \quad \Rightarrow \quad A = 0$$

$$z = h \quad , \quad \frac{du}{dz} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{d\Phi}{dz} = 0$$

$$\Phi' = \frac{d\Phi}{dz} = B z \sqrt{\lambda} \cos(z\sqrt{\lambda})$$

$$0 = B h \sqrt{\lambda} \cos(h\sqrt{\lambda}) \quad \Rightarrow \quad h\sqrt{\lambda} = \frac{\pi}{2} \quad \Rightarrow \quad \sqrt{\lambda} = \frac{\pi}{2h}$$

Partikularna rešitev:

$$\Phi_m = B_m \sin \frac{(2m-1)\pi z}{2h} \quad , \quad m = 1, 2, 3, \dots, \infty$$

Splošna rešitev:

$$\Phi = \sum_{m=1}^{\infty} \Phi_m = \sum_{m=1}^{\infty} B_m \sin \frac{(2m-1)\pi z}{2h}$$

Rešitev druge diferencialne enačbe:

$$\dot{\Psi} + c_v \lambda \Psi = 0$$

$$\Psi = C e^{(-c_v \lambda t)} = C \exp(-c_v \lambda t)$$

Partikularna rešitev:

$$\Psi_m = C_m \exp \left\{ -c_v \left[\frac{(2m-1)\pi}{2h} \right]^2 t \right\} = C_m \exp \left\{ -\frac{(2m-1)^2 \pi^2}{4} T_v \right\}$$

Splošna rešitev:

$$\Psi = \sum_{m=1}^{\infty} \Psi_m = \sum_{m=1}^{\infty} C_m \exp \left\{ -\frac{(2m-1)^2 \pi^2}{4} T_v \right\}$$

Če pomeni c_v koeficient vertikalne konsolidacije in je odvisen od mehanskih lastnosti zemljine:

$$\boxed{c_v = \frac{k E_{oed}}{\gamma_w}} \quad (5)$$

pomeni T_v časovni faktor konsolidacije in je brez dimenzijska mera za čas. Odvisen je od mehanskih lastnosti zemljine, časa in debeline zemeljske plasti:

$$\boxed{T_v = \frac{c_v t}{h^2} = \frac{k E_{oed} t}{\gamma_w h^2}} \quad (6)$$

Vrednost presežnega poreznega tlaka ob določenem času v določeni globini dobimo, če upoštevamo rešitvi obeh navadnih diferencialnih enačb:

$$u(z, t) = \Phi(z) \Psi(t) \Rightarrow$$

$$u(z, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \Phi_m \sum_{m=1}^{\infty} \Psi_m = \sum_{m=1}^{\infty} \Phi_m \Psi_m$$

$$u(z, t) = \sum_{m=1}^{\infty} D_m \sin \frac{(2m-1) \pi z}{2h} \exp \left\{ -\frac{(2m-1)^2 \pi^2}{4} T_v \right\}$$

Konstanto D_m določimo iz začetnega pogoja:

$$t = 0 \quad , \quad T_v = 0 \quad \Rightarrow \quad u = u_0 = \Delta \sigma_{zz} = const.$$

$$u_0 = \sum_{m=1}^{\infty} D_m \sin \frac{(2m-1) \pi z}{2h} = \Delta \sigma_{zz}$$

$$D_m = \frac{2}{h} \int_{z=0}^h \Delta\sigma_{zz} \sin \frac{(2m-1)\pi z}{2h} dz = \frac{2\Delta\sigma_{zz}}{h} \int_{z=0}^h \sin \frac{(2m-1)\pi z}{2h} dz$$

$$\int_{z=0}^h \sin \frac{(2m-1)\pi z}{2h} dz = \left[-\frac{2h}{(2m-1)\pi} \cos \frac{(2m-1)\pi z}{2h} \right]_{z=0}^h$$

$$\int_{z=0}^h \sin \frac{(2m-1)\pi z}{2h} dz = \frac{2h}{(2m-1)\pi}$$

$$D_m = \frac{4\Delta\sigma_{zz}}{(2m-1)\pi}$$

Končno lahko zapišemo rešitev difuzijske enačbe za vertikalno konsolidacijo, ki je posledica obremenitve sloja zemljine (temeljnih tal) z brezkraino obtežbo q v obliki:

$$\Delta u(z, t) = \frac{4\Delta\sigma_{zz}}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{2m-1} \sin \frac{(2m-1)\pi z}{2h} \exp \left[-\frac{(2m-1)^2 \pi^2}{4} T_V \right]$$

(enačba 7)

Ta rešitev velja za primer, da smo temeljna tla obremenili hipno (začetni pogoj) in da je obravnavani sloj zemljine debeline h , omejen na dnu z neprepustno podlago (robni pogoj).

Če podrobneje pogledamo rešitev difuzijske enačbe (enačba 7) za konkreten primer, lahko zaključimo:

(i)

Ob začetku konsolidacije ($t = 0$) ima časovni faktor konsolidacije nično vrednost ($T_V = 0$), zato so vrednosti presežnih porenih tlakov takrat največje. Pri hipni obremenitvi normalno konsolidirane zasičene zemljine (Skemptonov

koeficient $A = 1$) so vrednosti presežnih pornih tlakov v vsaki točki zemljine takoj po obremenitvi enake dodatnim totalnim vertikalnim napetostim.

$$\Delta u(z, t = 0) = \Delta u_0 = \Delta \sigma_{zz}$$

$$\sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{2m-1} \sin \frac{(2m-1)\pi z}{2h} = \frac{\pi}{4}$$

(ii)

Ob koncu konsolidacije ($t \Rightarrow \infty$) doseže tudi časovni faktor konsolidacije neskončno vrednost ($T_V \Rightarrow \infty$), zato so vrednosti presežnih pornih tlakov takrat nične.

$$\Delta u(z, t \Rightarrow \infty) = 0$$

$$\exp\left[-\frac{(2m-1)^2 \pi^2}{4} \infty\right] = \frac{1}{e^\infty} = 0$$

(iii)

V praksi običajno upoštevamo Terzaghijevo ugotovitev, da presežni porni tlaki upadejo na zanemarljivo majhne vrednosti ($\Delta u \cong 0$) že takrat, ko doseže časovni faktor konsolidacije vrednost 2. Praktičen pomen te ugotovitve je, da lahko dovolj natančno izračunamo realno vrednost časa, označimo ga s t_∞ , ko bo proces konsolidacije v zemljini (temeljnih tleh) končan.

$$\boxed{T_V = \frac{c_v t}{h^2} = 2 \Rightarrow t_\infty = \frac{2h^2}{c_v}} \quad (8a)$$

ali

$$\boxed{T_V = \frac{k E_{oed} t}{\gamma_w h^2} = 2 \Rightarrow t_\infty = \frac{2 \gamma_w h^2}{k E_{oed}}} \quad (8b)$$

Čas trajanja konsolidacije nekega sloja zemljine je odvisen od debeline sloja h (večja ko je debelina sloja, dalj časa bo trajala konsolidacija in obratno) in od mehanskih lastnosti zemljine. Konsolidacija bo prej izvršena v bolj prepustnih (večji koeficient prepustnosti k) in v manj deformabilnih zemljinah (večji modul stisljivosti E_{oed}) – v zemljinah z večjim koeficientom konsolidacije.

(iv)

Med procesom konsolidacije se dodatne totalne napetosti zaradi obremenitve tal ne spreminjajo. Zato ker se med konsolidacijo spreminjajo vrednosti presežnih porežnih tlakov (od največjih vrednosti do ničnih), se med konsolidacijo spreminjajo dodatne efektivne napetosti.

Ob upoštevanju načela efektivnih in totalnih napetosti:

$$\boxed{\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} + \delta_{ij}u \quad , \quad \sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij}u} \quad (9a)$$

oziroma:

$$\boxed{\Delta\sigma_{ij} = \Delta\sigma'_{ij} + \delta_{ij}\Delta u \quad , \quad \Delta\sigma'_{ij} = \Delta\sigma_{ij} - \delta_{ij}\Delta u} \quad (9b)$$

lahko v vsakem času, če poznamo vrednosti presežnih porežnih tlakov, izračunamo tudi dosežene dodatne efektivne napetosti v zemljini (temeljnih tleh).

V obravnavanemu primeru velja na začetku konsolidacije:

$$q \Rightarrow \Delta\sigma_{zz}$$

$$t = 0 \Rightarrow \Delta u = \Delta\sigma_{zz} \quad , \quad \Delta\sigma'_{zz} = 0$$

na koncu konsolidacije:

$$q \Rightarrow \Delta\sigma_{zz}$$

$$t = t_{\infty} \Rightarrow \Delta u = 0 \quad , \quad \Delta\sigma'_{zz} = \Delta\sigma_{zz}$$

in v poljubnem času med procesom konsolidacije:

$$q \Rightarrow \Delta\sigma_{zz}$$

$$t \Rightarrow \Delta u \quad , \quad \Delta\sigma'_{zz} = \Delta\sigma_{zz} - \Delta u$$

(v)

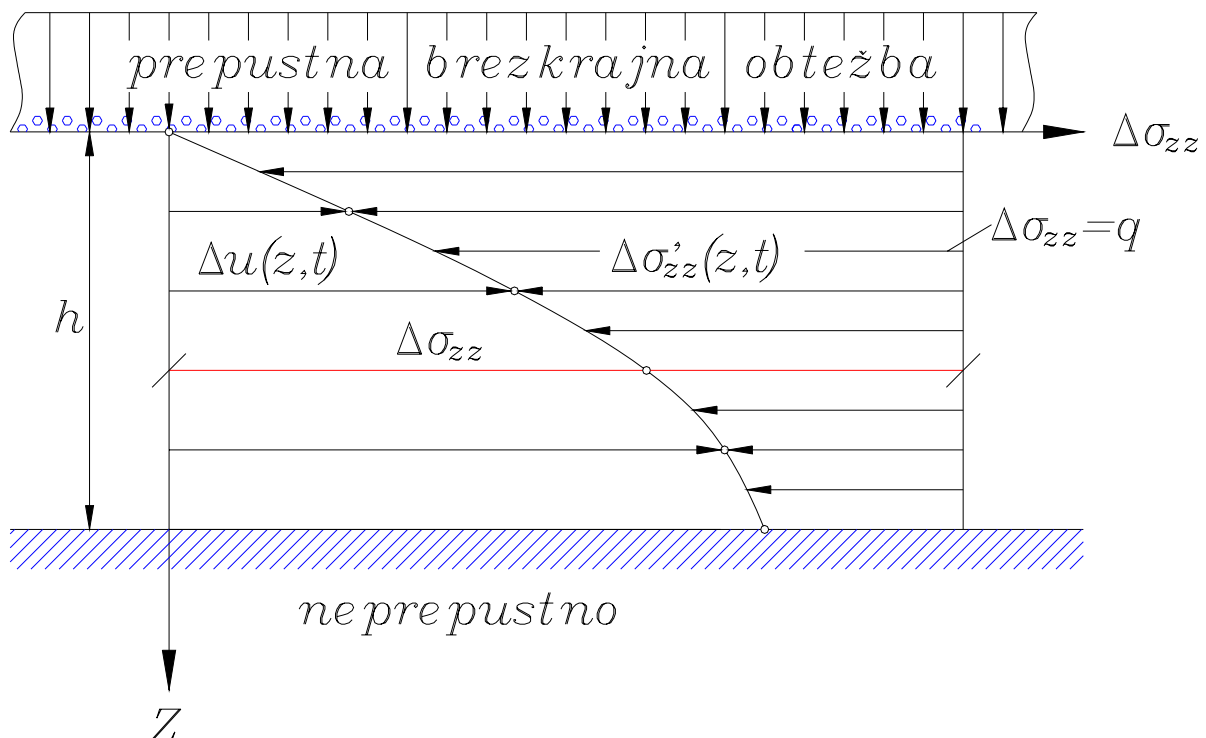
V poljubnem času konsolidacije moramo vrednosti presežnih pornih tlakov izračunati. Najbolje je, da presežne porne tlake računamo v enakomerno porazdeljenih točkah vzdolž globine (debeline) sloja. N. pr.: $z/h = 0, 0.1, 0.2, \dots, 1$.

Če narišemo ob nekem času diagram presežnih pornih tlakov vzdolž globine sloja, pravimo takšnemu diagramu **izohrona**. Oblika diagramov presežnih pornih tlakov (izohron) se s časom spreminja. Diagram presežnih pornih tlakov ob začetku konsolidacije:

$$u(z, t = 0) = u_0(z)$$

predstavlja **nično izohrono**. Za normalno konsolidirane zasičene zemljine, ki jih obremenimo hipno, velja, da ima nična izohrona enako obliko, kot diagram dodatnih totalnih vertikalnih napetosti, ki jih v zemljini povzroči obtežba na površju tal.

$$u(z, t = 0) = u_0(z) = \Delta\sigma_{zz}(z)$$



Slika 1: Diagram dodatnih totalnih in efektivnih vertikalnih napetosti ter diagram presežnih pornih tlakov (izohrona) v določenem času

Po določenemu času, ko so v vsaki točki (globini) sloja zemljine presežni porni tlaki že manjši od dodatnih totalnih vertikalnih napetosti, lahko aproksimiramo izohrono s kvadratno funkcijo (parabolo). Takšno aproksimacijo uporabimo takrat, kadar presežne porne tlake merimo v naravi in primerjamo terenske izmerke z računskimi rezultati.

(vi)

Del posedka sloja debeline h po končani konsolidaciji – **konsolidacijski posedek**, ki bo nastal v sloju zemljine (temeljnih tal) zaradi obremenitve sloja z obtežbo q , lahko izračunamo s pomočjo uporabe rezultatov edometriškega preizkusa. Skrček sloja, ki nastane zaradi izcejene porne vode iz zemljine (zmanjševanje prostornine praznin), izračunamo tako, da ploščino diagrama dodatnih totalnih vertikalnih napetosti delimo s povprečno vrednostjo modula stisljivosti, ki ustreza spremembi vertikalnih napetosti v sloju zemljine (temeljnih tal).

Pred obremenitvijo sloja zemljine (temeljnih tal) z obtežbo q , vlada v temeljnih tleh napetostno stanje:

$$\sigma_{zz\alpha} \quad , \quad \sigma'_{zz\alpha} = \sigma_{zz\alpha} - u_{\alpha}$$

Obremenitev temeljnih tal povzroči dodatne totalne vertikalne napetosti in novo totalno napetostno stanje:

$$q \Rightarrow \Delta\sigma_{zz}$$

$$\sigma_{zz\beta} = \sigma_{zz\alpha} + \Delta\sigma_{zz}$$

Ko bo proces konsolidacije končan, bodo presežni porni tlaki Δu , ki nastanejo v zemljini zaradi obtežbe q , upadli na nične vrednosti. Po končani konsolidaciji bodo dodatne efektivne vertikalne napetosti zaradi obtežbe q enake dodatnim totalnim vertikalnim napetostim.

$$t_{\infty} \Rightarrow \Delta u = 0 \quad , \quad \Delta\sigma'_{zz} = \Delta\sigma_{zz}$$

$$\sigma'_{zz\beta} = \sigma'_{zz\alpha} + \Delta\sigma'_{zz}$$

Modul stisljivosti izračunamo po enačbi:

$$E_{oed} = -\frac{\Delta\sigma'_{zz}}{\Delta e} (1 + e_{\alpha}) \quad (10)$$

$$\Delta e = e_{\beta} - e_{\alpha} \quad , \quad \sigma'_{zz\beta} \Rightarrow e_{\beta} \quad , \quad \sigma'_{zz\alpha} \Rightarrow e_{\alpha}$$

Velikost končnega konsolidacijskega posedka izračunamo po enačbi:

$$\rho_{\infty} = \frac{A_{\infty}}{E_{oed}} = \frac{\int_{z=0}^h \Delta\sigma_{zz}(z) dz}{E_{oed}} \quad (11)$$

Ko bo proces konsolidacije končan, ko bodo presežni porni tlaki (Δu), ki nastanejo v zemljini (temeljnih tleh) zaradi obremenitve tal z obtežbo q , upadli na nično vrednost, bodo dodatne efektivne vertikalne napetosti enake dodatnim totalnim vertikalnim napetostim. Po končani konsolidaciji bo tudi ploščina diagrama efektivnih dodatnih vertikalnih napetosti enaka ploščini diagrama totalnih dodatnih vertikalnih napetosti.

Velikost konsolidacijskega posedka, ki nastane v določenem času med konsolidacijo, lahko izračunamo, če ploščino diagrama efektivnih dodatnih vertikalnih napetosti delimo z modulom stisljivosti:

$$\rho_t = \frac{A_t}{E_{oed}} = \frac{\int_{z=0}^h \Delta\sigma'_{zz}(z) dz}{E_{oed}} \quad (12)$$

Ker so dodatne efektivne vertikalne napetosti enake razliki dodatnih totalnih vertikalnih napetosti in presežnih pornih tlakov, lahko ploščino diagrama efektivnih dodatnih vertikalnih napetosti izračunamo kot razliko ploščine diagrama dodatnih totalnih vertikalnih napetosti in ploščine diagrama presežnih pornih tlakov:

$$A_t = A_{\infty} - A_u = \int_{z=0}^h \Delta\sigma_{zz}(z) dz - \int_{z=0}^h \Delta u(z, t) dz \quad (13)$$

Razmerje med velikostjo konsolidacijskega posedka v določenem času t med konsolidacijo zemljine (ρ_t) in posedkom po končani konsolidaciji (ρ_∞) definira doseženo **stopnjo konsolidacije** U_v .

$$\boxed{U_v = \frac{\rho_t}{\rho_\infty}} \quad (14)$$

(vii)

Iz enačb (11) do (14) vidimo, da lahko doseženo stopnjo konsolidacije izračunamo tudi kot količnik med ploščino diagrama dodatnih efektivnih vertikalnih napetosti in ploščino diagrama totalnih dodatnih vertikalnih napetosti:

$$\boxed{U_v = \frac{A_t}{A_\infty} = \frac{A_\infty - A_u}{A_\infty} = 1 - \frac{A_u}{A_\infty}} \quad (15)$$

oziroma:

$$U_v = 1 - \frac{\int_{z=0}^h \Delta u(z, t) dz}{\int_{z=0}^h \Delta \sigma_{zz}(z) dz}$$

Za obravnavani primer velja (glej še enačbo 7):

$$A_u = \int_{z=0}^h \frac{4 \Delta \sigma_{zz}}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{2m-1} \sin \frac{(2m-1)\pi z}{2h} \exp \left[-\frac{(2m-1)^2 \pi^2}{4} T_v \right] dz$$

$$\int_{z=0}^h \sin \frac{(2m-1)\pi z}{2h} dz = \left[-\frac{2h}{(2m-1)\pi} \cos \frac{(2m-1)\pi z}{2h} \right] \Big|_{z=0}^h = \frac{2h}{(2m-1)\pi}$$

$$A_u = \frac{8 \Delta \sigma_{zz} h}{\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{(2m-1)^2} \exp\left[-\frac{(2m-1)^2 \pi^2}{4} T_v\right]$$

in

$$A_{\infty} = \int_{z=0}^h \Delta \sigma_{zz}(z) dz = \Delta \sigma_{zz} h$$

V poljubnem času je dosežena stopnja konsolidacije:

$$U_v = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{(2m-1)^2} \exp\left[-\frac{(2m-1)^2 \pi^2}{4} T_v\right] \quad (16)$$

Iz gornje enačbe je razvidno, da je dosežena stopnja konsolidacije v zemljini (temeljnih tleh) odvisna od časovnega faktorja konsolidacije. Če za različne čase t izračunamo ustrezne vrednosti časovnih faktorjev konsolidacije T_v , lahko po enačbi (16) izračunamo doseženo stopnjo konsolidacije U_v . Vrsta v enačbi (16) hitro konvergira.

Odnos med doseženo stopnjo konsolidacije in časovnim faktorjem konsolidacije lahko podamo v grafični obliki (diagramu) $U_v = U_v(T_v)$.

Če poznamo stopnjo dosežene konsolidacije v določenem času, lahko vrednost konsolidacijskega posejka v tem času izračunamo po enačbi:

$$\rho_t = \rho_{\infty} U_v \quad (17)$$

(viii)

V procesu konsolidacije se mehanske lastnosti zemljin na račun zmanjševanja praznin med zrnjem spreminjajo. Načeloma se na račun konsolidacije spreminja tako deformabilnost (modul stisljivosti), prepustnost (koeficient prepustnosti) in trdnost zemljin. Spremembe mehanskih lastnosti zemljin v procesu konsolidacije je možno upoštevati le v zahtevnih in natančnih numeričnih analizah (n.pr. po metodi končnih elementov).

V vsakdanji praksi računamo tako, da privzamemo v analizi konsolidacije za sloj zemljine konstantne deformacijske in prepustnostne parametre.

Tako kot smo izračunali povprečno vrednost modula stisljivosti za neko povprečno končno spremembo efektivnega vertikalnega napetostnega stanja v sloju zemljine (n.pr.: v sredini sloja):

$$\Delta\sigma'_{zz} = \sigma'_{zz\beta} - \sigma'_{zz\alpha}$$

$$E_{oed} = -\frac{\Delta\sigma'_{zz}}{\Delta e} (1 + e_\alpha) \cong \left[-\frac{d\sigma'_{zz}}{de} (1 + e) \right]_{\sigma'_{zz} = \frac{\sigma'_{zz\beta} - \sigma'_{zz\alpha}}{2}}$$

tako v analizi konsolidacije upoštevamo tudi povprečno vrednost koeficienta prepustnosti:

$$k = \frac{k_\beta + k_\alpha}{2}, \quad \sigma'_{zz\beta} \Rightarrow k_\beta, \quad \sigma'_{zz\alpha} \Rightarrow k_\alpha$$

ali (bolje):

$$k = k \left(\sigma'_{zz} = \frac{\sigma'_{zz\beta} + \sigma'_{zz\alpha}}{2} \right)$$

(ix)

Če želimo izračunati časovni razvoj konsolidacijskih posedkov v sloju zemljine (temeljnih tleh), ki jih povzroči določena obtežba na površju sloja (temeljnih tal), postopamo na naslednji način:

- izračunamo prvotne, dodatne in nove vertikalne napetosti v sloju,
- izračunamo vrednost modula stisljivosti (iz rezultatov ustrezne preiskave),
- izračunamo vrednost koeficienta prepustnosti (iz rezultatov ustrezne preiskave),
- izračunamo končni konsolidacijski posedek,
- izračunamo čas, ko bo konsolidacija končana in
- za različne čase t izračunamo časovni faktor konsolidacije T_v in iz diagrama $U_v = U_v(T_v)$ določimo stopnjo konsolidacije U_v .
- Velikost konsolidacijskega posedka v času t izračunamo kot produkt med končnim posedkom in doseženo stopnjo konsolidacije.

(x)

Stopnjo dosežene konsolidacije v izbranem času med procesom konsolidacije (enačba 16), smo izračunali iz vrednosti presežnih pornih tlakov (enačba 7), ki smo jih dobili tako, da smo rešili difuzijsko parcialno diferencialno enačbo za vertikalno konsolidacijo (enačba 1) ob upoštevanju ustreznih začetnih in robnih pogojev.

Za drugačne robne pogoje konsolidacije - oba robova sloja debeline h sta prepustna ($z = 0, u = 0$ in $z = h, u = 0$), bi dobili drugačno rešitev difuzijske enačbe. V takšnem primeru poteka konsolidacija 4 krat hitreje. Za takšen primer (sloj zemljine je obojestransko omejen s prepustnim robom) lahko uporabimo rešitev, ki velja za sloj zemljine omejen z 1 prepustnim in 1 neprepustnim robom, če v enačbah, kjer nastopa količina h , upoštevamo polovično debelino sloja.

Drugačno rešitev difuzijske enačbe bi dobili tudi, če bi upoštevali v analizi konsolidacije drugačen začetni pogoj konsolidacije (obliko diagrama nične izohrone). Za sloj zasičene normalno konsolidirane zemljine, ki ga hipno obremenimo, velja, da je diagram nične izohrone enak diagramu totalnih dodatnih vertikalnih napetosti.

V naravi dobimo v splošnem tri oblike diagramov totalnih dodatnih vertikalnih napetosti:

- Dodatne totalne vertikalne napetosti se z globino ne spreminjajo, so enakomerno razporejene. Takšen diagram dodatnih totalnih vertikalnih napetosti dobimo, če je sloj zemljine obremenjen z brezkraino obtežbo;
 $\Delta\sigma_{zz} = q$.
- Dodatne totalne vertikalne napetosti se z globino linearno povečujejo od nične vrednosti do največje vrednosti. Takšen diagram dodatnih totalnih vertikalnih napetosti dobimo, če se v sloju zemljine zniža vodoravni nivo talne vode za določeno globino; n.pr.: od z_{w1} na z_{w2} za Δz_w . V tem primeru je v globini z_{w1} dodatna totalna vertikalna napetost nična ($\Delta\sigma_{zz} = 0$), v globini z_{w2} pa je enaka ($\Delta\sigma_{zz} = \gamma_w \Delta z_w$).
- Dodatne totalne vertikalne napetosti se z globino zmanjšujejo, od največjih vrednosti na površju sloja (običajno $\Delta\sigma_{zz} = q$), do ničnih vrednosti v neskončni globini. Takšen diagram dodatnih totalnih vertikalnih napetosti

dobimo za vse obtežbe, ki obremenjujejo sloj zemljine (temeljna tla) in imajo vsaj eno končno veliko tlorisno dimenzijo. Kako hitro upadajo velikosti dodatnih totalnih vertikalnih napetosti je odvisno od manjše tlorisne dimenzije obtežbe (b) in/ali od razmerja manjše tlorisne dimenzije obtežbe in debeline sloja (b/z).

Pogoj, da lahko analitično rešimo difuzijsko enačbo za vertikalno konsolidacijo pri različnih začetnih pogojih je, da je oblika diagrama totalnih dodatnih vertikalnih napetosti ($\Delta\sigma_{zz}(z)$) oziroma oblika diagrama nične izohrone ($\Delta u_0(z)$) takšna, da lahko spremembe totalnih dodatnih vertikalnih napetosti ali presežnih pornih tlakov po vsej debelini sloja popišemo s takšno funkcijo, ki je integrabilna.

Za različno obliko nične izohrone moramo izračunati konstanto D_m v enačbi, ki opisuje nično izohrono:

$$u_0 = \sum_{m=1}^{\infty} D_m \sin \frac{(2m-1)\pi z}{2h} = \Delta\sigma_{zz}(z)$$

$$D_m = \frac{2}{h} \int_{z=0}^h \Delta\sigma_{zz}(z) \sin \frac{(2m-1)\pi z}{2h} dz$$

vrednosti presežnih pornih tlakov v določeni globini sloja v izbranem času v procesu konsolidacije po enačbi:

$$u(z,t) = \sum_{m=1}^{\infty} D_m \sin \frac{(2m-1)\pi z}{2h} \exp \left\{ -\frac{(2m-1)^2 \pi^2}{4} T_v \right\}$$

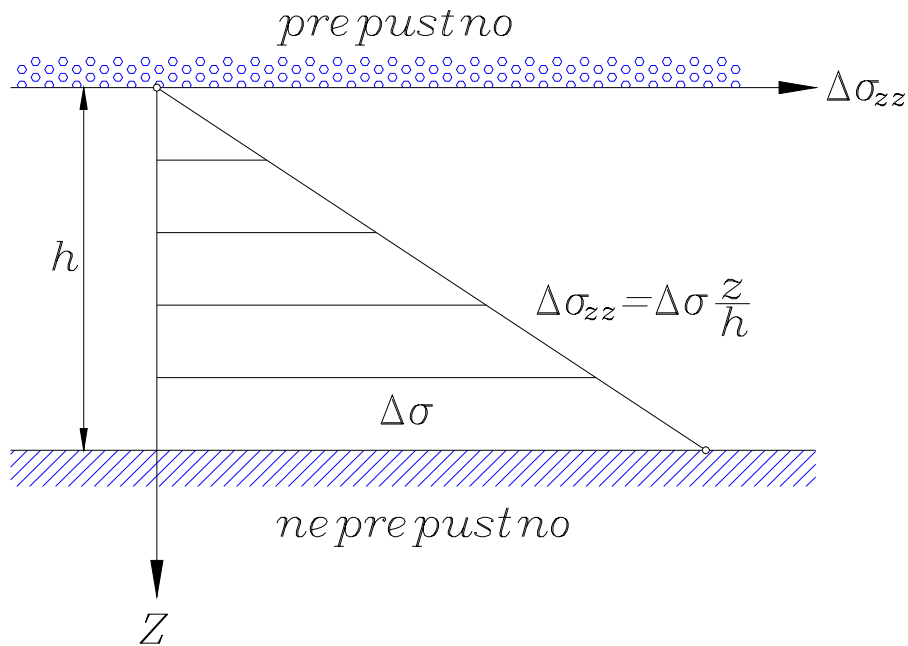
in doseženo stopnjo konsolidacije U_v po enačbi:

$$U_v = 1 - \frac{\int_{z=0}^h \Delta u(z,t) dz}{\int_{z=0}^h \Delta\sigma_{zz}(z) dz}$$

(xi)

Analiza vertikalne konsolidacije pri različnih oblikah nične izohrone (začetni pogoj) in različnih robnih pogojih:

a)



Slika 2: Dodatne vertikalne napetosti linearno naraščajo z globino

$$\Delta\sigma_{zz}(z) = \Delta\sigma \frac{z}{h}$$

$$D_m = \frac{2}{h} \int_{z=0}^h \Delta\sigma \frac{z}{h} \sin \frac{(2m-1)\pi z}{2h} dz = \frac{8\Delta\sigma}{\pi^2(2m-1)^2}$$

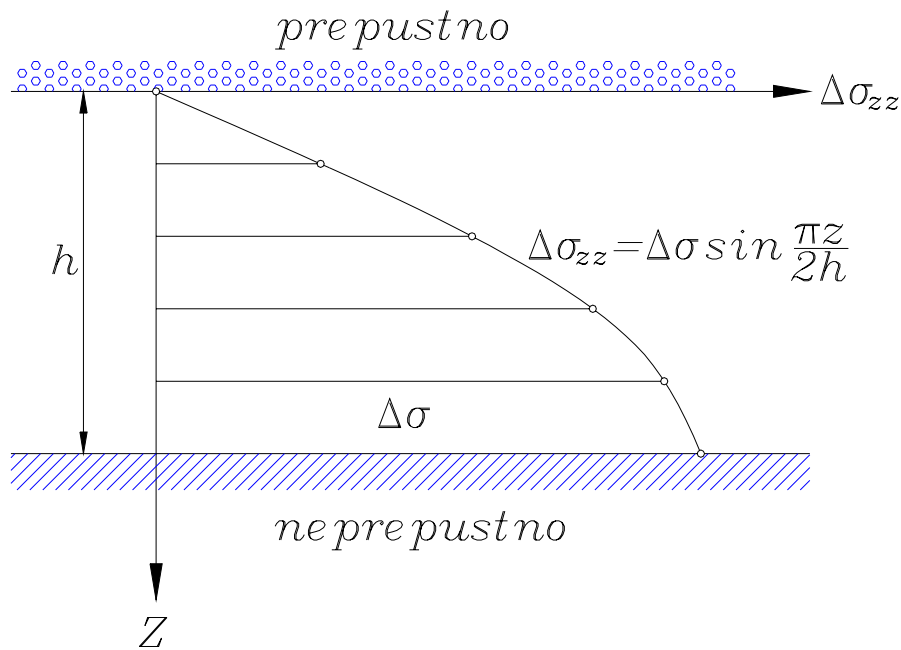
$$u(z,t) = \frac{8\Delta\sigma}{\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{(2m-1)^2} \sin \frac{(2m-1)\pi z}{2h} \exp \left\{ -\frac{(2m-1)^2 \pi^2}{4} T_v \right\}$$

$$A_{\infty} = \frac{\Delta\sigma h}{2}$$

$$A_u = \frac{16\Delta\sigma h}{\pi^3} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{(2m-1)^3} \exp \left[-\frac{(2m-1)^2 \pi^2}{4} T_v \right]$$

$$U_v = 1 - \frac{32}{\pi^3} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{(2m-1)^3} \exp \left[-\frac{(2m-1)^2 \pi^2}{4} T_v \right]$$

b)



Slika 3: Dodatne totalne vertikalne napetosti naraščajo z globino po sinusni funkciji

$$\Delta\sigma_{zz}(z) = \Delta\sigma \sin \frac{\pi z}{2h}$$

$$D_m = \frac{2}{h} \int_{z=0}^h \Delta\sigma \sin \frac{\pi z}{2h} \sin \frac{(2m-1)\pi z}{2h} dz \Rightarrow$$

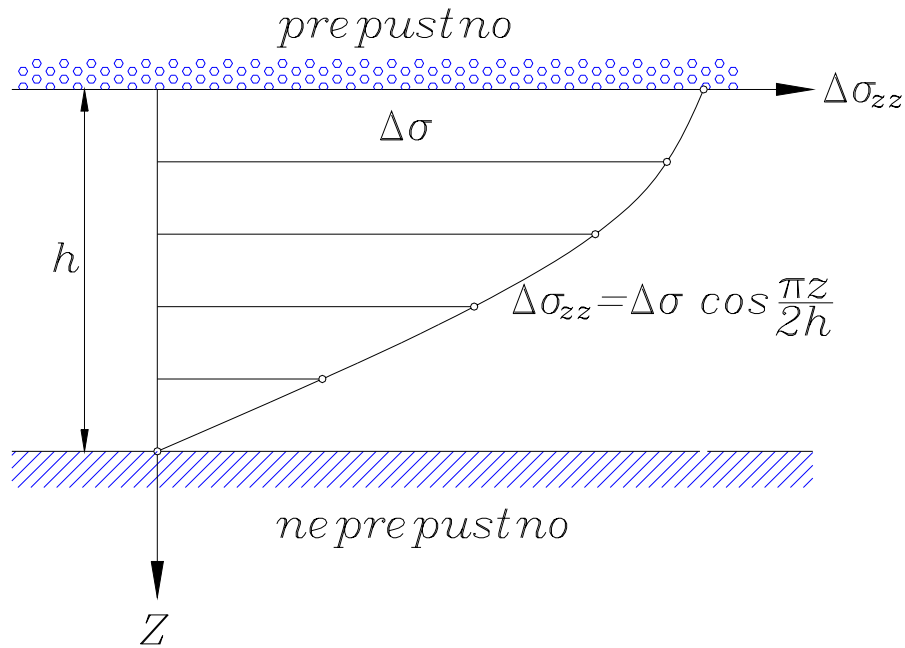
$$D_1 = \Delta\sigma \sin \frac{\pi z}{2h}, \quad D_i = 0, \quad i \neq 1$$

$$u(z, t) = \Delta\sigma \sin \frac{\pi z}{2h} \exp\left(-\frac{\pi^2}{4} T_v\right)$$

$$A_\infty = \frac{2 \Delta\sigma h}{\pi}, \quad A_u = \frac{2 \Delta\sigma h}{\pi} \exp\left(-\frac{\pi^2}{4} T_v\right)$$

$$U_v = 1 - \exp\left(-\frac{\pi^2}{4} T_v\right)$$

c)



Slika 4: Dodatne totalne vertikalne napetosti upadajo z globino po kosinusni funkciji

$$\Delta\sigma_{zz}(z) = \Delta\sigma \cos \frac{\pi z}{2h}$$

$$D_m = \frac{2}{h} \int_{z=0}^h \Delta\sigma \cos \frac{\pi z}{2h} \sin \frac{(2m-1)\pi z}{2h} dz =$$

$$= \frac{\Delta\sigma}{\pi} \left\{ \frac{1}{m} - \frac{\cos(m\pi)}{m} + \frac{1}{m-1} - \frac{\cos[(m-1)\pi]}{m-1} \right\}$$

$$u(z,t) = \frac{\Delta\sigma}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \frac{(2m-1) - (m-1)\cos(m\pi) - m\cos[(m-1)\pi]}{m(m-1)} \right\} *$$

$$* \sin \frac{(2m-1)\pi z}{2h} \exp \left\{ -\frac{(2m-1)^2 \pi^2}{4} T_v \right\}$$

$$A_{\infty} = \frac{2 \Delta \sigma h}{\pi}$$

$$A_u = \frac{2 \Delta \sigma h}{\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \frac{(2m-1) - (m-1) \cos(m\pi) - m \cos[(m-1)\pi]}{m(m-1)(2m-1)} \right\} * \\ * \exp \left\{ -\frac{(2m-1)^2 \pi^2}{4} T_v \right\}$$

$$U_v = 1 - \frac{1}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \frac{(2m-1) - (m-1) \cos(m\pi) - m \cos[(m-1)\pi]}{m(m-1)(2m-1)} \right\} * \\ * \exp \left\{ -\frac{(2m-1)^2 \pi^2}{4} T_v \right\}$$

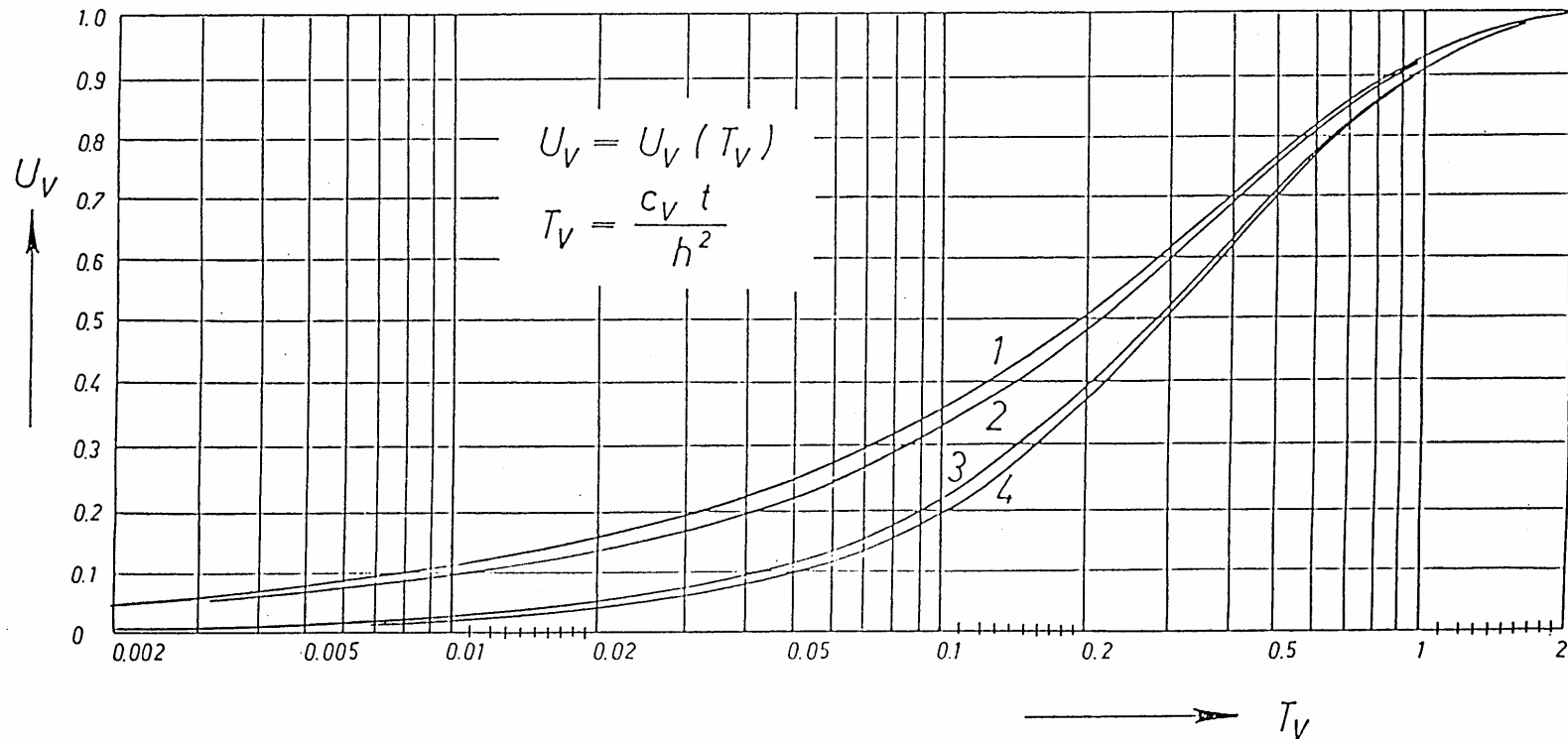
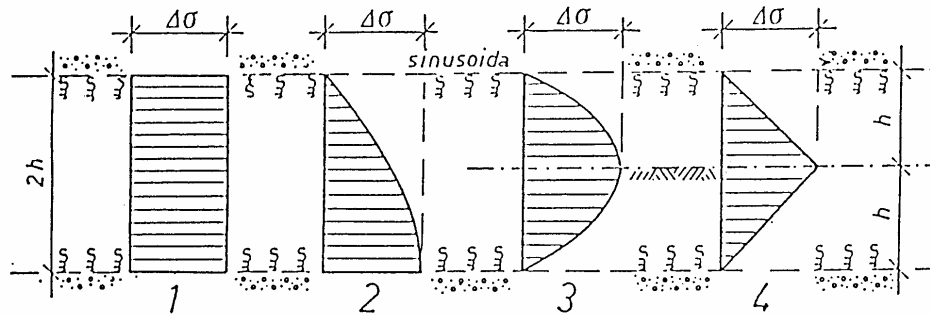
(xii)

V praksi pogosto računamo časovni razvoj konsolidacije v temeljnih tleh tako, da uporabimo analitične rešitve podane v obliki diagramov $U_v = U_v(T_v)$. Takšen način omogoča izračun dosežene stopnje konsolidacije in velikost konsolidacijskega posedka med procesom konsolidacije, ne omogočajo pa tudi izračuna presežnih pornih tlakov oziroma efektivnih dodatnih vertikalnih napetosti.

Analitične rešitve so omejene (oblika nične izohrone), predvsem pa veljajo za konsolidacijo enega homogenega sloja.

Natančnejša analiza konsolidacije homogenih temeljnih tal (1 sloj zemljine), še posebej v več slojnih temeljnih tleh je možna le, če difuzijsko enačbo konsolidacije rešujemo numerično (n. pr.: po diferenčni metodi ali po metodi končnih elementov).

Sovisnice med doseženo stopnjo konsolidacije U_v in časovnim faktorjem konsolidacije T_v so za različne oblike ničnih izohron oziroma različne oblike diagramov dodatnih totalnih vertikalnih napetosti v sloju, ki ga hipno obremenimo na površju (začetni pogoji) in robne pogoje (sloj zemljine je omejen z obojestranskim prepustnim robom, sloj je na vrhu – površje – omejen s prepustnim robom, na dnu pa z neprepustnim robom) podane v diagramih na naslednji sliki in v preglednici I in II.



Slika 5: Diagrami $U_v = U_v(T_v)$ dobjeni iz analitičnih rešitev difuzijske enačbe vertikalne konsolidacije v homogenem sloju zemljine za različne začetne in robne pogoje konsolidacije

Preglednica I: Dosežene stopnje konsolidacije pri različnih časovnih faktorjih za 4 tipične oblike ničnih izohron

Dosežena stopnja konsolidacije U_v (%)				
T_v	Primer 1	Primer 2	Primer 3	Primer 4
0,004	7,14	6,49	0,98	0,80
0,008	10,09	8,62	1,95	1,60
0,012	12,36	10,49	2,92	2,40
0,020	15,96	13,67	4,81	4,00
0,028	18,88	16,38	6,67	5,60
0,036	21,40	18,76	8,50	7,20
0,048	24,72	21,96	11,17	9,60
0,060	27,64	24,81	13,76	11,99
0,072	30,28	27,43	16,28	14,36
0,083	32,51	29,67	18,52	16,51
0,100	35,68	32,88	21,87	19,77
0,125	39,89	36,54	26,54	24,42
0,150	43,70	41,12	30,93	28,86
0,175	47,18	44,73	35,07	33,06
0,200	50,41	48,09	38,95	37,04
0,250	56,22	54,17	46,03	44,32
0,300	61,32	59,50	52,30	50,78
0,350	65,82	64,21	57,83	56,49
0,400	69,79	68,36	62,73	61,54
0,500	76,40	76,28	70,88	69,95
0,600	81,56	80,69	77,25	76,52
0,700	85,59	84,91	82,22	81,65
0,800	88,74	88,21	86,11	85,66
0,900	91,20	90,79	89,15	88,80
1,000	93,13	92,80	91,52	91,25
1,500	98,00	97,90	97,53	97,45
2,000	99,42	99,39	99,28	99,26

Preglednica II: Časovnih faktorji konsolidacije pri doseženi stopnji konsolidacije za 4 tipične oblike ničnih izohron

Časovni faktor konsolidacije T_v				
U_v (%)	Primer 1	Primer 2	Primer 3	Primer 4
0	0,000	0,000	0,000	0,000
5	0,002	0,003	0,021	0,025
10	0,008	0,011	0,043	0,050
15	0,018	0,024	0,066	0,075
20	0,031	0,041	0,090	0,101
25	0,049	0,061	0,117	0,128
30	0,071	0,085	0,145	0,157
35	0,096	0,112	0,175	0,187
40	0,126	0,143	0,207	0,220
45	0,159	0,177	0,242	0,255
50	0,197	0,215	0,281	0,294
55	0,239	0,257	0,324	0,336
60	0,286	0,305	0,371	0,384
65	0,342	0,359	0,425	0,438
70	0,403	0,422	0,488	0,501
75	0,477	0,495	0,562	0,575
80	0,567	0,586	0,652	0,665
85	0,684	0,702	0,769	0,782
90	0,848	0,867	0,933	0,946
95	1,129	1,148	1,214	1,227
100	$\cong 2$	$\cong 2$	$\cong 2$	$\cong 2$

(xiii)

Ker je difuzijska enačba konsolidacije »linearno« odvisna od časa, lahko za različne oblike ničnih izohron (diagramov dodatnih vertikalnih napetosti) uporabimo tudi načelo superpozicije.

To pomeni, da lahko izračunamo doseženo stopnjo konsolidacije za obliko nične izohrone (diagrama dodatnih vertikalnih napetosti), ki jo lahko sestavimo iz ničnih izohron takšnih oblik, za katere poznamo analitično rešitev.

V primerih, ko dodatne totalne vertikalne napetosti v sloju zaradi obremenitve na površju sloja z globino upadajo, lahko takšno nično izohrono (diagram dodatnih vertikalnih napetosti) aproksimiramo z:

- trapezno obliko nične izohrone; odštejemo trikotno obliko nične izohrone od pravokotne oblike nične izohrone,
- obliko nične izohrone, ki jo dobimo, če od nične izohrone pravokotne oblike odštejemo nično izohrono sinusne oblike,
- obliko nične izohrone, ki jo dobimo, če k nični izohroni pravokotne oblike prištejemo nično izohrono kosinusne oblike

Stopnjo konsolidacije pri določenemu času, oziroma časovnemu faktorju konsolidacije, za tako sestavljeno obliko nične izohrone izračunamo po enačbi:

$$U_V = \frac{U_{v(i)} A_{\infty(i)} \pm U_{v(j)} A_{\infty(j)}}{A_{\infty(i)} \pm A_{\infty(j)}}$$

V gornji enačbi oznake pomenijo:

U_V stopnjo konsolidacije za dejansko obliko nične izohrone

$U_{v(i)}$ in $U_{v(j)}$ stopnjo konsolidacije pri i -ti in j -ti obliki nične izohrone za katero poznamo analitično rešitev

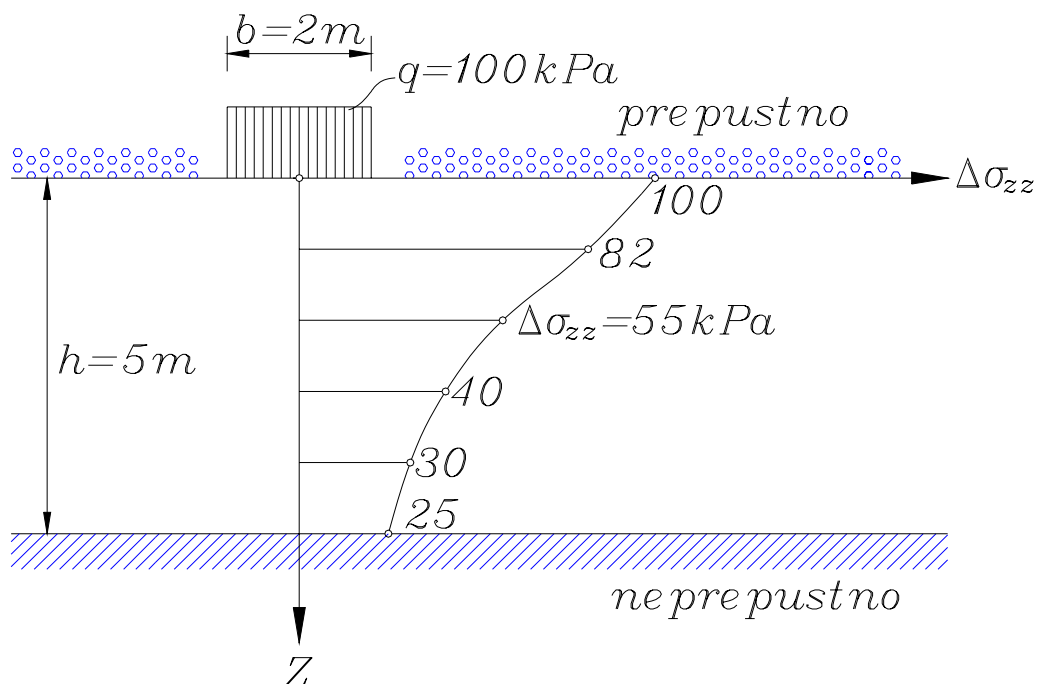
$A_{\infty(i)}$ in $A_{\infty(j)}$ ploščino i -te in j -te oblike nične izohrone za katero poznamo analitično rešitev

Kot ponazoritev prej opisanega postopka pogledjmo, kako bi lahko izračunali doseženo stopnjo konsolidacije v različnih časih za 5 m debel sloj homogene

zemljine, ki je na površju obremenjen s pasovno obtežbo širine 2 m in velikosti 100 kPa.

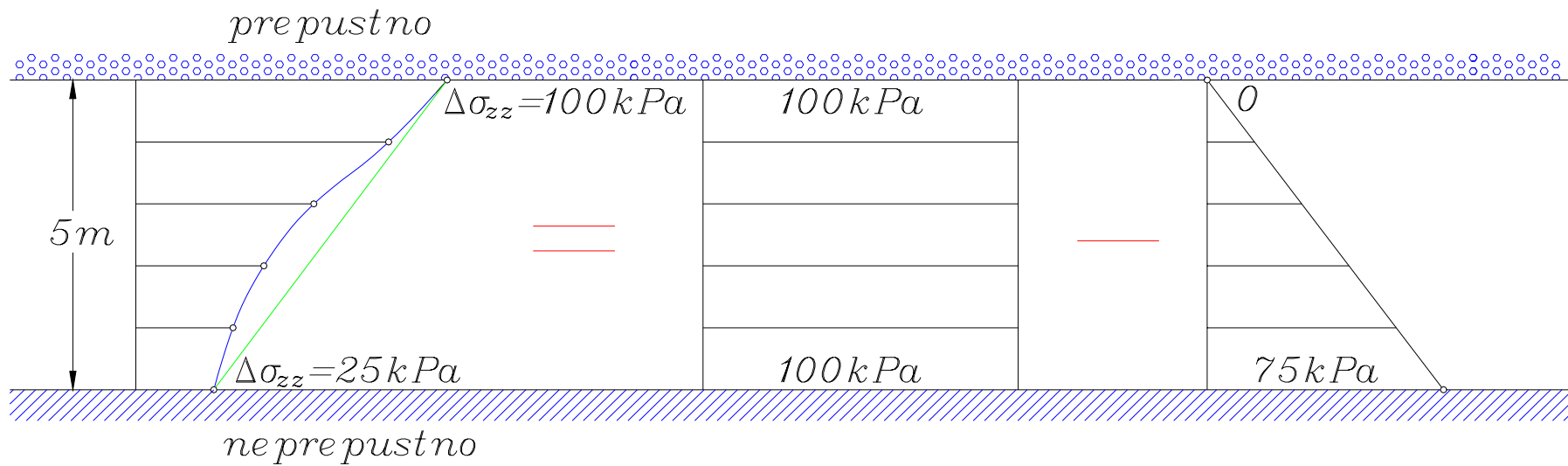
Diagram dodatnih totalnih vertikalnih napetosti je prikazan na sliki 6. Nična izohrona je v tem primeru takšne oblike, da zanjo ne obstoja natančna analitična rešitev.

Pomagamo si s superpozicijo znanih analitičnih rešitev. Kombiniramo lahko nično izhrono pravokotne oblike z nično izhrono trikotne oblike, ali z nično izhrono sinusne oblike, ali z nično izhrono kosinusne oblike.

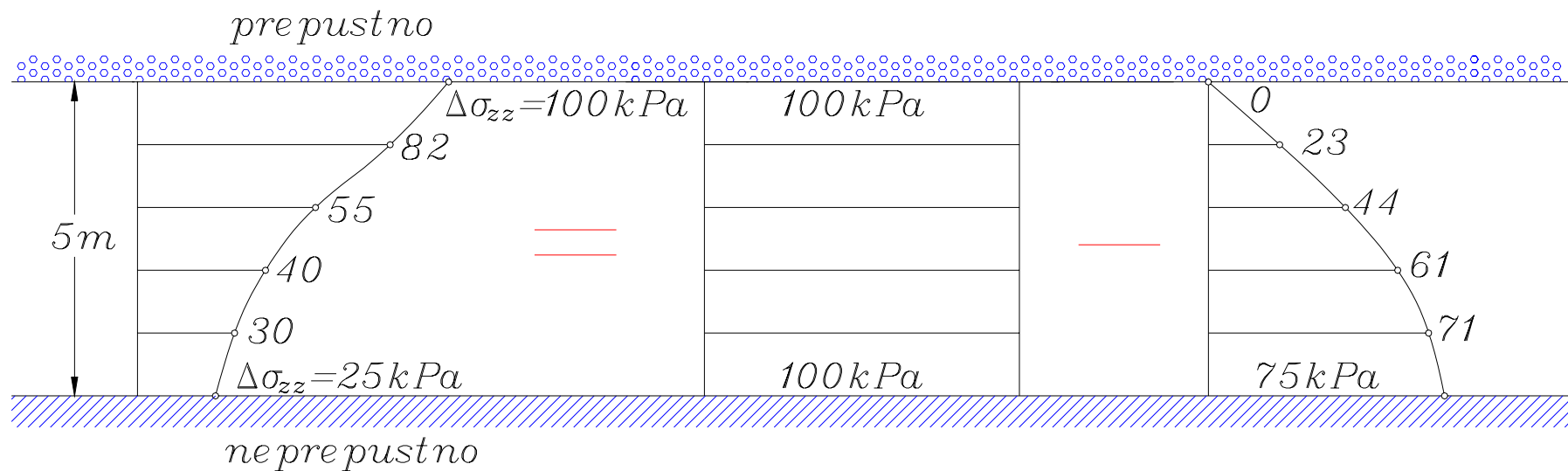


Slika 6: Oblika nične izohrone
(diagrama dodatnih totalnih vertikalnih napetosti)
v 5 m debelom sloju zemljine, ki je na površju obremenjen
s pasovno obtežbo širine 2 m in velikosti 100 kPa

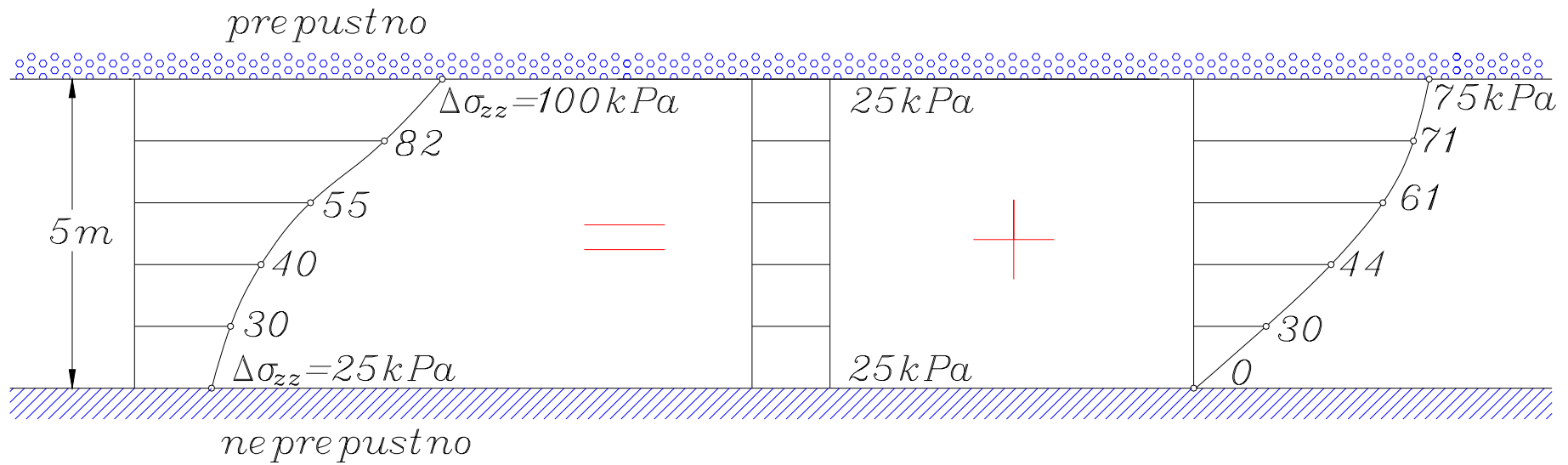
V vseh treh primerih bomo izračunali, da se konsolidacija konča pri istem času, dosežene stopnje konsolidacije (posedki) v različnih časih, pa se bodo pri naštetih primerih med seboj minimalno razlikovale.



Slika 7: Kombinacija nične izohrone pravokotne oblike in nične izohrone trikotne oblike



Slika 8: Kombinacija nične izohrone pravokotne oblike in nične izohrone sinusne oblike



Slika 9: Kombinacija nične izohrone pravokotne oblike in nične izohrone kosinusne oblike

(xiv)

Če nas zanima kdaj bo konsolidacija sloja zemljine (temeljnih tal) končana, je pravzaprav vseeno katero analitično rešitev upoštevamo v preprostih analizah konsolidacije. Vertikalna konsolidacija je končana pri vseh mogočih začetnih pogojih (različnih oblikah nične izohrone oziroma različnih oblikah diagrama totalnih dodatnih vertikalnih napetostih $\Delta\sigma_{zz} = \Delta\sigma_{zz}(z)$) pri vrednosti časovnega faktorja $T_v = 2$.

Iz diagramov $U_v = U_v(T_v)$ je razvidno, da je časovni razvoj konsolidacije pri različnih začetnih pogojih (različnih oblikah diagrama totalnih dodatnih vertikalnih napetostih) zelo podoben. Dosežena stopnja konsolidacije se pri istem času (istem časovnemu faktorju) pri različnih oblikah nične izohrone ne razlikuje za več kot 10%.

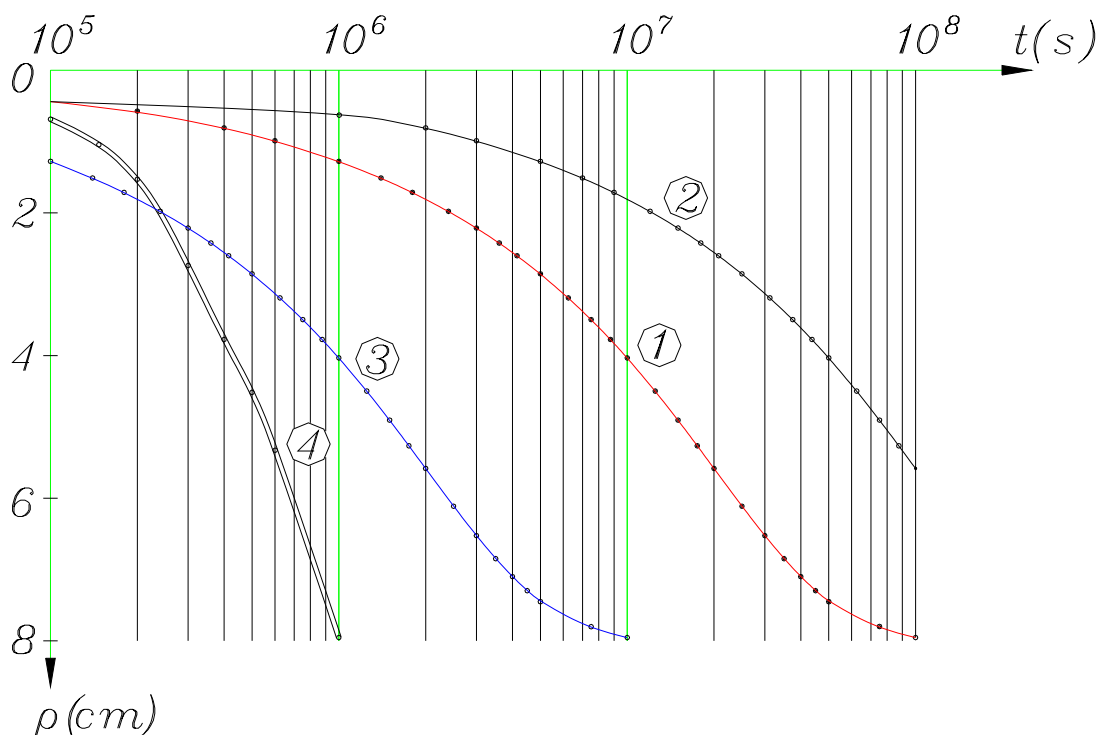
Če časovni razvoj konsolidacije (posedkov) v procesu konsolidacije računamo tako, da upoštevamo rešitev pri nični izohroni $u_0 = konst.$ (ni potrebno v vsakem času upoštevati sestavljene oblike nične izohrone), bo v naravi, pri obtežbah končnih tlorisnih dimenzij, konsolidacija potekala nekoliko hitreje, kot bodo izkazovali naši izračuni.

Časovni razvoj konsolidacije je zelo odvisen od homogenosti zemljinskega sloja. Če se v posameznemu sloju zemljine nahajajo med seboj povezani vložki bistveno bolj prepustne zemljine, bo v naravi konsolidacija na ta račun potekala bistveno hitreje. Vložek bolj prepustne zemljine v sloju manj prepustne zemljine, »razdeli« ta sloj na dva sloja manjših debelin, spremeni pa tudi robne pogoje konsolidacije.

Med vsemi vhodnimi podatki pri računu časovnega razvoja konsolidacije je najmanj zanesljiv podatek o prepustnosti zemljin. Običajno so v laboratoriju izmerjene vrednosti koeficienta prepustnosti (k) manjše (tudi do 10 krat) od dejanske prepustnosti zemljine v naravi. Predvsem pri določanju prepustnosti zemljin je zaželena kombinacija laboratorijskih (edometer ali permeameter) in terenskih raziskav (črpalni ali nalivalni preizkusi oziroma CPT disipacijski preizkusi).

Pri zahtevnejših objektih moramo vedno opazovati časovno posedanje objektov. Iz primerjave izračunanih in izmerjenih časovnih sovisnic $\rho = \rho(t)$ lahko ugotovimo:

1. ali v naravi poteka konsolidacija tako, kot smo to z našimi računi predvideli,
2. ali v naravi poteka konsolidacija počasneje,
3. ali v naravi poteka konsolidacija hitreje in
4. če v naravi poteka konsolidacija (naraščanje posedkov tal) po začetku konsolidacije (med ali kmalu po končani gradnji) bistveno hitreje od naših predvidevanj, je lahko temu vzrok prevelika obremenitev temeljnih tal, ki lahko privede do porušitve tal in gradbenega objekta.



Slika 10: Primerjave terenskih izmerkov posedkov z računsko napovedjo časovnega razvoja posedkov (konsolidacije).
 (1) izračunane vrednosti posedkov, (2) počasnejši potek konsolidacije v naravi, (3) hitrejši potek konsolidacije, (4) nevarnost porušitve temeljnih tal

(xv)

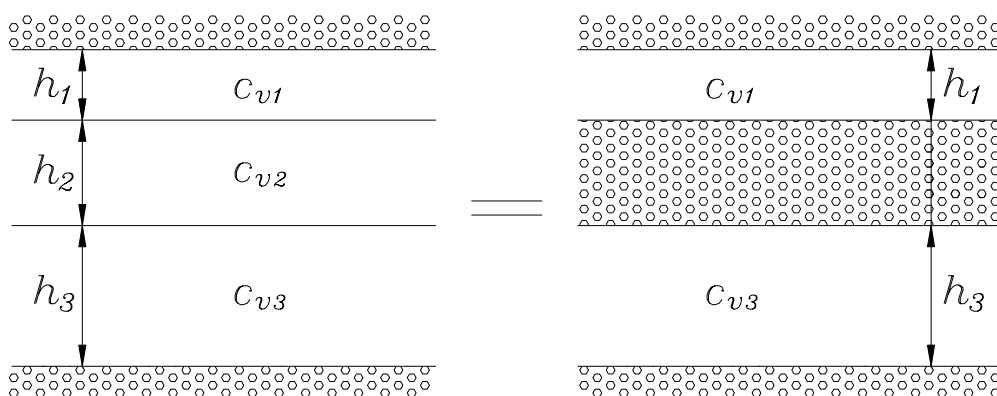
V primeru večslojnih temeljnih tal, lahko za napoved časovnega razvoja konsolidacije z določenimi privzetki uporabimo tudi analitično rešitev, ki velja

za časovni razvoj konsolidacije v homogenem sloju zemljine (homogena temeljna tla).

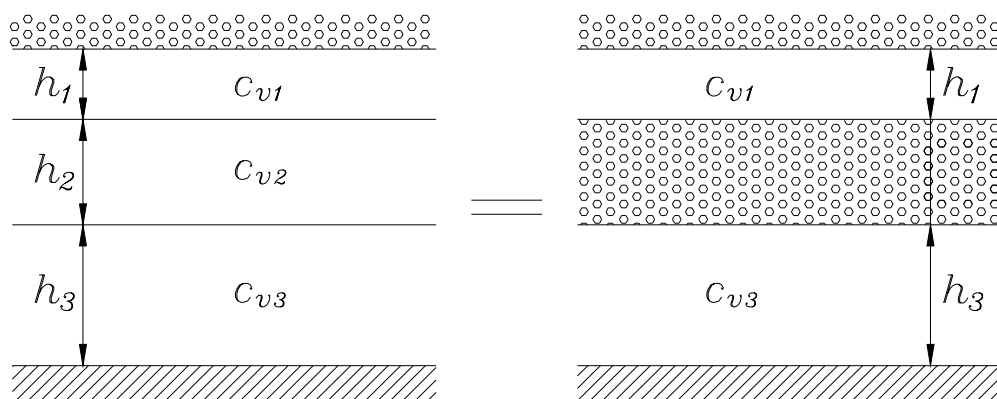
V praksi so možni naslednji primeri:

(a)

Med dvema slojema podobne deformabilnosti in prepustnosti ($c_{v1} \cong c_{v3}$) je sloj, ki ima bistveno večji koeficient konsolidacije ($c_{v2} \gg c_{v1} \cong c_{v3}$). V takšnem primeru računamo časovni razvoj konsolidacije posebej za zgornji sloj (c_{v1}) in posebej za spodnji sloj (c_{v3}), pri tem pa upoštevamo, da je zaradi veliko bolj prepustnega drugega sloja (c_{v2}) spodnji rob prvega sloja in zgornji rob tretjega sloja prepusten. V takšnem primeru bo konsolidacija končana takrat, ko bo skonsolidiran prvi ali tretji sloj. To je odvisno od velikosti koeficienta konsolidacije, debeline in robnih pogojev konsolidacije prvega oziroma tretjega sloja.



Slika 11: Troslojna temeljna tla z vmesnim slojem, ki ima bistveno večji koeficient konsolidacije od vrhnjega (1.) in spodnjega (3.) sloja



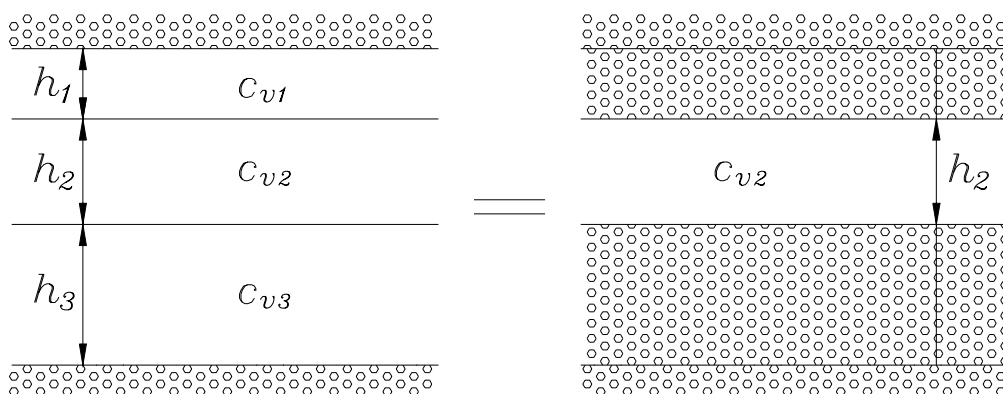
Slika 11a: Troslojna temeljna tla z vmesnim slojem, ki ima bistveno večji koeficient konsolidacije od vrhnjega (1.) in spodnjega (3.) sloja

(b)

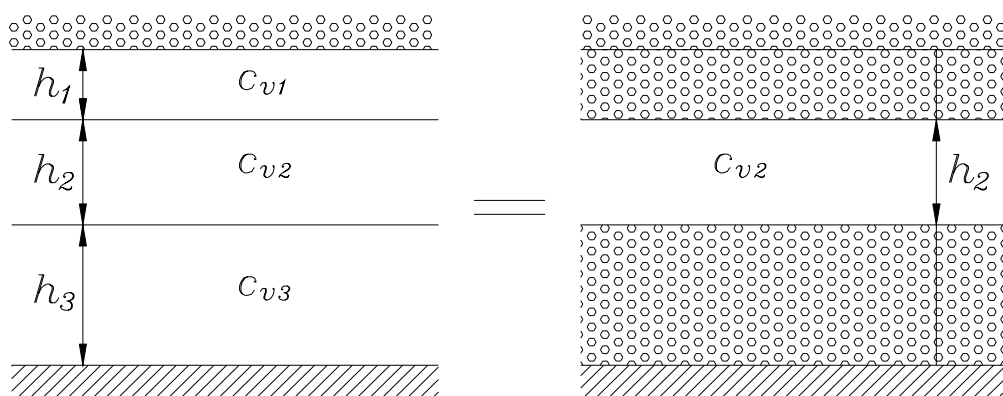
Med dvema slojema podobne deformabilnosti in prepustnosti ($c_{v1} \cong c_{v3}$) je sloj, ki ima bistveno manjši koeficient konsolidacije ($c_{v2} \ll c_{v1} \cong c_{v3}$). V tem primeru sta možna dva slučaja.

(b1)

Če sta koeficienta prepustnosti zgornjega (1.) in spodnjega (3.) sloja tako velika, da se konsolidacija v teh dveh slojih konča zelo hitro, računamo časovni razvoj konsolidacije v vmesnem sloju. Za vmesni sloj upoštevamo, da je obojestransko omejen s prepustnim robom.



Slika 12: Troslojna temeljna tla z vmesnim slojem, ki ima bistveno manjši koeficient konsolidacije od vrhnjega (1.) in spodnjega (3.) sloja. Vrhnji in spodnji sloj imata izredno velika koeficienta konsolidacije.

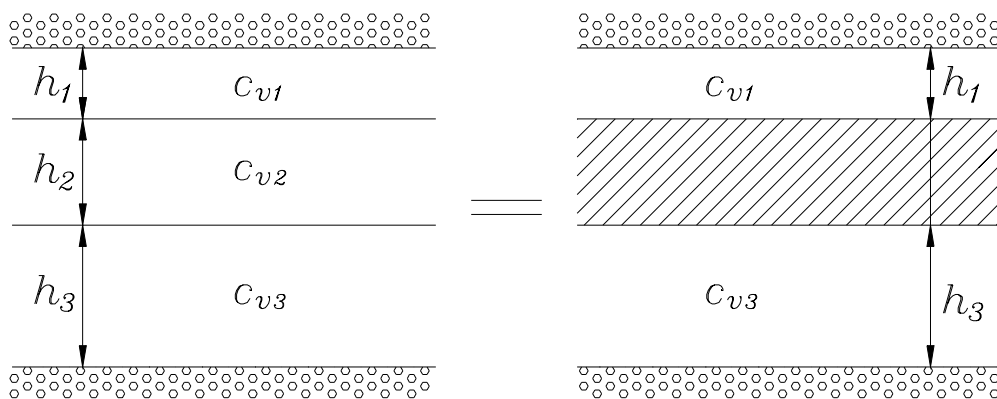


Slika 12a: Troslojna temeljna tla z vmesnim slojem, ki ima bistveno manjši koeficient konsolidacije od vrhnjega (1.) in spodnjega (3.) sloja. Vrhnji in spodnji sloj imata izredno velika koeficienta konsolidacije.

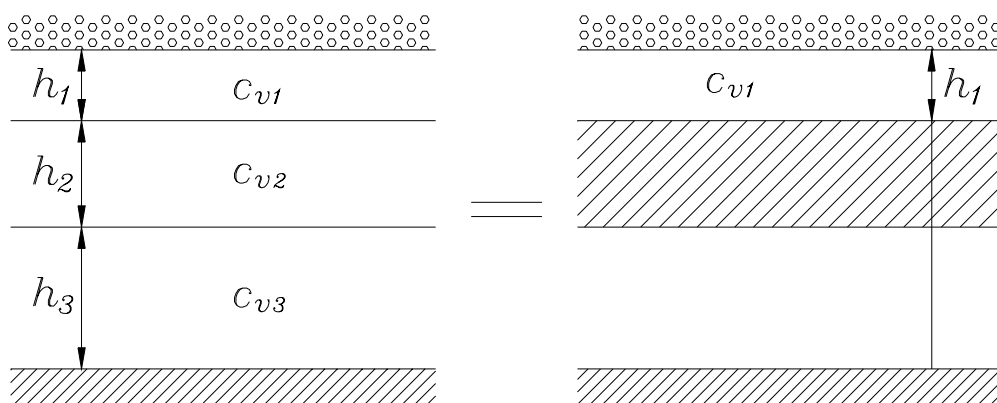
(b2)

Če je koeficient prepustnosti vmesnega (2.) sloja tako majhen, da bi bila konsolidacija v tem sloju končana po zelo dolgem času, računamo časovni razvoj konsolidacije posebej za zgornji sloj (c_{v1}) in posebej za spodnji sloj (c_{v3}), pri tem pa upoštevamo, da je zaradi veliko manj prepustnega drugega sloja (c_{v2}) spodnji rob prvega sloja in zgornji rob tretjega sloja neprepusten. Konsolidacija temeljnih tal bo končana takrat, ko bo skonsolidiran prvi ali tretji sloj.

V primeru, da je tretji sloj omejen z neprepustnim robom tudi na spodnji strani, se v tem sloju konsolidacija ne more izvršiti.



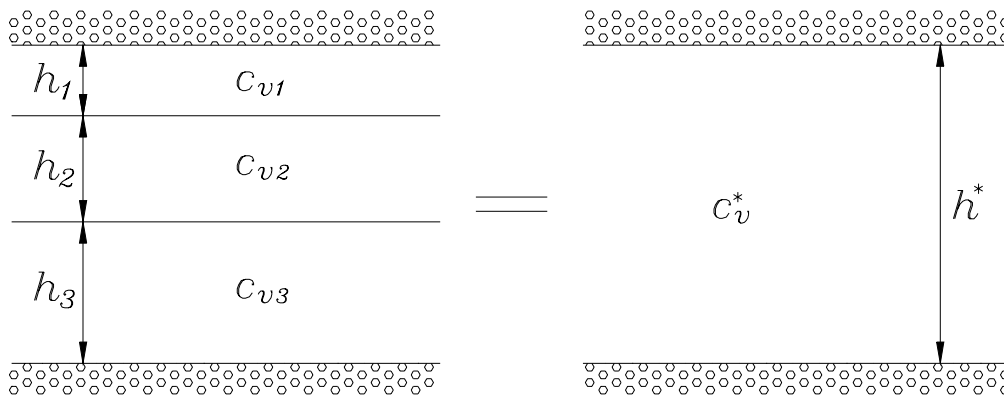
Slika 13: Troslojna temeljna tla z vmesnim slojem, ki ima bistveno manjši koeficient konsolidacije od vrhnjega (1.) in spodnjega (3.) sloja. Vmesni (2.) sloj ima izredno majhen koeficient konsolidacije.



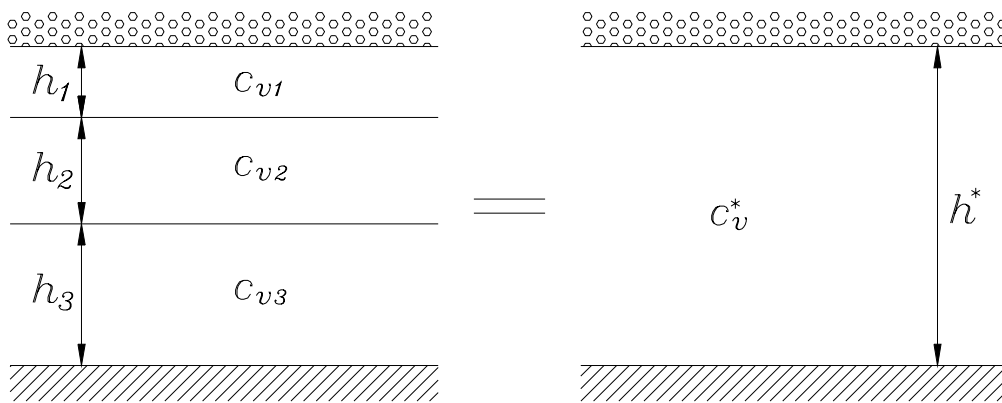
Slika 13a: Troslojna temeljna tla z vmesnim slojem, ki ima bistveno manjši koeficient konsolidacije od vrhnjega (1.) in spodnjega (3.) sloja. Vmesni (2.) sloj ima izredno majhen koeficient konsolidacije.

(c)

Če temeljna tla sestojе iz slojev približno enake deformabilnosti in prepustnosti ($c_{v1} \cong c_{v2} \cong c_{v3}$; $c_{v \max} \cong 100 c_{v \min}$), lahko večslojna temeljna tla nadomestimo z »umetnim homogenim slojem«. V takšnem umetnem homogenem sloju mora biti končni posedek površja temeljnih tal enako velik, kot ga izračunamo v realnih večslojnih temeljnih tleh. Hkrati pa mora potekati tudi konsolidacija v umetnem sloju tako, kot bi potekala v večslojnih tleh.



Slika 14: Troslojna temeljna tla sestojе iz slojev podobne deformabilnosti in prepustnosti



Slika 14a: Troslojna temeljna tla sestojе iz slojev podobne deformabilnosti in prepustnosti

Iz enakosti posedkov večslojnih tal in »umetnega homogenega sloja« izračunamo ekvivalenten modul stisljivosti E_{oed}^* :

$$u_z(z=0) = w(z=0) = \rho = \sum_{i=1}^n \rho_i = \sum_{i=1}^n \frac{A_{\infty i}}{E_{oed i}}$$

$$\rho^* = \rho \Rightarrow E_{oed}^* = \frac{\sum_{i=1}^n A_{\infty i}}{\sum_{i=1}^n \rho_i}$$

Iz pogoja, da mora biti pri istem času dosežena enaka stopnja konsolidacije v večslojnih tleh in v »umetnem homogenem sloju«, izračunamo koeficient konsolidacije umetnega sloja in njegovo debelino:

$$U_v^* = U_v \Rightarrow T_v^* = T_v$$

$$T_v^* = \frac{c_v^* t}{(h^*)^2}, \quad T_v = \frac{c_v t}{(h)^2} \Rightarrow \frac{c_v^*}{(h^*)^2} = \frac{c_v}{h^2}$$

Vrednost koeficienta konsolidacije »umetnega homogenega sloja« (c_v^*) izberemo, debeline posameznih slojev pa izračunamo po enačbi:

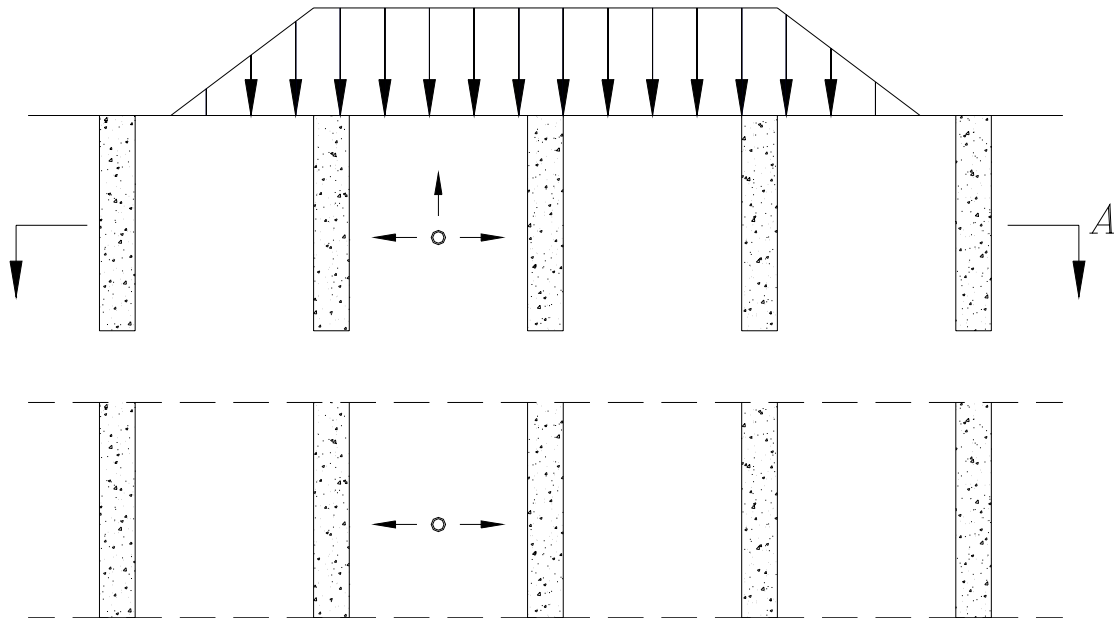
$$h_i' = h_i \sqrt{\frac{c_v^*}{c_{v_i}}} = h_i \sqrt{\frac{k^* E_{oed}^*}{k_i E_{oed_i}}}$$

Debelina »umetnega homogenega sloja« je vsota korigiranih debelin posameznih slojev.

$$h^* = \sum_{i=1}^n h_i'$$

(xvi)

Po končani konsolidaciji se zemljina zgosti, kar se odraža v boljših mehanskih lastnosti zemljine (manjša deformabilnost, večja trdnost). Včasih je ugodno, da konsolidacijo umetno pospešimo. Konsolidacijo lahko pospešimo bodisi z izvedbo drenažnih reber (globina drenažnih reber je omejena), ali pa z izvedbo vertikalnih drenaž (drenov).



Slika 15: Prerez in tloris drenažnih reber pod cestnim nasipom

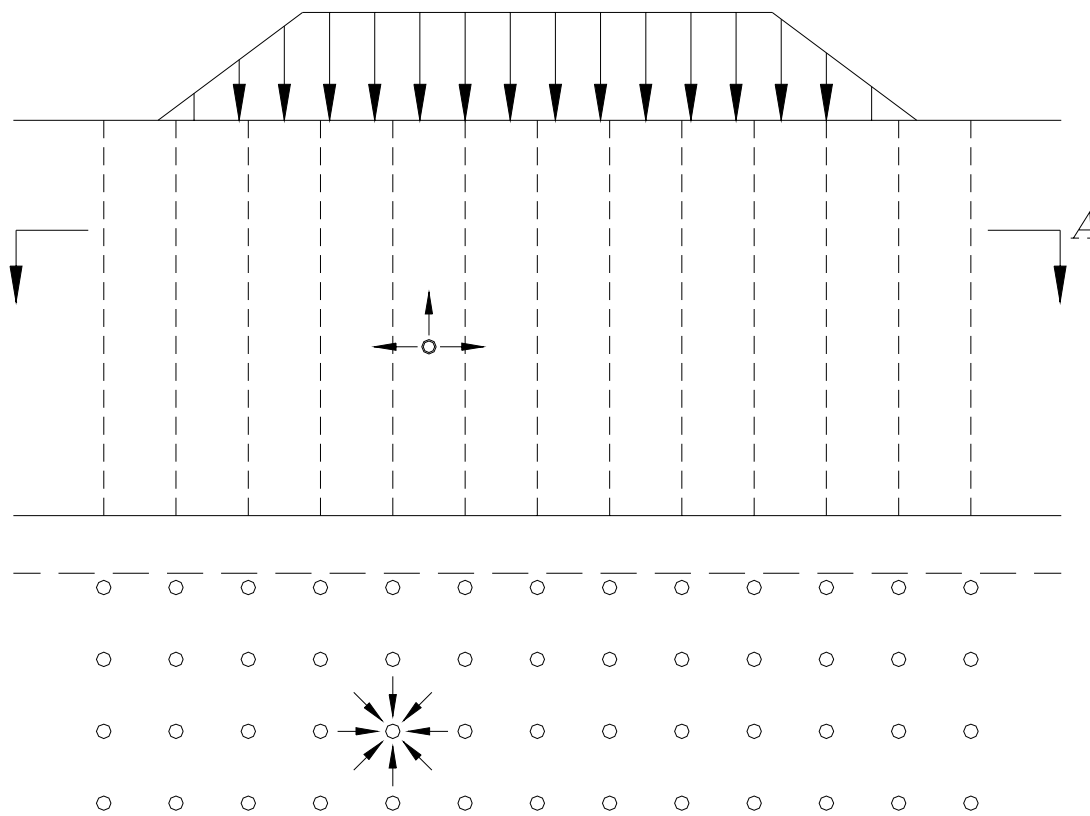
V prvem primeru moramo v analizi konsolidacije temeljnih tal upoštevati difuzijsko enačbo za ravninsko konsolidacijo, v drugem primeru pa difuzijsko enačbo za osno-simetrično prostorsko konsolidacijo.

Kadar naravno (vertikalno) konsolidacijo umetno pospešujemo, pa lahko pri tem še dodatno vplivamo na boljše mehanske lastnosti zemljin. Ločimo dva takšna primera:

- **predobtežbo in**
- **preobtežbo.**

Pod pojmom **predobtežba** mislimo na to, da temeljna tla obremenimo z ekvivalentno obtežbo (n.pr. nasip ali deponija), ki ni občutljiva na posedke temeljnih tal, dovolj časa prej, predno bomo začeli z gradnjo objekta, ki je bolj občutljiv na posedke tal, še posebej na diferenčne posedke. V času ko bodo temeljna tla obremenjena s »predobtežbo«, se bo že izvršila določena stopnja konsolidacije tal. Efekt predobtežbe bo tem večji, čim dalj časa bo

predobtežba tal obremenjevala temeljna tla. V nizko gradnji (n.pr. pri gradnji nasipov) pomeni pojem predobtežbe tudi to, da izdelamo voziščno konstrukcijo šele potem, ko se bo že realiziral pretežni del posedkov temeljnih tal in nasipa.

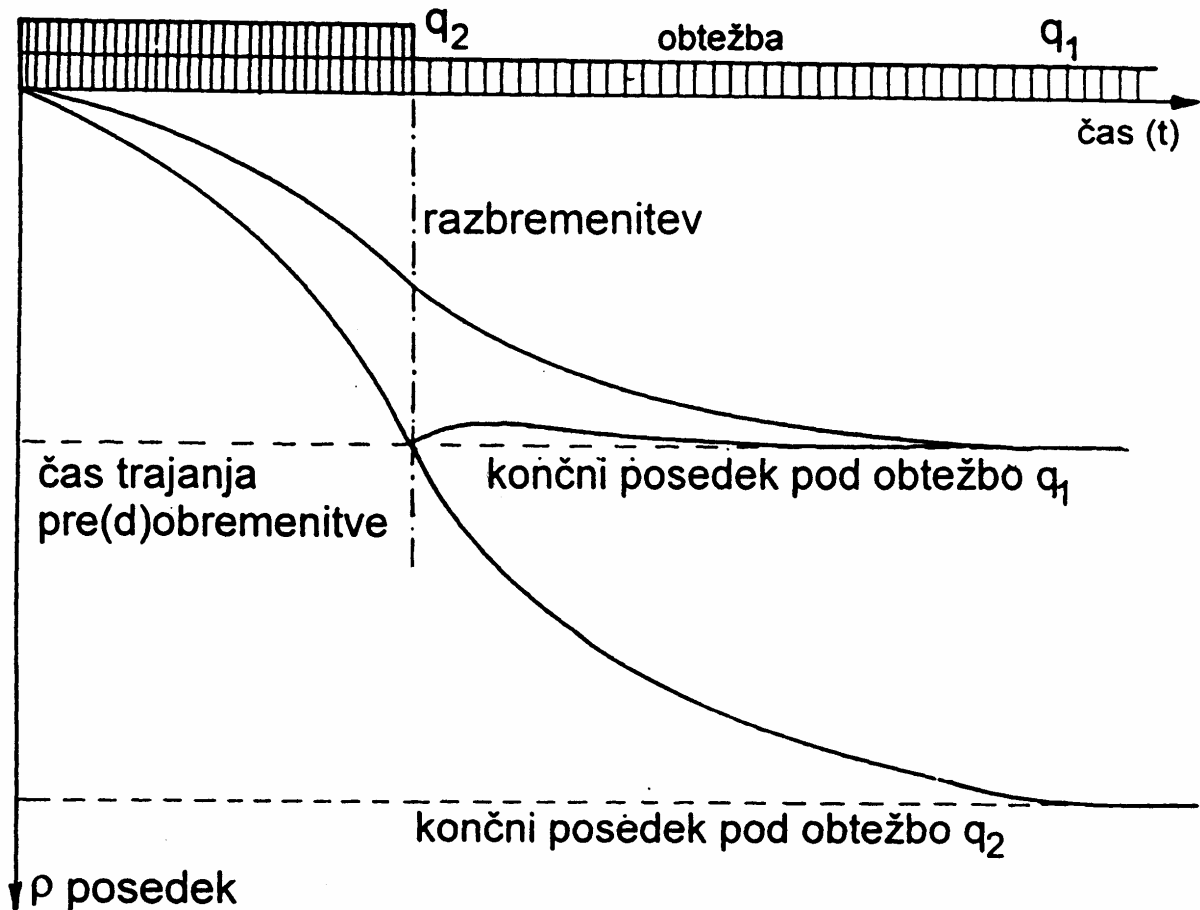


Slika 16: Prerez in tloris vertikalnih drenaž (drenov) pod cestnim nasipom

Preobtežba pomeni večjo obtežbo od obtežbe s katero bo gradbeni objekt (n.pr. stanovanjska, industrijska ali poslovna zgradba, premostitveni objekt, nasip, ...) v končni fazi obremenjeval temeljna tla. Glede na elasto-plastičen značaj zemljin (večje deformacije pri obremenitvi in manjše deformacije pri enaki razbremenitvi) in glede na to, da je čas trajanja konsolidacije temeljnih tal neodvisen od velikosti obtežbe določene tlorisne oblike in velikosti, lahko z večjo obtežbo, ki obremenjuje temeljna tla krajši čas, izzovemo takšne posledke temeljnih tal, kot bi jih dejanska obtežba povzročila v bistveno daljšem času.

Drugače povedano: če temeljna tla obremenimo s preobtežbo q_2 (n.pr.: z nasipom enake površine, kot bo površina tlorisa bodočega objekta, vendar večje teže od bodočega objekta q_1) bomo na račun večje obtežbe q_2 od dejanske obtežbe ($q_2 < q_1$), izzvali v temeljnih tleh posedek površja temeljnih

tal ρ_2 , ki bo praktično enake velikosti, kot bi bil posedek ρ_1 pri dejanski obtežbi, vendar v krajšem času. Pogosto ni niti nujno, da sta posedka ρ_1 in ρ_2 enako velika, pomembno je, da je razlika posedkov $\Delta\rho = \rho_1 - \rho_2$, ki se bo realizirala po odstranitvi preobtežbe, takšna, da ni škodljiva objektu.



Slika 16: Vpliv pre(d)obtežbe na časovni razvoj konsolidacije in posedkov površja temeljnih tal

