

# **ZÁKLADY HYDROGEOLOGIE**

***V. PŘEDNÁŠKA***

# REGIONÁLNÍ PROUDĚNÍ PODZEMNÍ VODY

## proudové sítě

- grafickým řešením Laplaceovy rovnice
- řešení ve 2-D zobrazení ( $x - y$  nebo  $x - z$ )

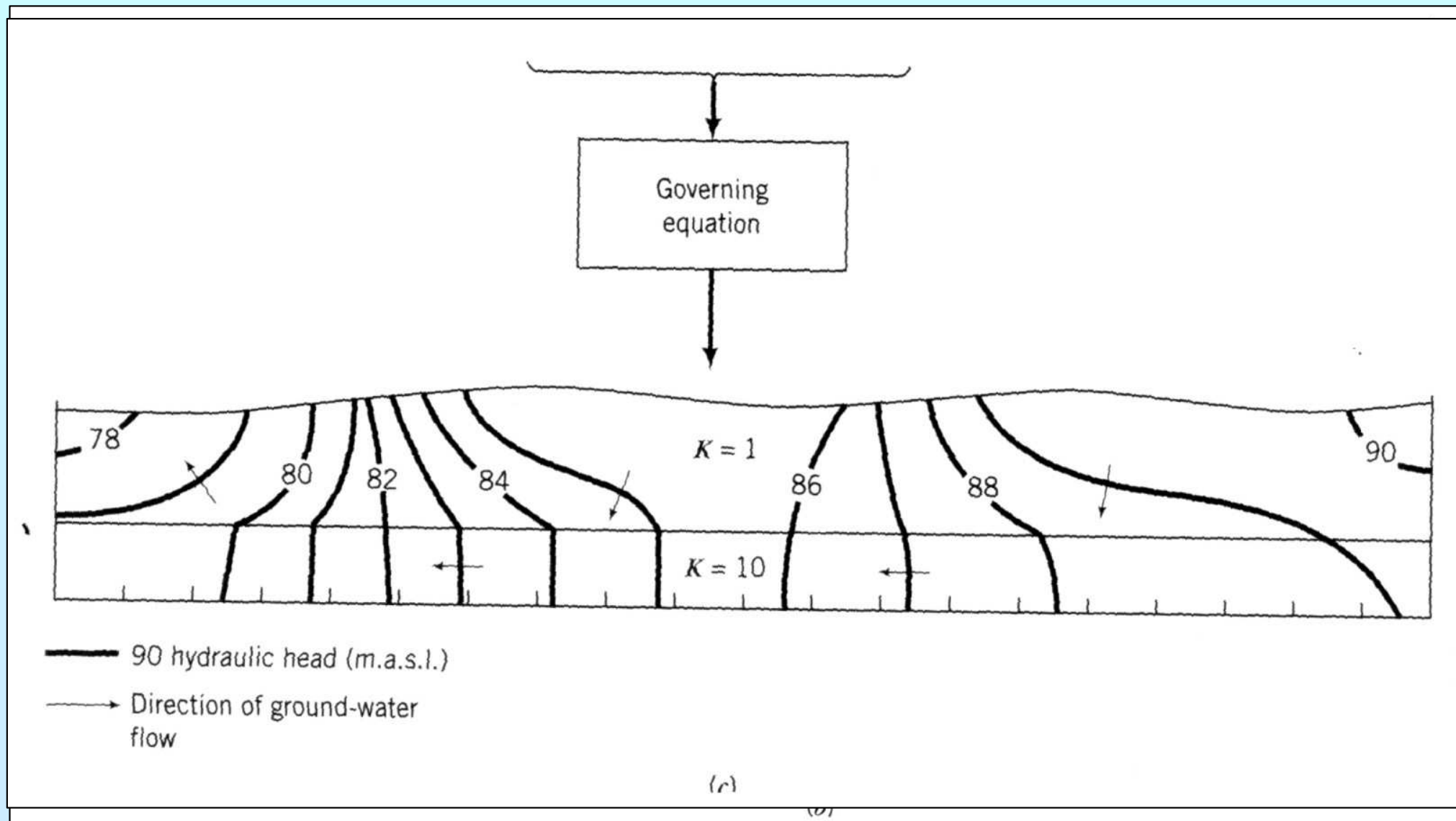
proudnice – linie paralelní se směrem proudění podzemní vody

equipotenciály – linie spojující body se stejnou hodnotou hydraulické výšky

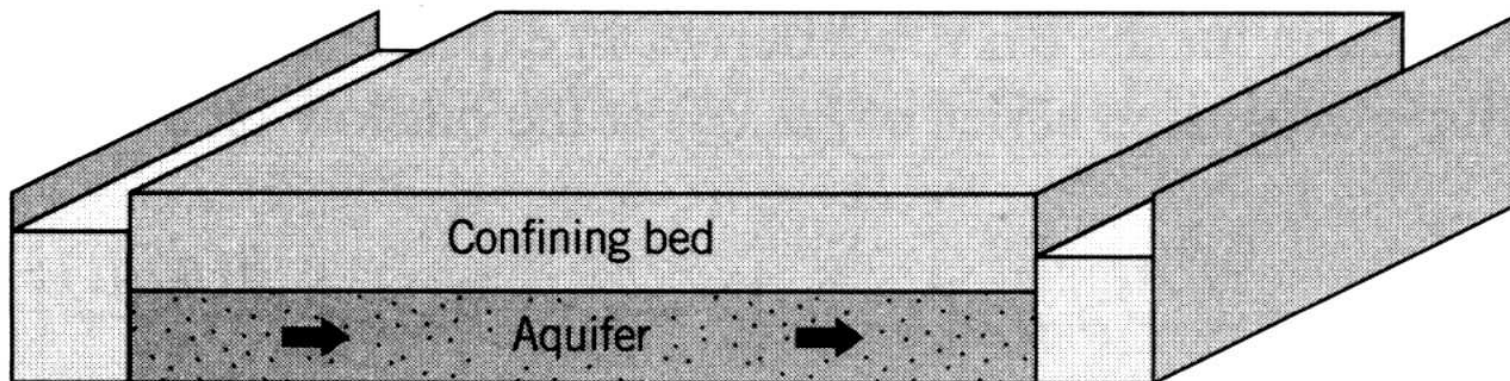
## *metody konstrukce*

- grafické – metoda pokusu a omylu (trial and error)
- numerické počítačové modelování

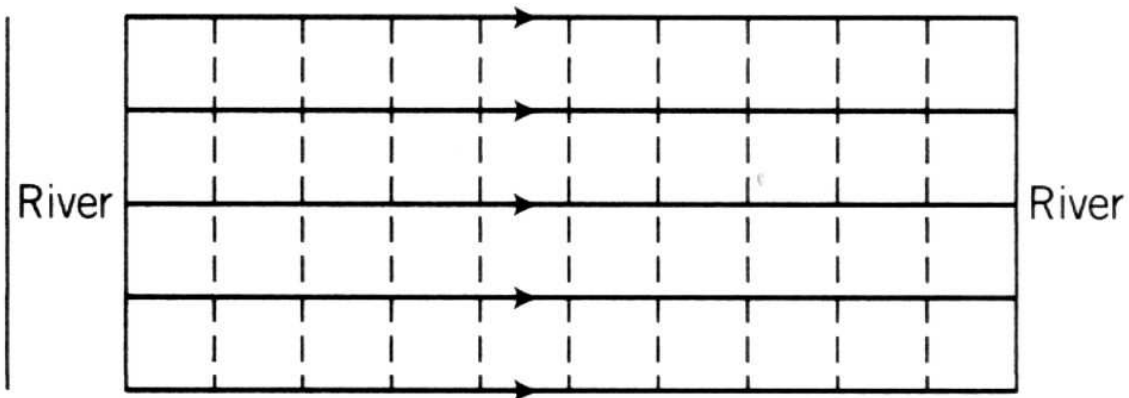
# 1. krok – analýza hydrogeologických poměrů ve struktuře a jejich zjednodušení



příklad konstrukce proudové sítě



(a)



—→ Flow line  
- - - Equipotential line

(b)

## HOMOGENNÍ A IZOTROPNÍ ZVODNĚNÉ PROSTŘEDÍ

*proudová síť je grafickým řešením Laplaceovy rovnice*

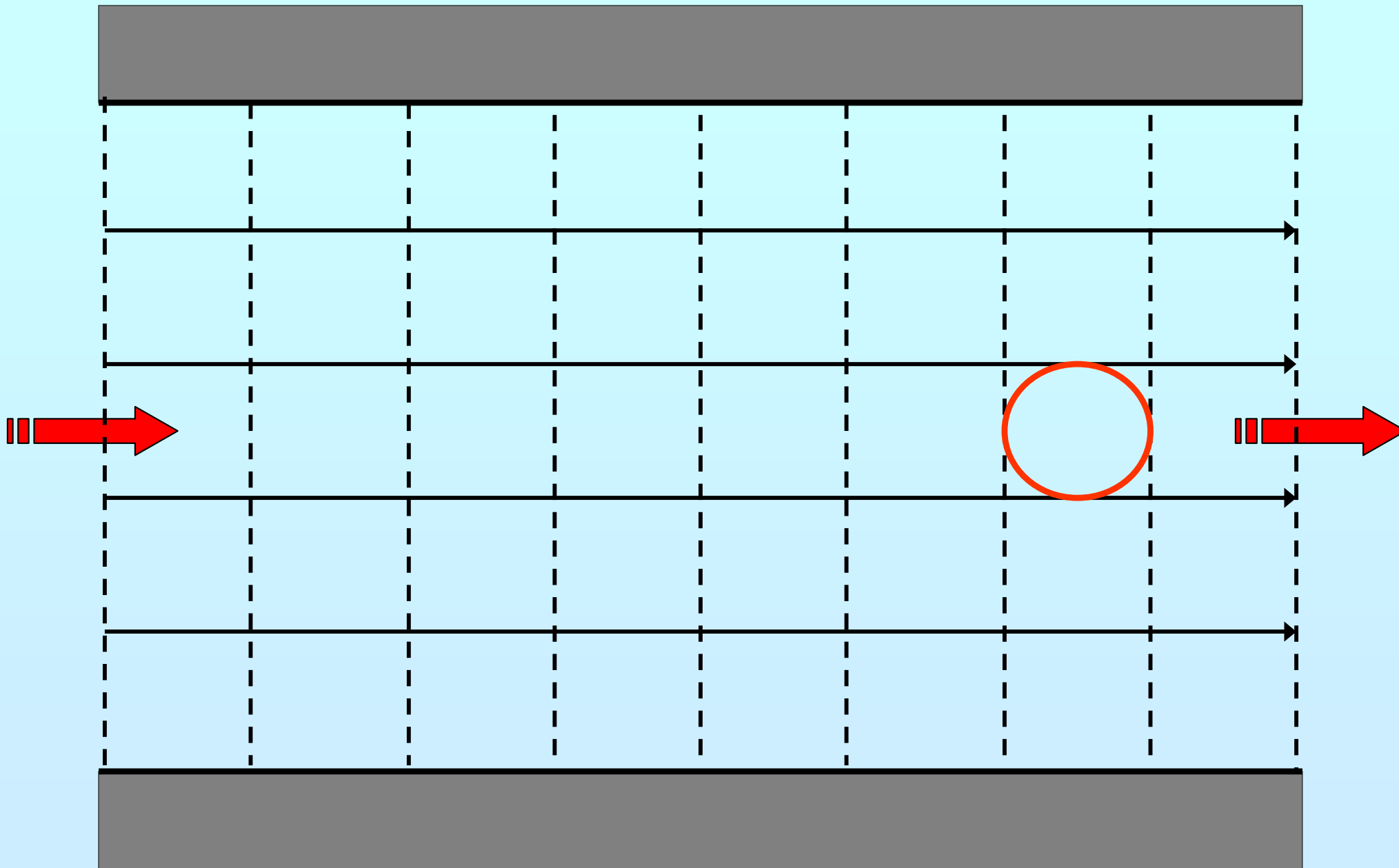
- proudnice jsou kolmé na equipotenciály
- je-li pokles hydraulické výšky mezi equipotenciálami konstantní, průsečíky proudnic a equipotenciál formují zakřivené čtvercové plochy
- čtverce mají zakřivené strany a uvnitř čtverců lze konstruovat kružnice, které jsou v místech kontaktu se čtverci na ně kolmé
- objem vody protékající horninou mezi dvěma přilehlými proudnicemi je konstantní
- uvnitř proudové sítě je konstantní objem protékající vody
- počet trubic vymezených proudnicemi musí být v celé síti konstantní
- pokles hydraulické výšky mezi dvěma přilehlými equipotenciálami je stejný

## DOPORUČENÝ POSTUP KONSTRUKCE PROUDOVÉ SÍTĚ

1. získejte co nejvíce informací ze správně zkonstruovaných proudových sítí řešících podobný problém a proudové sítě přizpůsobte vašim podmínkám
2. nejprve zkonstruujte proudnice tak, aby jste měli 4 – 5 proudových trubic přes celou doménu
3. zkonstruujte kompletní proudovou síť tak, aby byla přibližně správná v rámci celé domény – zanedbejte vliv detailů
4. vyhýbejte se příliš častým přímkovým průběhům proudnic a equipotenciál, začněte s konstrukcí proudové sítě právě v oblastech paralelního průběhu linií
5. pokud je doména symetrická, postačí zkonstruovat proudovou síť v její části – zbytek je jejím zrcadlovým obrazem
6. po celou dobu konstrukce pamatujte, že velikosti čtverců se mění postupně – všechny změny jsou pozvolné, v místech zakřivení se kružnice uvnitř čtverců mění na elipsy

# ZÁKLADNÍ PRAVIDLA KONSTRUKCE PROUDOVÉ SÍTĚ

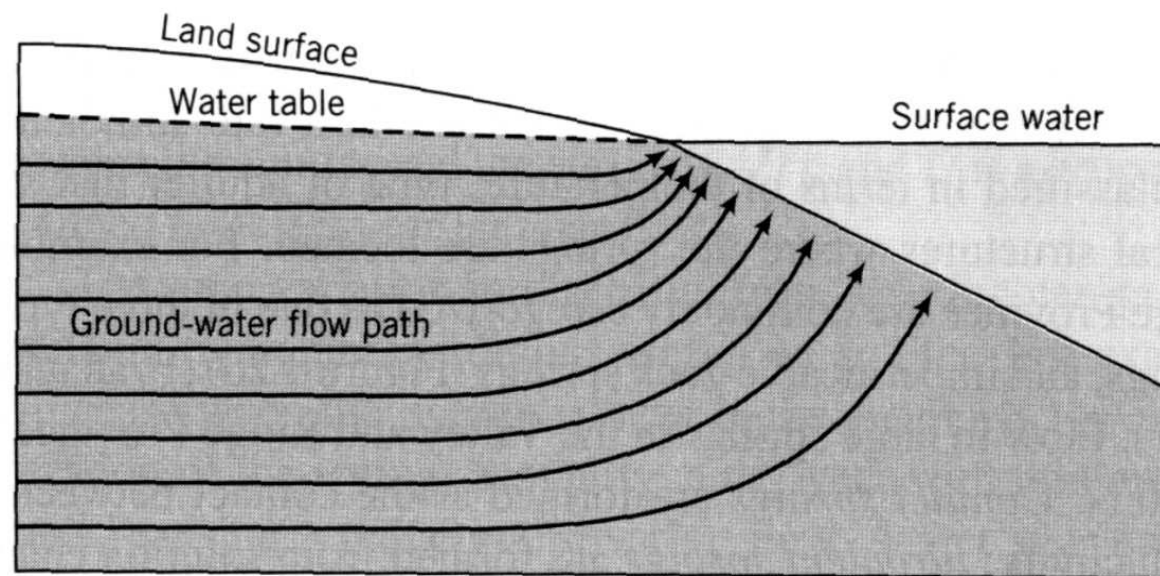
1. okrajová podmínka typu  $q=0$  je proudnicí
  - proudnice konstruovaná v těsné blízkosti okrajové podmínky je s ní paralelní
  - eqipotenciály jsou na tuto okrajovou podmínku kolmé
2. hladina podzemní vody je proudnicí
  - pokud není doplňování, odvodnění ani ET
  - proudnice konstruovaná v těsné blízkosti hladiny je s ní paralelní
3. hladina podzemní vody není proudnicí ani eqipotenciálou
  - platí zejména v zónách odvodnění a doplňování
  - proudnice mohou být na hladinu téměř kolmé
4. ukončení proudnic
  - čerpané vrty, místa odvodnění, odvodňující vodoteče
5. počátek proudnic
  - infiltrované vrty, doplňující vodoteče
6. přírodní systémy proudění
  - proudnice začínají a končí v oblastech doplňování a odvodnění



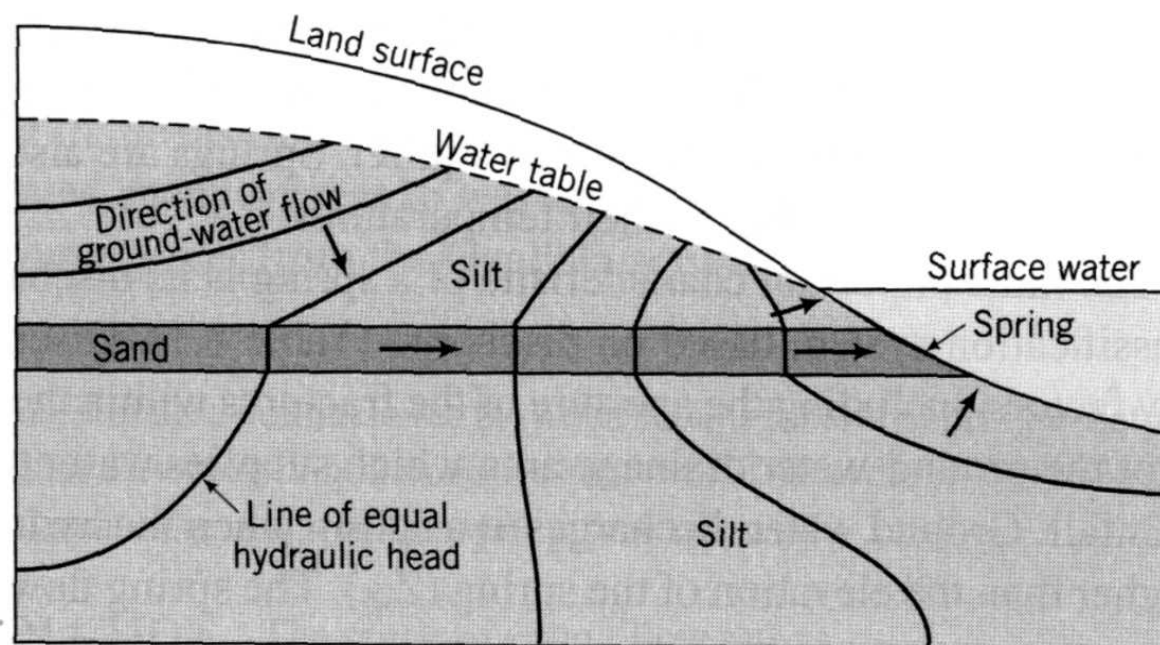


charakteristický  
průběh proudnic  
v oblastech odvodnění

charakteristický  
průběh proudnic  
v oblastech doplňování  
a odvodnění

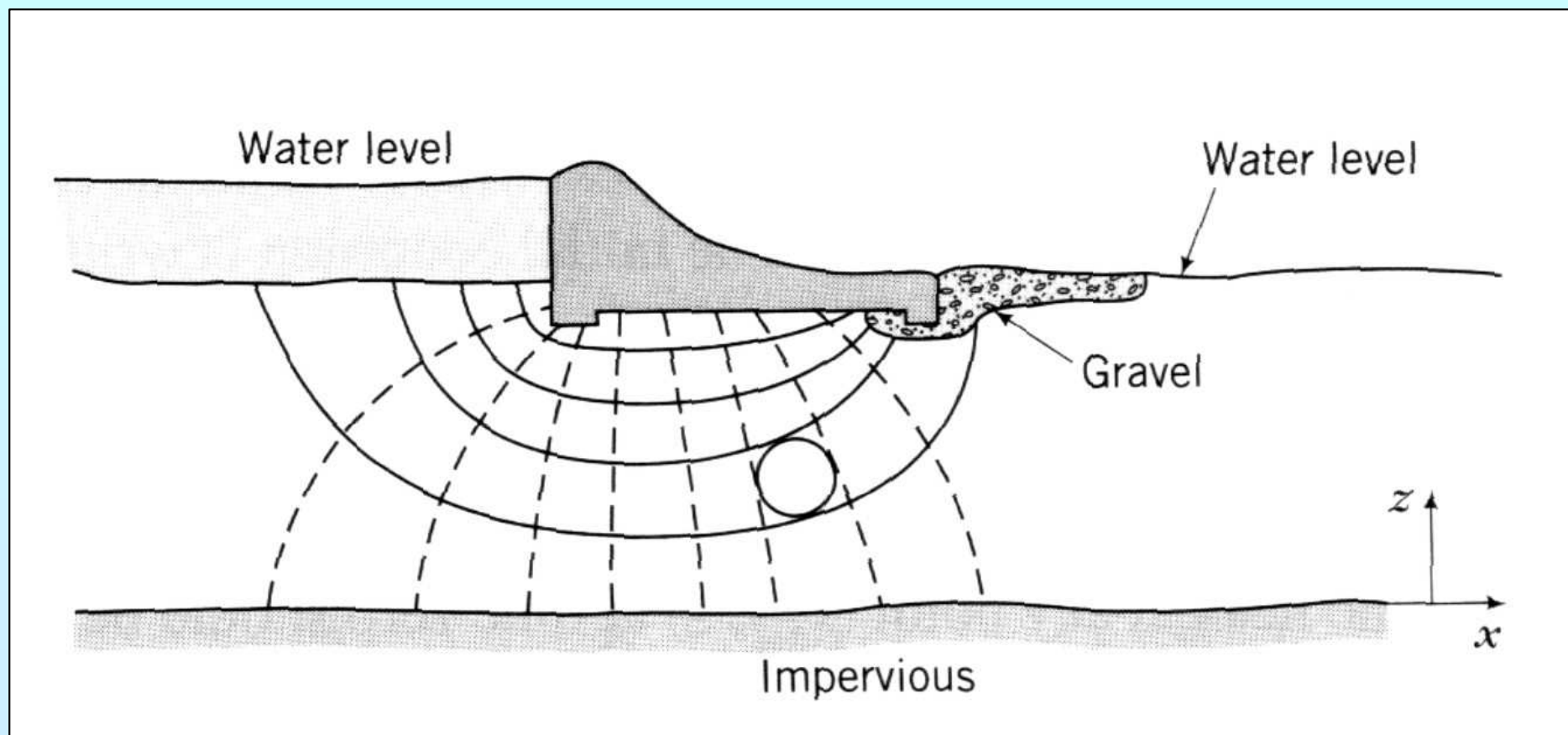


(a)



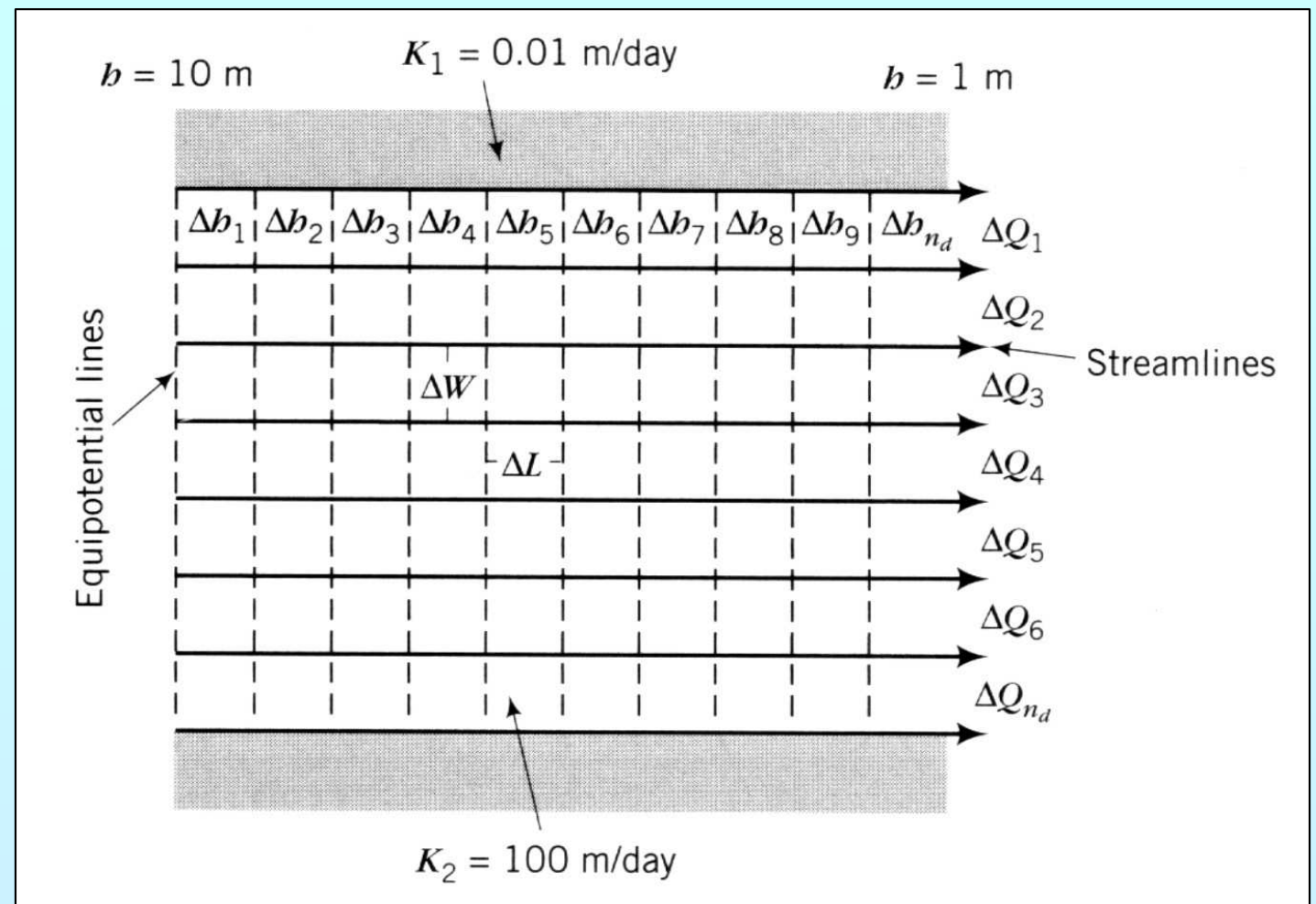
(b)

příklad konstrukce proudové sítě  
pod hrází



„čtverce“ jsou zakřivené

určení průtoku  
mezi dvěma  
přilehlými  
equipotenciálami  
v rámci jedné  
proudové trubice  
(2-D, x-y)



$$\Delta Q = T \Delta h \frac{\Delta W}{\Delta L}$$

$\Delta Q$  průtok

$T$  transmisivita

$\Delta h$  pokles hydraulické výšky mezi  
dvěma equipotenciálami

$\Delta W$  šířka proudové trubice

$\Delta L$  vzdálenost mezi dvěma  
equipotenciálami

# určení celkového průtoku doménou zobrazenou pomocí proudové sítě

(2-D,  $x$ - $y$ )

platí pouze tehdy, pokud počet proudových trubic a  
počet poklesů hydraulických výšek  
je v rámci proudové sítě v doméně konstantní

$$Q = \frac{n_f}{n_d} T \Delta H$$

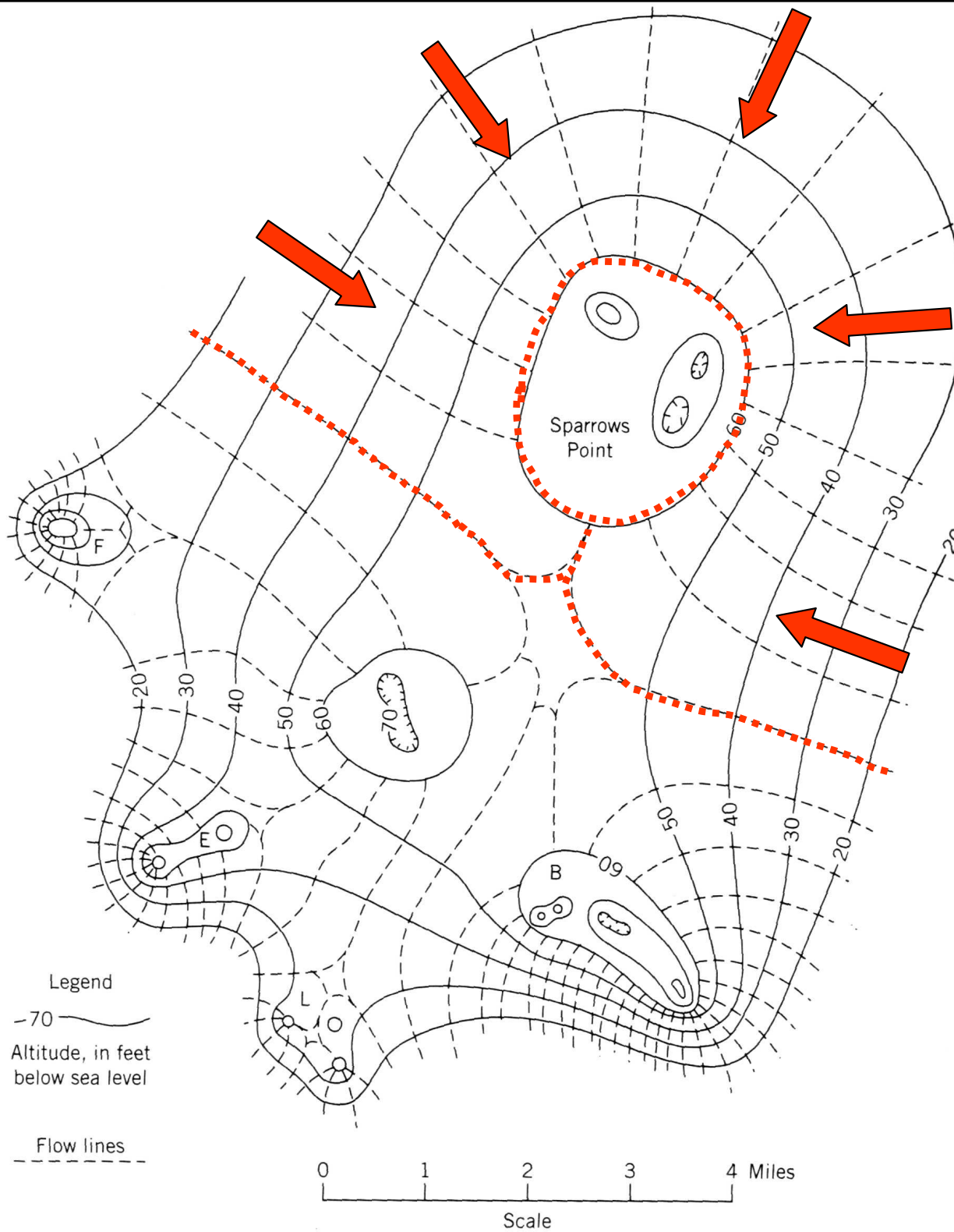
$Q$  průtok

$T$  transmisivita

$n_f$  celkový počet proudových trubic

$n_d$  celkový počet poklesů  
hydraulické výšky

$\Delta H$  celkový pokles hydraulické výšky



$$Q = \frac{n_f}{n_d} T \Delta H$$

$$n_f = 15$$

$$n_d = 3$$

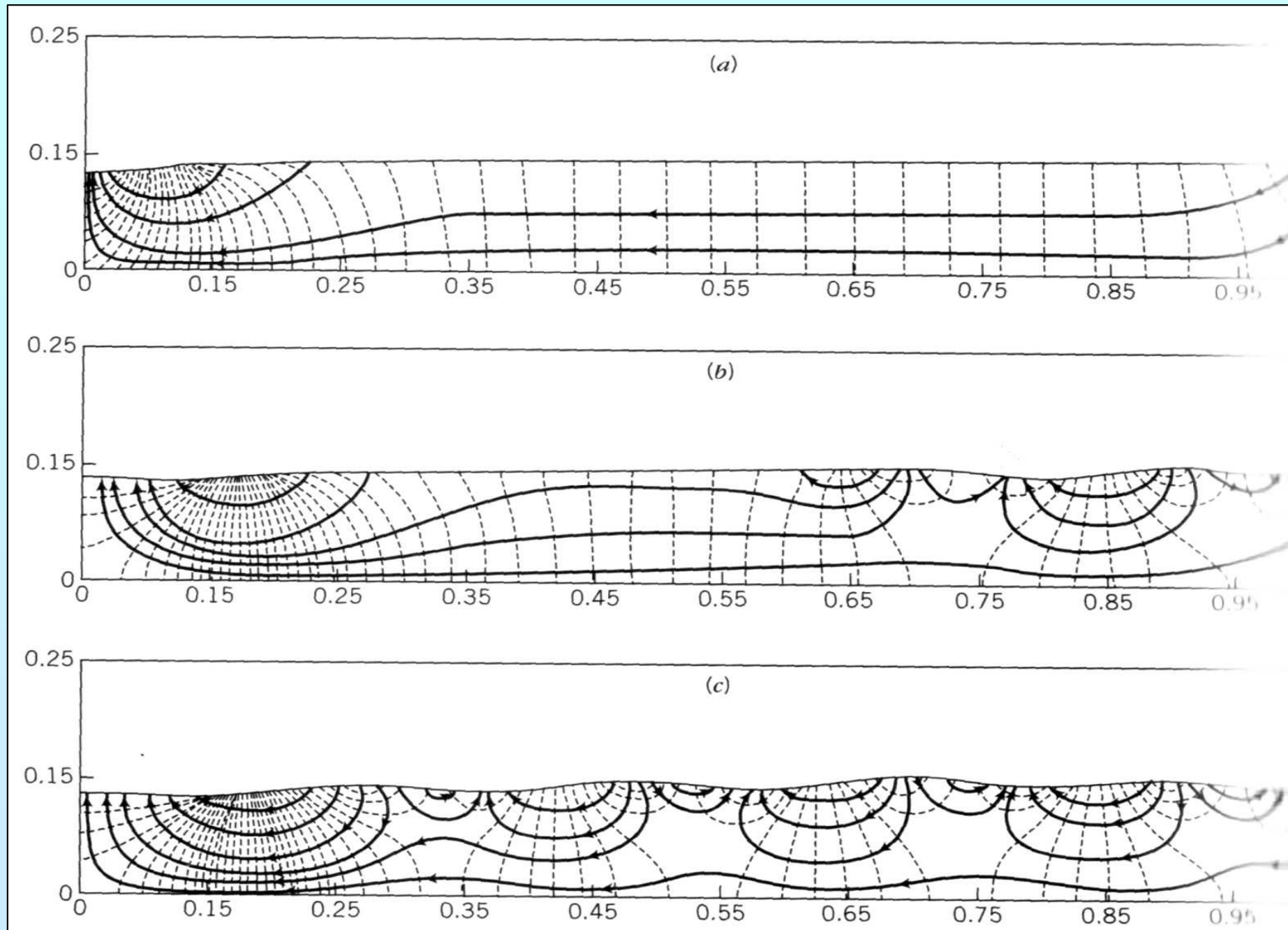
$$\Delta H = 30 \text{ ft} = 9,1 \text{ m}$$

$$T = 7,2 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s} = 620 \text{ m}^2/\text{d}$$

$$Q = \frac{15}{3} 7,2 \cdot 10^{-3} \cdot 9,1$$

$$Q = 0,3276 \text{ m}^3 / \text{s}$$

# Numerické řešení rovnic proudění (Freeze a Witherspoon 1967)



## NEHOMOGENNÍ PROSTŘEDÍ

- equipotenciály a proudnice tvoří čtverce, ale obdélníky
- nejjednodušší případ – změna hydraulické vodivosti v celé průtočné šířce domény

$$\Delta Q = T_1 \Delta h_1 \frac{\Delta W_1}{\Delta L_1} = T_2 \Delta h_2 \frac{\Delta W_2}{\Delta L_2}$$

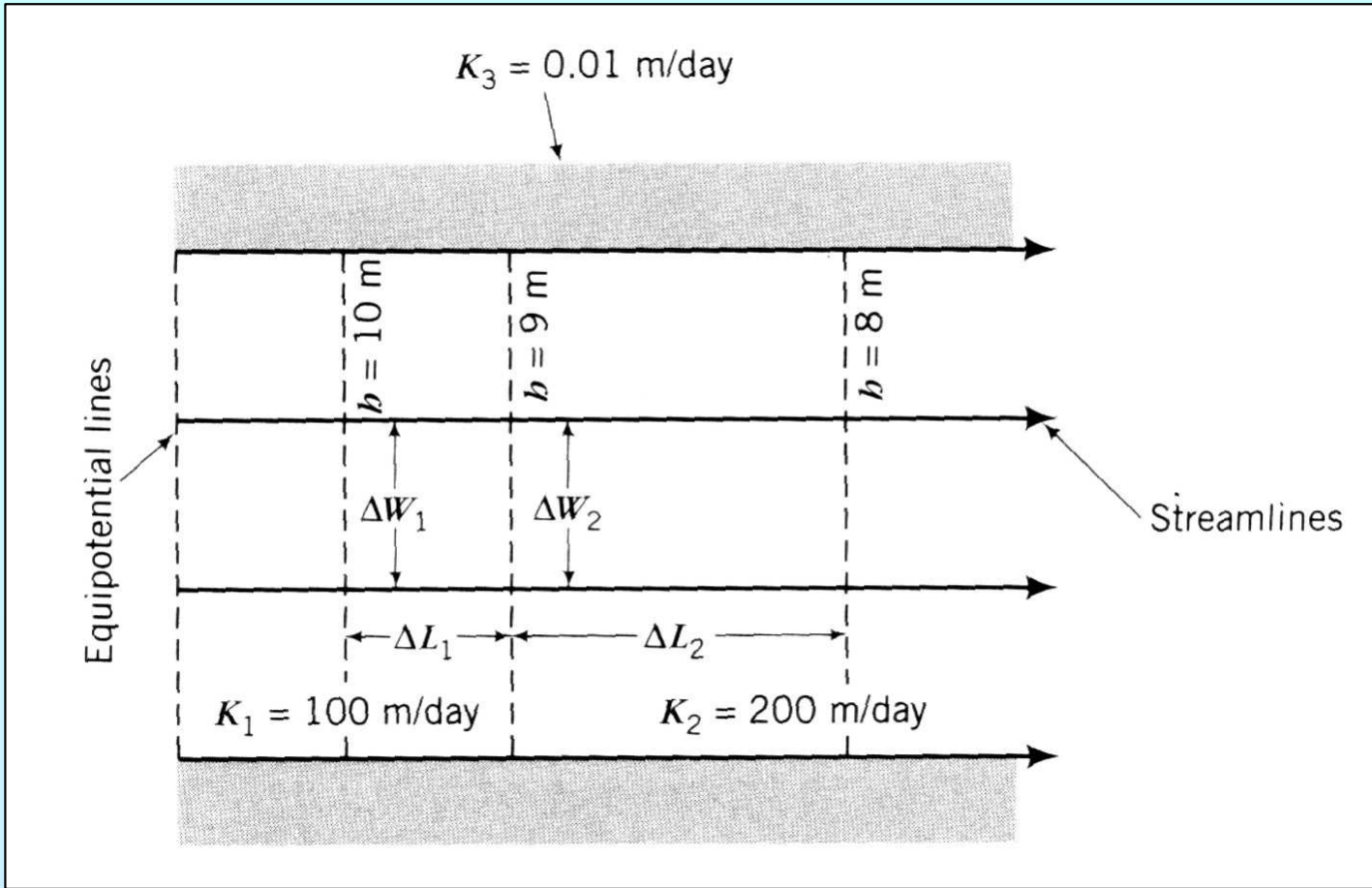
rovnice pro 2-D, x-y

platí, že průtok  $Q$  je celou proudovou sítí konstantní

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{\Delta L_1 \cancel{\Delta W_2}}{\Delta L_2 \cancel{\Delta W_1}}$$

je-li  $W$  konstantní

# deformace čtverců proudové sítě v nehomogenním prostředí



$k_1$	100 m/d
$k_2$	200 m/d
$\Delta W$	10 m
$\Delta L_1$	10 m
$b$	50 m

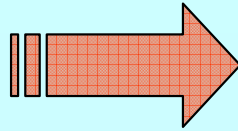
$$\Delta Q = T_1 \Delta h_1 \frac{\Delta W_1}{\Delta L_1} \quad \Rightarrow \quad \Delta Q = (100 \cdot 50) \cdot 1 \cdot \frac{10}{10} = 5000 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{\Delta L_1 \Delta W_2}{\Delta L_2 \Delta W_1} \quad \Rightarrow \quad \Delta L_2 = \frac{T_2}{T_1} \Delta L_1 = \frac{(200 \cdot 50)}{(100 \cdot 50)} 10 = 20 \text{ m}$$

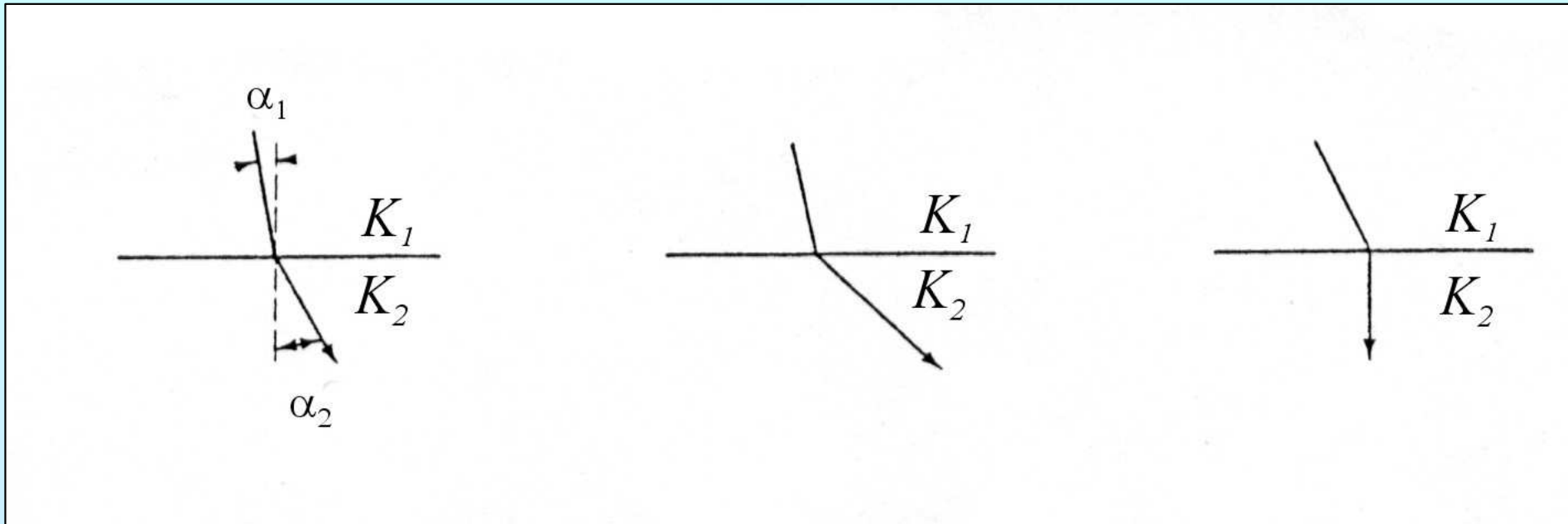


## Proudění v nehomogenním prostředí

- refrakce proudnic
- analogie lomu světla



$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{\tan \alpha_1}{\tan \alpha_2}$$



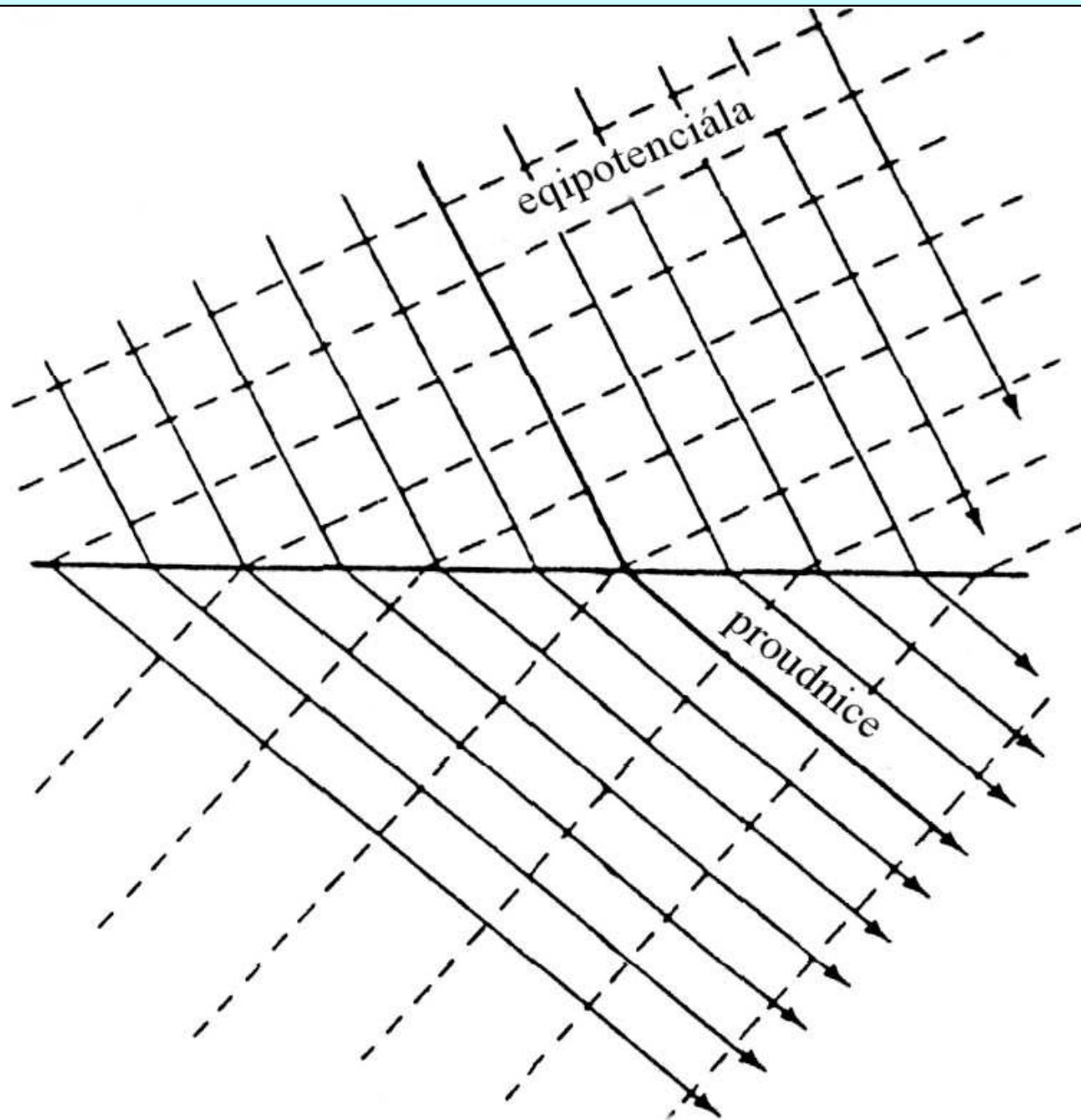
*obecně:*

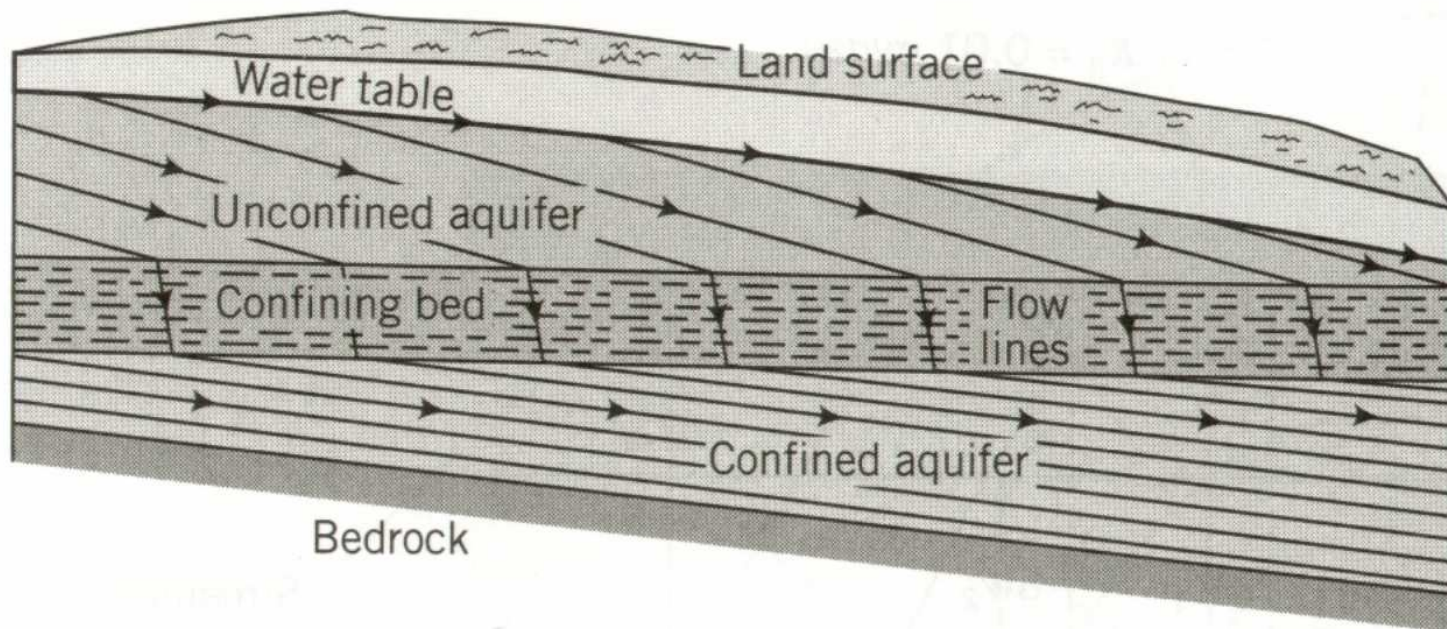
$k_1 > k_2$  ... ve spodní vrstvě je proudnice svislejší

$k_1 < k_2$  ... ve spodní vrstvě se proudnice více uklání k hranici

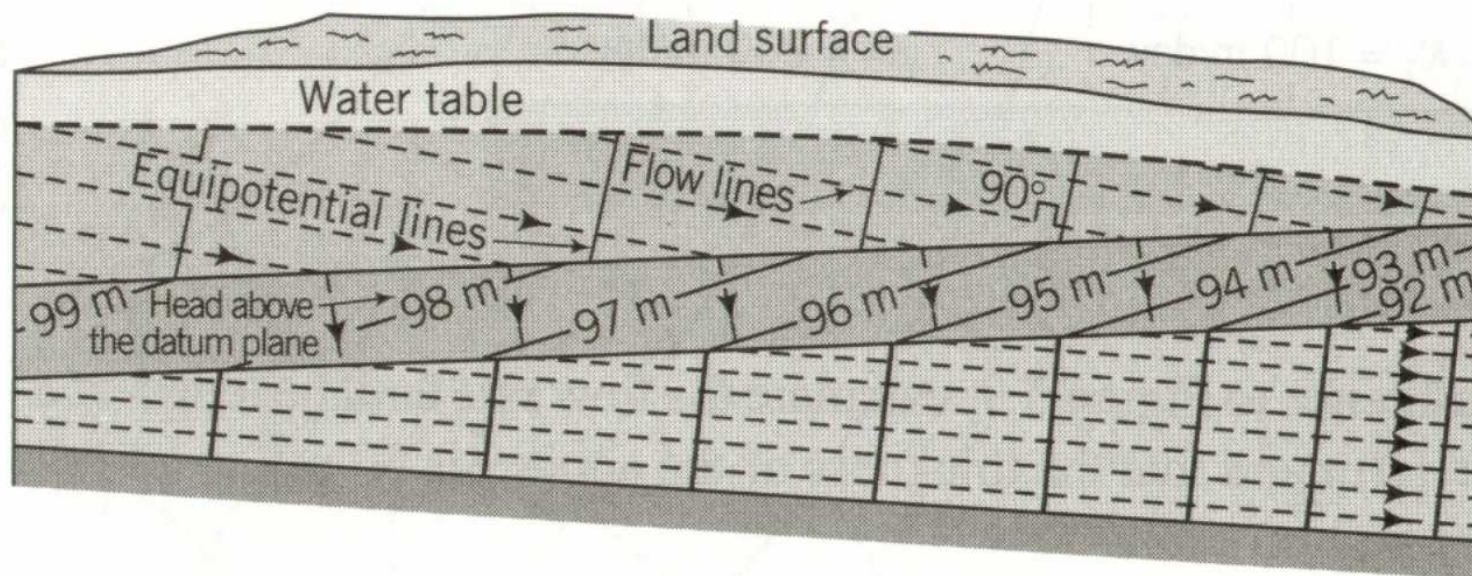
$k_1 \gg k_2$  ... ve spodní vrstvě jsou proudnice svislé (z kolektoru do izolátoru)

při refrakci proudnic se mění i průběh equipotenciál





(a)



(b)

příklad  
refrakce  
proudnic a  
equipotenciál  
ve struktuře  
s napjatou a  
volnou zvodní  
oddělenými  
poloizolátorem

propustnosti jednotlivých hornin se v těchto případech vyjadřují  
relativní propustností  $K$

*postup:*

- hydraulická vodivost nejméně propustné horniny je rovna  $K = 1$
- relativní propustnosti ostatních hornin jsou rovny podílům příslušných hydraulických vodivostí a hydraulické vodivosti nejméně propustné horniny

---

$$k_1 = 1 \times 10^{-4} \text{ m/s} \quad \Rightarrow \quad K_1 = 100$$

---

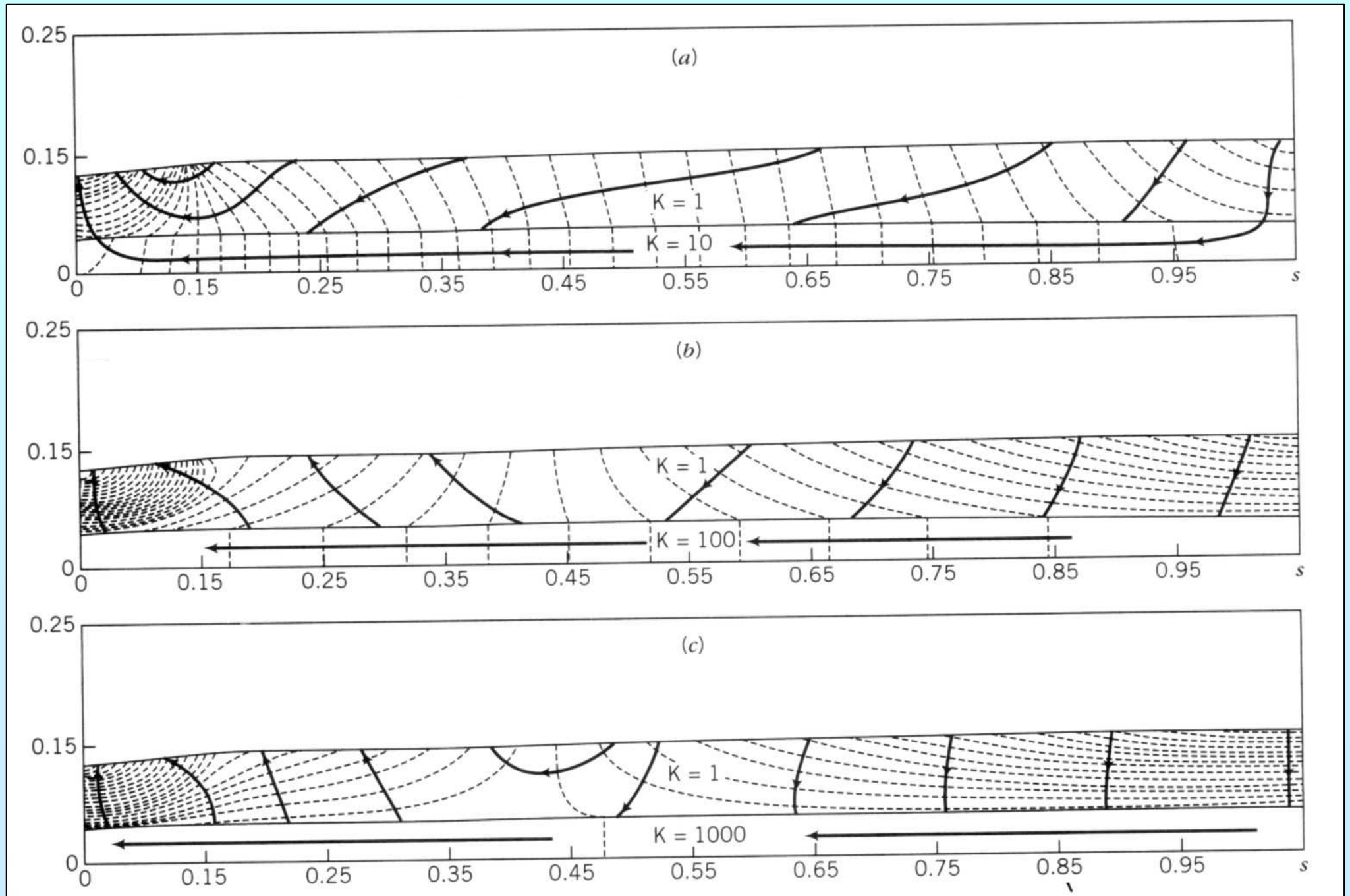
$$k_2 = 1 \times 10^{-6} \text{ m/s} \quad \Rightarrow \quad K_2 = 1$$

---

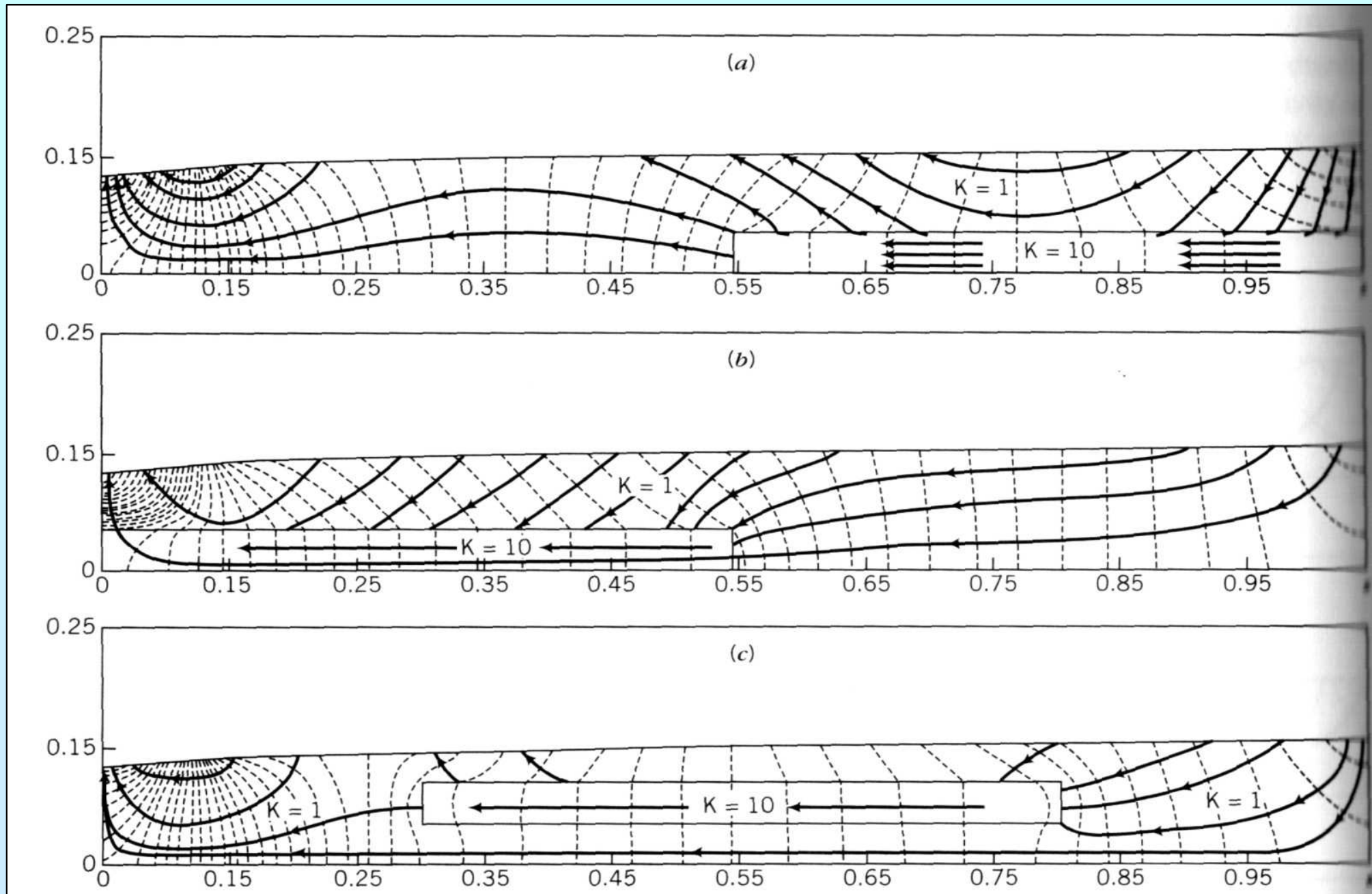
$$k_3 = 2 \times 10^{-5} \text{ m/s} \quad \Rightarrow \quad K_3 = 20$$

---

# vliv propustnější vrstvy na proudění podzemní vody



efekt hornin s vyšší hydraulickou vodivostí – drenážní funkce

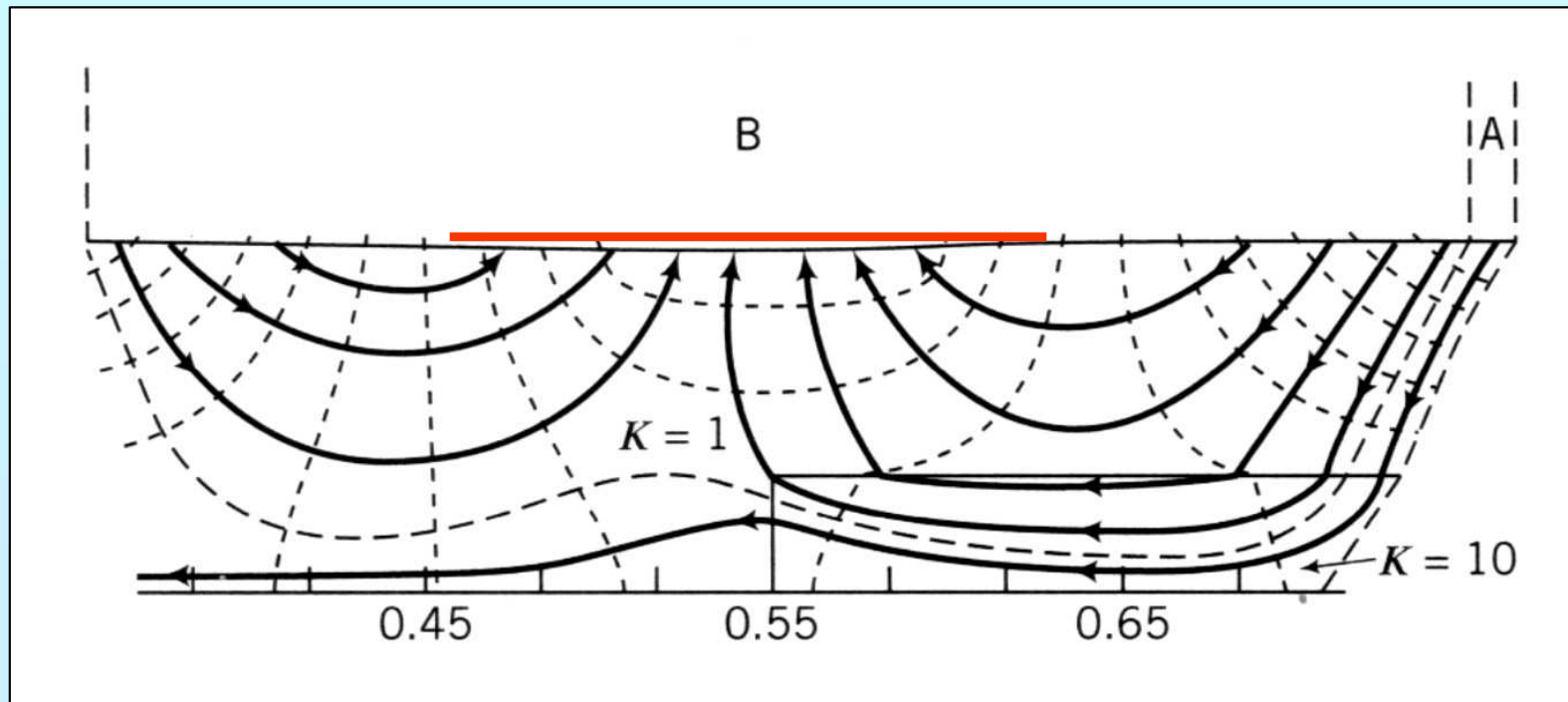


řešení průtoků v 2-D,  $x$ - $z$

$$Q = \frac{n_f}{n_d} k \Delta H$$

vzorec platí pro jednotkovou  
mocnost struktury (1 m)

příklad výpočtu odtoku (odvodnění)  $Q$  části struktury



$$n_f = 8$$

$$n_d = 1$$

$$\Delta H = 6,1 \text{ m}$$

$$k_l = 0,25 \text{ m/d}$$

$$Q = \frac{8}{1} \cdot 0,25 \cdot 6,1 = 12,2 \text{ m}^3/\text{d}$$

# ANIZOTROPNÍ PROSTŘEDÍ

proudnicе nemusí protínat equipotenciály v pravých úhlech

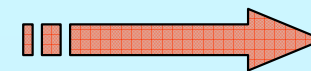
## 1. hlavní směr anizotropie je shodný se směrem proudění

- proudnicе a equipotenciály svírají pravý úhel

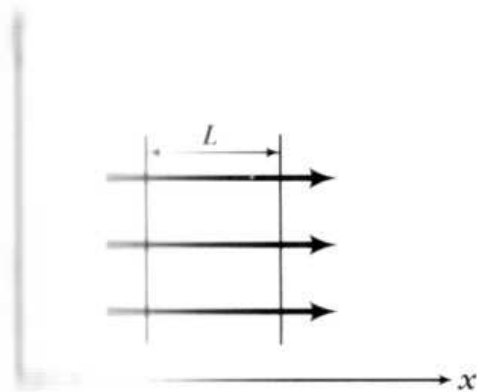
## 2. směr anizotropie není shodný se směrem proudění

- proudnicе a equipotenciály nesvírají pravý úhel

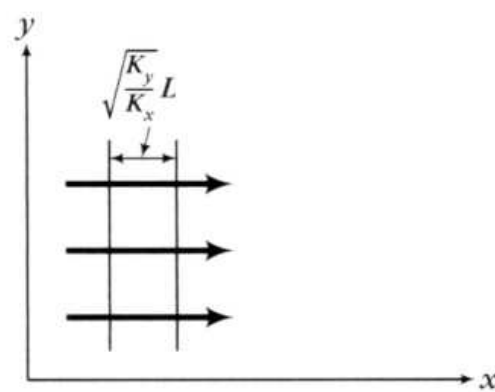
- transformace proudové sítě pomocí vztahu



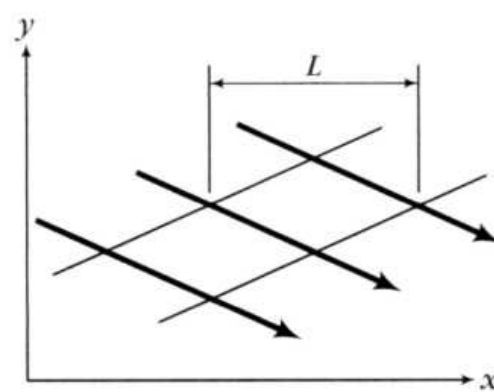
$$\sqrt{\frac{K_y}{K_x}} L$$



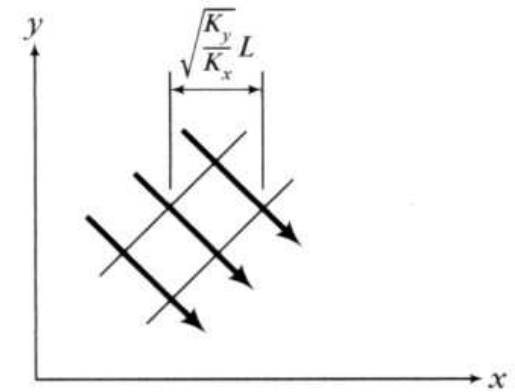
(a)



(b)



(c)



(d)