

A scenic view of a forest stream with a waterfall, surrounded by tall trees and autumn foliage. The water is clear and flows over rocks, creating a small waterfall. The forest is dense with tall, thin trees, and the ground is covered in fallen leaves and moss.

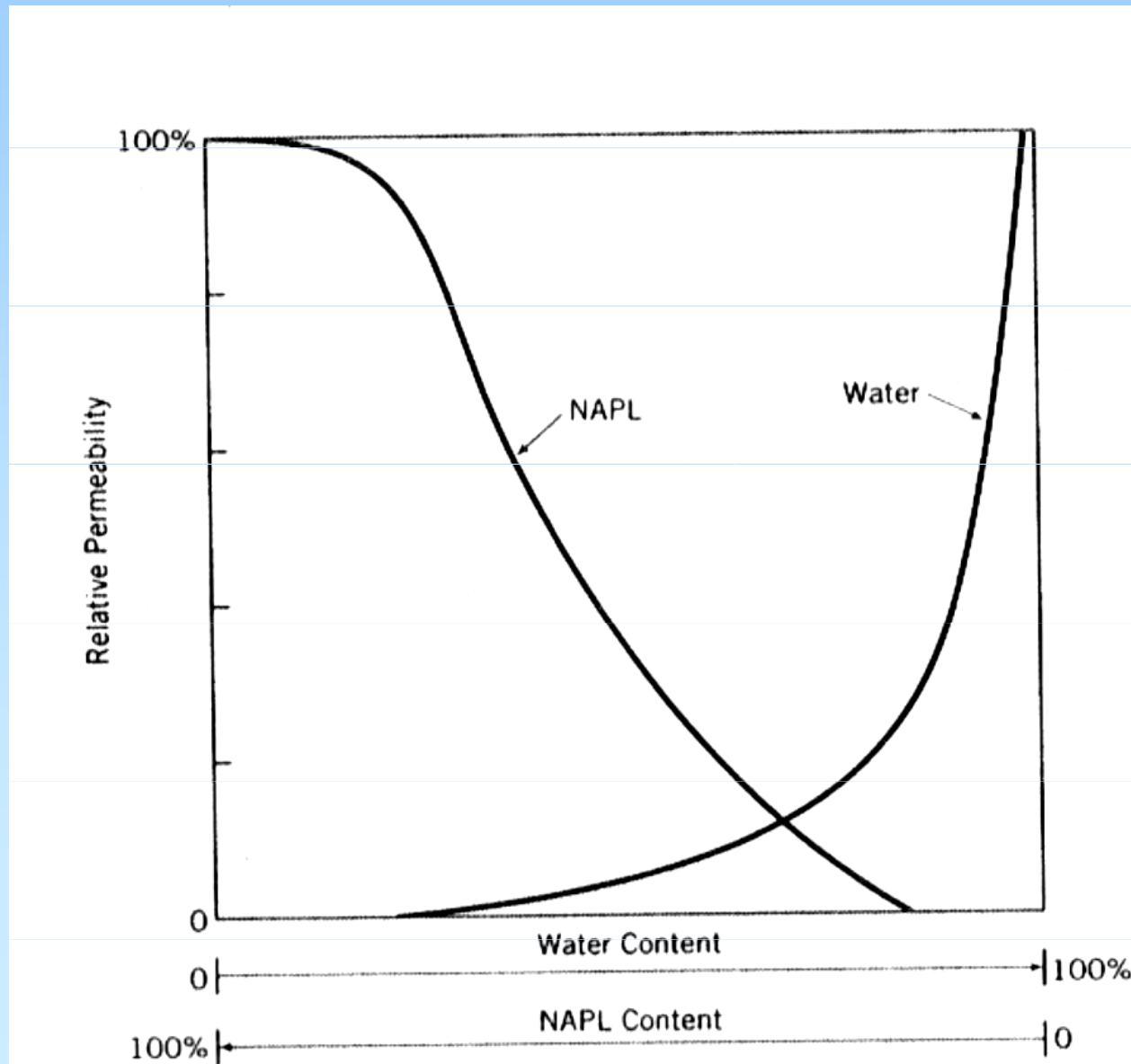
# POCHRANA PODZEMNÍCH VOD

VI.

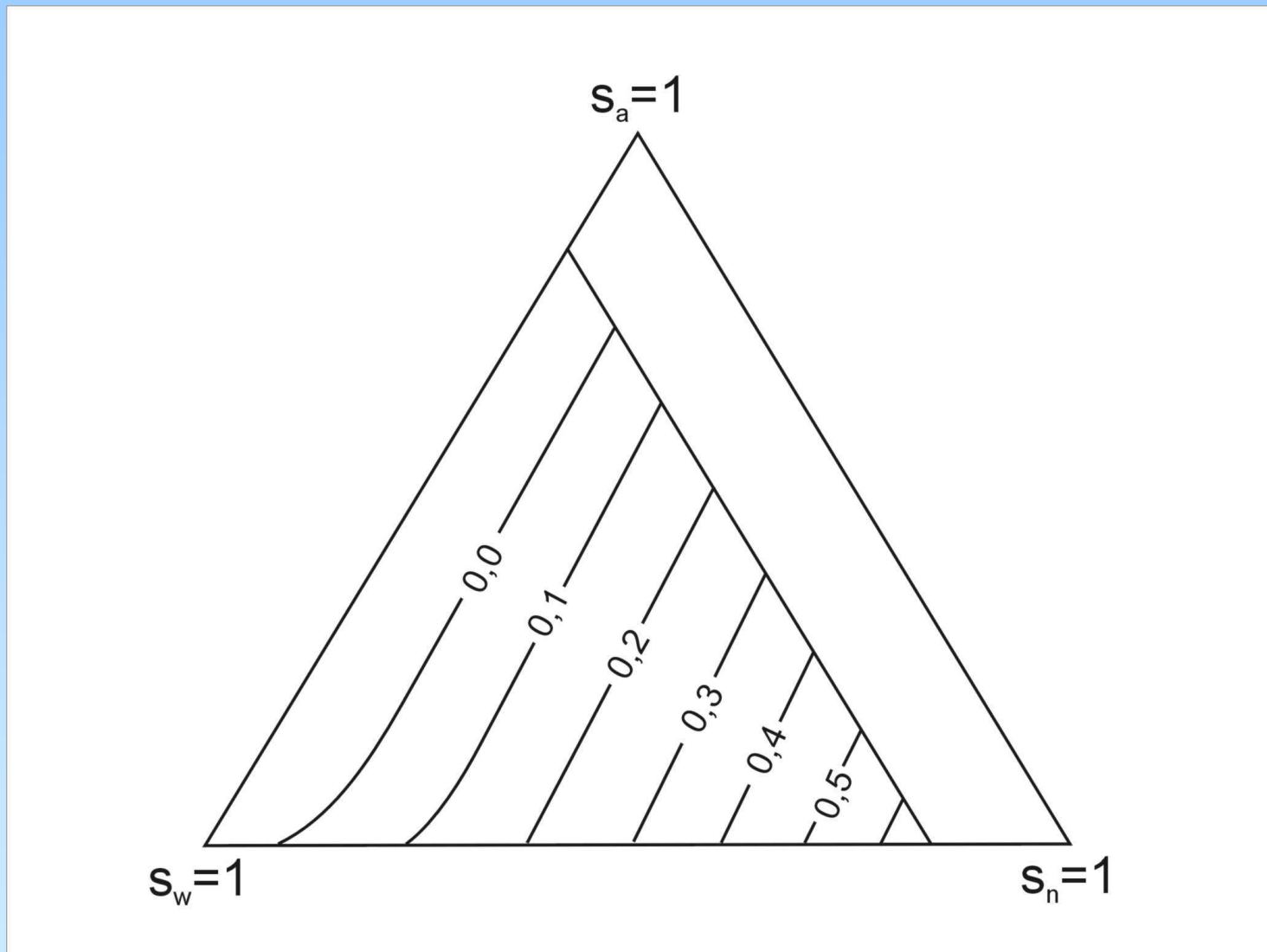


## RELATIVNÍ PROPUSTNOST

- v multifázovém prostředí spolu fluida soupeří o volný prostor (objem pórů)
- propustnost prostředí pro jedno fluidum je potom mírou nasycení prostředí tímto fluidem
- platí i v saturované zóně pro systémy NAPL – voda, NAPL – voda – vzduch, apod.



- skutečné prostředí – existují 3 fluida
- konstrukce ternárních diagramů



- uvažují prostředí proměnlivě saturované vodou, NAPL a vzduchem s vodou jako smáčejícím fluidem

**Darcyho zákon v obecné formě  
pro 1-D proudění**

$$q_i = -\frac{k_i}{\mu_i} (\Delta P_i - \rho_i \cdot g \cdot \Delta h)$$

$k_i$  efektivní propustnost média pro  $i$ -té fluidum

$\mu_i$  viskozita

$P$  tlak

$\rho$  hustota

$g$  gravitační konstanta

$h$  výška

**vztah relativní propustnosti  
k propustnosti prostředí**

$$k_{ri} = \frac{k_i}{k}$$

$k_{ri}$  relativní propustnost  $i$ -tého fluida

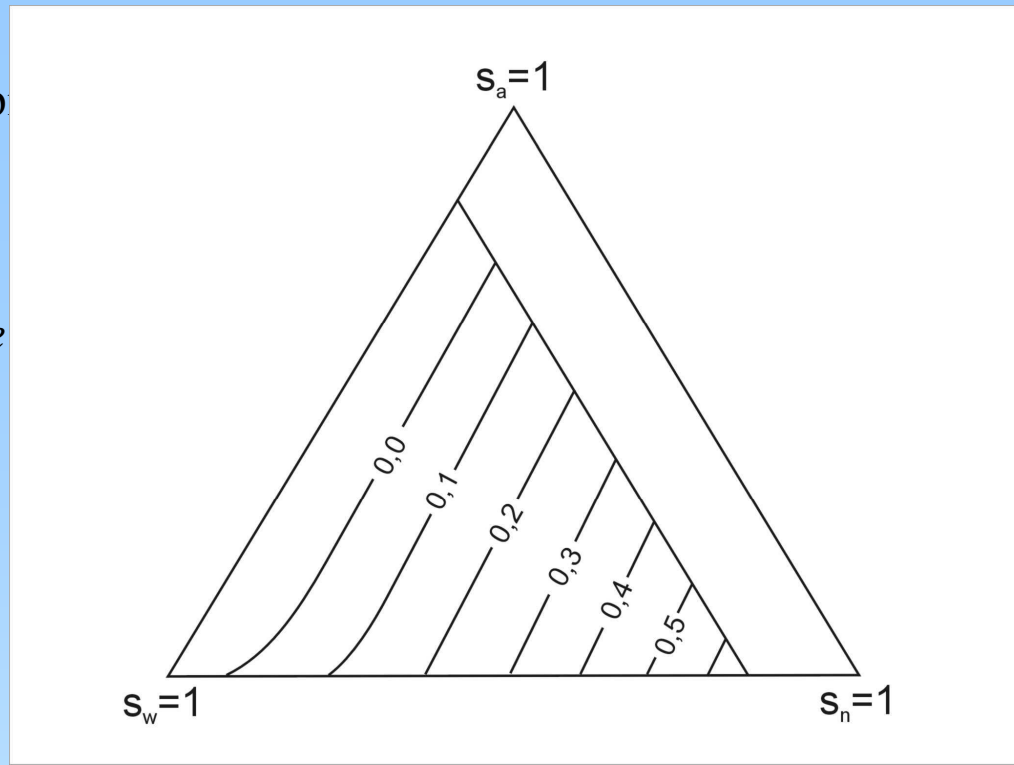
$k_i$  efektivní propustnost  $i$ -tého fluida

$k$  propustnost média (v  $\text{m}^2$ )

ideální případ – součet všech relativních propustností je při daném nasycení jednotlivými fluidy roven 1

Frick (1962) – emp

$$k_{rn} = (1 - s_e)$$



dí

$$= \frac{(s_w - s_{wr})}{(1 - s_{wr})}$$

Stone (1973) - obecný vzorec - 3 fázové prostředí – podle vzorce se konstruují ternární diagramy

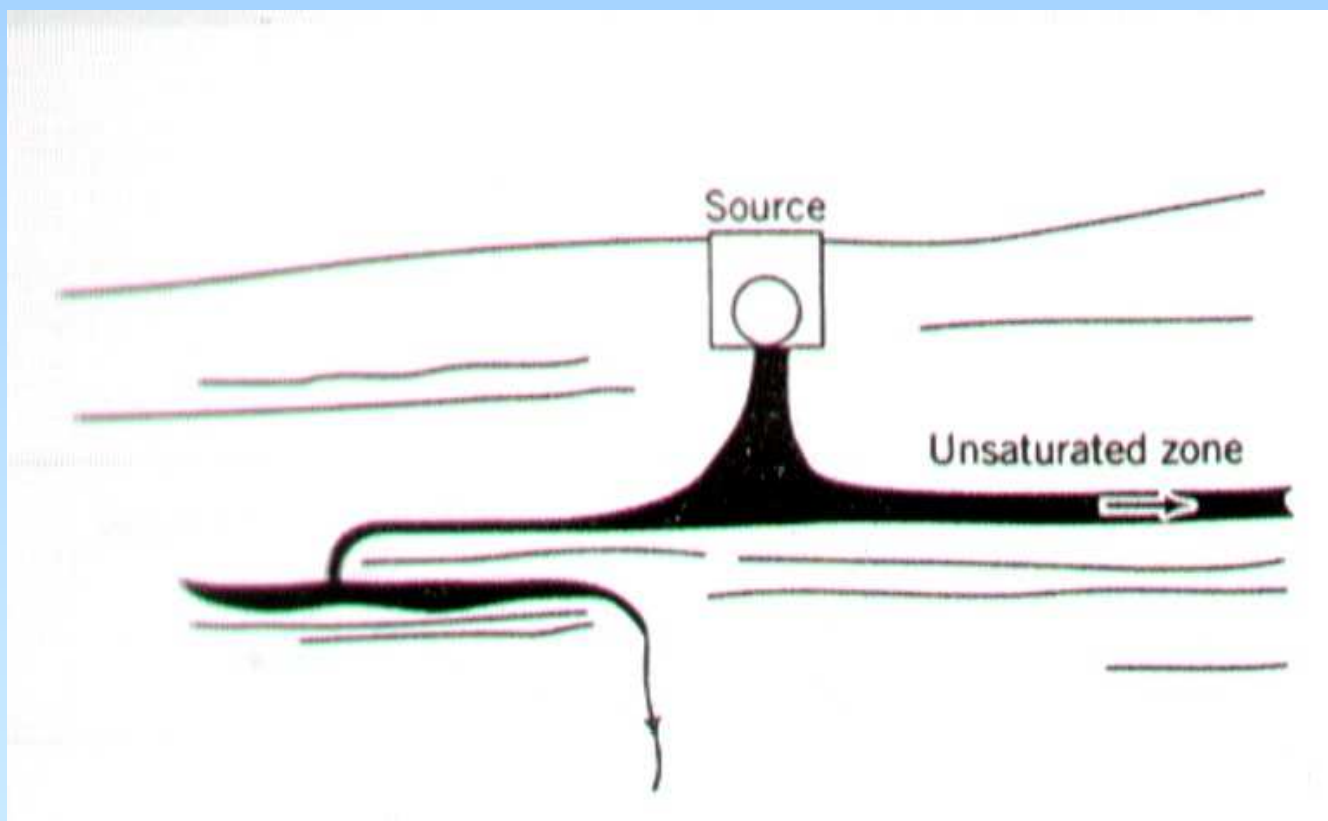
$$k_{rn} = k_{rnw}^* \left[ \left( \frac{k_{rnw}}{k_{rnw}^*} + k_{rw} \right) \left( \frac{k_{rna}}{k_{rnw}^*} + k_{ra} \right) - (k_{rw} + k_{ra}) \right]$$

- $k_{rnw}^*$     relativní propustnost NAPL při reziduálním nasycení vodou
- $k_{rnw}$      relativní propustnost NAPL (funkce nasycení systému vodou)
- $k_{rna}$      relativní propustnost NAPL (funkce nasycení systému vzduchem)

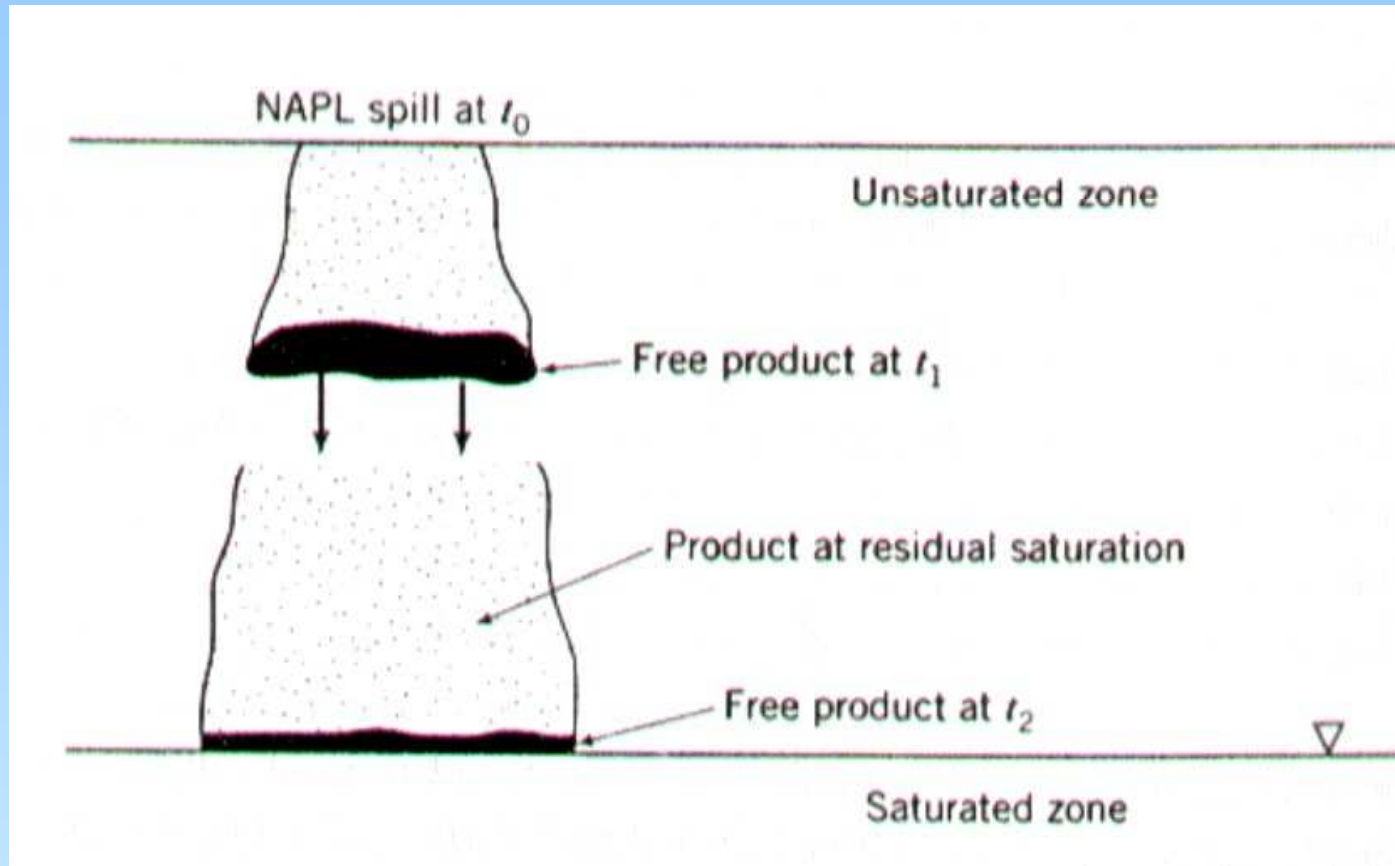
# MIGRACE NAPL HORNINOVÝM PROSTŘEDÍM

## nesaturovaná zóna

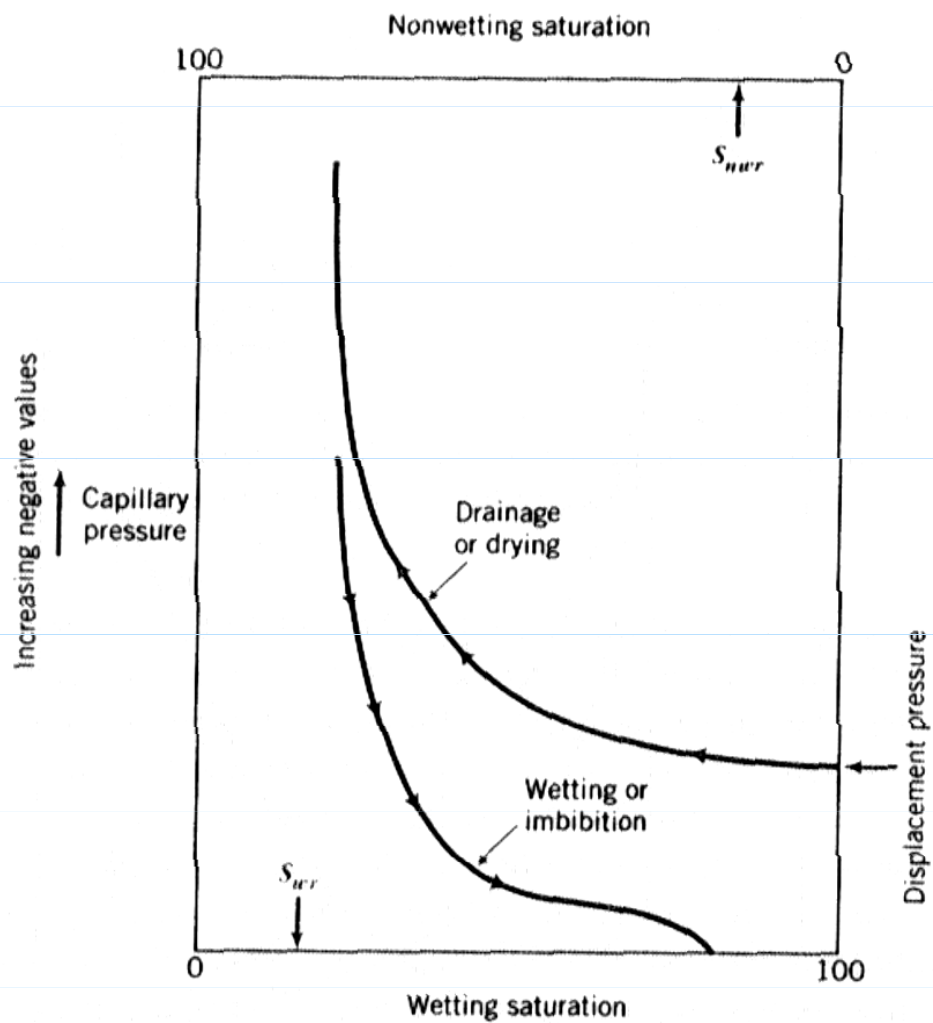
- převažuje vertikální pohyb ve směru působení gravitace



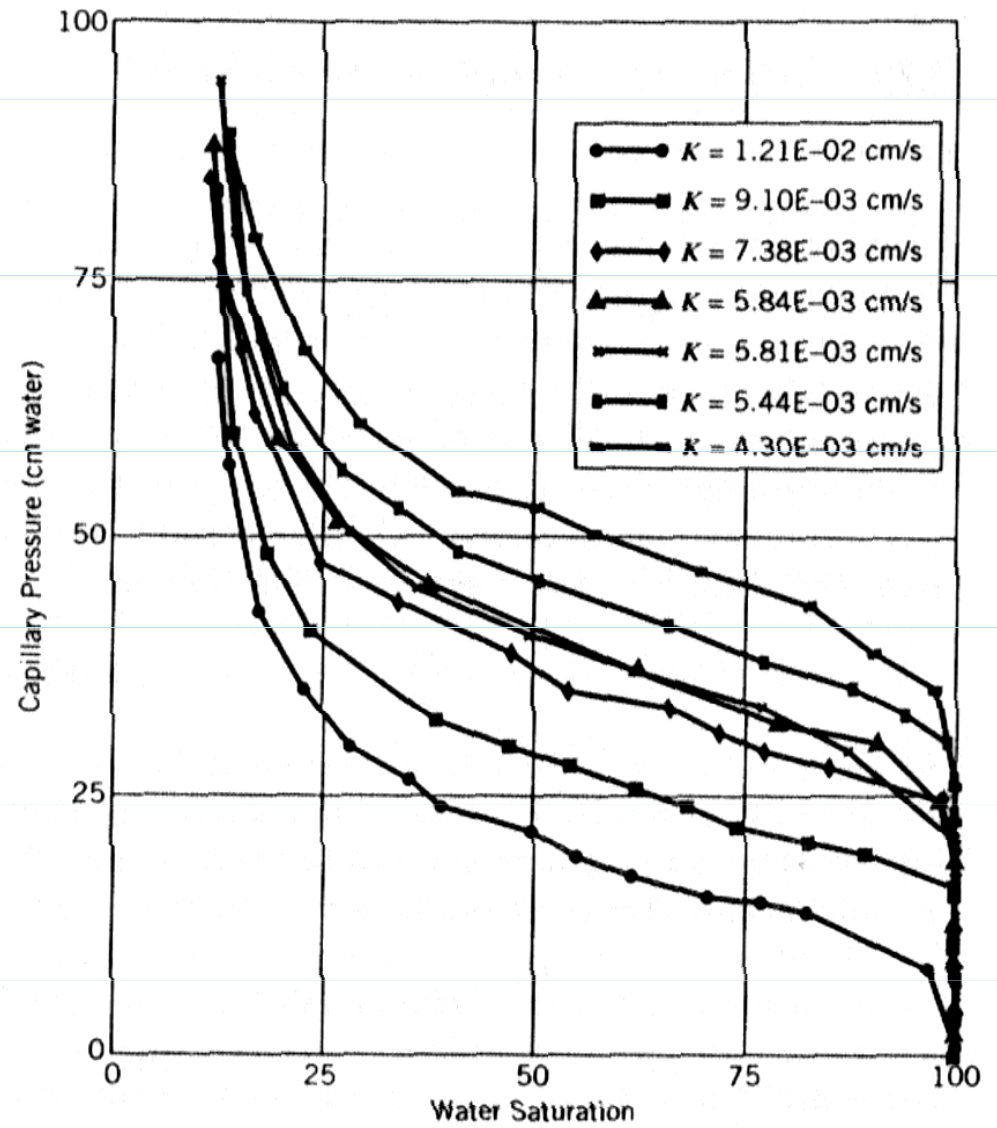
- migrace volné fáze NAPL je ovlivněna distribucí otevřených pórů a vody, potenciálně je lepší v suchém prostředí (viz koncept relativní propustnosti a kapilárního (vstupního) tlaku), zvýšená přítomností puklin, trhlin, rozvolněných prostor v okolí kořenů rostlin, apod.



- formování kapalného rezidua pórech, kterými volná fáze NAPL prošla (smáčejší fluidum)
- srovnatelné s formováním reziduálního nasycení vody (smáčejší fluidum)
- po průchodu fronty volné fáze NAPL nastává v hornině drenáž (na konci fronty volné fáze NAPL)



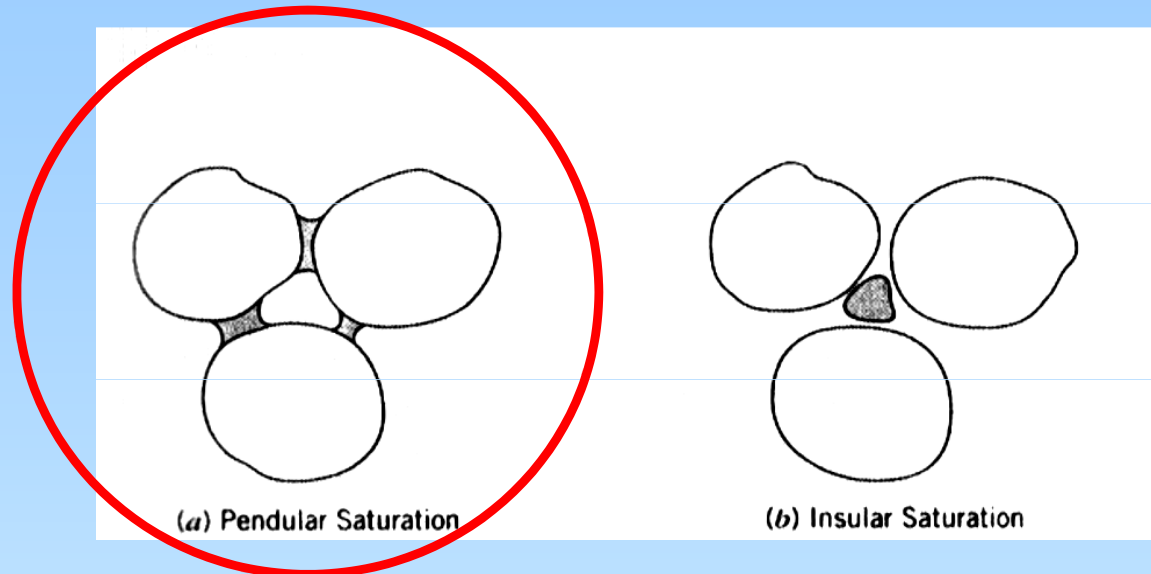
Observations: wetting or imbibition curve.





## NAPL ve formě kapalného rezidua

- vytváří nejčastěji povlaky zrn (event. stěn nebo zúžení puklin) nebo na kontaktu zrn
- forma izolovaných těles



- hodnoty  $s_r$  pro všechny smáčeující kapaliny zhruba srovnatelné
- obecně platí, že hodnoty  $s_r$  rostou s poklesem zrnitosti
- obecně platí, že hodnoty  $s_r$  rostou s rostoucí viskozitou NAPL a vlhkostí prostředí
- $s_r = 0,1 - 0,2$  (0,23 – jílovité spraše)
- schopnost nesaturované zóny zadržet NAPL se označuje jako **retenční kapacita**

$$R = 1000s_r n$$

- udává zachycený objem NAPL (v litrech) na 1 m<sup>3</sup> horniny

- hrubé šterky – jednotky  $l/m^3$  (20)
- šterk s pískem – vyšší jednotky až kolem  $10 l/m^3$  (max. 50)
- písek hrubý až střední – 10 – 20 (max. 80)  $l/m^3$
- střední až jemný písek – 20 – 30 (max. 120)  $l/m^3$
- jemný až jílnatý písek – 40 (max. 160)  $l/m^3$
- v případě zvrstvených a nehomogenních sedimentů je retenční kapacita ještě větší (až  $100 l/m^3$ )  
jemnozrnné písky 40 – 160  $l/m^3$

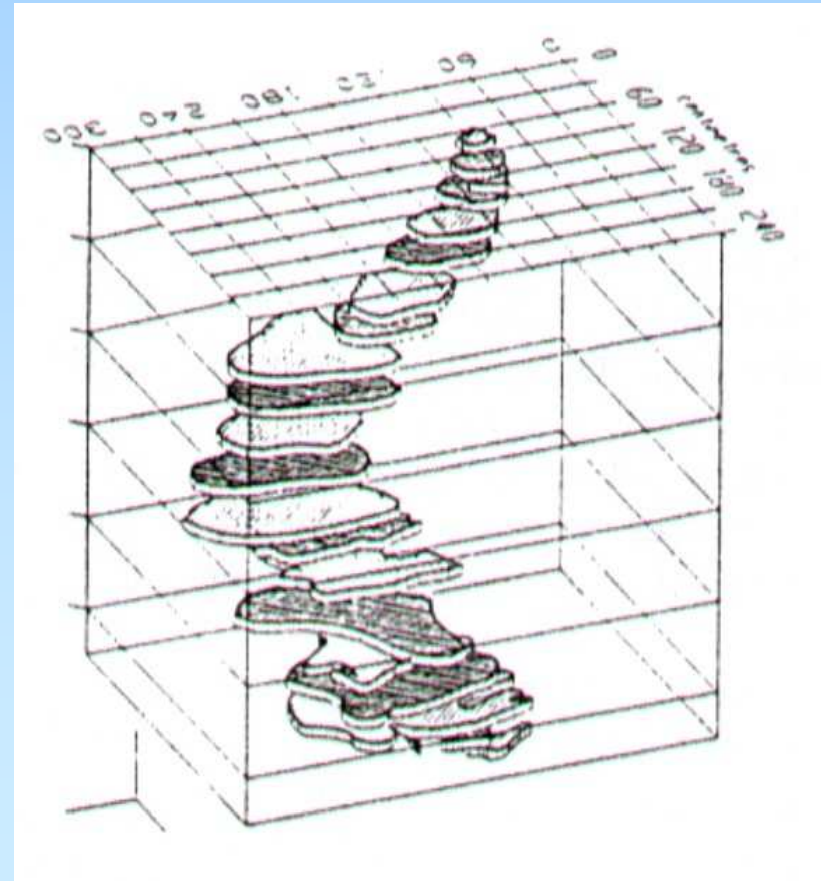
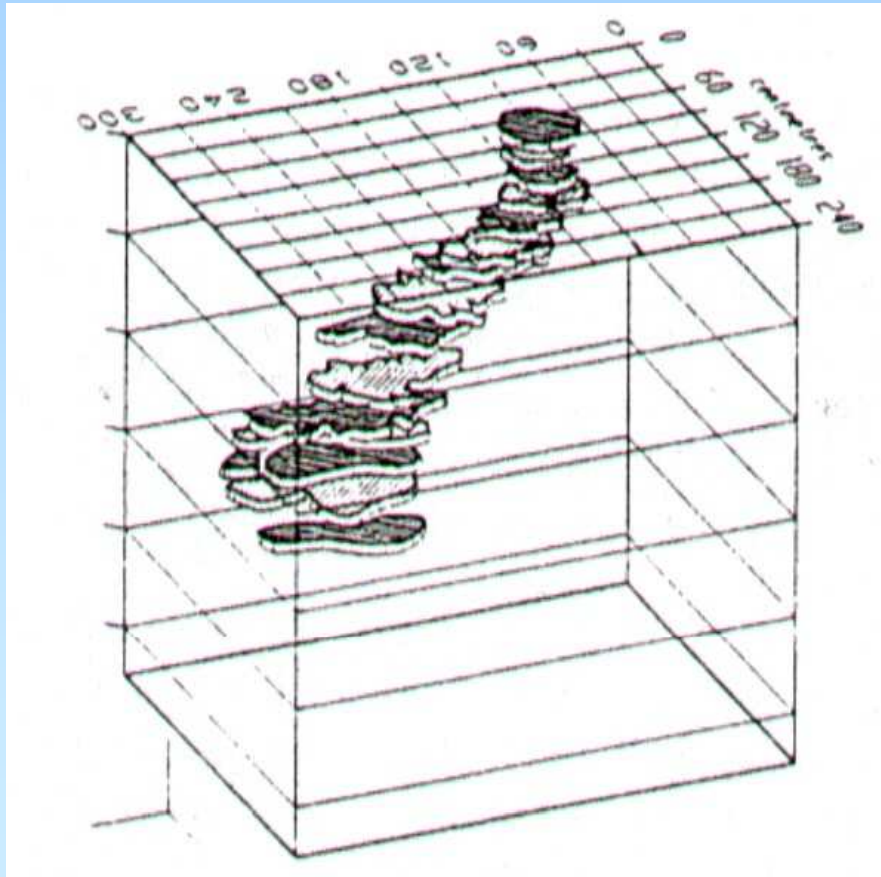
pokud není nasycena retenční kapacita, pohyb nemůže probíhat

naopak je-li retenční kapacita nasycena (opakované úniky NAPL) – pohyb beze ztrát a mnohem rychlejší

- laboratorní stanovení hodnot retenční kapacity
- zjištění hodnot retenční kapacity z retenčních čar  
(křivky kapilární tlak – nasycení smáčeující kapalinou)

## vliv charakteru vstupu NAPL do horninového prostředí

- jednorázové úniky větších objemů látek – nejmenší riziko z hlediska hloubkového dosahu
- opakované úniky – vyšší riziko z hlediska hloubkového dosahu
- bodové opakované úniky - nejvyšší riziko z hlediska hloubkového dosahu

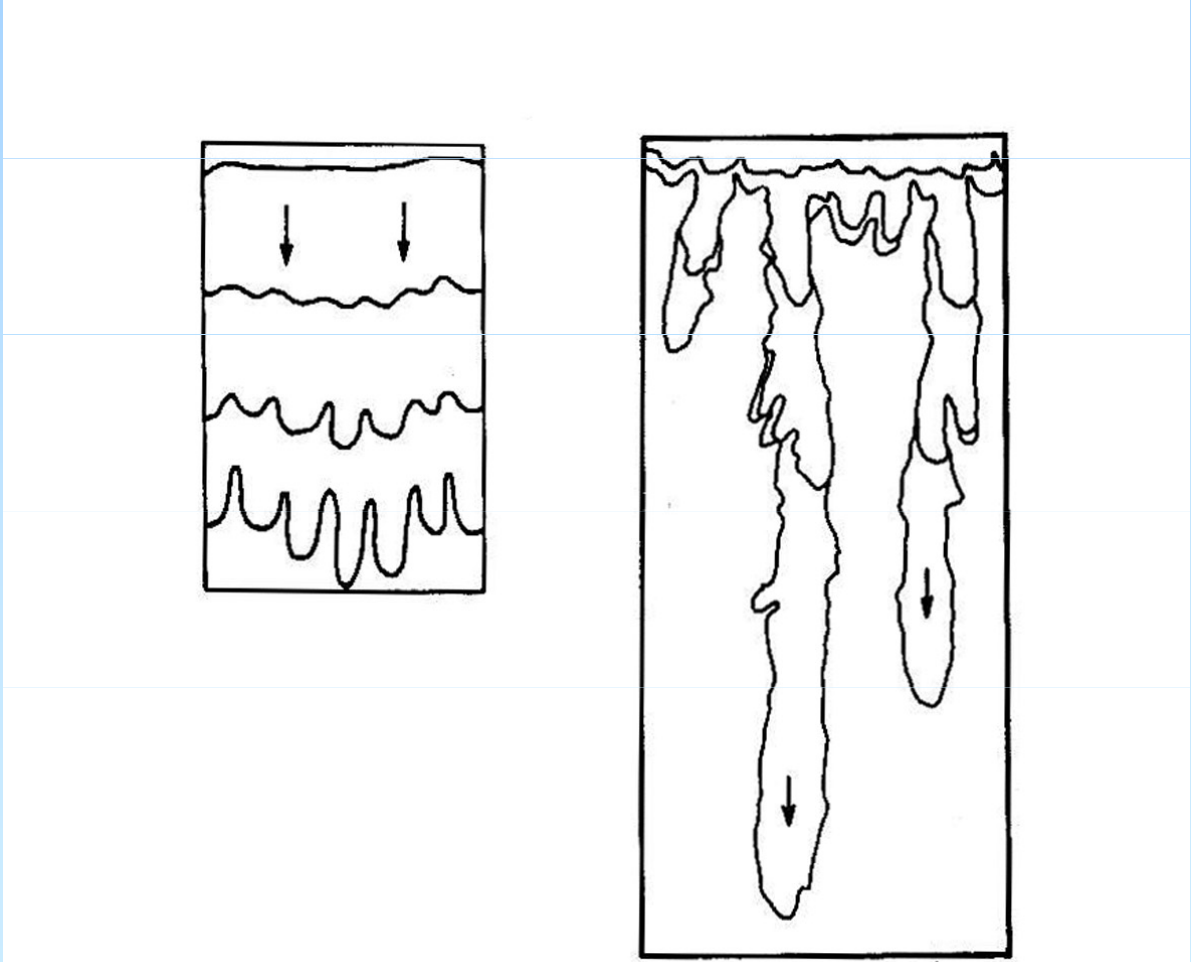




kalkulace skutečného dosahu volné fáze (event. objemu horniny vyplněného kapalným reziduem) je jen teoretická

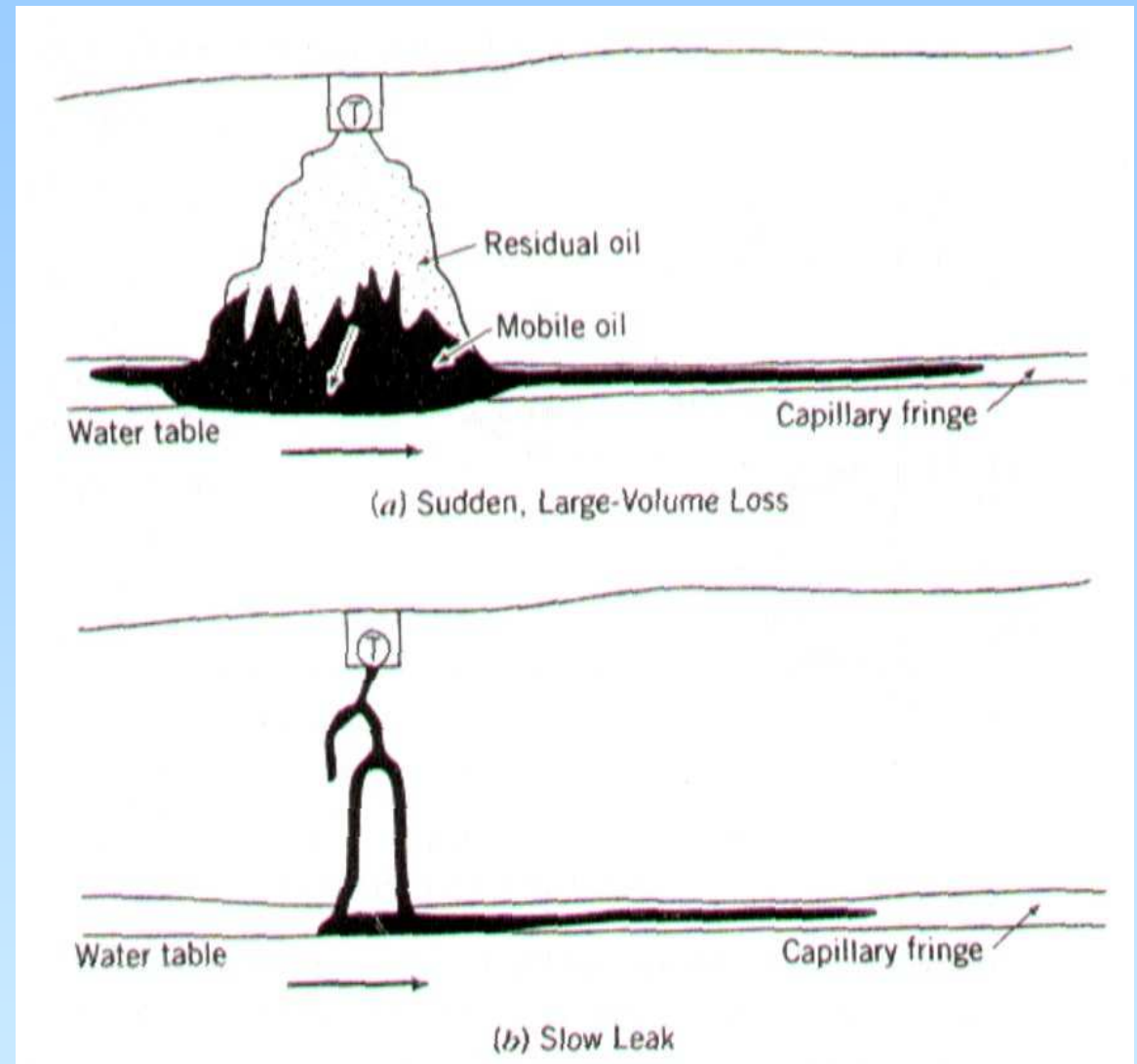
pouze orientační výpočty

- i v homogenním prostředí by byla větší v důsledku formování tzv. prstů

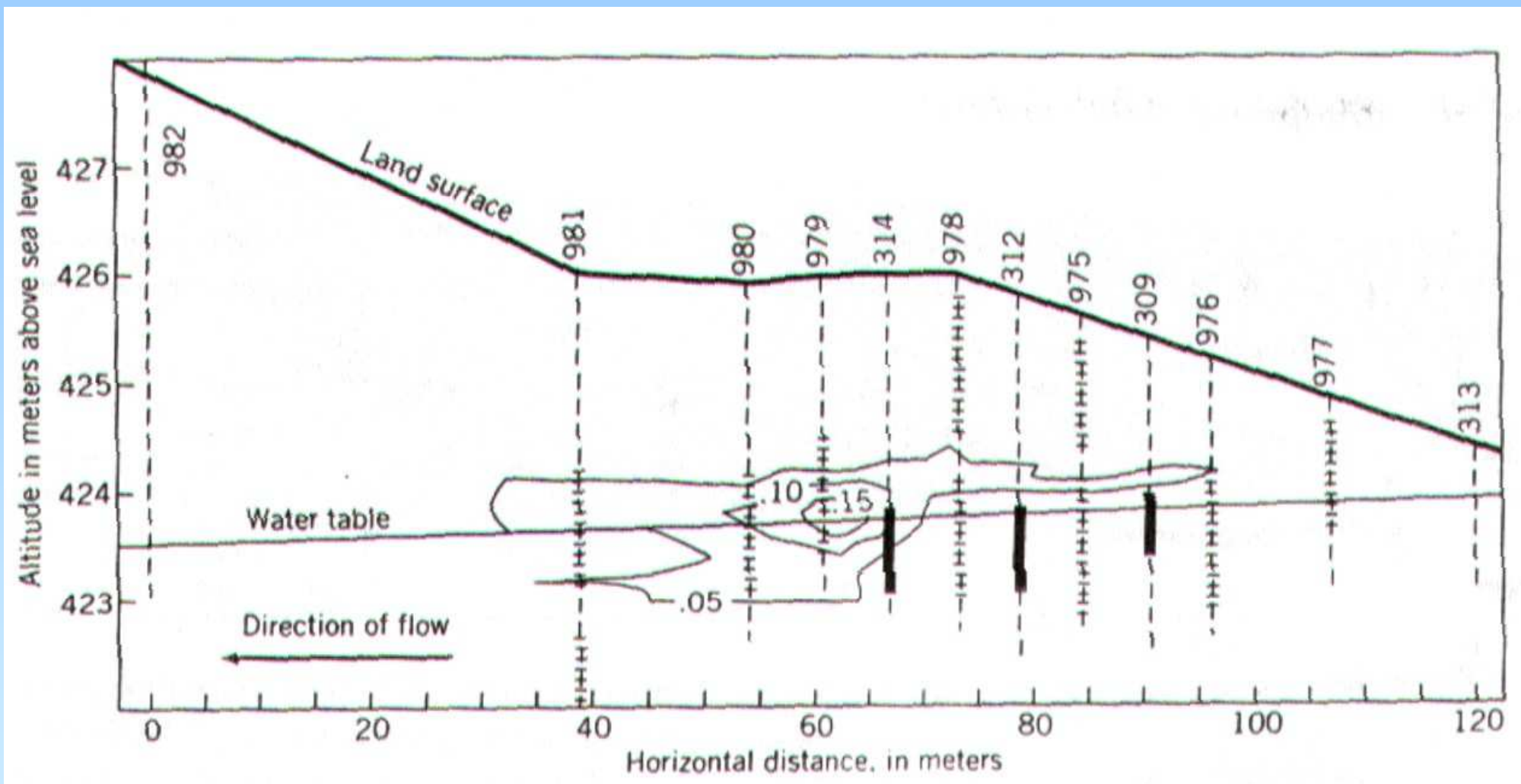


## LNAPL's

- vertikální pohyb je ukončen po dosažení hranice saturované zóny
- rostoucí saturace porů vodou snižuje propustnost pro LNAPL
- při plném nasycení porů vodu dochází k akumulaci volné fáze LNAPL (kapilární třáseň)
- velký objem LNAPL může vyvolat zatlačené volné fáze LNAPL pod hladinu podzemní vody
- ve skutečnosti – LNAPL se akumuluje spíše nad kapilární třásní
- vstup LNAPL do vrtů – akumuluje se větší výška vrstvy volné fáze, než je ve skutečnosti – nadhodnocení objemu LNAPL v horninovém prostředí
- poměr mezi zdánlivou a skutečnou tloušťkou vrstvy volné fáze LNAPL je 2 - 4



rovnání skutečného rozsahu LNAPL (izolinie hodnot nasycení) s mocností vrstvy LNAPL zjištěné v indikačních vrtech

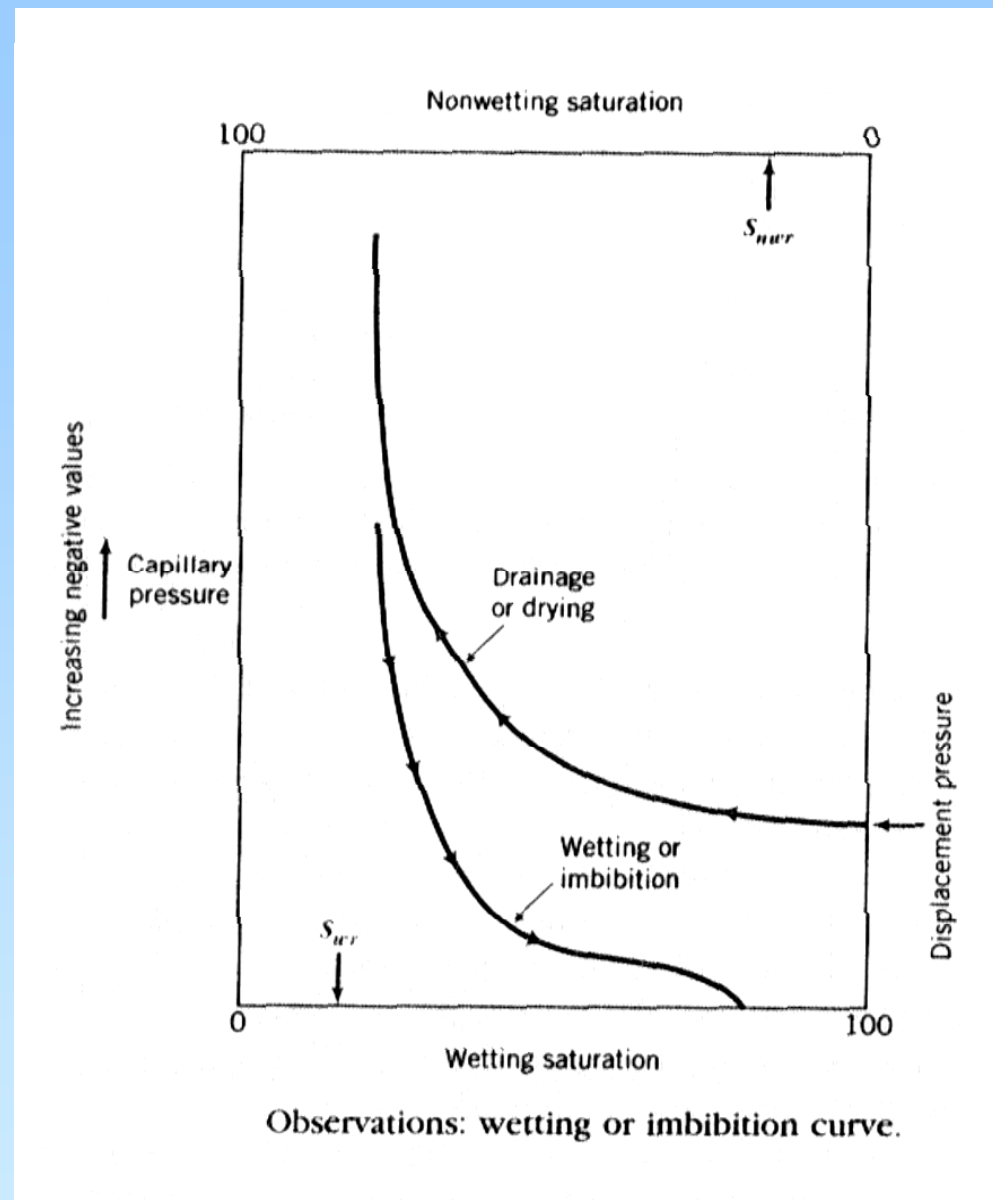


nové metody průzkumu – dielektrické profilování, apod.



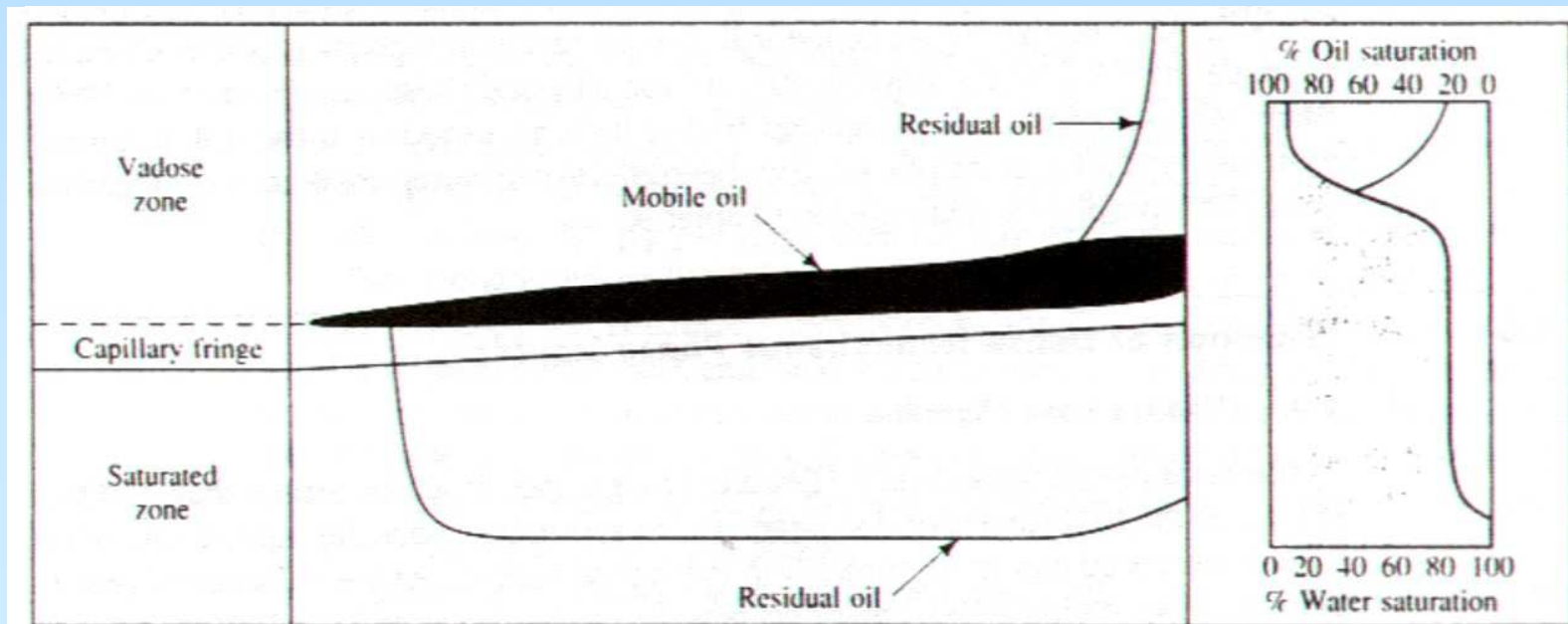
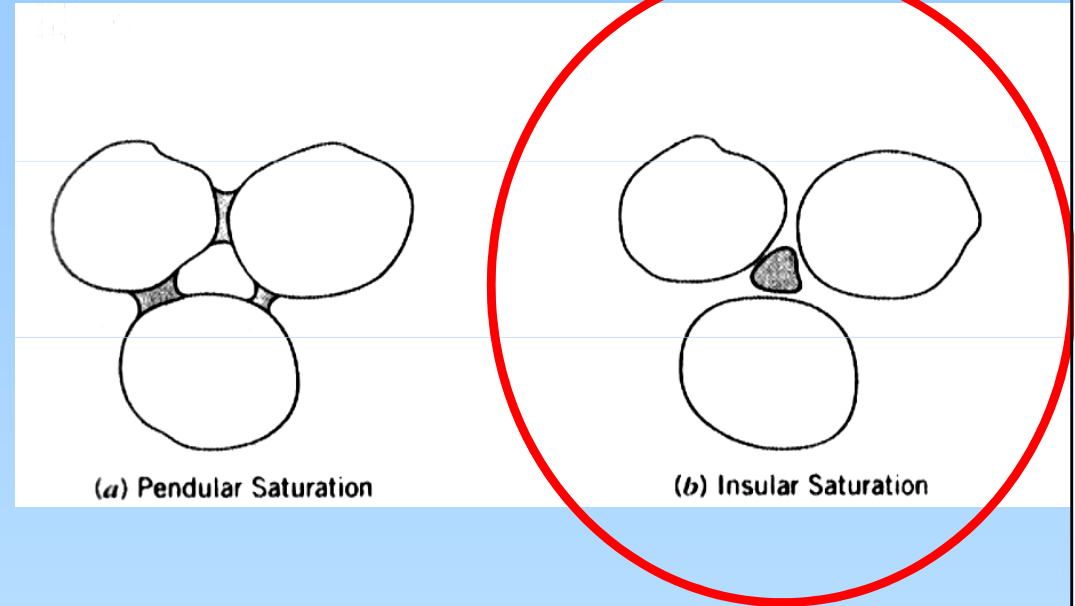
## Výskyt LNAPL's při hranici s hladinou podzemní vody

- kolísání hladiny podzemní vody umožňuje vstup volné fáze LNAPL do pórů s obsahem reziduálního nasycení vody
- pokles hladiny – drenáž
- nástup hladiny - nasávání
- při nástupu hladiny dochází k formování reziduálního nasycení LNAPL v saturované zóně
- mechanismy
  1. by-passing... smáčeující fluidum odškrtí nesmáčeující uvnitř pórů
  2. snap-off .... u pórů s velkým poměrem mezi velikostí hrdla a vnitřkem pórů



## Výskyt LNAPL's při hranici s hladinou podzemní vody

- hodnoty  $S_r$  výrazně vyšší – 0,2 – 0,5
- příčiny – reziduum LNAPL je uzavřeno spíše ve větších pórech (snadnější průnik při poklesu hladiny podzemní vody)
- důsledek formování reziduálního nasycení v saturované zóně – zdánlivý pokles objemu LNAPL (tloušťky vrstvy volné fáze ve vrtech) při nástupu hladiny a naopak zdánlivý nárůst objemu LNAPL (tloušťky vrstvy volné fáze ve vrtech) při poklesu hladiny



## DNAPL's v saturované zóně

- každý pór nasycený smáčejší kapalinou (vodou) klade nesmáčejší kapalině (DNAPL) odpor vyjádřený kapilárním (tzv. vstupním) tlakem

$$P_d = \frac{2\sigma \cos \varphi}{r}$$

$$P_d = \frac{2\sigma \cos \varphi}{b}$$

- orientační výpočet velikosti póru v průlinově porózním prostředí

$$r \approx d / 8$$

$$r \approx (k / n)^{0,5}$$

- akumulace volné fáze generuje tlak způsobený objemovou hmotností

$$P_g = z_n g \rho_{nw}$$

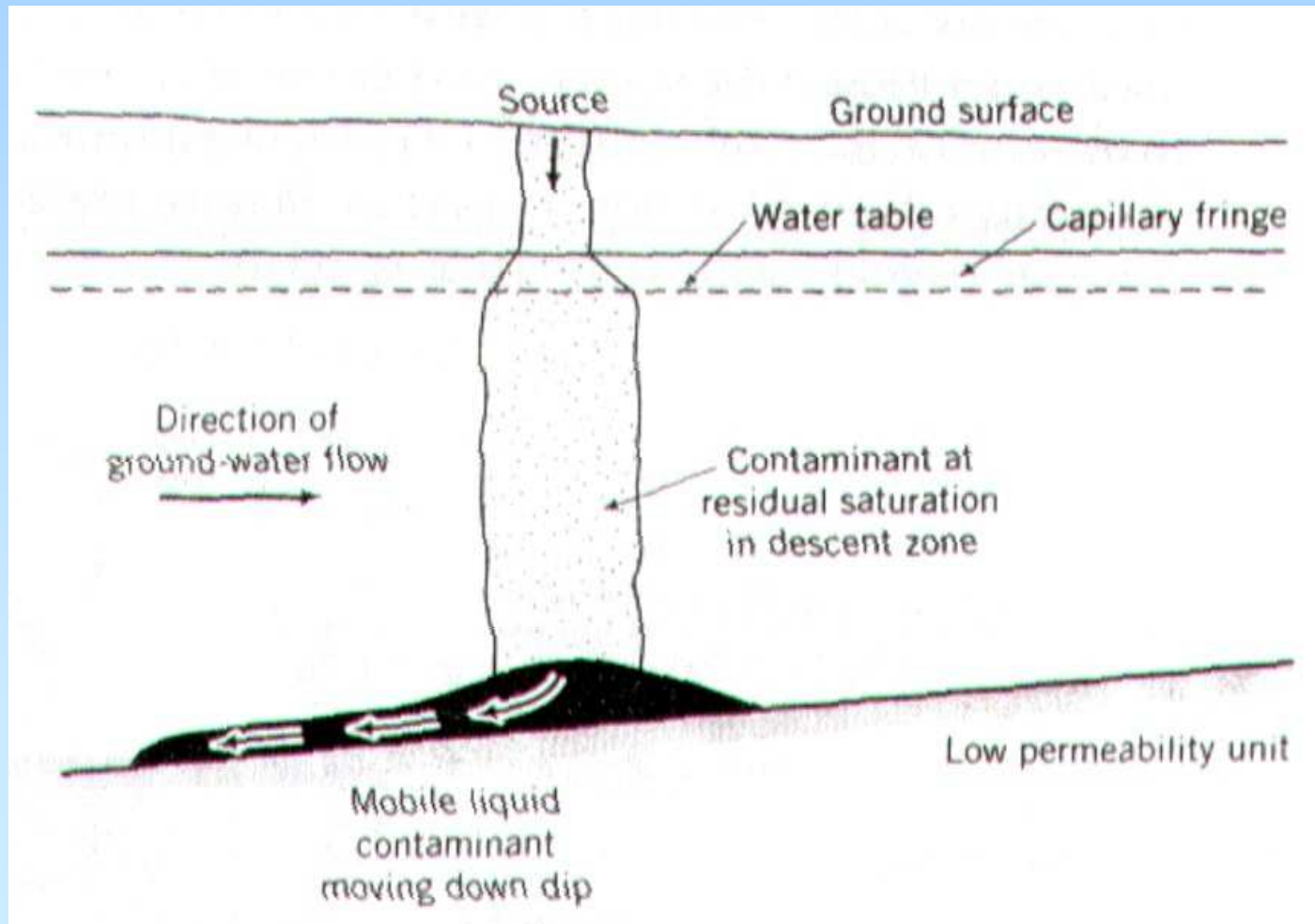
- v saturované zóně je tento gravitační tlak přímo úměrný rozdílu objemových hmotností DNAPL a vody

$$P_g = z_n g (\rho_{nw} - \rho_w)$$



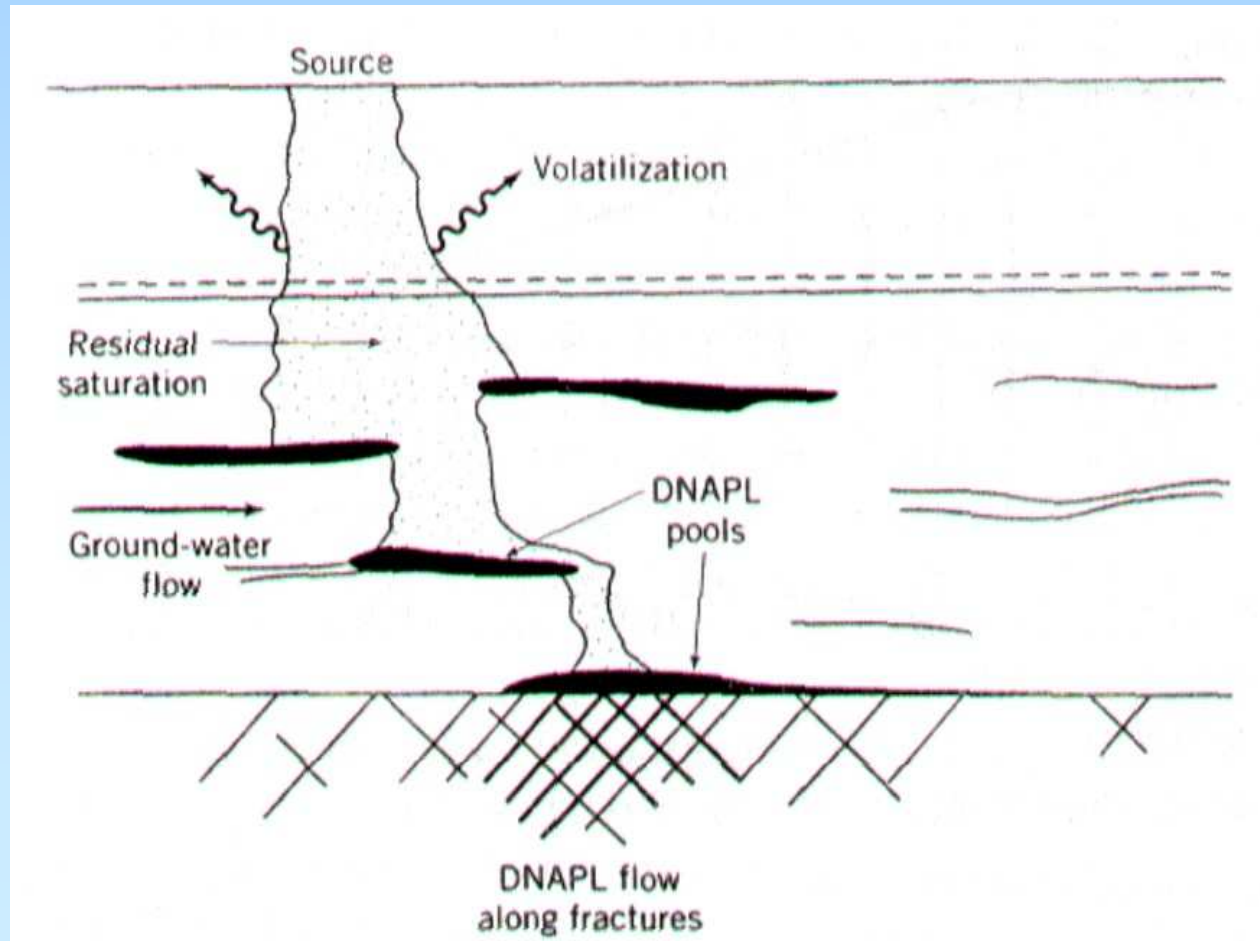
## jednoduché podmínky – homogenní prostředí

- formování kapalného rezidua v nesaturované zóně
- formování kapalného rezidua v saturované zóně
- vznik akumulace volné fáze
- pohyb akumulace volné fáze DNAPL ve sklonu tlakového potenciálu tělesa (zjednodušeně - ve směru sklonu nepropustné vrstvy)



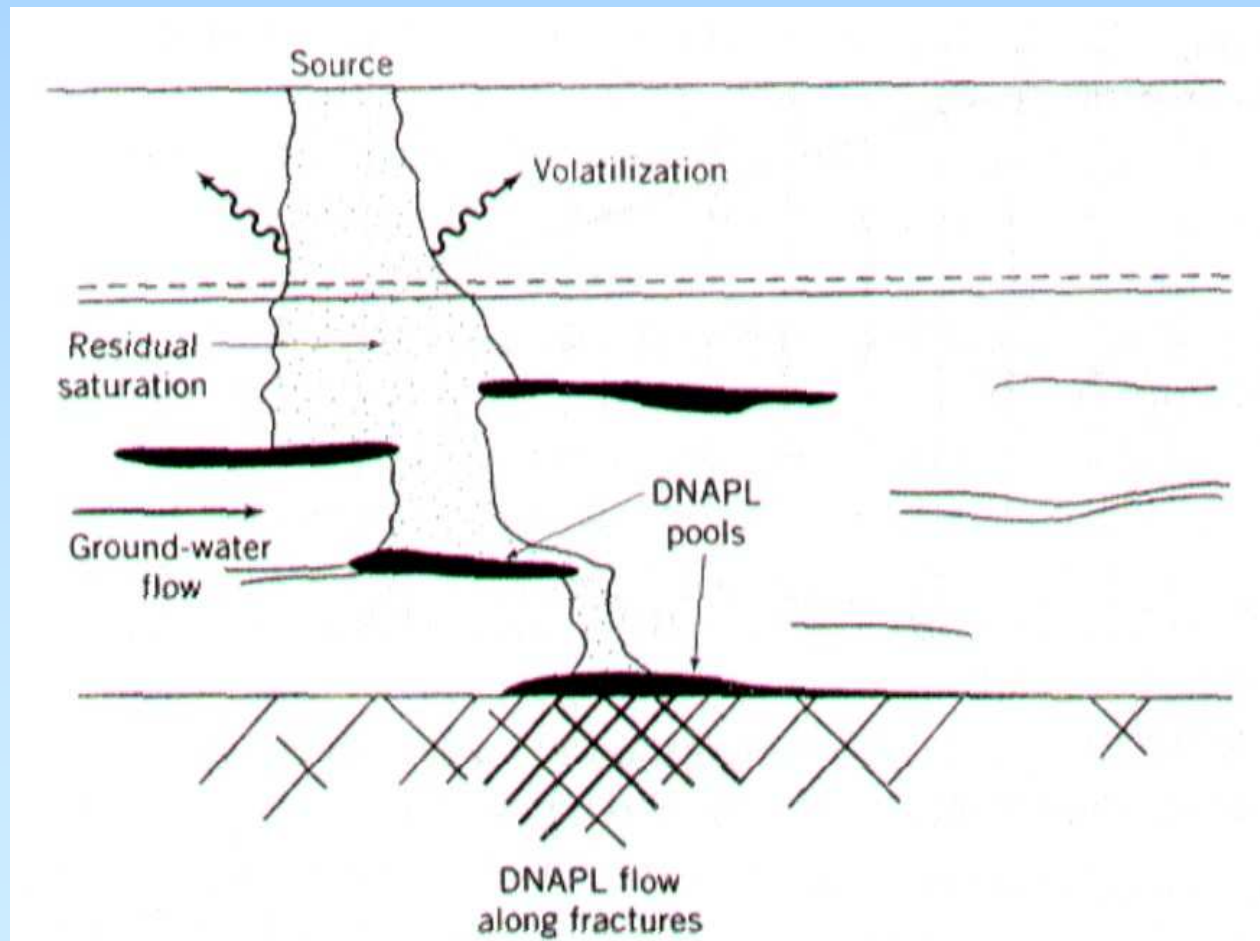
## jednoduché podmínky – nehomogenní prostředí

- formování kapalného rezidua v nesaturované zóně
- formování kapalného rezidua v saturované zóně
- vznik akumulací volné fáze nad tzv. **kapilárními bariérami** (větší hodnota  $P_c$ )
- jednotlivé akumulace volné fáze jsou propojeny vertikálně polohami s kapalným reziduem
- pohyb a distribuci volné fáze a kapalného rezidua je prakticky nemožné přesně definovat



## jednoduché podmínky – prostředí s puklinovou porozitou

- kumulace rizika extrémního hloubkového dosahu akumulace volné fáze
- prokázáno minimálně do hloubek stovek metrů
- příčiny
  - propojení systému puklin je zpravidla vertikální
  - při průniku do pukliny se kumuluje ve vertikálním směru mocná vrstva volné fáze



## HYDROSTATICKÉ PODMÍNKY

průnik volné fáze DNAPL do saturované zóny

$$z_n = \frac{2\sigma \cos \varphi}{rg\rho_{nw}}$$

průnik volné fáze do menších pórů (puklin) – povrch tělesa je v podmínkách nasávání

$$z_n = \frac{2\sigma \cos \varphi}{rg(\rho_{nw} - \rho_w)}$$

průnik volné fáze do menších pórů (puklin) – povrch tělesa je v podmínkách drenáže

$$z_n = \frac{[P_{c(jemno)} - P_{c(hrubo)}]}{rg(\rho_{nw} - \rho_w)}$$

stabilní délka akumulace na uklánějící se vrstvě v saturované zóně

$$L_n = \frac{P_d}{(\rho_{nw} - \rho_w)g \sin \theta}$$



## HYDRODYNAMICKÉ PODMÍNKY

vertikální hydraulický gradient (**rozdíl výšek hladin**) potřebný k zamezení dalšího hloubkového průniku volné fáze DNAPL (měřeno přes mocnost akumulace)

$$\Delta h = i_c z_n = \frac{z_n (\rho_{nw} - \rho_w)}{\rho_w}$$

kritická hodnota horizontálního hydraulického gradientu, potřebná k mobilizaci volné fáze DNAPL (ležící horizontálně na kapilární bariéře)

$$i_c = \frac{2\sigma \cos \varphi}{r\rho_w gL}$$

hydraulický gradient potřebný k zamezení pohybu volné fáze v uklánějící se puklině nebo ležící podél ukloněné plochy

$$i_c = \frac{(\rho_{nw} - \rho_w) \sin \theta}{\rho_w}$$

