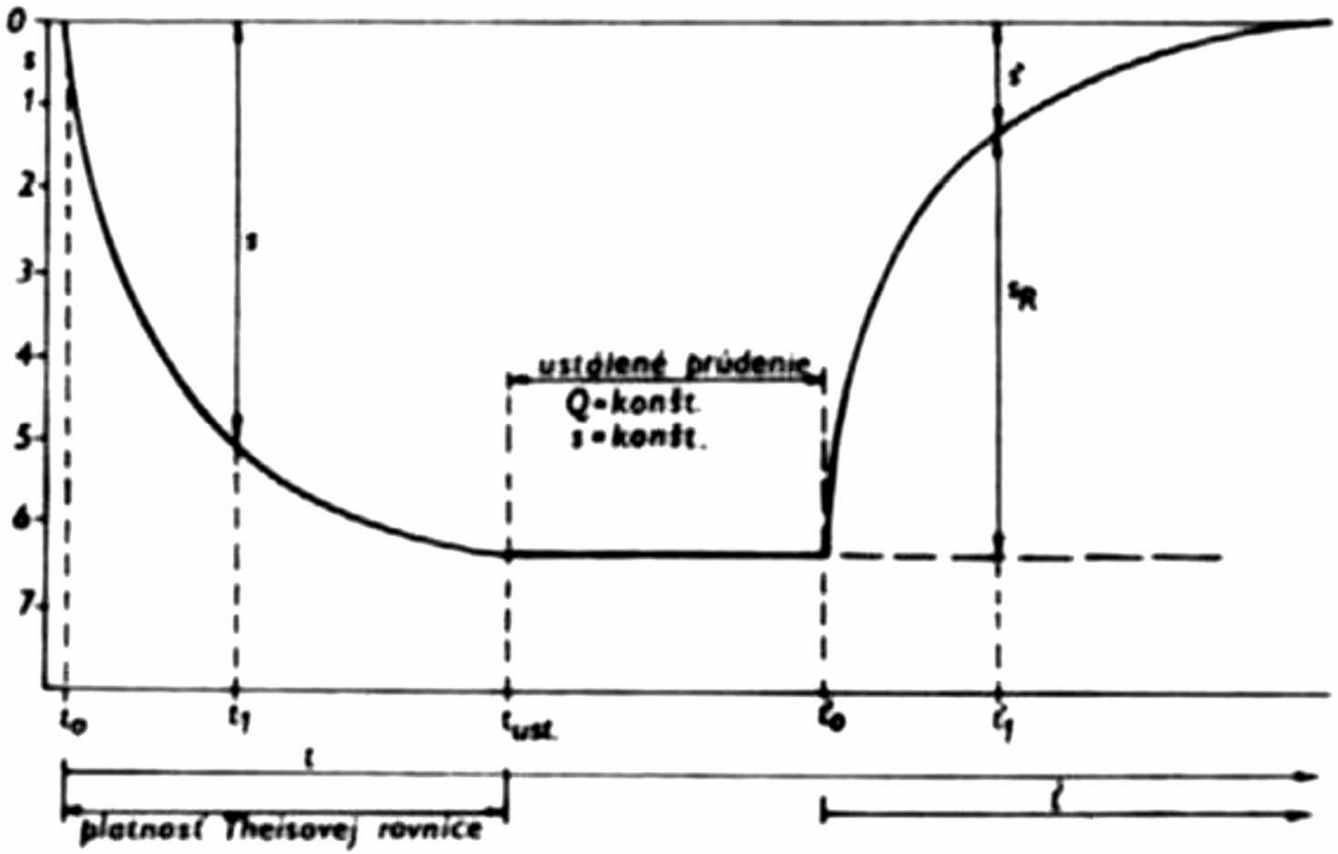
Hydraulika podzemních vod

STOUPACÍ ZKOUŠKY

- vyhodnocení stavu po skončení čerpací zkoušky
- měří se tzv. zbytkové snížení (původní hladina – hladina po skončení čerpání v libovolném čase po skončení odběru)
- zbytkové snížení je podle Theise aproximováno rozdílem snížení hladin v případě, kdy po skončení čerpání dochází ke vsakování stejného množství vody v imaginárním vrtu umístěném v původně čerpaném vrtu (aplikace zákona superpozice)
- obrovská výhoda – stanovení pro čerpaný vrt (bez nutnosti vrtů pozorovacích)



$$s' = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot T} W\left(\frac{S \cdot r^2}{4 \cdot T \cdot t}\right) - \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot T} W\left(\frac{S' \cdot r^2}{4 \cdot T \cdot t'}\right)$$

upravená Theisova rovnice pro výpočet snížení při stoupací zkoušce

$$s' = \frac{2{,}303 \cdot Q}{4 \cdot \pi \cdot T}\left(\log \frac{2{,}246 \cdot T \cdot t}{S \cdot r^2} - \log \frac{2{,}246 \cdot T \cdot t'}{S' \cdot r^2}\right)$$

úprava Jacobovou metodou přímkové aproximace

$$s' = \frac{2{,}303 \cdot Q}{4 \cdot \pi \cdot T} \log \frac{t}{t'}$$

$$\Delta s' = \frac{2{,}303 \cdot Q}{4 \cdot \pi \cdot T}$$

výpočet snížení v jednom logaritmickém cyklu času *t/t´*

POSTUP VYHODNOCENÍ

- nejčastěji vyhodnocení semilogaritmickou metodou (obdoba Jacobovy aproximace) – pro výpočet *T* se používá přímkový úsek grafu
- změříme snížení na konci čerpací zkoušky v čase t
- postupně měříme zbytkové snížení *s´* v časech *t´*
- četnost měření hladin odpovídá 2 – 3 měření *s´* v jednom logaritmickém cyklu času
- v semilogaritmickém grafu vyneseme na osu x poměr *t/t´* proti hodnotám *s´* na ose y
- čas *t* je celkový čas hydrodynamické zkoušky – čas čerpací + stoupací zkoušky k danému bodu měření
- čas *t´* je čas od zahájení stoupací zkoušky (přerušení čerpání)

Stanovení **storativity** touto metodou

- jen orientační (pro čerpaná vrt)
- nepřesné – ovlivněno objemem vody ve vrtu
- přesnější než v případě čerpací zkoušky
  (samotný vrtu je při čerpací zkoušce pro výpočet *S* nepoužitelný)

storativita čerpací zkoušky – *S*
storativita stoupací zkoušky – *S´*

hodnoty často rozdílné

vyjádření storativity v základní rovnici
$$s' = \frac{2{,}303 \cdot Q}{4 \cdot \pi \cdot T}\left[\log\left(\frac{t}{S}\right) - \log\left(\frac{t'}{S'}\right)\right]$$

pro snížení *s´*= 0 platí $\log \frac{t \cdot S'}{t' \cdot S} = 0$ z čehož *t/t´ = S/S´*

hodnotu *t/t´* odečteme přímo z grafu (pro *s´* = 0) můžeme určit poměr *S/S´*

$(t/t')_0 > 1 \quad (S' < S)$ $(t/t')_0 = 1 \quad (S' = S)$ $(t/t')_0 < 1 \quad (S' > S)$

k výpočtu storativity lze použít údaje z pozorovacího vrtu

$$S_p = \frac{2{,}25 . T . t_{čz} / r^2}{10^{s'_0 / i}}$$

s'_0 - počáteční snížení na začátku stoupací zkoušky
i - snížení na jeden *log* cyklus času *t´*

HYDRODYNAMICKÉ ZKOUŠKY
S JEDNORÁZOVÝM NÁLEVEM NEBO ODBĚREM

- principem je rychlý (jednorázový) odběr určitého objemu vody (**bail test**), nebo naopak injektáž určitého objemu vody (**slug test**)
- rychlost návratu hladiny na původní úroveň je mírou propustnosti kolektoru

Výhody

- rychlá metoda
- při nálevech nevzniká nutnost odčerpávat vodu – použití v kontaminační hydrogeologii

Nevýhody

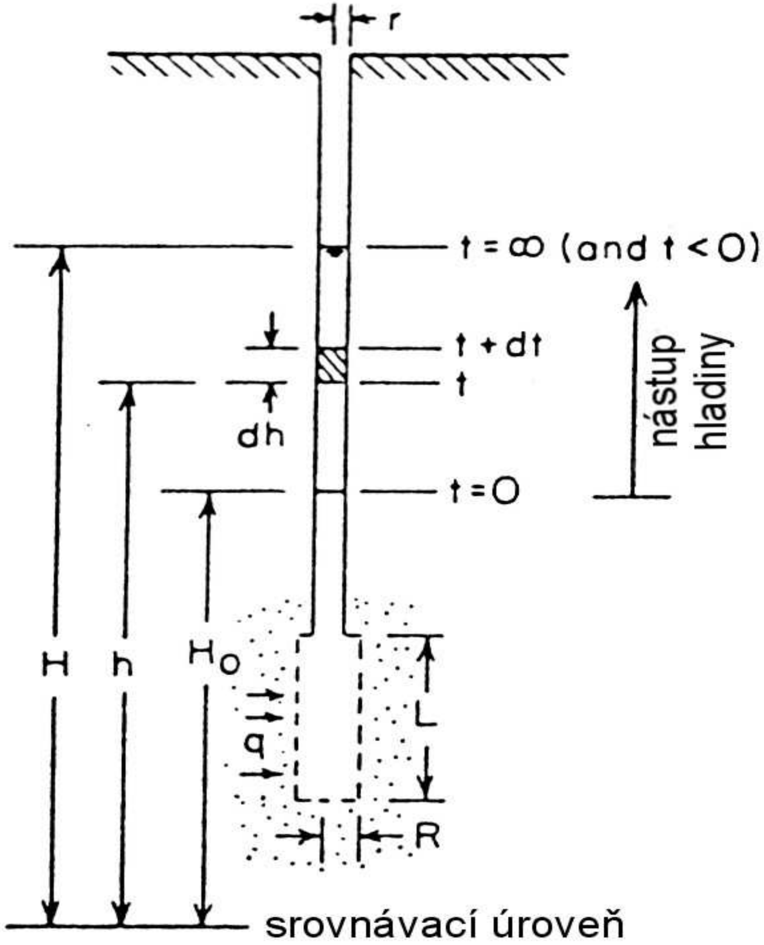
- orientační metoda použitelná jen v omezených případech
- použitelné jen u úzkoprofilových piezometrů
- stanovuje se *k* v dosahu jen několika centimetrů od vrtu
- nevhodné u vrtů s obsypem

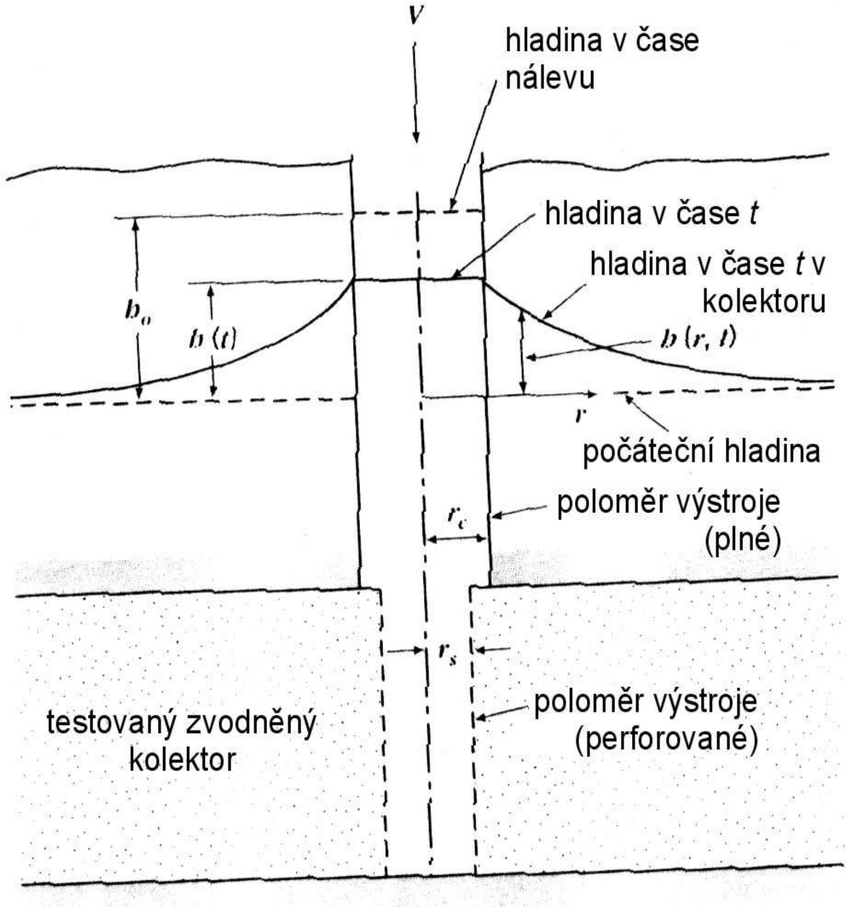
Metody řešení

- Bouwer a Rice
- Ferris a Knowles
- Hvorslev

Faktory ovlivňující zjišťovanou hodnotu *k* (měřené hodnoty) – obecně pro všechny metody

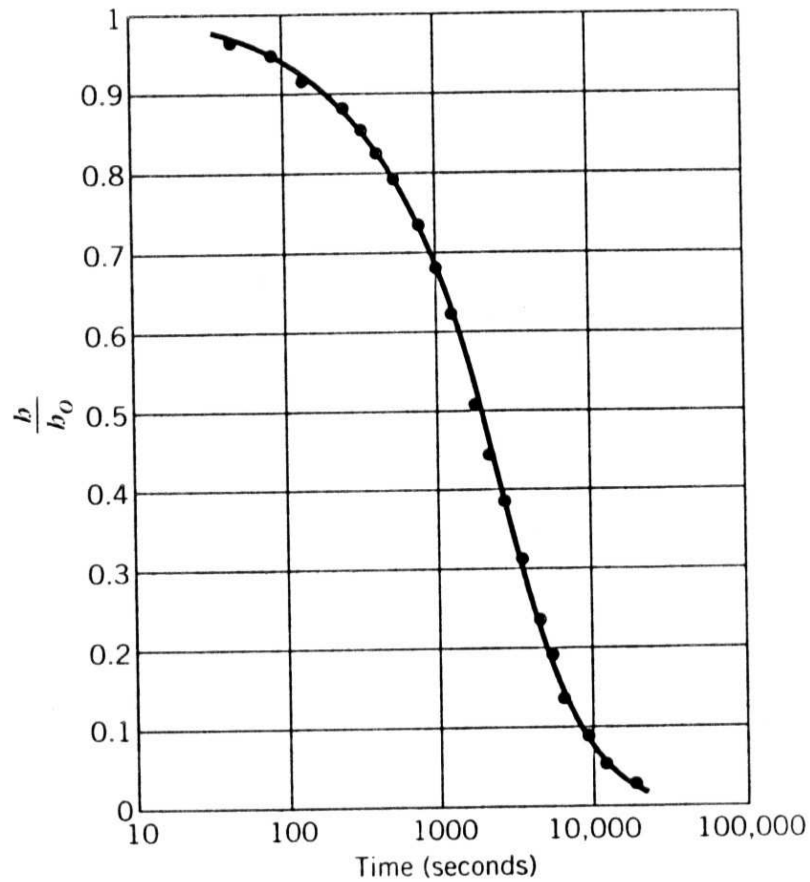
- zbytkové snížení
- čas
- tvarový faktor piezometru





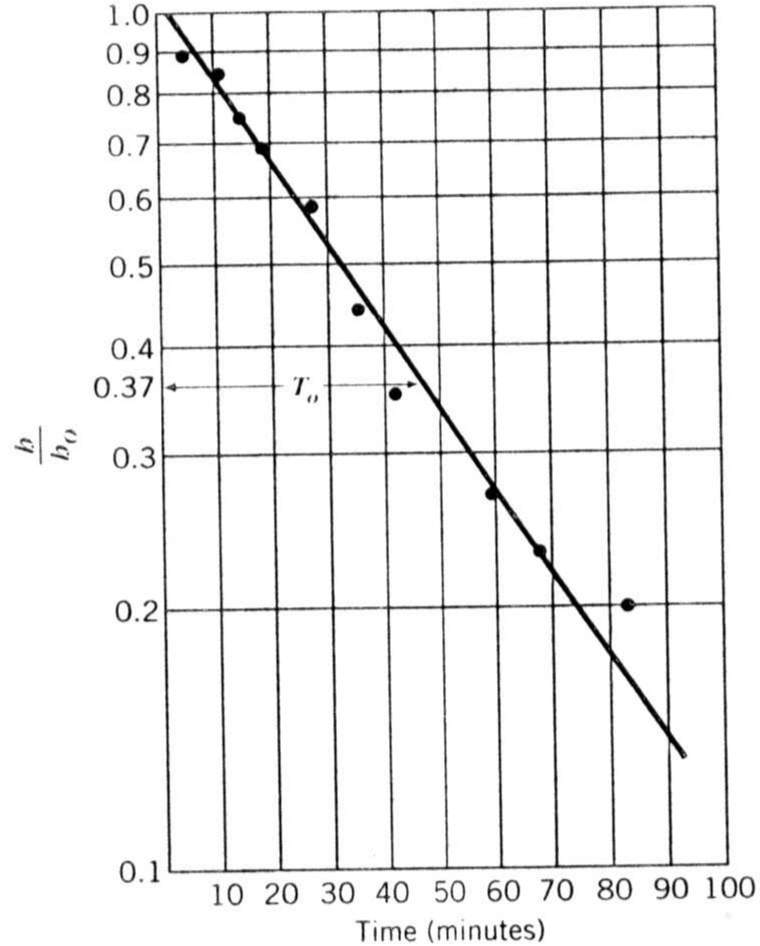
Metoda Hvorsleva

Tvarový faktor Hvorslevova metoda – $L/R > 8$



- vynáší se poměr h/h_0 na ose y proti času t na ose x
- výška h je výška nálevu v libovolném čase
- na počátku je poměr h/h_0 roven 1 a postupně se blíží 0

Interpretace v semilogaritmickém grafu *log* h/h_0 proti *t*



-je definována základní doba zpoždění T_0

Postup vyhodnocení

- data změřená v piezometru se vynesou v semilogaritmickém grafu
- střední část křivky se v semilogaritmickém měřítku promítne jako přímka
- odečte se část odpovídající poměru snížení h/h_0 rovno 0,37 (přepočet *log* na *ln*)

$$k = \frac{r^2 . \ln(L/r)}{2.L.T_0}$$

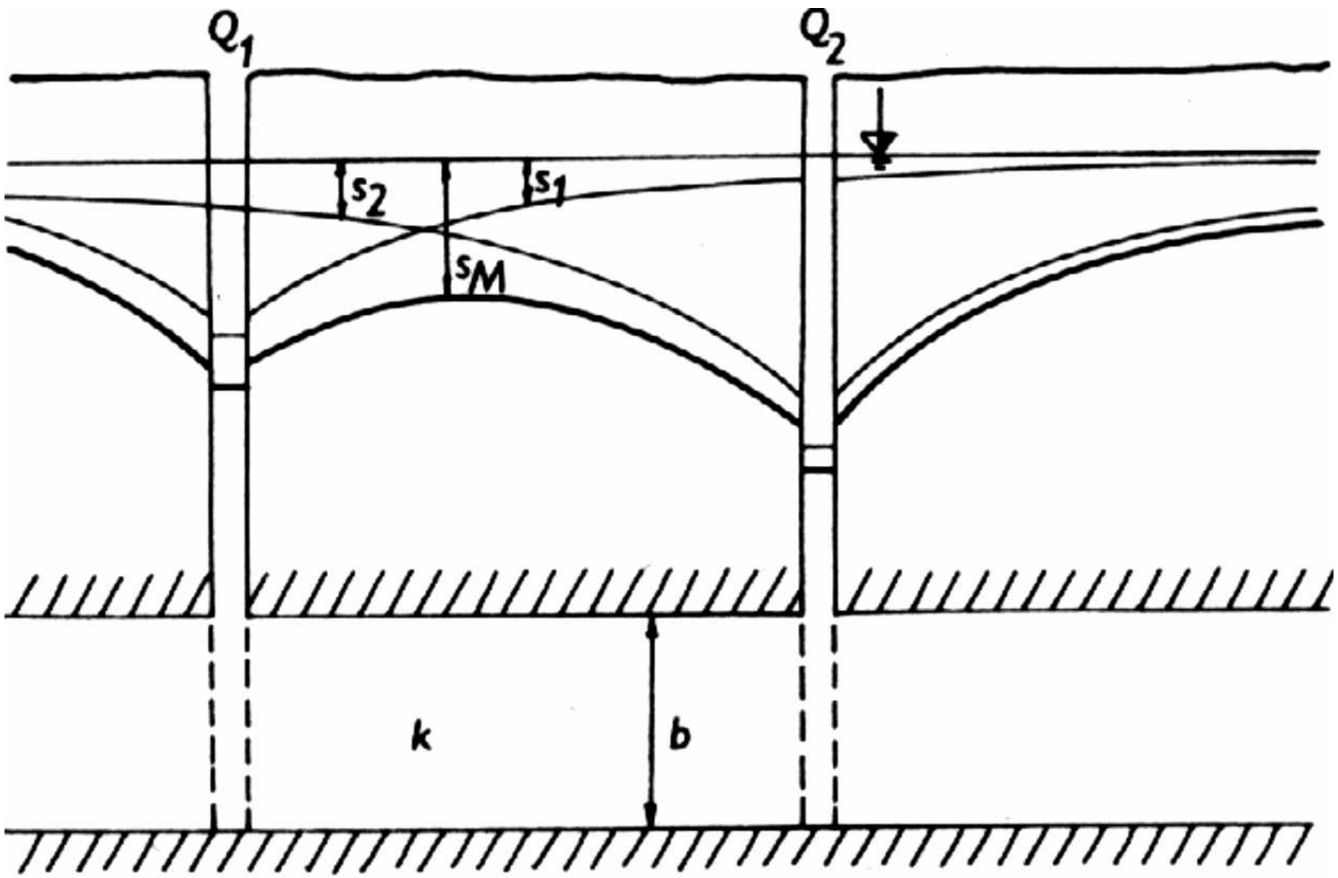
PRINCIP SUPERPOZICE

- základem řešení hydraulických problémů v reálných podmínkách

- pokud je ve zvodněné vrstvě několik vstupů a výstupů podzemní vody, potom výsledná piezometrická úroveň hladiny je rovná algebraickému součtu piezometrických výšek vyvolaných jednotlivými vlivy

- využití – řešení okrajových podmínek proudění, čerpání v případech existence více objektů, apod.

PŘÍKLAD

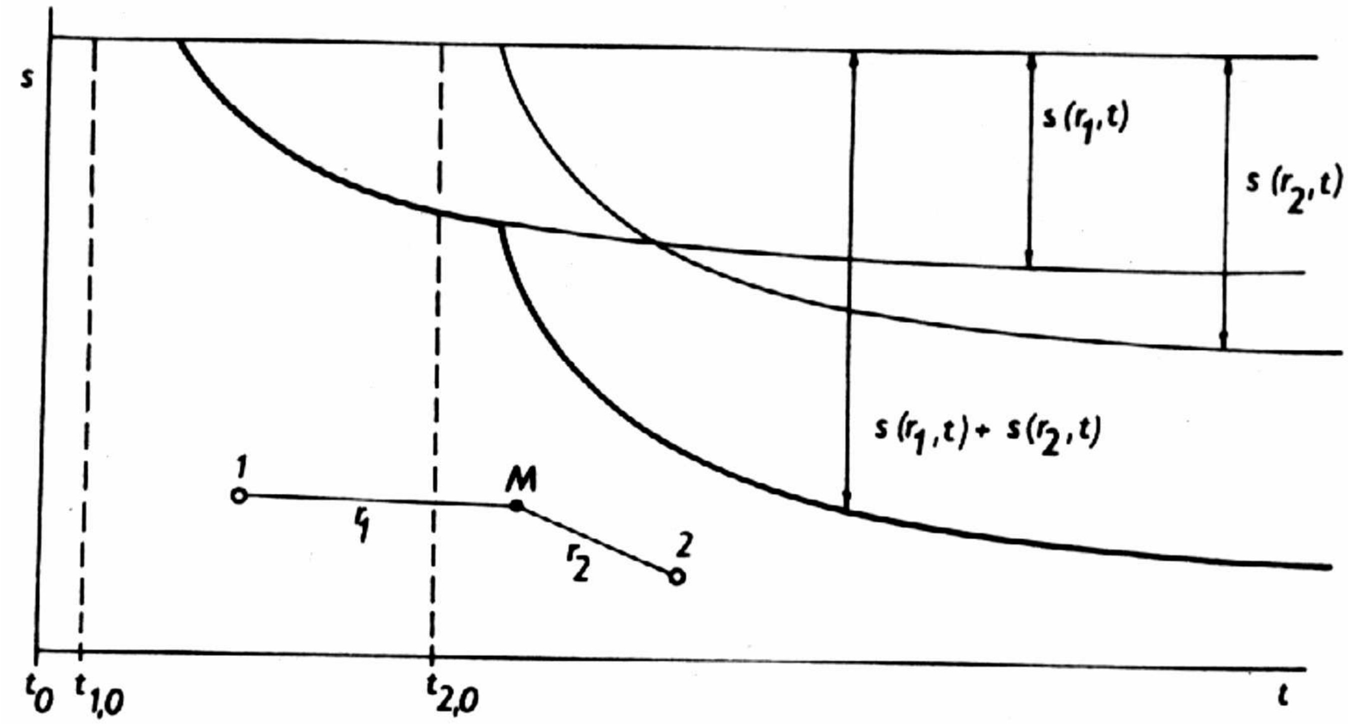


dva čerpané vrty v jedné hydrogeologické struktuře s napjatou hladinou,

před začátkem čerpání byla hladina ustálená, čerpání Q_1 vyvolá ve struktuře snížení s_1, čerpání Q_2 vyvolá ve struktuře snížení s_2,

snížení vyvolané současným čerpáním obou vrtů v množství Q_1 a Q_2 odpovídá v každém bodě součtu obou snížení

PŘÍKLAD



pokud není čerpání v obou vrtech zahájeno současně,

pokles vyvolaný čerpáním z druhého vrtu se v libovolném bodě *M* projeví

až po dosažení tohoto bodu druhým depresním kuželem

Obecný tvar Theisovy rovnice pro řešení reálných podmínek aplikací zákona superpozice

$$s = s_1 \pm s_2 \pm s_3 \pm \ldots \pm s_n = \frac{Q}{4.\pi.T}.\left[W(u)_1 \pm W(u)_2 \pm W(u)_3 \pm \ldots \pm W(u)_n\right] = \frac{Q}{4.\pi.T}\sum W(u)$$

- kladné hodnoty snížení - odpovídají vlivu dalšího čerpaného vrtu

- záporné hodnoty snížení – odpovídají vlivu dalšího vrtu - vsakovaného

výpočet snížení

- výpočet z Theisovy rovnice $$s = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot T} \cdot W(u)$$

- při známých parametrech *T* a *S* zjistíme hodnotu argumentu *u* $$u = \frac{r^2 \cdot S}{4 \cdot T \cdot t}$$

- následně zjistíme hodnotu odpovídající hodnotu argumentu *W(u)*
  (z tabulky hodnot Theisovy funkce nebo z grafu typové křivky) $$s = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot T} \cdot W(u)$$

ŘEŠENÍ ČERPACÍCH ZKOUŠEK OVLIVNĚNÝCH OKRAJOVÝMI PODMÍNKAMI

neexistuje nekonečná zvodněná vrstva

z vyhodnocení průběhu čáry snížení lze rozeznat druh okrajové podmínky a určit její hydraulický charakter (dokonalost)

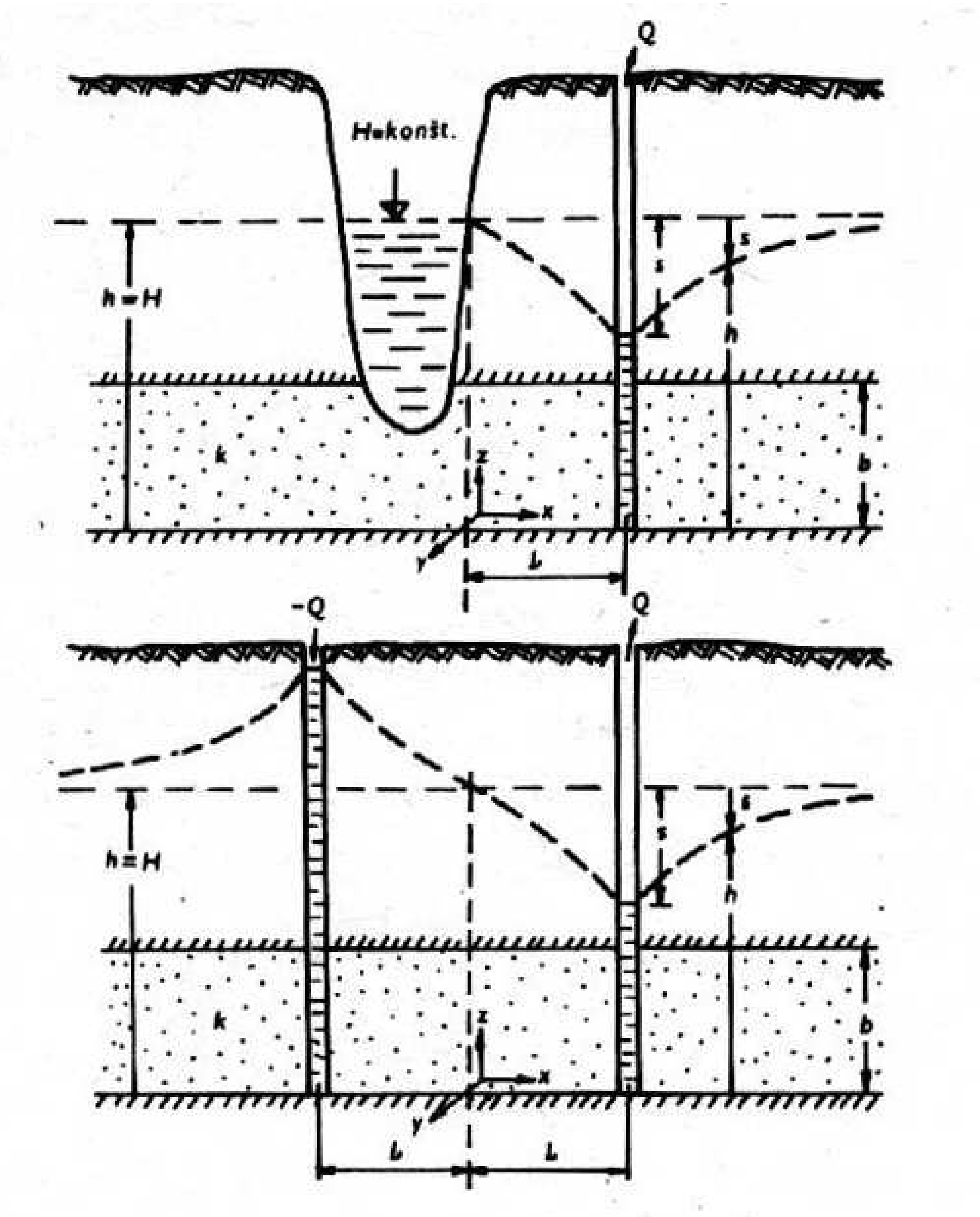
Teorie zrcadlového zobrazení (imaginárních, fiktivních vrtů)

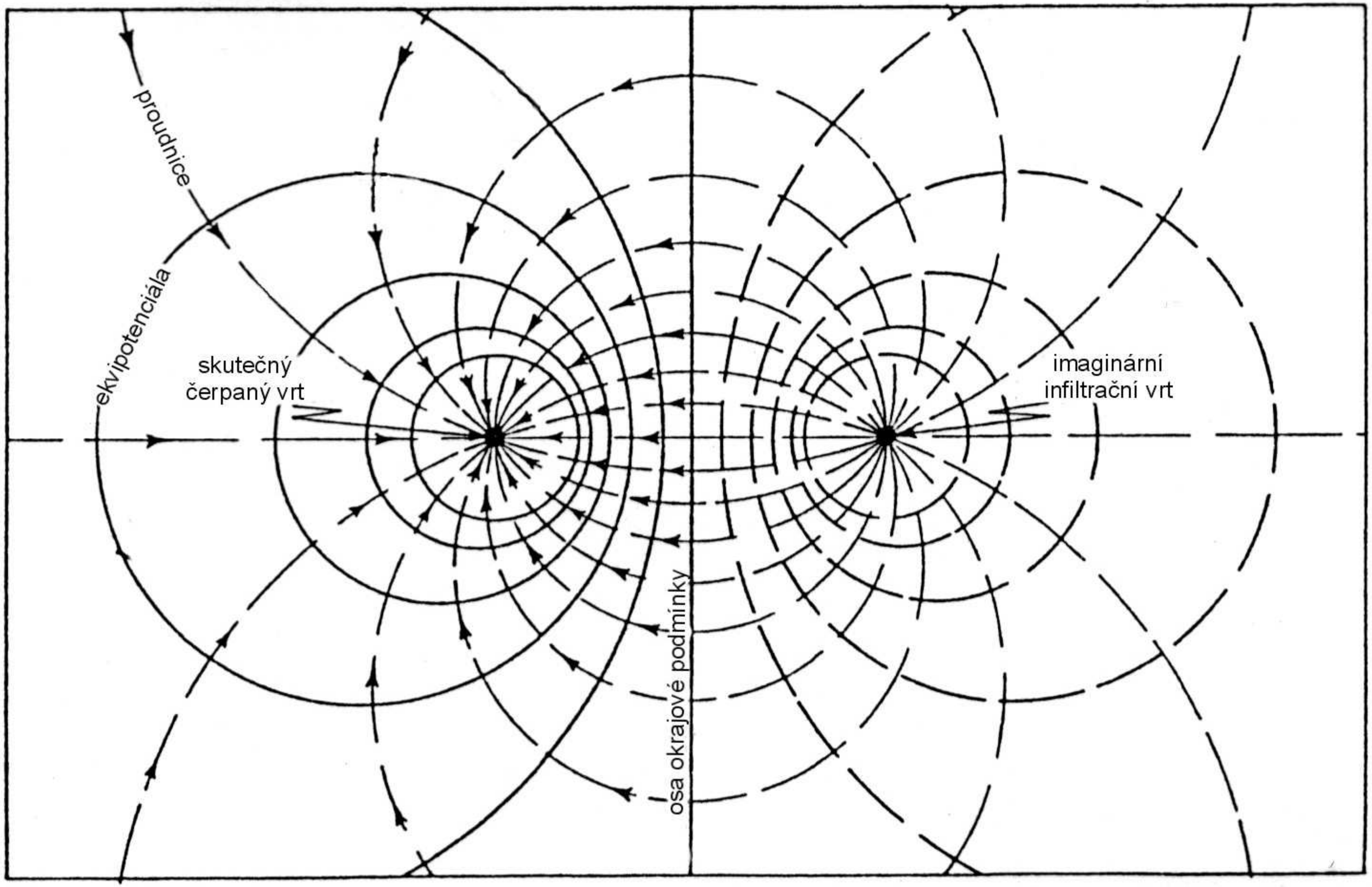
- vliv okrajové podmínky lze vyjádřit imaginárními (zrcadlově zobrazenými vrty)
- podle druhu okrajové podmínky má imaginární vrt čerpané množství +Q nebo –Q
- superponováním snížení (+s nebo –s) vyvolané imaginárním vrtem na snížení vyvolané čerpáním z reálného vrtu lze kalkulovat skutečné snížení v libovolné vzdálenosti od čerpaného vrtu
- platí, že imaginární vrt leží za okrajovou podmínkou, jejíž osa probíhá kolmo na spojnici imaginárního a reálného vrtu a leží uprostřed této vzdálenosti

- použitelné zejména pro případy okrajové podmínky typu H = konst. (skutečné snížení v dosahu okrajové podmínky bude menší)
  a pro případ q = 0 (skutečné snížení bude větší)

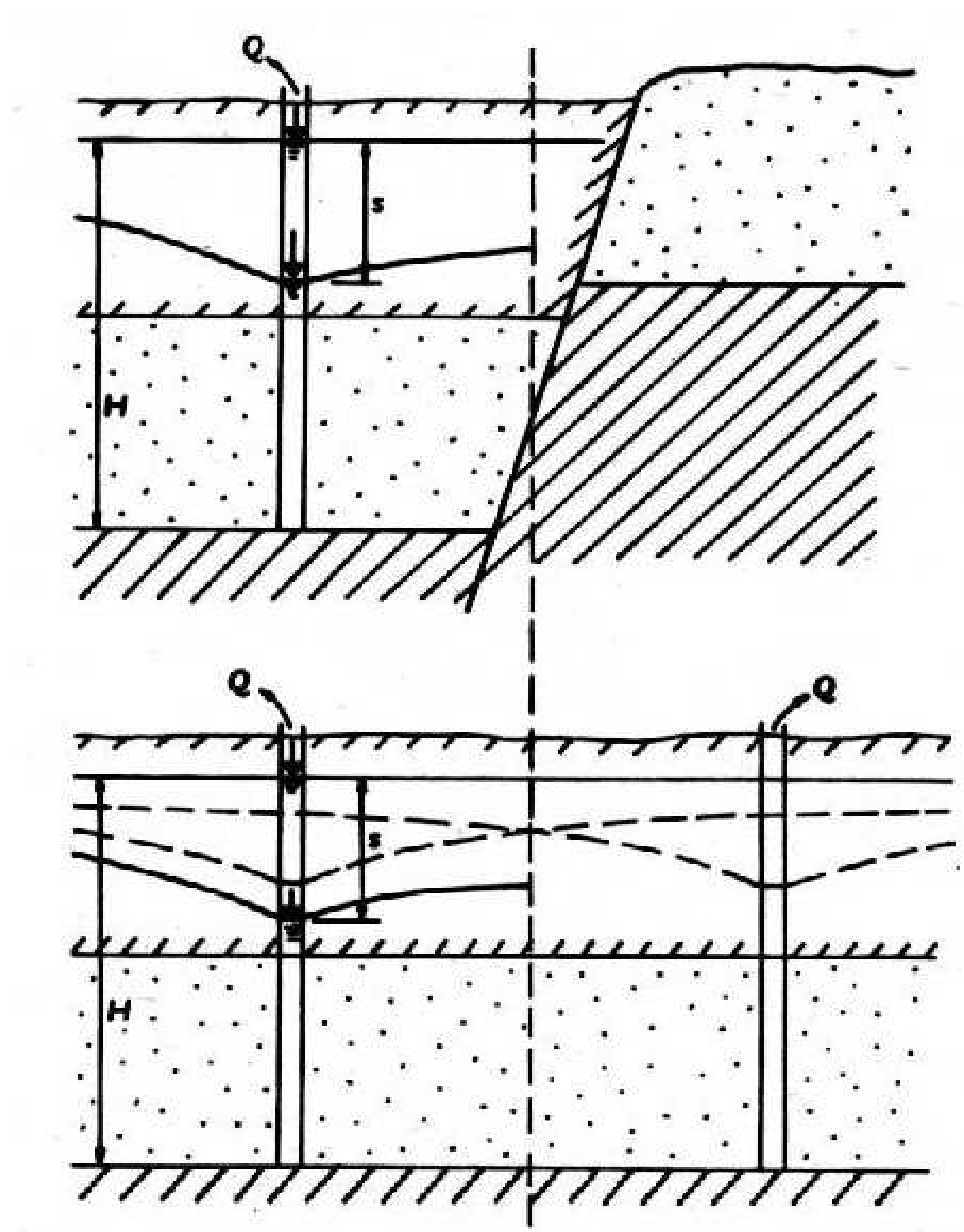
$$s = s_r \pm s_i = \frac{Q}{4.\pi.T}.\left[W(u)_r \pm W(u)_i\right] = \frac{Q}{4.\pi.T}\sum W(u)$$

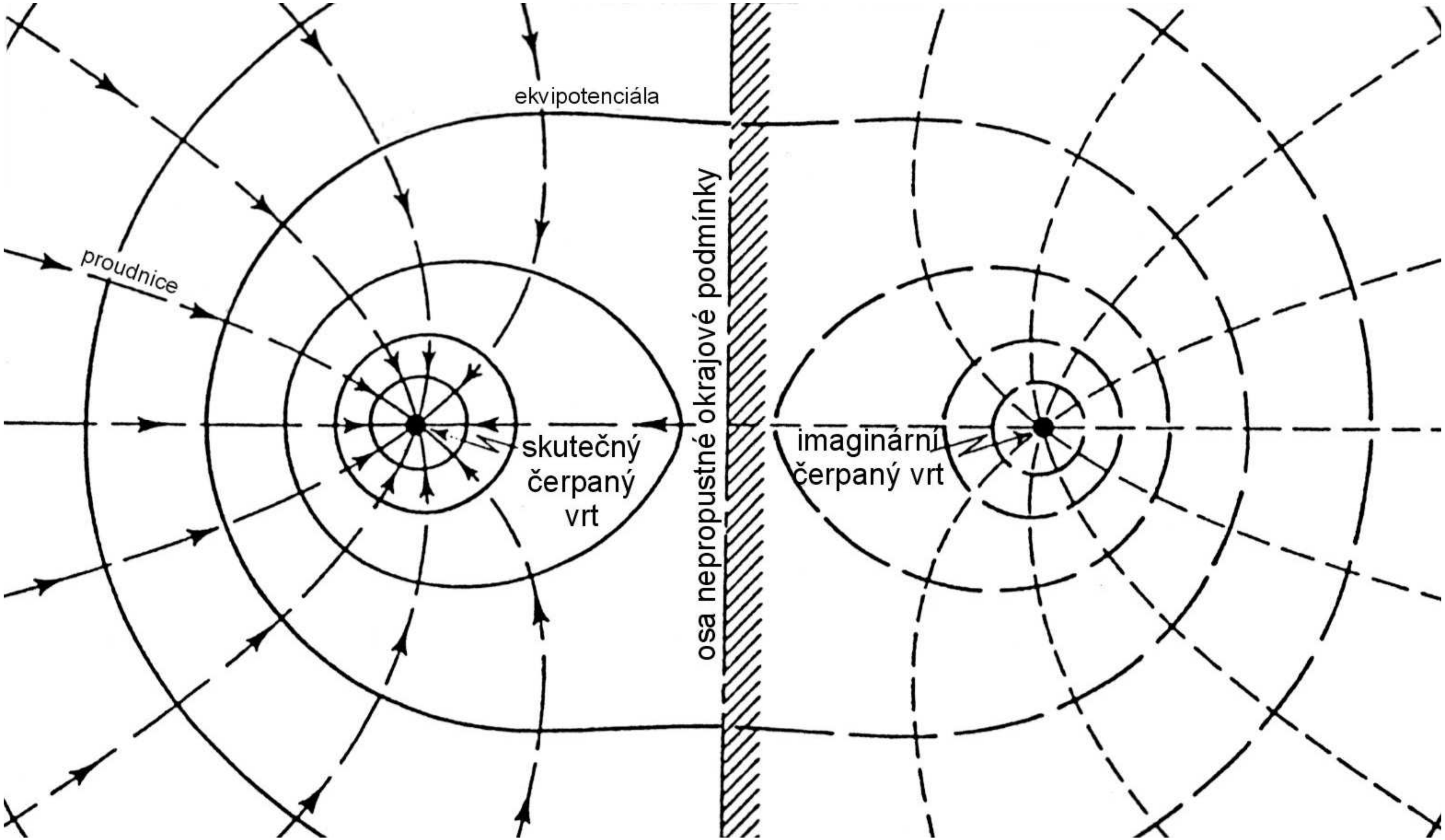
řeka jako okrajová podmínka (1. typu, H = konst.)




proudnice
ekvipotenciála
skutečný
čerpaný vrt
imaginární
infiltrační vrt
osa okrajové podmínky

nepropustná vrstva jako okrajová podmínka (2. typu, q = 0)

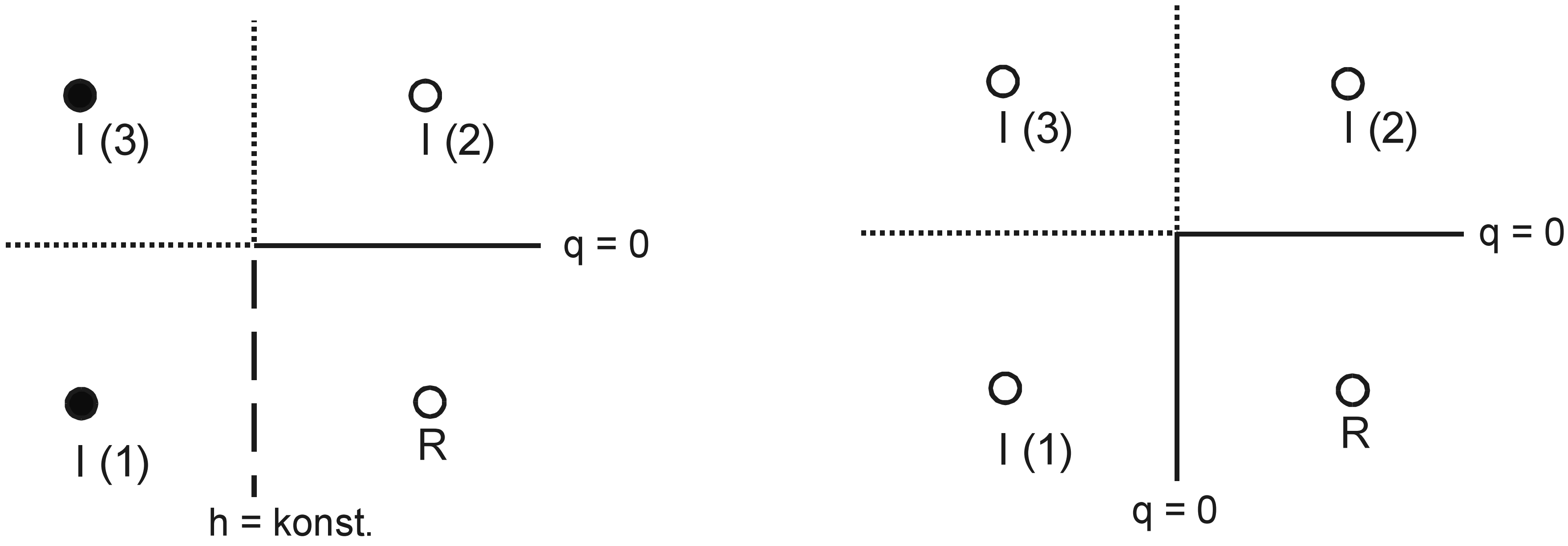



ekvipotenciála
proudnice
osa nepropustné okrajové podmínky
skutečný
čerpaný
vrt
imaginární
čerpaný vrt

Vliv geometrie okrajových podmínek na lokalizaci imaginárních vrtů

1. Poloohraničená zvodněná vrstva

2. Zvodněné vrstva ohraničená ze 3/4

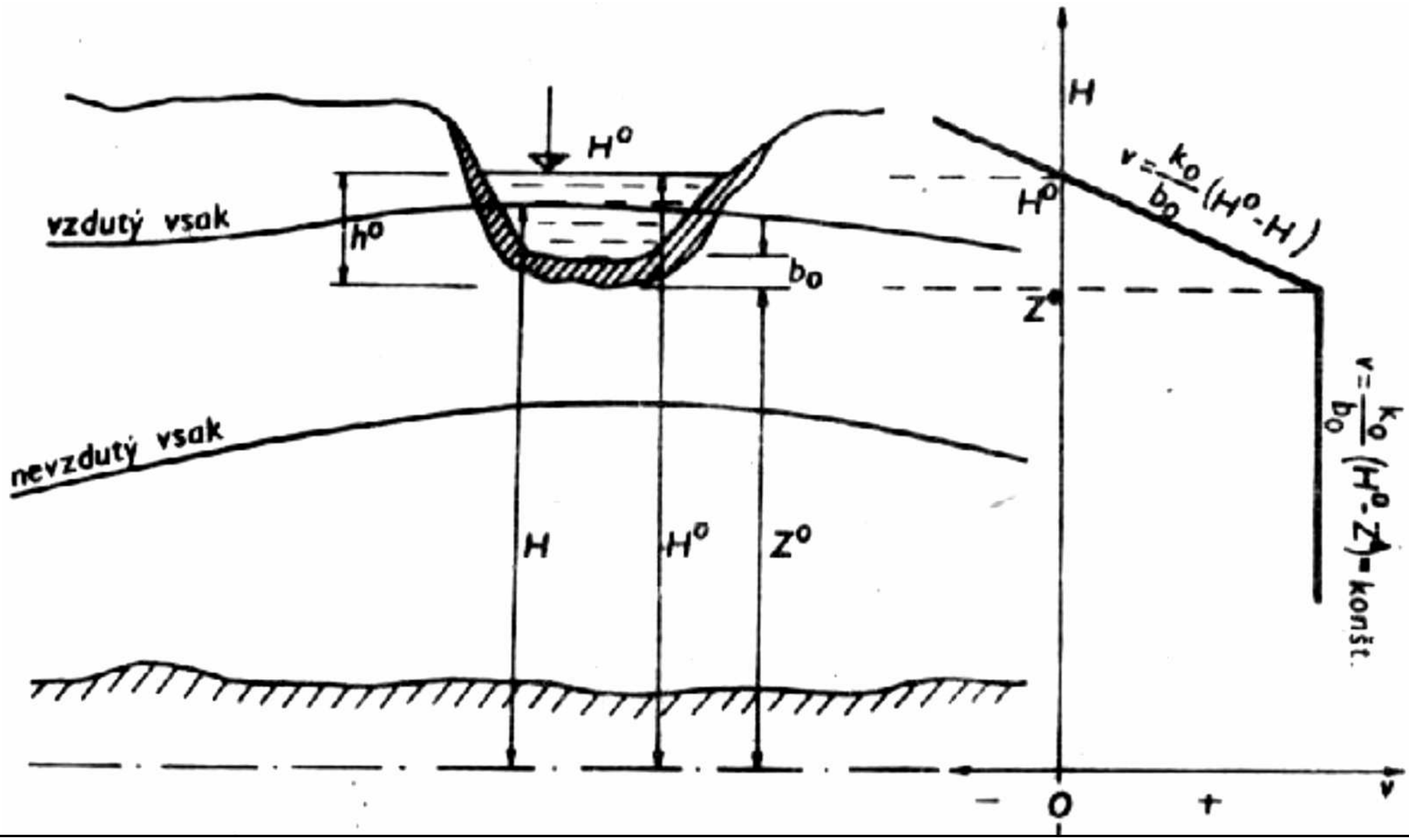


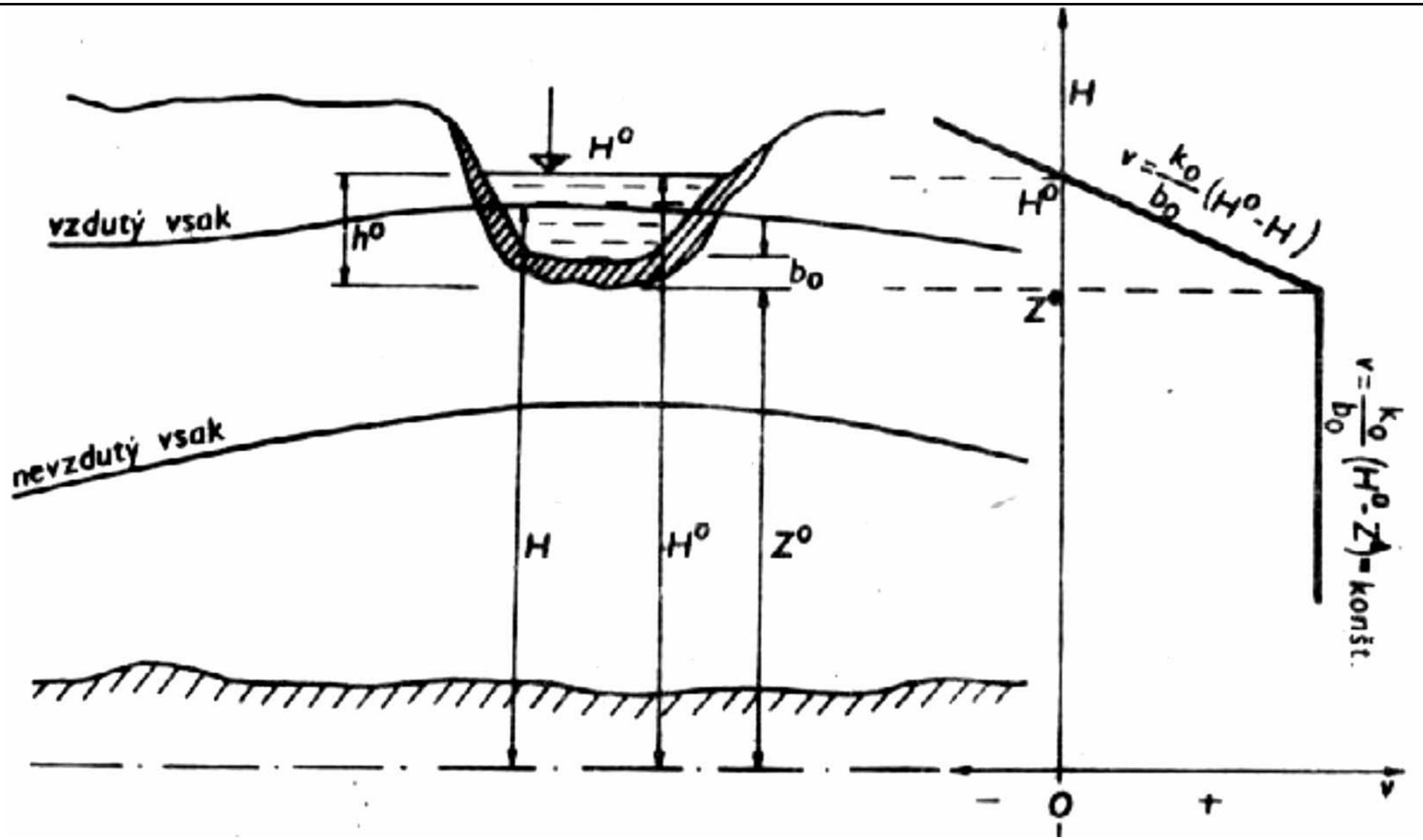
ŘEKA JAKO OKRAJOVÁ PODMÍNKA

-*H=konst.*, *H* nezávisí na přítoku na hranici okrajové podmínky

-při neustáleném proudění se H_0 (hladina v řece) může měnit v závislosti na hydrologických faktorech a je dána součtem $h_0 + z_0$

-pokud je koryto zanesené vrstvičkou nepropustných sedimentů nebo je zakolmatované, hranice okrajové podmínky se přenáší až na styk této vrstvy se zvodněným prostředím





2 druhy okrajových podmínek

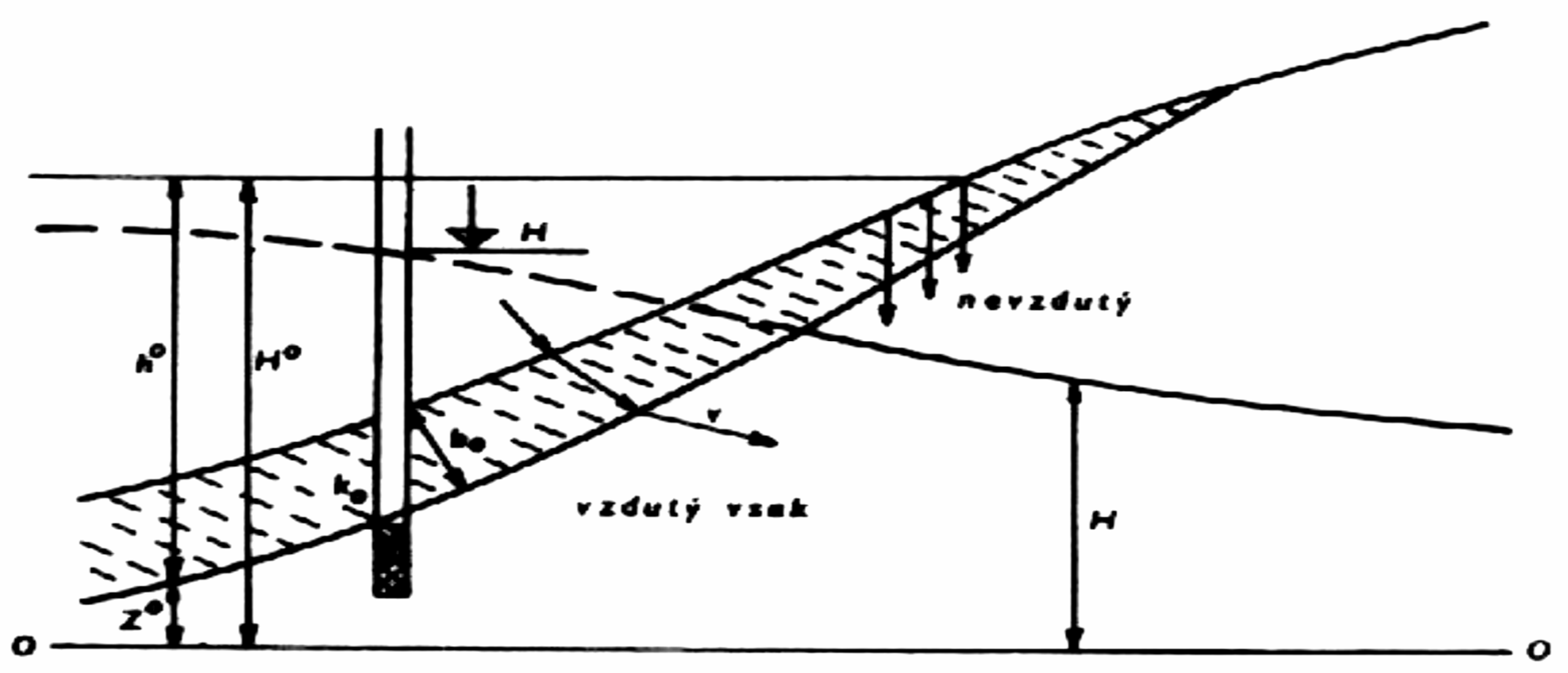
proudění s nevzdutým vsakem – proudění neovlivněné hladinou podzemní vody (hladina podzemní vody se trvale nachází v hloubce větší, než je styk kolmatované vrstvy s propustným prostředím a mezi nimi je nenasycená zóna)

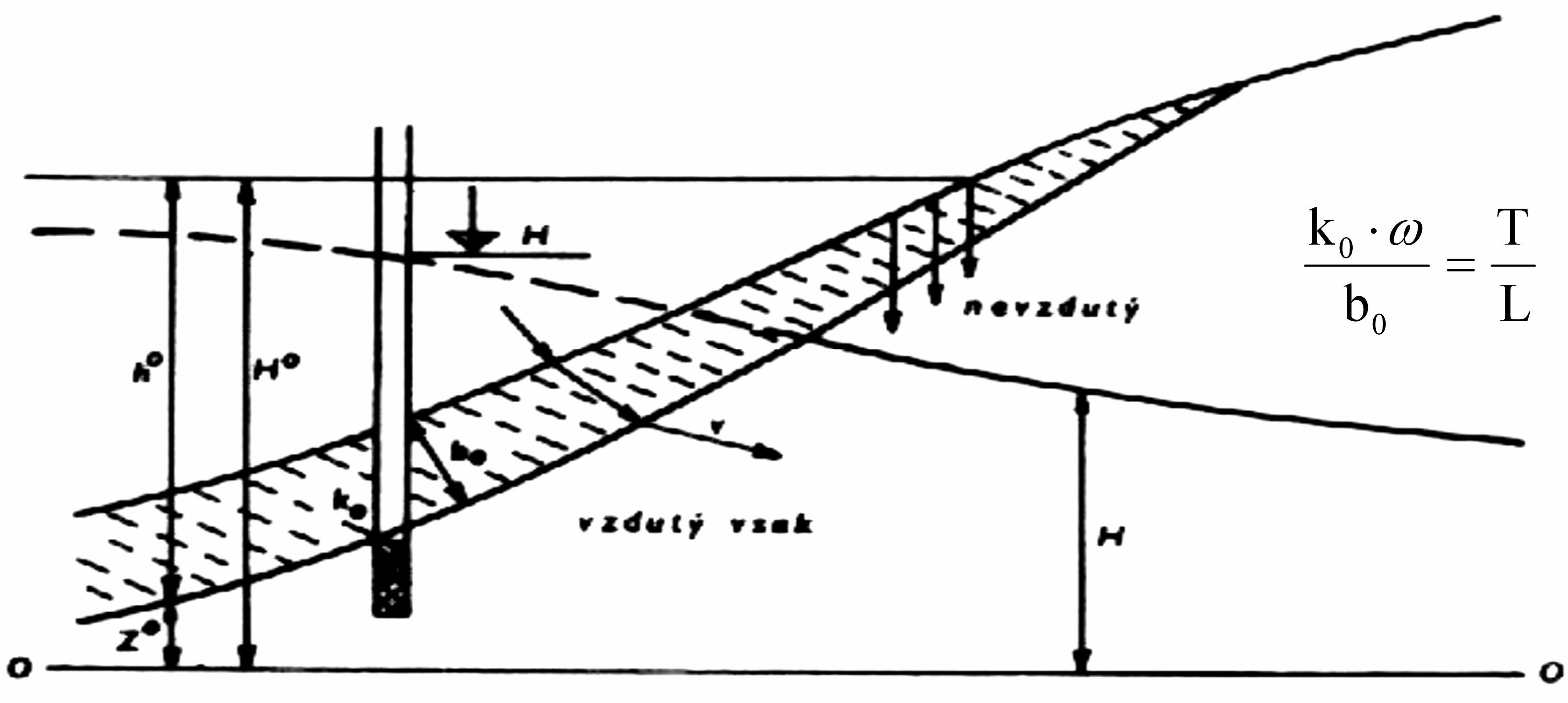
proudění se vzdutým vsakem – hladina podz. vody se pohybuje nad hranicí styku kolmatované vrstvy se zvodněným prostředím (zvodněné prostředí pod touto hranicí je úplně nasycené vodou, rychlost proudění závisí na výšce hladiny v okrajové podmínce a zvodněné vrstvě, vzhledem ke zpravidla malé tloušťce kolmatované vrstvy se uvažuje filtrační proud kolmý na vrstvičku)

v některých případech může nastat stav, kdy část vody infiltruje se vzdutým a část bez vzdutého vsaku rychlost filtrace při proudění se vzdutým vsakem $v = \frac{k_0}{b_0} \cdot (H_0 - H)$

rychlost filtrace při proudění s nevzdutým vsakem $v = \frac{k_0}{b_0} \cdot (H_0 - Z_0)$ nebo $v = \frac{k_0}{b_0} \cdot h_0$

$$\frac{k_0 \cdot \omega}{b_0} = \frac{T}{L}$$





$$\frac{k_0 \cdot \omega}{b_0} = \frac{T}{L}$$

kde *T* je transmisivita zvodněné vrstvy, ω je plocha průsaku jednotkové šířky a
L je náhradní délka zvodněné vrstvy o transmisivitě *T*,
která odpovídá svými odporovými vlastnostmi kolmatované vrstvičce

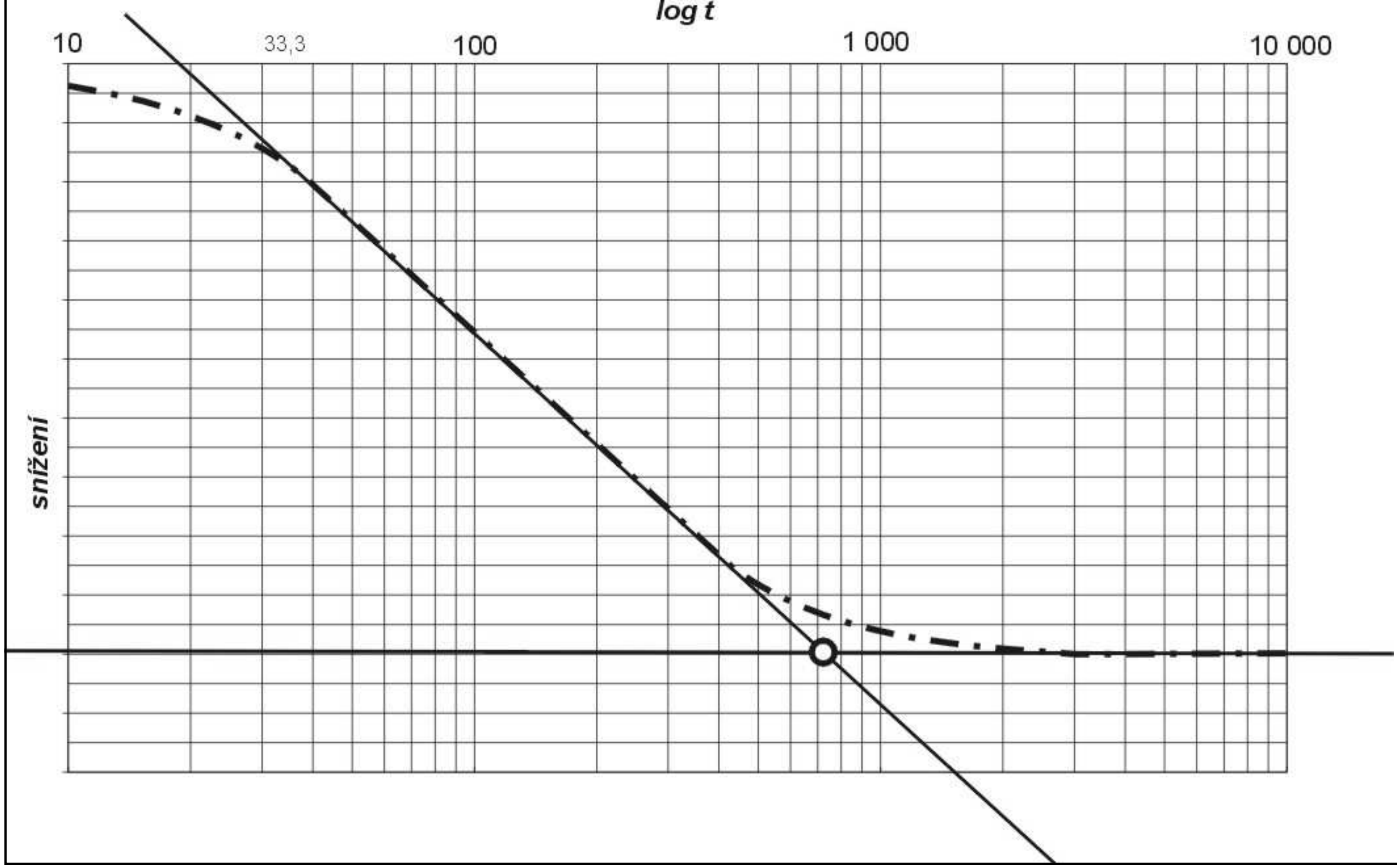
poměr k_0/b_0 představuje jednotkovou charakteristiku propustnosti kolmatované vrstvičky a označuje se jako součinitel kolmatace, není jej možné přesně určit.

proudění přes takové ohraničení se nazývá břehová infiltrace a
pokud je vyvolané čerpáním ve zvodněné vrstvě jako indukovaná břehová infiltrace

$$s = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot T}\left[W\left(\frac{S \cdot r_1^2}{4 \cdot T \cdot t}\right) - W\left(\frac{S \cdot r_2^2}{4 \cdot T \cdot t}\right)\right] \qquad s = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot T}\ln\frac{2L}{r} \qquad s = \frac{2{,}303 \cdot Q}{2 \cdot \pi \cdot T}\log\left(\frac{r_f}{r}\right)$$

způsoby řešení

- typové křivky v bilogaritmickém měřítku (podobné křivkám pro mezivrstevní přetékání)
- semilogaritmické řešení



vypočítáme hodnoty *T* a *S* z rovnic pro Jacobovu aproximaci z prvního přímkového úseku

odečteme čas t_i odpovídající souřadnicím inflexního bodu

pro výpočty vzdálenosti okrajové podmínky (resp. vzdálenosti pozorovacího vrtu od imaginárního vrtu) použijeme následující vzorce

pro případ, kdy je vzdálenost *r* zanedbatelně malá proti vzdálenosti *L*

- platí zjednodušení $r_f = 2L$

- platí pro výpočet vzdálenosti okrajové podmínky rovnice $L = 0{,}75\sqrt{\frac{T \cdot t_i}{S}}$ $\quad t_i = 1{,}78\frac{L^2 \cdot S}{T}$

pro případ, kdy je pozorovací vrt na spojnici čerpaného a imaginárního vrtu (tj. na na kolmici čerpaného vrtu k ose okrajové podmínky)

- platí $r_f = 2L - r$

- výpočet vzdálenosti okrajové podmínky $L = \left(\frac{r}{2}\right)\sqrt{\left(\frac{t_i}{t_0}\right)} + \frac{r}{2}$

pro případ, kdy je pozorovací vrt na prodloužení spojnice čerpaného a imaginárního vrtu na opačnou stranu od čerpaného vrtu, než probíhá hranice

- platí $r_f = 2L + r$

- výpočet vzdálenosti okrajové podmínky $L = \left(\frac{r}{2}\right)\sqrt{\left(\frac{t_i}{t_0}\right)} - \frac{r}{2}$

pro případ, kdy je pozorovací vrt na přímce procházející čerpaným vrtem a rovnoběžné s hranicí

- platí $r_f = \sqrt{4L^2 + r^2}$

- výpočet vzdálenosti okrajové podmínky $L = \left(\frac{r}{2}\right)\sqrt{\left(\frac{t_i}{t_0}\right) - 1}$

pro případ pozorovacího vrtu, jehož spojnice s odběrovým vrtem je odchýlena o libovolný úhel *Q* od kolmice spuštěné z odběrového vrtu na přímkovou boční hranici

- určení vzdálenosti r_f podle vztahu $r_f = \sqrt{4 \cdot L^2 + r^2 - 4 \cdot L \cdot r \cdot \cos \Theta}$

HYDRAULICKY NEDOKONALÁ BOČNÍ NAPÁJECÍ HRANICE

- všechny uvedené rovnice platí pro ideální okrajovou podmínku (neexistují doplňkové hydraulické odpory)

- ve skutečnosti – např. zakolmatované břehy vodoteče, neúplné prořezání zvodněného kolektoru vodotečí, apod.

ZPŮSOB ŘEŠENÍ:

- zavedení doplňkového hydraulického odporu vyjádřeného doplňkovou vzdáleností Δd
- skutečná vzdálenost reálných vrtů od okrajové podmínky se posune o vzdálenost, která představuje dodatečný hydraulický odpor (posunutí osy okrajové podmínky do větší vzdálenosti, než je vypočítaná vzdálenost *L*

1. Určení velikosti posunutí – vzdálenosti Δd

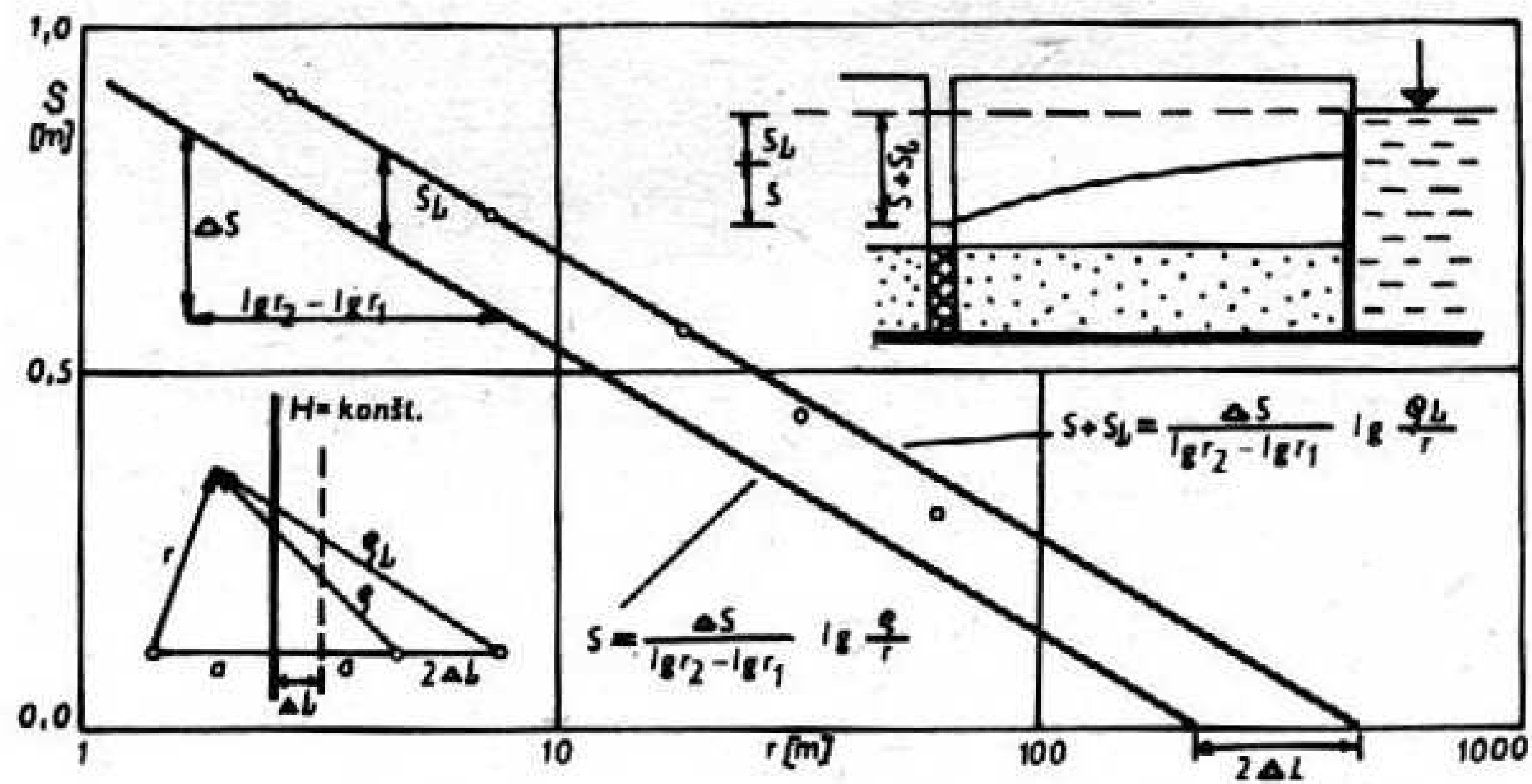
- srovnání známé vzdálenosti *L* a vzdálenosti *L* vypočítané z čerpacích zkoušek
- použití Forcheimerovy rovnice $$s = \frac{2{,}303 \cdot Q}{2 \cdot \pi \cdot T} \log\left(\frac{r_f}{r}\right) \qquad s = \frac{\Delta s}{\log r_2 - \log r_1} \log \frac{r_f}{r}$$
- po dosazení známých členů rovnice vypočítáme snížení pro ideální okrajovou podmínku
- teoretické snížení srovnáme se skutečným zjištěným při čerpací zkoušce
- pokud je okrajová podmínka neúplná, naměřené skutečné snížení nebude souhlasit s vypočítaným a bude větší, zvětšené bude o hodnotu s_L, což představuje doplňující hydraulický odpor okrajové podmínky.

__2. grafické určení doplňkové vzdálenosti:__

- výpočet z rovnice $$s + s_L = \frac{\Delta s}{\log r_2 - \log r_1} \log \frac{\rho_L}{r}$$

s je vypočítané ideální snížení a r_L je vzdálenost pozorovaného vrtu od imaginárního zrcadlově zobrazeného vrtu přes posunutou okrajovou podmínku a s_L je doplňkové snížení v důsledku neúplnosti okrajové podmínky

- nebo grafické určení ze semilogaritmického grafu *log r* proti *s*



3. numerické řešení doplňkové vzdálenosti

- výpočet doplňkové vzdálenosti $$\Delta d = \frac{1}{k_b} eth\left(\frac{k_b \cdot l}{2}\right)$$

kde *l* je šířka řeky a k_b je charakteristika odporové vrstvičky podle vztahu $$k_b = \sqrt{\frac{k_0}{b_0 \cdot T}}$$

- při velké šířce koryta platí zjednodušení $$\Delta d = \frac{1}{k_b} = \sqrt{\frac{T \cdot b_0}{k_0}}$$

- malé šířky koryt – komplikované

- po zjištění hodnoty koeficientu netěsnosti k_b určíme hodnoty k_0 a b_0 tak, aby hodnota součinitele kolmatace zůstala neměnná

např. součinitel kolmatace 3.10^{-6} s^{-1}

$k_0 = 3.10^{-6}$ m/s a $b_0 = 1$ m

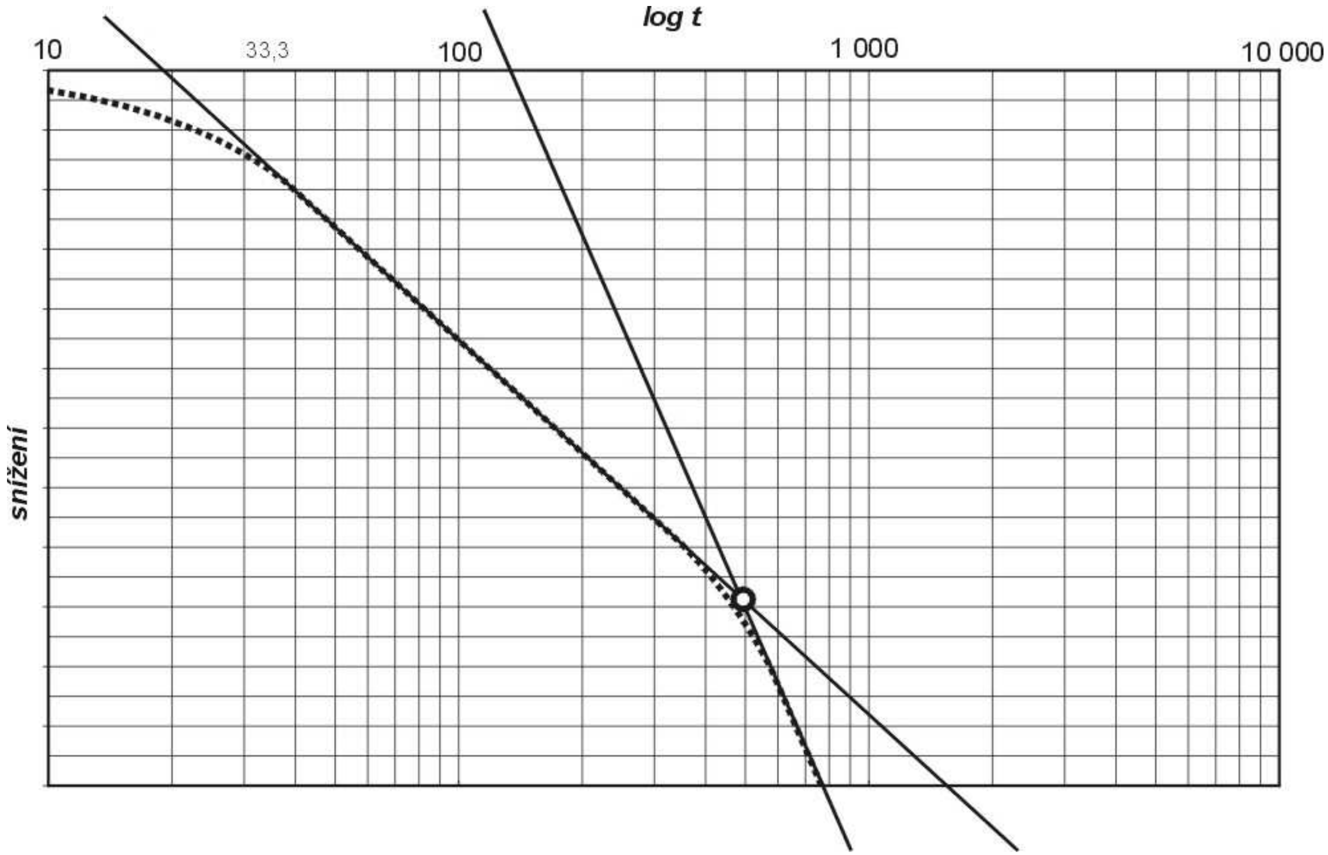
$k_0 = 3.10^{-7}$ m/s a $b_0 = 10$ m

NEPROPUSTNÁ HRANICE JAKO OKRAJOVÁ PODMÍNKA

způsoby vyhodnocení

- bilogaritmická metoda – typové křivky
- semilogaritmická metoda

SEMILOGARITMICKÉ ŘEŠENÍ



ideální případ - $$\Delta s_1 = 2\Delta s_2 = \frac{2{,}303 \cdot Q}{2 \cdot \pi \cdot T}$$

pro tento případ je postup řešení:

- vypočítáme hodnoty *T* a *S* z rovnic pro Jacobovu aproximaci
- odečteme čas t_i odpovídající souřadnicím inflexního bodu
- dosadíme do rovnice $$r_f = 1{,}5\sqrt{\frac{T \cdot t_i}{S}}$$

pro případ, kdy je vzdálenost *r* zanedbatelně malá proti vzdálenosti *L*

- platí zjednodušení $r_f = 2L$
- platí pro výpočet vzdálenosti okrajové podmínky rovnice $$L = 0{,}75\sqrt{\frac{T \cdot t_i}{S}}$$

$$t_i = 1{,}78\frac{L^2 \cdot S}{T}$$

- podmínka platí i pro čerpaný vrt – vzhledem k dodatečným snížením nelze zjistit *S* ani *L*

pro případ, kdy je pozorovací vrt na spojnici čerpaného a imaginárního vrtu (tj. na na kolmici čerpaného vrtu k ose okrajové podmínky)

- platí $r_f = 2L - r$

- výpočet vzdálenosti okrajové podmínky $L = \left(\frac{r}{2}\right)\sqrt{\left(\frac{t_i}{t_0}\right)} + \frac{r}{2}$

pro případ, kdy je pozorovací vrt na prodloužení spojnice čerpaného a imaginárního vrtu na opačnou stranu od čerpaného vrtu, než probíhá hranice

- platí $r_f = 2L + r$

- výpočet vzdálenosti okrajové podmínky $L = \left(\frac{r}{2}\right)\sqrt{\left(\frac{t_i}{t_0}\right)} - \frac{r}{2}$

pro případ, kdy je pozorovací vrt na přímce procházející čerpaným vrtem a rovnoběžné s nepropustnou hranicí

- platí $r_f = \sqrt{4L^2 + r^2}$

- výpočet vzdálenosti okrajové podmínky $L = \left(\frac{r}{2}\right)\sqrt{\left(\frac{t_i}{t_0}\right) - 1}$

pro případ pozorovacího vrtu, jehož spojnice s odběrovým vrtem je odchýlena o libovolný úhel *Q* od kolmice spuštěné z odběrového vrtu na přímkovou boční hranici

- určení vzdálenosti r_f podle vztahu $r_f = \sqrt{4 \cdot L^2 + r^2 - 4 \cdot L \cdot r \cdot \cos\Theta}$

obecné určení vzdálenosti r_f ze semilogaritmického grafu

- ze semilogaritmického grafu *s* (osa y) proti *log t* (osa x)

- v grafu se vyhledají dvě stejné hodnoty snížení pro 1. a 2. přímkový úsek grafu

- odečtou se časy t_1 a t_2 od začátku čerpací zkoušky odpovídající tomuto snížení

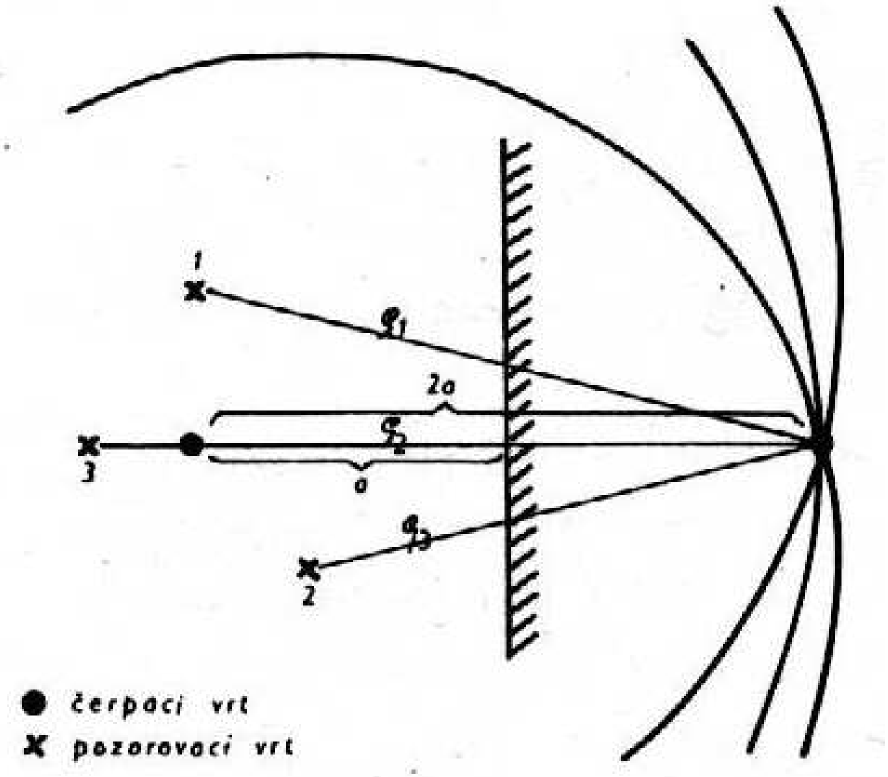
- pokud platí, že $$u_1 = \frac{r_1^2 \cdot S}{4 \cdot T \cdot t} \qquad u_2 = \frac{r_f^2 \cdot S}{4 \cdot T \cdot t}$$

- potom pro stejné hodnoty snížení platí $$u_1 = u_2$$

- a potom $$r_f = r\left(\frac{t_2}{t_1}\right)^{\frac{1}{2}}$$

URČENÍ POLOHY BOČNÍ HRANICE

- polohu hranice o známém směru určíme graficky podle výsledků jednoho pozorovacího vrtu
- pokud neznáme směr hranice, k určení průběhu je potřeba minimálně 2, ideálně 3 pozorovací vrty



fiktivní vrt leží na průsečíku kružnic a okrajová podmínka v polovině vzdálenosti mezi čerpaným a imaginárním vrtem, osa okrajové podmínky je kolmá na tuto spojnici

Vzdálenost okrajové podmínky
- stanoví se „hydraulicky efektivní vzdálenost“
- např. vyklínění, faciální změny, vertikálně ukloněná hranice – linie, na které je pokles mocnosti zvodněné vrstvy spolu se současným poklesem propustnosti tak velký, že vyvolá efekt nepropustné okrajové podmínky