

ZÁKLADY HYDROGEOLOGIE

V. PŘEDNÁŠKA

REGIONÁLNÍ PROUDĚNÍ PODZEMNÍ VODY

proudové sítě

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

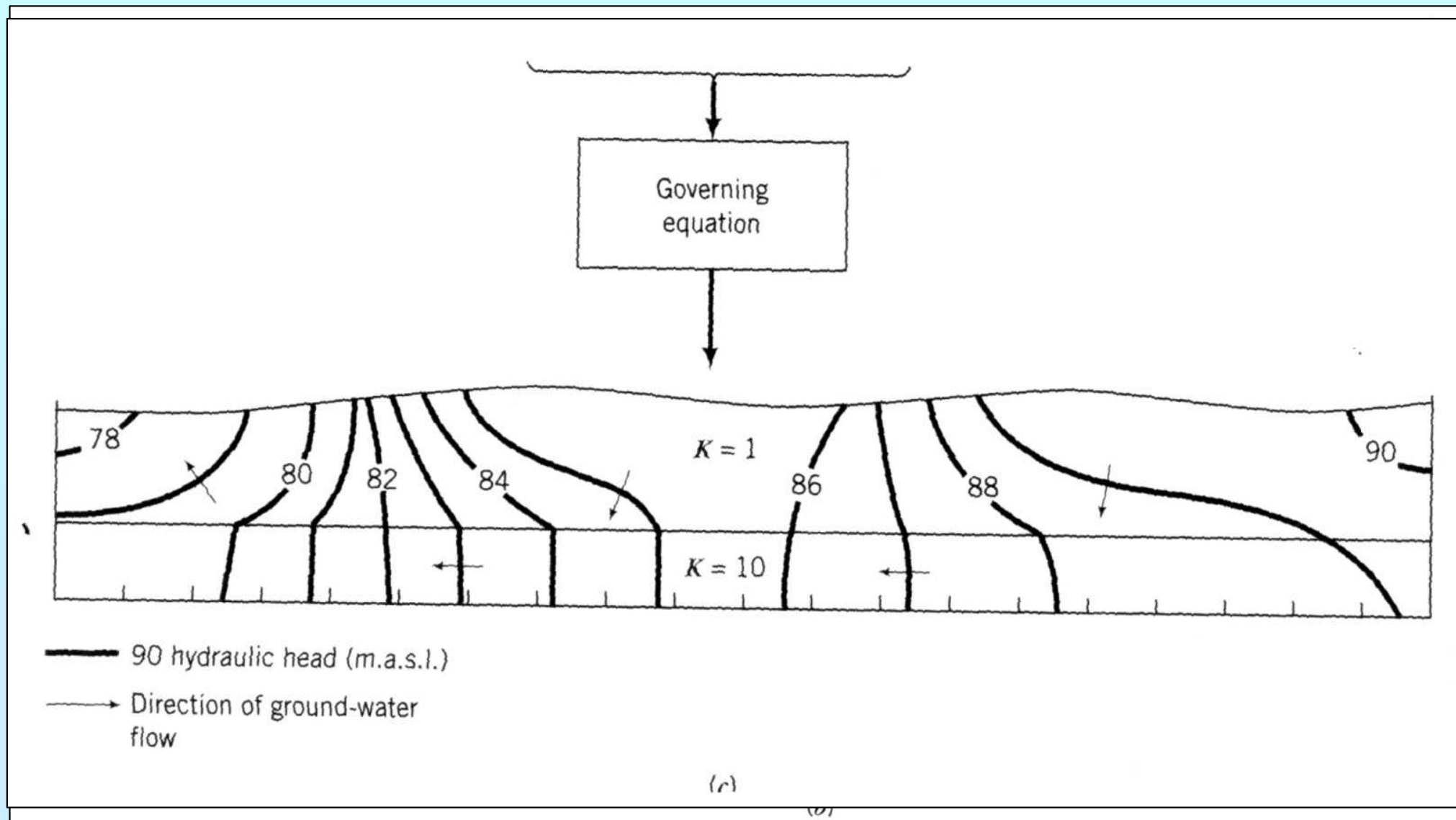
proudnice – linie paralelní se směrem proudění podzemní vody

equipotenciály – linie spojující body se stejnou hodnotou hydraulické výšky

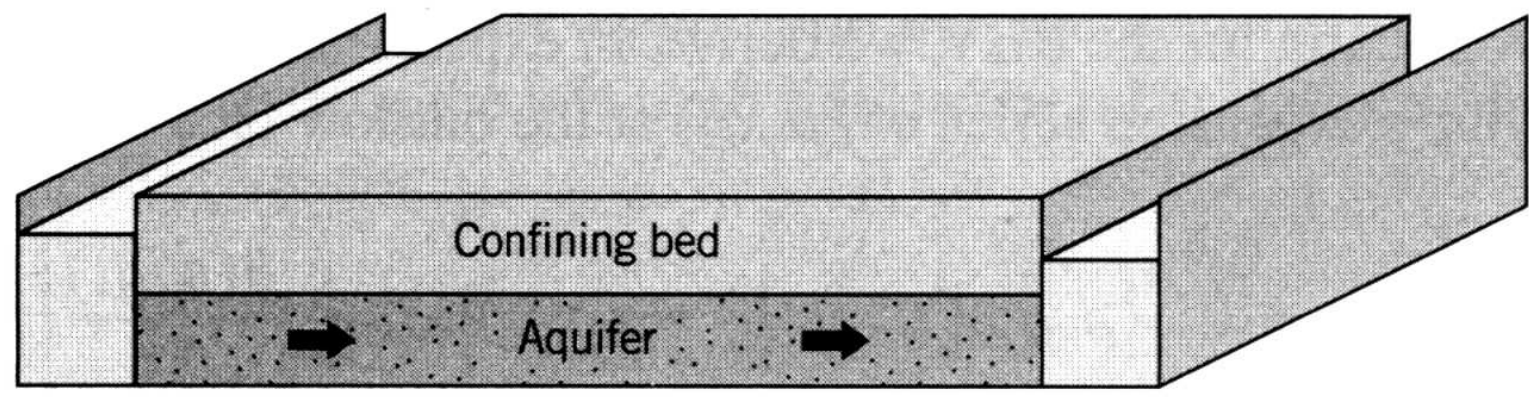
metody konstrukce

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

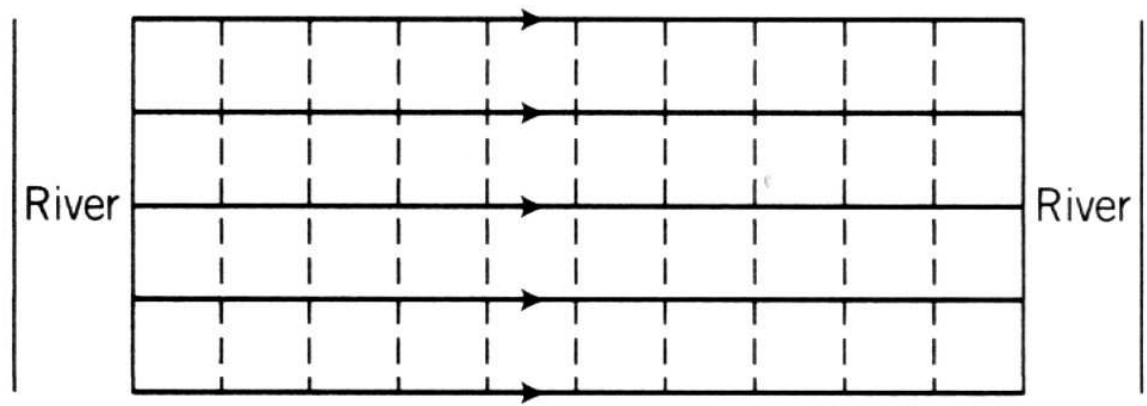
1. krok – analýza hydrogeologických poměrů ve struktuře a jejich zjednodušení



příklad konstrukce proudové sítě



(a)



→ Flow line
--- Equipotential line

(b)

HOMOGENNÍ A IZOTROPNÍ ZVODNĚNÉ PROSTŘEDÍ

proudová síť je grafickým řešením Laplaceovy rovnice

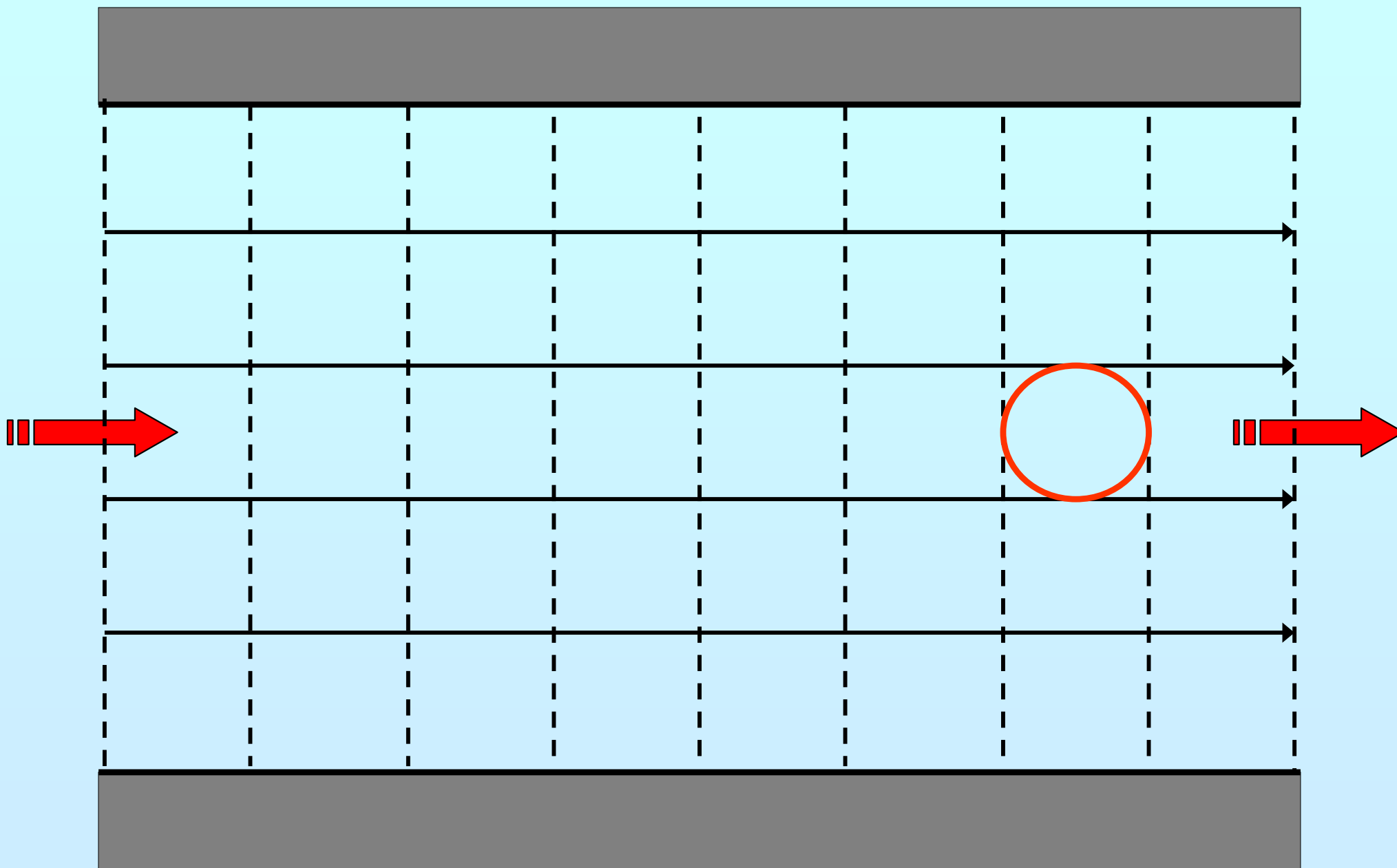
- proudnice jsou kolmé na equipotenciály
- je-li pokles hydraulické výšky mezi equipotenciálami konstantní, průsečíky proudnic a equipotenciál formují zakřivené čtvercové plochy
- čtverce mají zakřivené strany a uvnitř čtverců lze konstruovat kružnice, které jsou v místech kontaktu se čtverci na ně kolmé
- 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

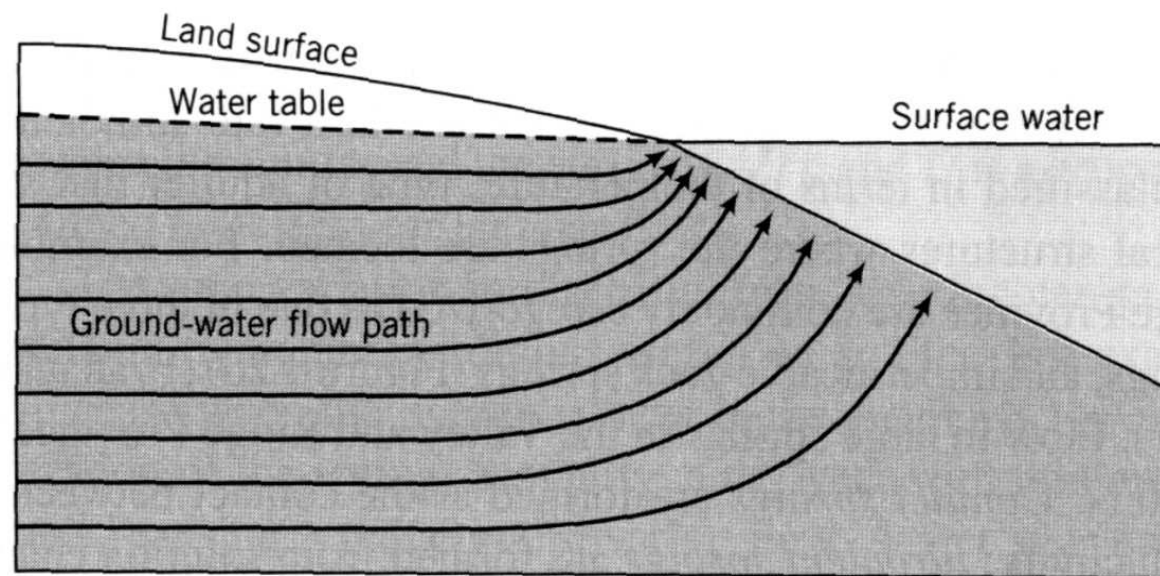
ZÁKLADNÍ PRAVIDLA KONSTRUKCE PROUDOVÉ SÍTĚ

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

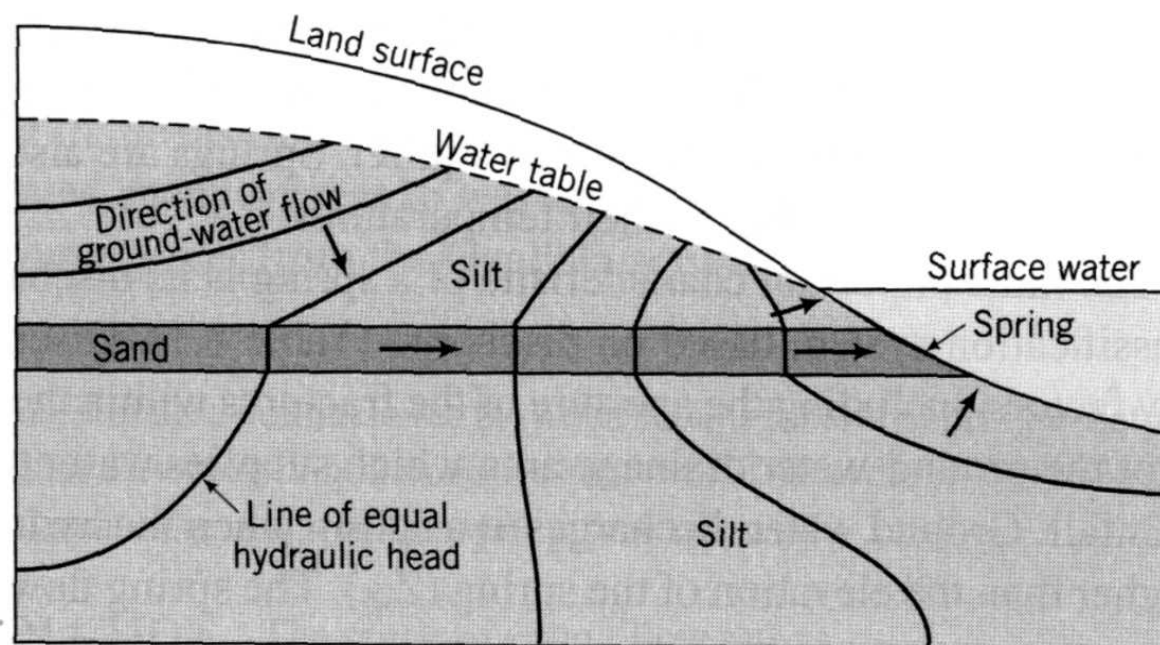


charakteristický
průběh proudnic
v oblastech odvodnění

charakteristický
průběh proudnic
v oblastech doplňování
a odvodnění

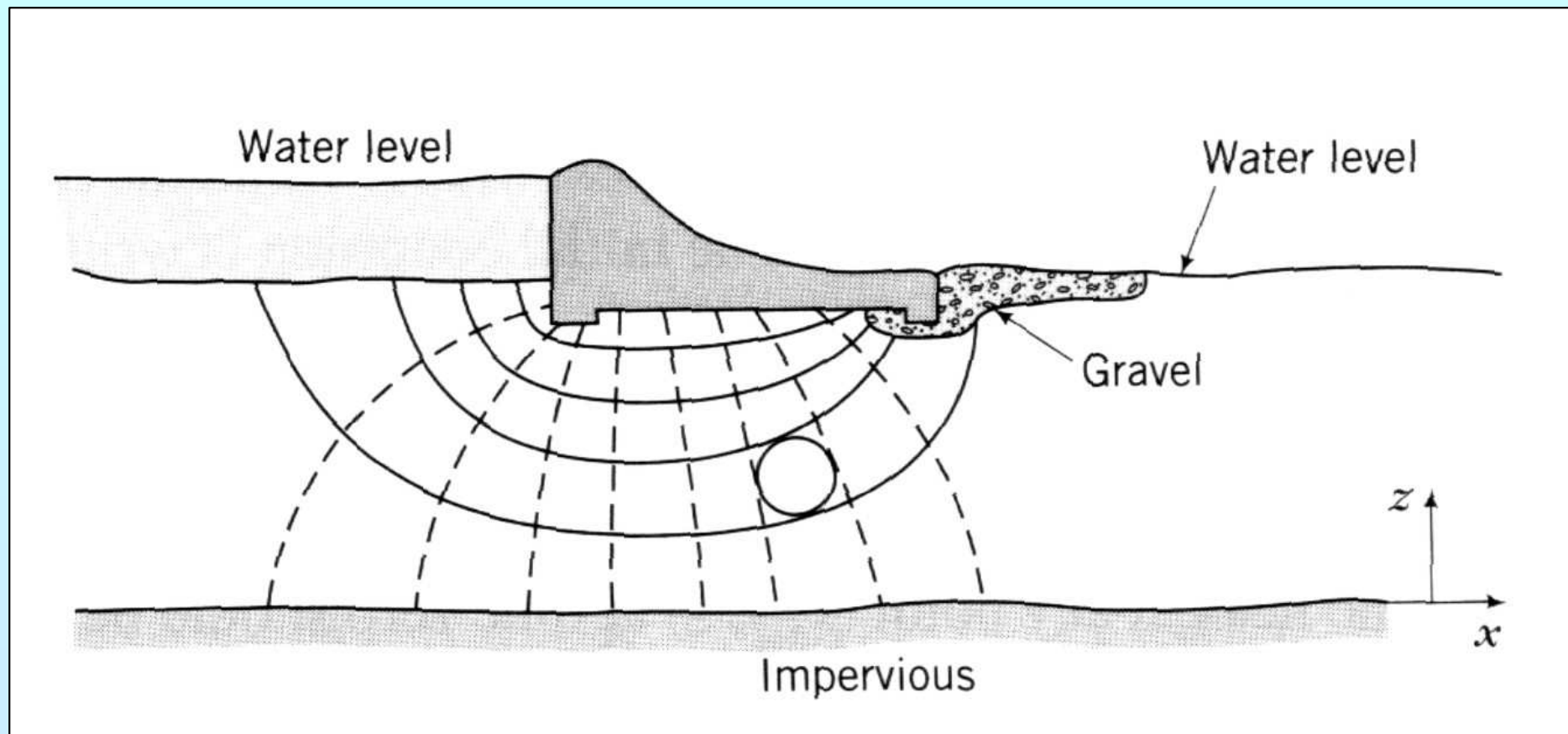


(a)



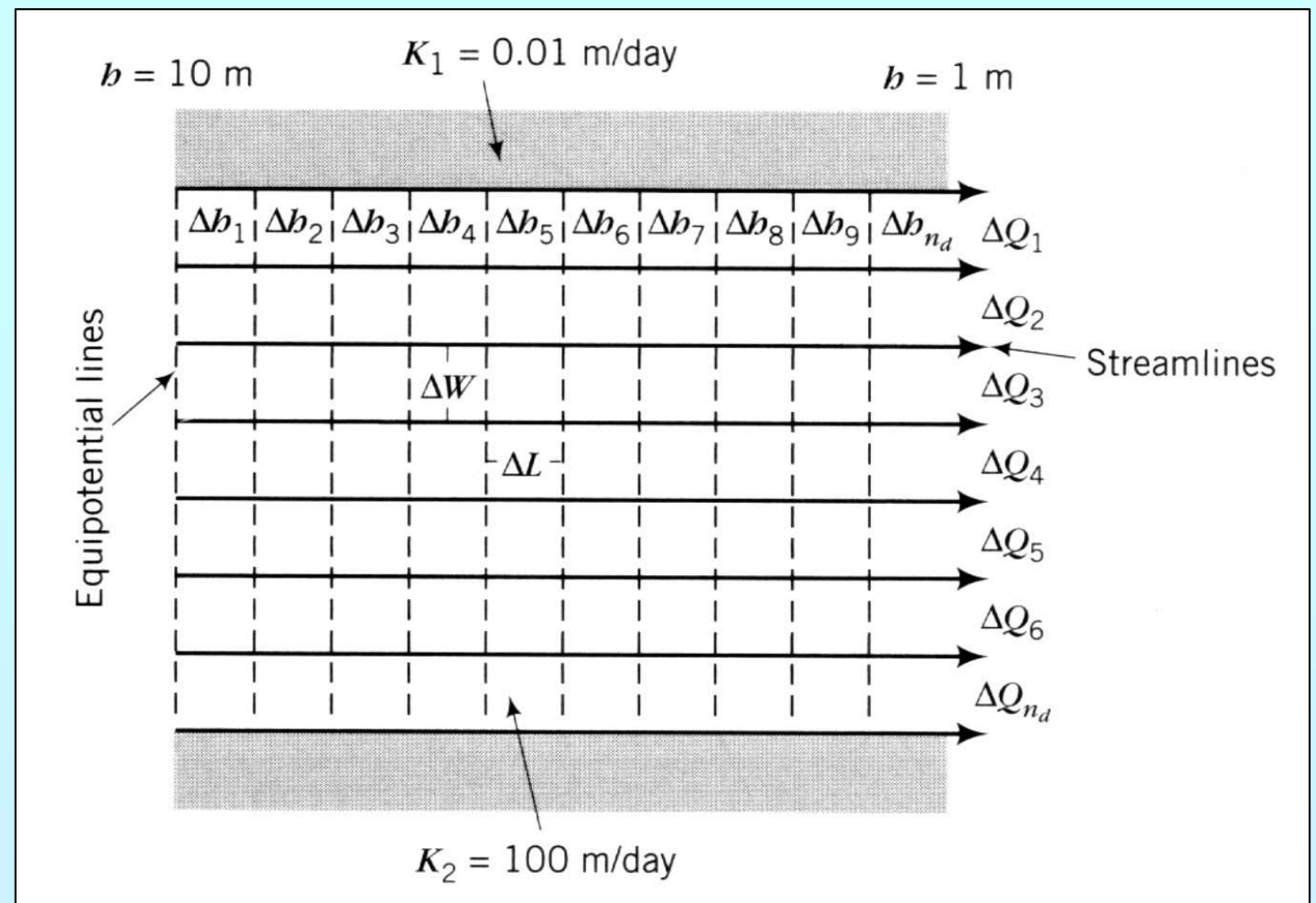
(b)

příklad konstrukce proudové sítě
pod hrází



„čtverce“ jsou zakřivené

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



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

ΔQ průtok

T transmisivita

Δh pokles hydraulické výšky mezi dvěma equipotenciálami

ΔW šířka proudové trubice

ΔL 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

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

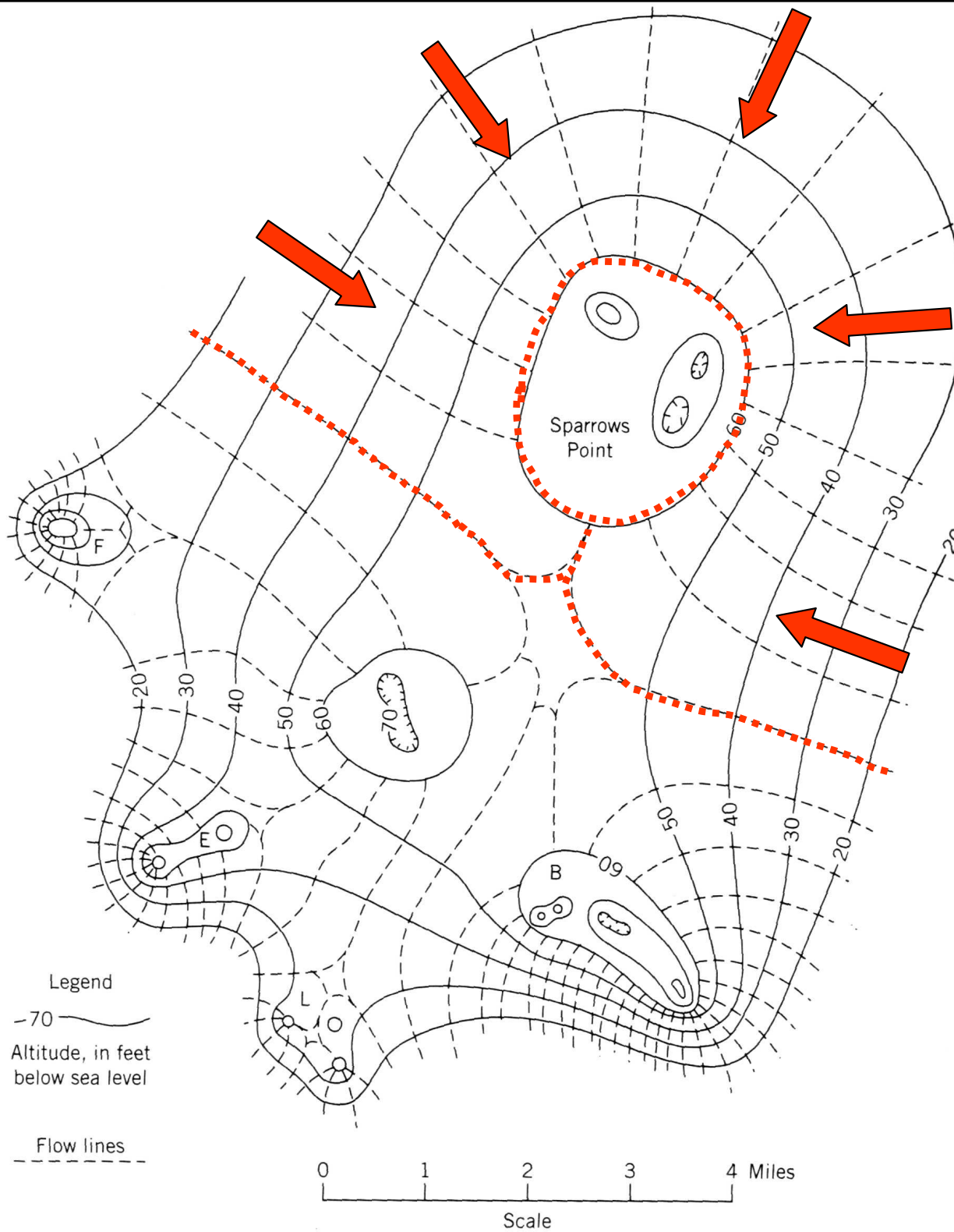
Q průtok

T transmisivita

n_f celkový počet proudových trubic

n_d celkový počet poklesů hydraulické výšky

ΔH celkový pokles hydraulické výšky



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

$$n_f = 15$$

$$n_d = 3$$

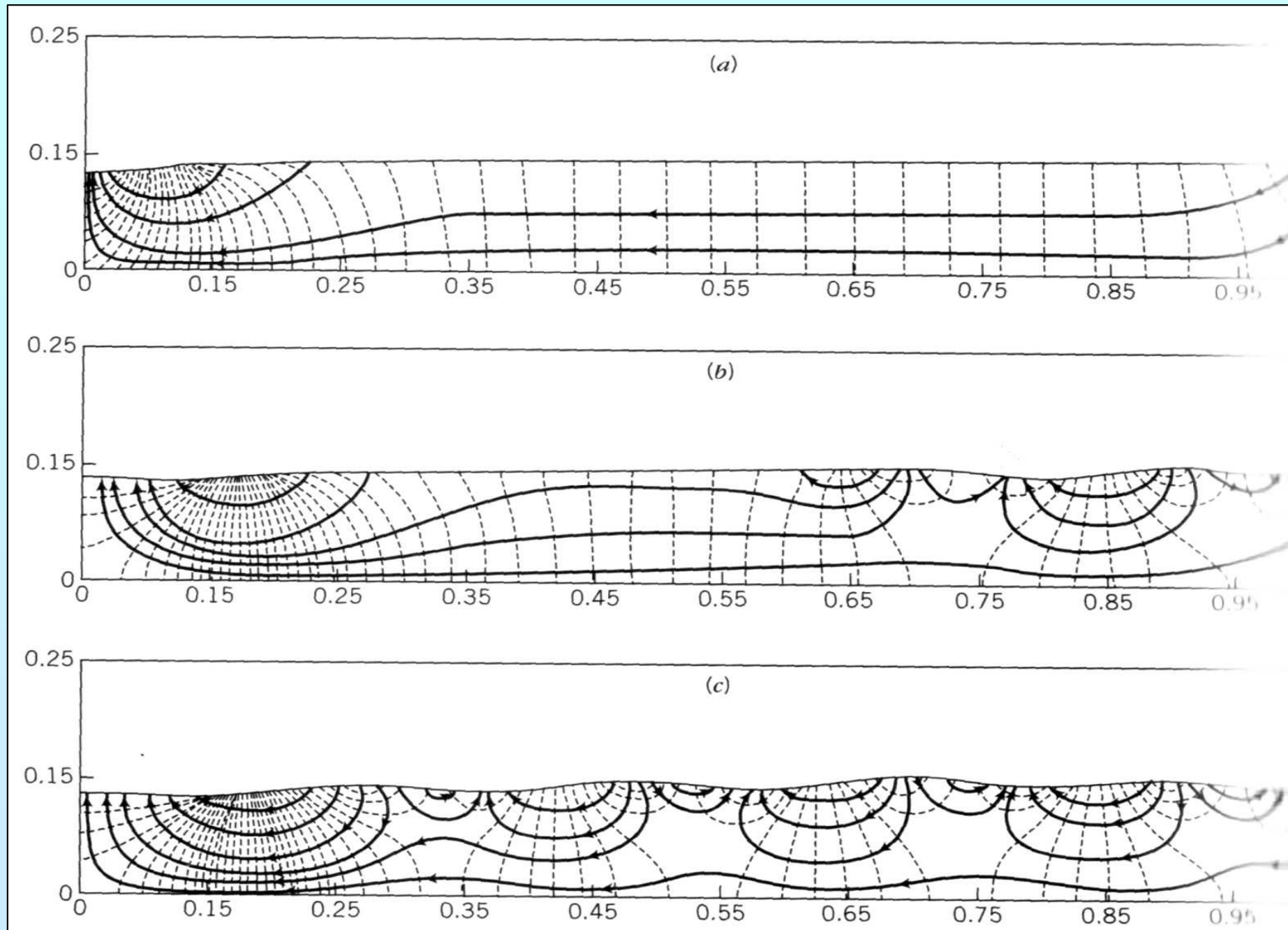
$$\Delta H = 30 \text{ ft} = 9,1 \text{ m}$$

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

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

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

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

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

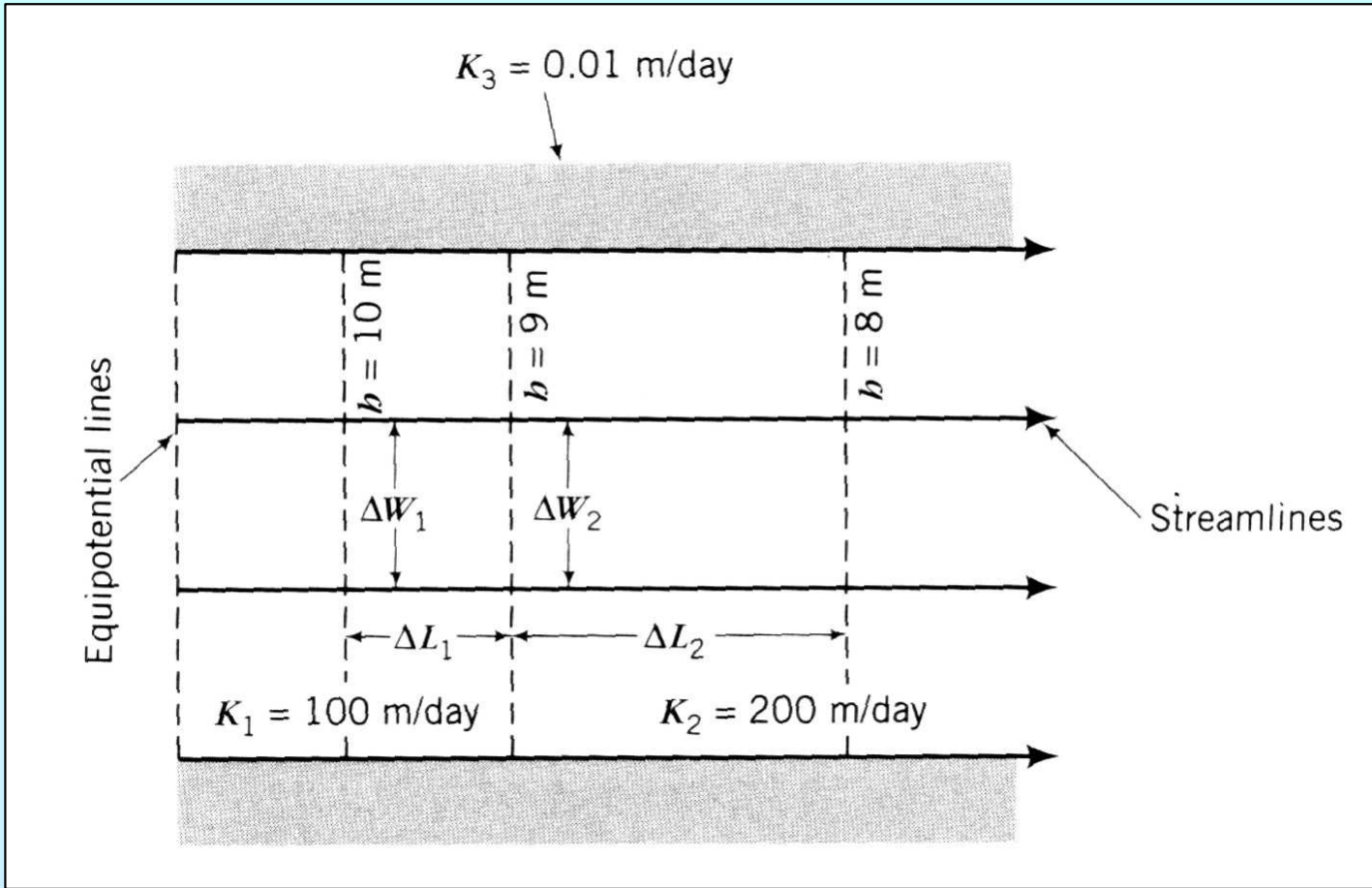
rovnice pro 2-D, x-y

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



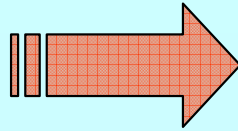
k_1	100 m/d
k_2	200 m/d
ΔW	10 m
ΔL_1	10 m
b	50 m

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

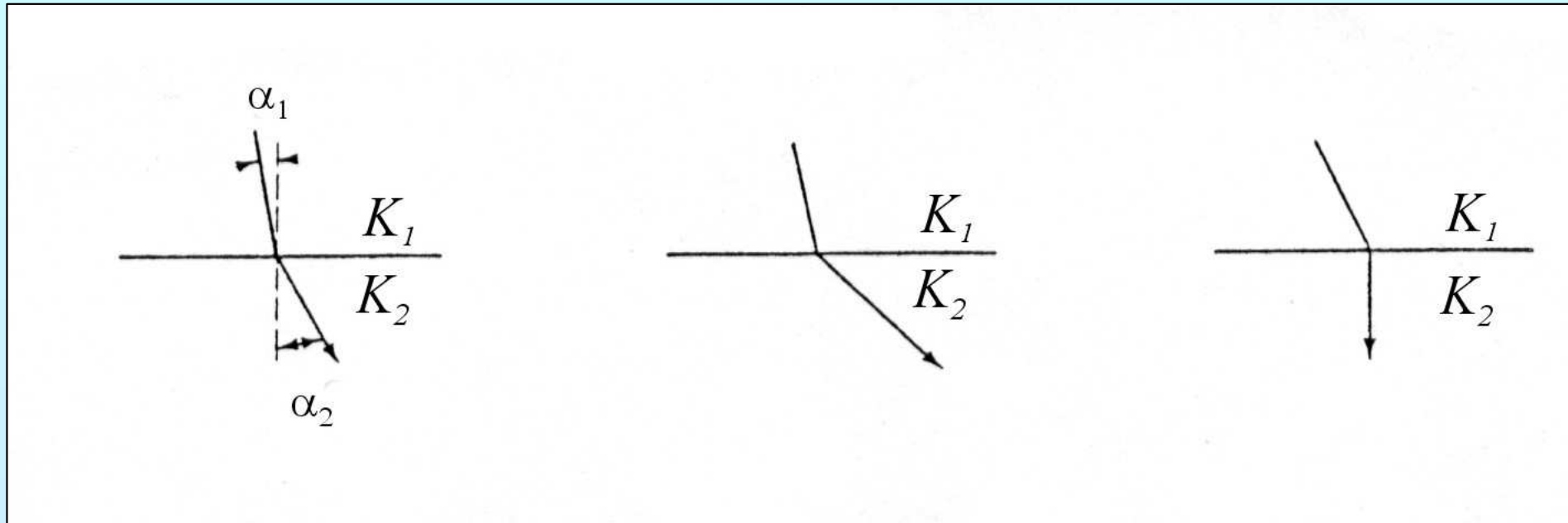
$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{\Delta L_1 \Delta W_2}{\Delta L_2 \Delta W_1} \quad \Rightarrow \quad \Delta L_2 = \frac{T_2}{T_1} \Delta L_1 = \frac{(200 \cdot 50)}{(100 \cdot 50)} 10 = 20 \text{ m}$$

Proudění v nehomogenním prostředí

- refrakce proudnic
- analogie lomu světla



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



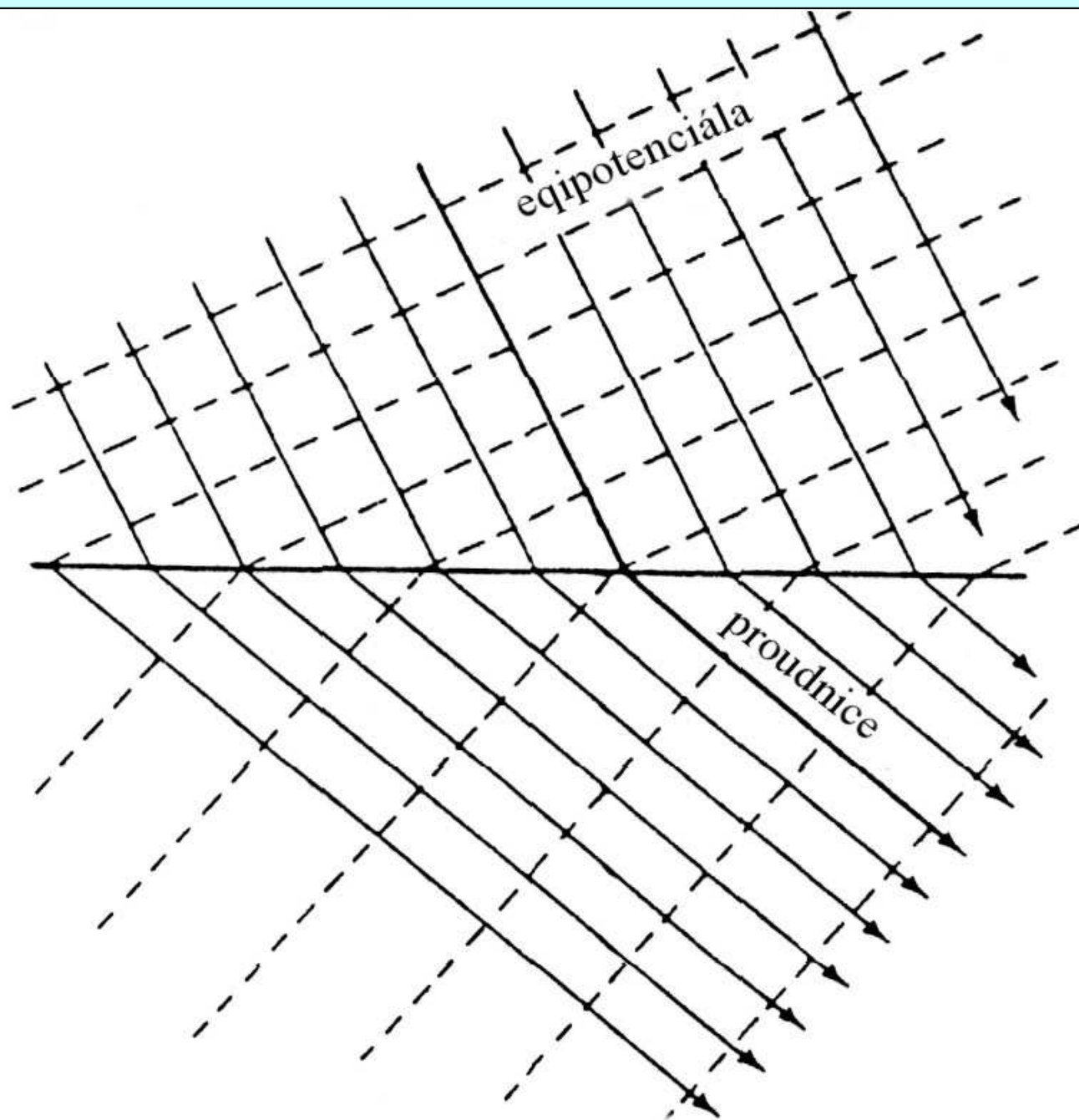
obecně:

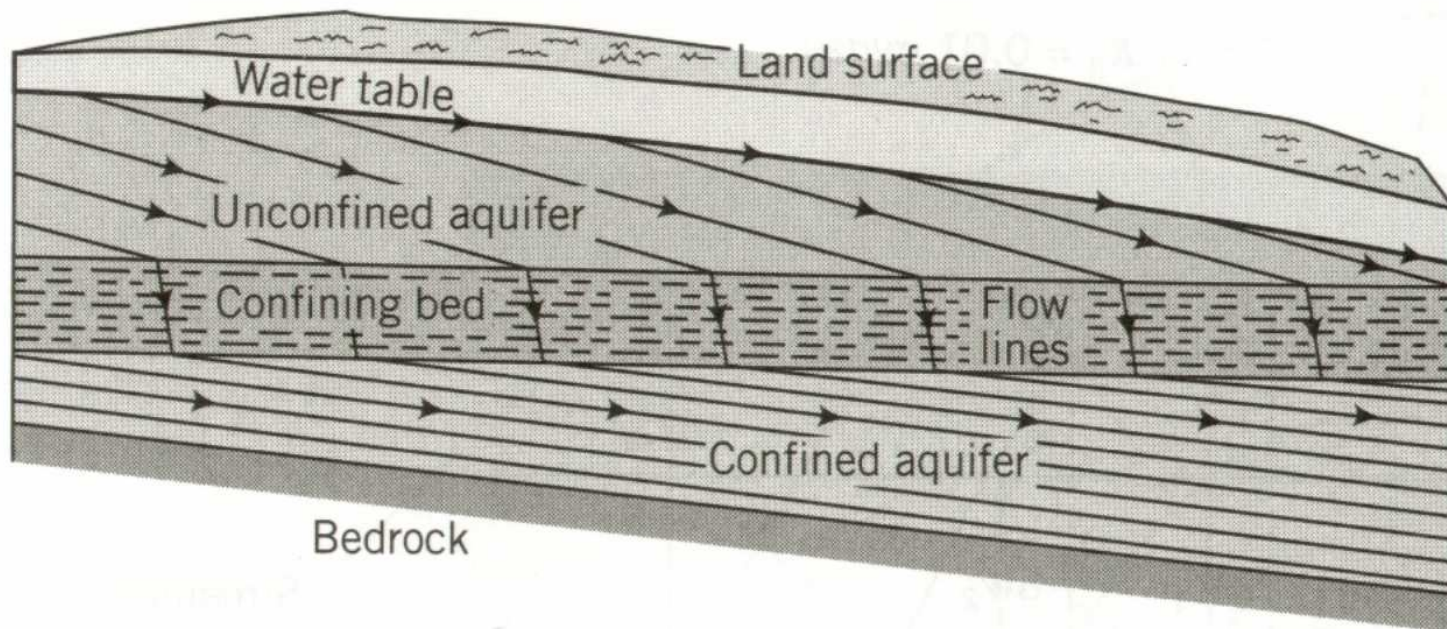
$k_1 > k_2$... ve spodní vrstvě je proudnice svislejší

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

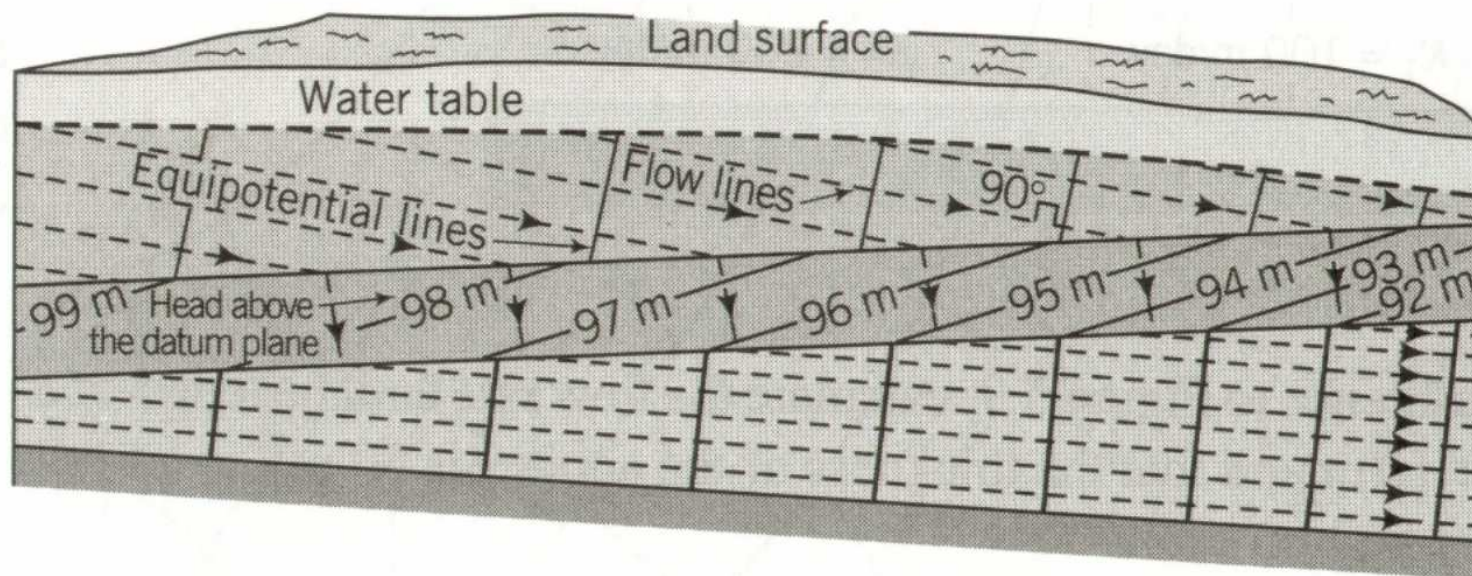
$k_1 \gg k_2$... ve spodní vrstvě jsou proudnice svislé (z kolektoru do izolátoru)

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:

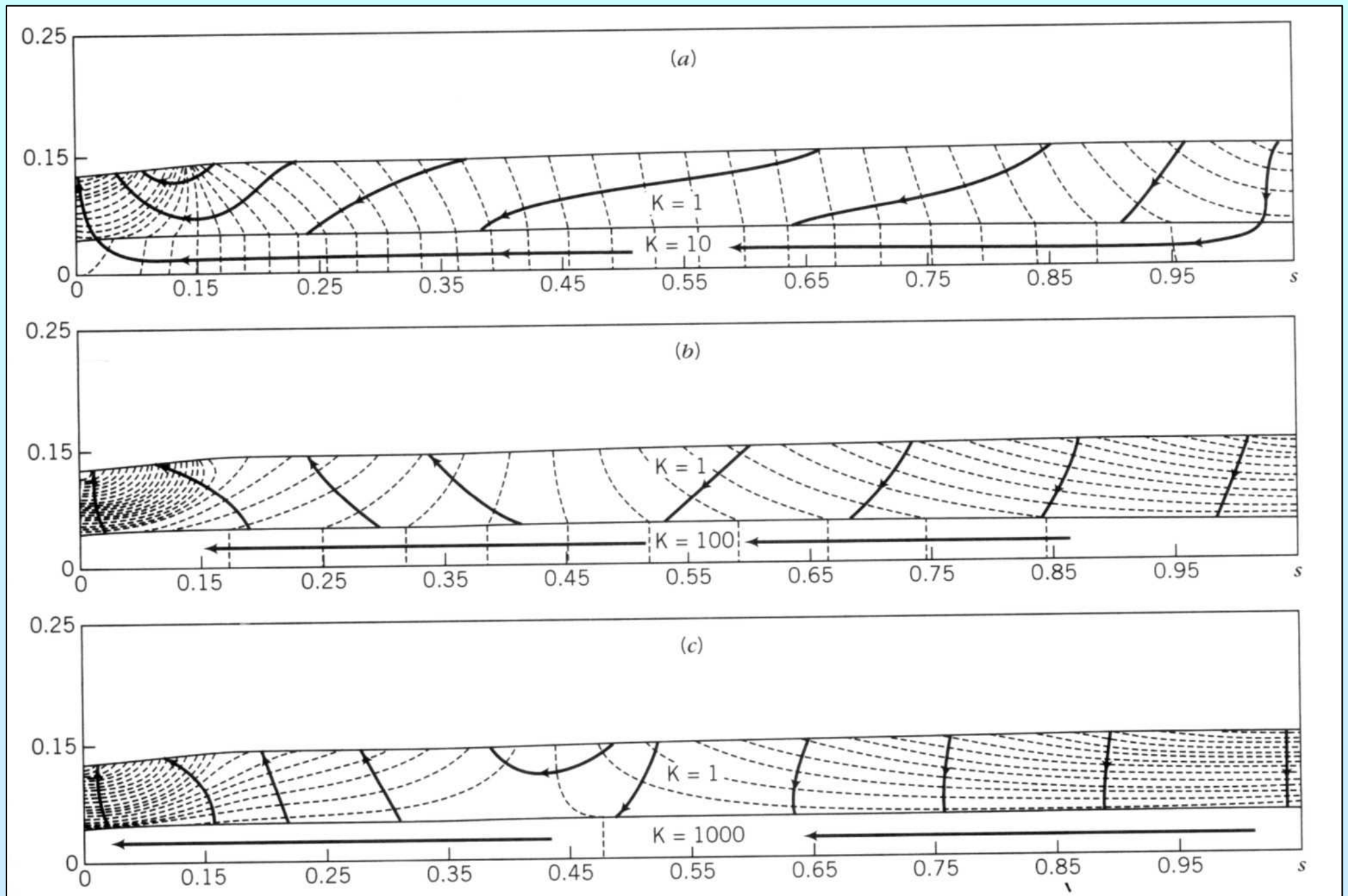
- hydraulická vodivost nejméně propustné horniny je rovna $K = 1$
- relativní propustnosti ostatních hornin jsou rovny podílům příslušných hydraulických vodivostí a hydraulické vodivosti nejméně propustné horniny

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

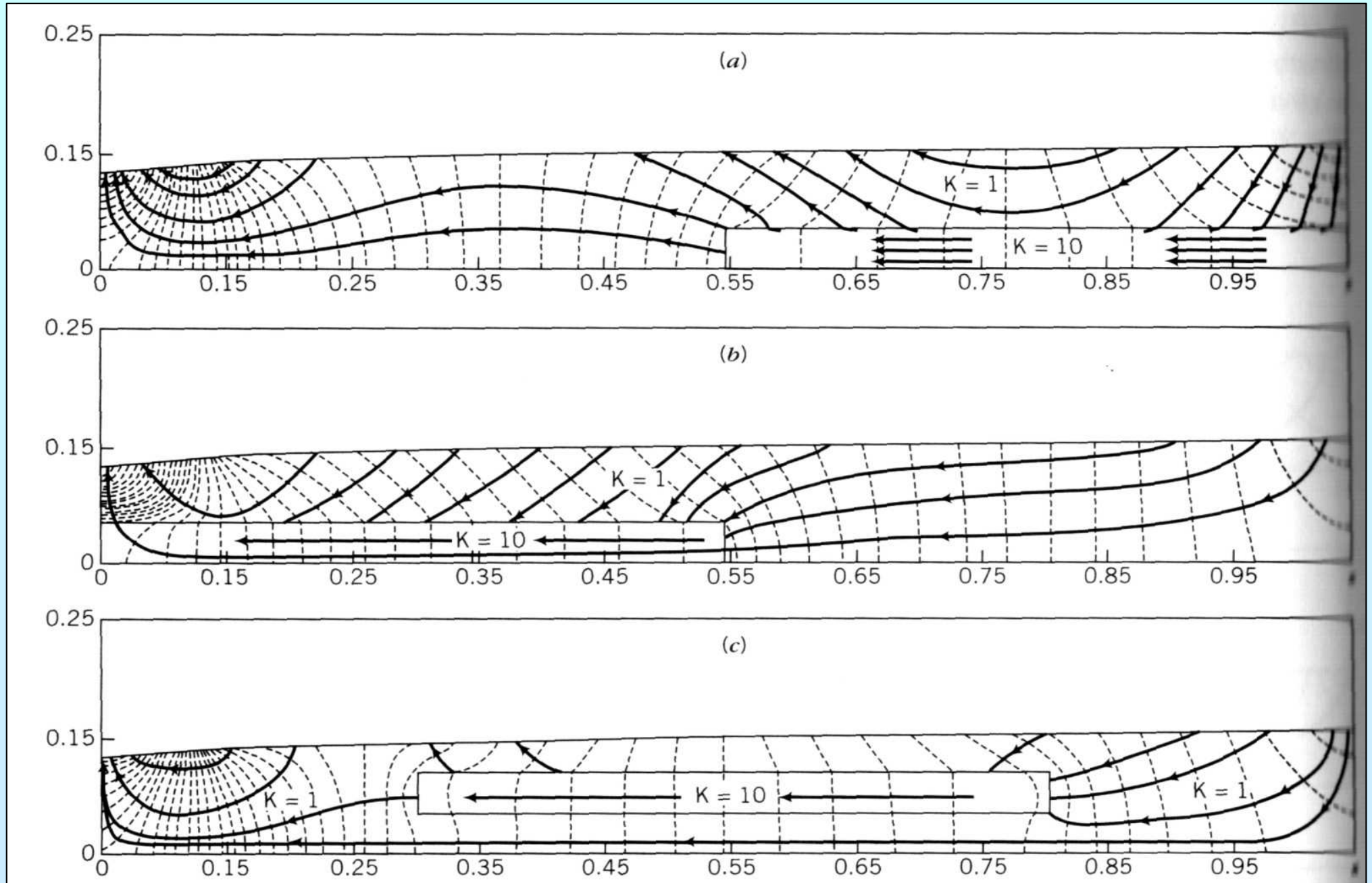
$$k_2 = 1 \times 10^{-6} \text{ m/s} \quad \Rightarrow \quad K_2 = 1$$

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

vliv propustnější vrstvy na proudění podzemní vody



efekt hornin s vyšší hydraulickou vodivostí – drenážní funkce

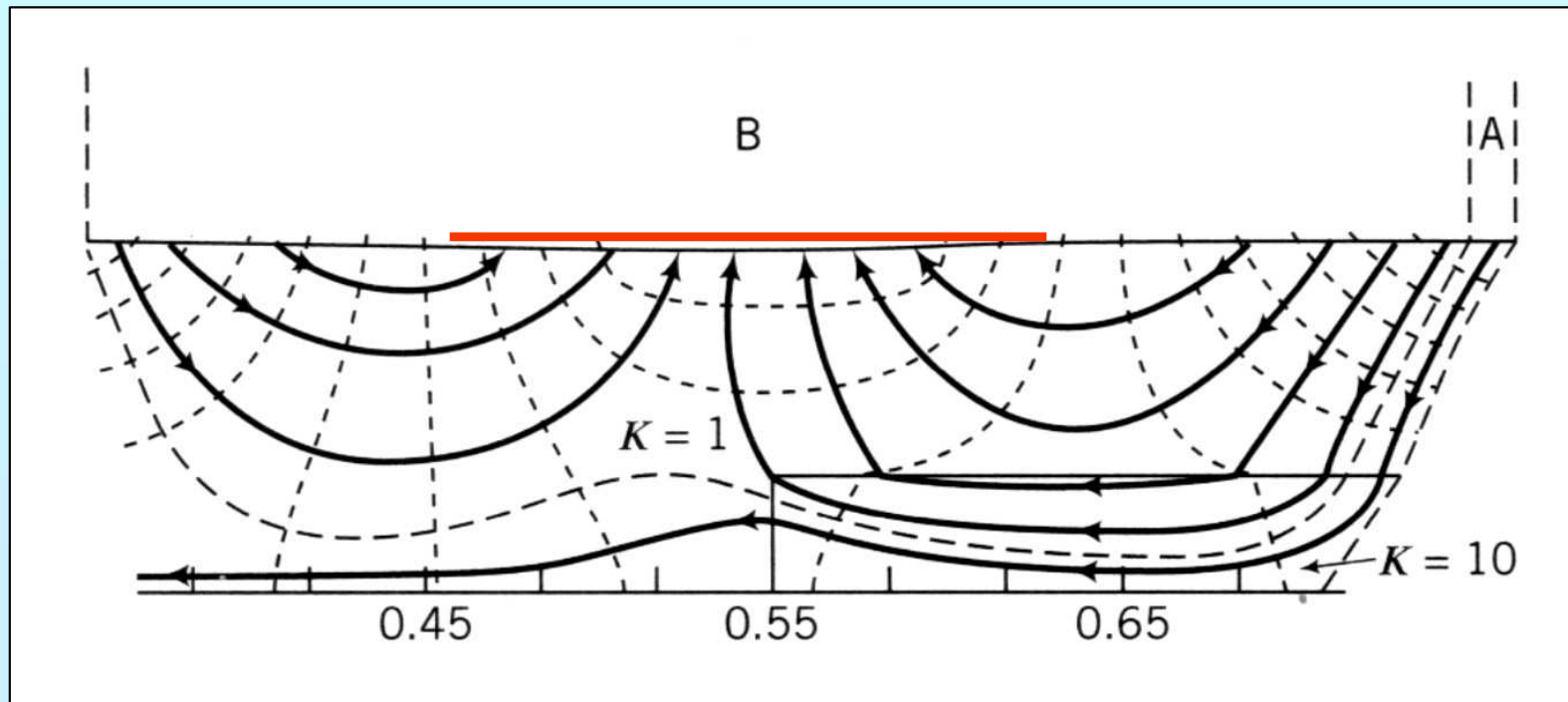


řešení průtoků v 2-D, x - z

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

vzorec platí pro jednotkovou
mocnost struktury (1 m)

příklad výpočtu odtoku (odvodnění) Q části struktury



$$n_f = 8$$

$$n_d = 1$$

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

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

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

ANIZOTOPNÍ PROSTŘEDÍ

proudnicе nemusí protínat equipotenciály v pravých úhlech

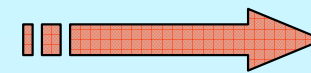
1. hlavní směr anizotropie je shodný se směrem proudění

- proudnicе a equipotenciály svírají pravý úhel

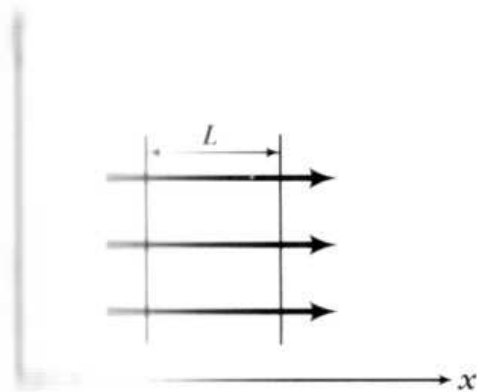
2. směr anizotropie není shodný se směrem proudění

- proudnicе a equipotenciály nesvírají pravý úhel

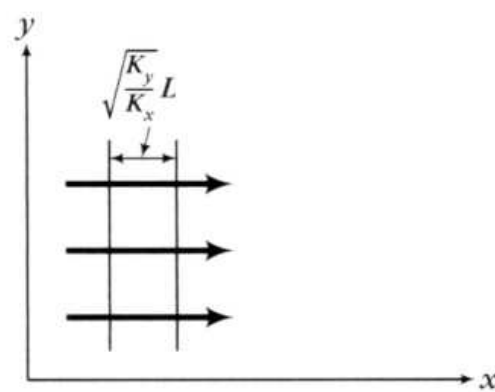
- transformace proudové sítě pomocí vztahu



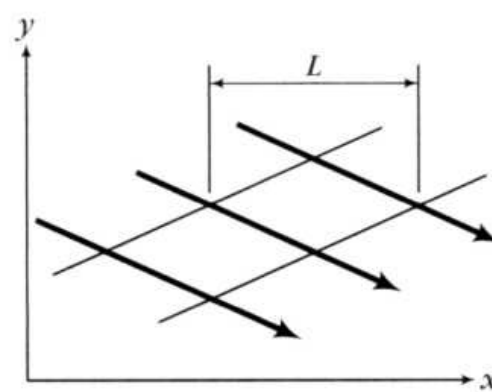
$$\sqrt{\frac{K_y}{K_x}} L$$



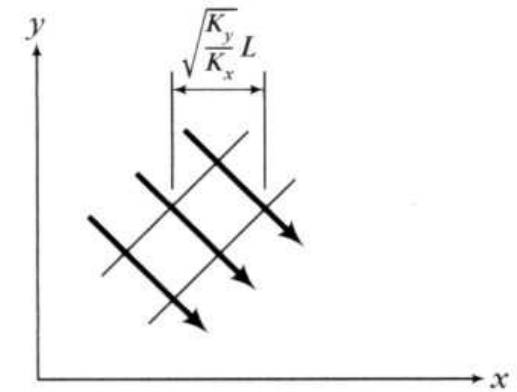
(a)



(b)



(c)



(d)